



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου υπολογισμού του  
ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις  
και τάσεις επαφής σε συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών**

Παναγιώτης Ν. Καπένης

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου υπολογισμού του  
ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις  
και τάσεις επαφής σε συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών**

Παναγιώτης Ν. Καπένης

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2023.

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Καθηγητής

.....

Παύλος Σ. Γεωργιάκης  
Καθηγητής

.....

Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου  
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....

Παναγιώτης Ν. Καπένης

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

Copyright © Παναγιώτης Ν. Καπένης 2023

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

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στην μελέτη του τρόπου που επιδρά ο τρόπος υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής σε ένα αιολικό πάρκο. Αρχικά, πραγματοποιείται μια θεωρητική προσέγγιση της μεθόδου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος και ακολουθεί εμβάθυνση στις μεθόδους που περιγράφουν το Πρότυπο IEC 60909 και το Πρότυπο ANSI C 37.010. Στη συνέχεια, γίνεται μοντελοποίηση ενός αιολικού πάρκου εννέα ανεμογεννητριών και προσομοίωση της λειτουργίας του, υπό συνθήκες σφάλματος, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Powerfactory. Τέλος, με χρήση των απαραίτητων πλεγμάτων γείωσης για τις εννέα ανεμογεννήτριες και το Κέντρο Ελέγχου, προσομοιώνεται η απόκριση του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης στο αιολικό πάρκο, εστιάζοντας στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, με χρήση του λογισμικού CDEGS. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται με αυτά της διπλωματικής εργασίας «Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα» του Νικόλαου Κ. Γουβάλα.

### Λέξεις κλειδιά:

Ρεύμα σφάλματος, διασυνδεδεμένο σύστημα γείωσης, IEC 60909, ANSI C 37.010, βηματικές τάσεις, τάσεις επαφής

## **Abstract**

This diploma thesis centres on the study of how the way that we calculate the short circuit current affects the developed step and touch voltages in a wind farm. First of all, a theoretical approach is taken on how to calculate the fault current, followed by a deep look at the methods described in Standard IEC 60909 and Standard ANSI C 37.010. Then, the modelling of a nine-turbine wind farm is performed and its operation, under fault conditions, is simulated using Powerfactory software. Finally, using the grounding grids which are necessary for the nine wind turbines and the Control building, the response of the linked grounding system in the wind farm is simulated, focusing on the developing step and touch voltages, using the CDEGS software. The results, taken from the simulations, are compared to those of the diploma thesis “Effect of the method of calculation of the fault current on the developing voltages(step and touch) in wind farms” written by Nikolaos K. Gouvalas.

### **Key words:**

Fault current, interconnected grounding system, IEC 60909, ANSI C 37.010, step voltages, touch voltages

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων υπό τις ερευνητικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της, κύριο Ιωάννη Φ. Γκόνο, καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την συμπαράσταση του και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχε.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Χρήστο Χριστοδούλου, τον κύριο Γιώργο Πουλημένο και την κυρία Κάτια Δαμιανάκη, που με καθοδήγησαν, με στήριξαν και με βοήθησαν στη χρήση των λογισμικών Powerfactory και CDEGS.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στα Βραχυκυκλώματα και στις Μεθόδους Υπολογισμού τους .....</b>	<b>2</b>
1.1 Κατηγορίες Βραχυκυκλωμάτων.....	2
1.2 Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης.....	7
1.2.1 Ανάλυση ασύμμετρου συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες.....	7
1.2.2 Τριφασικό Βραχυκύκλωμα.....	8
1.2.3 Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα φάσης-γης.....	10
1.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη.....	11
1.2.5 Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς γη.....	14
1.3 Παρουσίαση των πλέον χρησιμοποιούμενων διεθνών πρότυπων υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος.....	15
<b>Κεφάλαιο 2 Το Πρότυπο IEC 60909.....</b>	<b>18</b>
2.1 Γενικές πληροφορίες για το πρότυπο IEC 60909.....	18
2.2 Μέθοδος ισοδύναμης πηγής τάσης.....	19
2.3 Βασικοί ορισμοί και έννοιες που ορίζει το Πρότυπο IEC 60909.....	20
2.4 Παραδοχές που υιοθετούνται στους υπολογισμούς.....	21
2.5 Σύνθετες αντιστάσεις και συντελεστές διόρθωσης.....	23
2.5.1 Κυρίως δίκτυο(feeder).....	23
2.5.2 Μετασηματιστές.....	25
2.5.3 Σύγχρονες γεννήτριες.....	27
2.5.4 Ασύγχρονες μηχανές.....	28
2.5.5 Σταθμοί Παραγωγής.....	29
2.5.5.1 Σταθμοί Παραγωγής με μεταγωγέα υπό φορτίο στον μετασηματιστή.....	29
2.5.5.2 Σταθμοί Παραγωγής χωρίς μεταγωγέα υπό φορτίο στον μετασηματιστή....	30
.....	30
2.5.6 Στατικοί μετατροπείς.....	31



2.5.7 Καλώδια και εναέριες γραμμές μεταφοράς.....	31
2.6 Υπολογισμός ειδικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης.....	31
2.6.1 Συμμετρικό ρεύμα διακοπής.....	32
2.6.2 Θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης.....	34
2.6.3 Μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης.....	35
2.6.4 Ρεύμα μόνιμης κατάστασης.....	35
<b>Κεφάλαιο 3 Το Πρότυπο ANSI C 37.010.....</b>	<b>37</b>
3.1 Γενικές πληροφορίες για το Πρότυπο ANSI C 37.010.....	37
3.2 Η απλοποιημένη μέθοδος E/X.....	37
3.3 Η μέθοδος E/X με προσαρμογή για τον υπολογισμό των ac και dc συνιστωσών.....	39
<b>Κεφάλαιο 4 Συστήματα Γείωσης .....</b>	<b>44</b>
4.1 Εισαγωγή.....	44
4.2 Είδη γειώσεων.....	45
4.3 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης.....	46
4.4 Θεμελιακή γείωση.....	47
4.5 Αντίσταση γείωσης.....	48
4.6 Ειδική αντίσταση του εδάφους.....	50
4.7 Μέτρα προστασίας στο σύστημα γείωσης.....	55
4.7.1 Πρότυπα και κανονισμοί.....	55
4.7.2 Επιτρεπτά όρια τάσης.....	56
4.7.3 Επιτρεπτά όρια ρεύματος και αντίσταση του ανθρώπινου σώματος.....	58
4.7.4 Ηλεκτροχημική διάβρωση και επιλογή υλικών ηλεκτροδίων γείωσης.....	59
4.8 Σχεδιασμός συστημάτων γείωσης.....	61
<b>Κεφάλαιο 5 Υπολογιστική Προσομοίωση Σφαλμάτων σε Αιολικό Πάρκο.....</b>	<b>64</b>
5.1 Περιγραφή του λογισμικού Powerfactory.....	64
5.2 Προσομοίωση σφαλμάτων σε δίκτυο MT στο λογισμικό Powerfactory.....	67
<b>Κεφάλαιο 6 Υπολογιστική Προσομοίωση Συστήματος Γείωσης Αιολικού Πάρκου υπό Συνθήκες Σφάλματος.....</b>	<b>77</b>

6.1 Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου.....	77
6.2 Περιγραφή του λογισμικού CDEGS.....	81
6.2.1 Γενικά.....	81
6.2.2 Ανάλυση εδάφους.....	84
6.2.3 Εξαγωγή της τιμής Αντίστασης Γείωσης.....	85
6.2.4 Εξαγωγή Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής.....	86
6.3 Προσομοίωση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου.....	89
6.3.1 Προσδιορισμός μέγιστου ρεύματος σφάλματος.....	89
6.3.2 Μέτρηση ειδικής αντίστασης του εδάφους.....	89
6.3.3 Υπολογισμός Αντίστασης Γείωσης για κάθε σύστημα γείωσης.....	91
6.3.4 Υπολογισμός Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής.....	93
6.3.4.1 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 1.....	94
6.3.4.2 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 2.....	100
6.3.4.3 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 3.....	106
6.3.4.4 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 4.....	112
6.3.4.5 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 5.....	118
6.3.4.6 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 6.....	124
6.3.4.7 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 7.....	130
6.3.4.8 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 8.....	136
6.3.4.9 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 9.....	142
6.3.4.10 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για το Κτίριο Ελέγχου.....	148
6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.....	155
6.4.1 Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.....	155
6.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τη διπλωματική εργασία <b>Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα</b> του Νικόλαου Κ. Γουβάλα.....	157
6.4.2.1 Σύγκριση ρευμάτων σφάλματος.....	157
6.4.2.2 Σύγκριση αντιστάσεων γείωσης.....	159

6.4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.....	159
6.4.2.3.1 Μέγιστες επιτρεπόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.....	159
6.4.2.3.2 Μέγιστες αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.....	161
<b>Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα.....</b>	<b>163</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>166</b>

## Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία απαρτίζεται από τα παρακάτω κεφάλαια:

**Κεφάλαιο 1:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια εισαγωγή στη έννοια των βραχυκυκλωμάτων και προσεγγίζεται θεωρητικά ο τρόπος υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος.

**Κεφάλαιο 2:** Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιείται εμβάθυνση στη μέθοδο που περιγράφεται από το Πρότυπο IEC 60909.

**Κεφάλαιο 3:** Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφεται το Πρότυπο ANSI C 37010.

**Κεφάλαιο 4:** Στο κεφάλαιο αυτό, εισάγεται η έννοια του συστήματος γείωσης και των χαρακτηριστικών του και γίνεται μια περιγραφή των αρχών που διέπουν τον σχεδιασμό ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης.

**Κεφάλαιο 5:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται σύντομα το λογισμικό Powerfactory και γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας υφιστάμενου αιολικού πάρκου, σε συνθήκες σφάλματος, χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο λογισμικό.

**Κεφάλαιο 6:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται σύντομα το λογισμικό CDEGS και γίνεται προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου εννέα ανεμογεννητριών, υπό συνθήκες σφάλματος. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εξέταση του τρόπου που επιδρά ο υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις και εκτελείται σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις με τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας «Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα» του Νικόλαου Κ. Γουβάλα.

**Κεφάλαιο 7:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια ανακεφαλαίωση και εξάγονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή στα Βραχυκυκλώματα και στις Μεθόδους Υπολογισμού τους

### 1.1 Κατηγορίες Βραχυκυκλωμάτων

Ως βραχυκύκλωμα ορίζεται η αγώγιμη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων σε ένα κύκλωμα, τα δυναμικά, των οποίων, σε ομαλή λειτουργία, είναι διαφορετικά. Οι επιπτώσεις, που μπορούν να επιφέρουν τα βραχυκυκλώματα, ποικίλλουν, αναλόγως του τύπου, της θέσης και της διάρκειας τους. Στη γενική περίπτωση, οι βασικότερες πιθανές συνέπειες παρουσιάζονται παρακάτω:

-Πρόκληση ηλεκτρικού τόξου στο σημείο του βραχυκυκλώματος το οποίο μπορεί να καταστρέψει τις μονώσεις, να λιώσει τους αγωγούς και να προκαλέσει πυρκαγιές ή θανατηφόρα ατυχήματα.

-Τα ρεύματα υψηλής έντασης που αναπτύσσονται από το σφάλμα, μπορούν να καταπονήσουν μηχανικά τον εξοπλισμό, και κατ'επέκταση να καταστρέψουν τους ηλεκτρικούς ζυγούς, να αποσυνδέσουν τα καλώδια και να υπερθερμάνουν τον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Η υπερθέρμανση μπορεί να οδηγήσει και σε καταστροφή των μονώσεων.

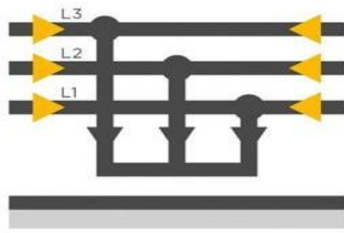
-Τα κυκλώματα τηλεπικοινωνιών και ελέγχου μπορούν να διαταραχθούν, η τάση μπορεί να παρουσιάσει βυθίσεις ή διακοπές, μέχρι να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, η ηλεκτροδότηση μπορεί να διακοπεί και, στην χειρότερη περίπτωση, όλο το ηλεκτρικό σύστημα είναι πιθανό να γίνει ασταθές, ή ακόμα και να καταρρεύσει.

Τα βραχυκυκλώματα ταξινομούνται ευρέως ως:

α)συμμετρικά βραχυκυκλώματα

β)ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

Ως συμμετρικά βραχυκυκλώματα ορίζονται οι ανώμαλες μεταβατικές καταστάσεις, στις οποίες υπόκειται ένα σύστημα, σε περίπτωση που και οι τρεις φάσεις του συνδέονται με οποιονδήποτε αγώγιμο τρόπο μεταξύ τους. Σε αυτά τα βραχυκυκλώματα, τα ρεύματα σφάλματος σε όλες τις φάσεις είναι συμμετρικά, δηλαδή τα μεγέθη τους είναι ίσα και μετατοπίζονται ίσα με γωνία 120 μοιρών. Είναι ο πιο σοβαρός τύπος σφάλματος, αλλά συμβαίνει σπάνια. Λόγω της ισορροπημένης φύσης αυτών των βραχυκυκλωμάτων, μπορούμε να λάβουμε υπόψιν μας μόνο την μια φάση, όταν κάνουμε υπολογισμούς, αφού και οι άλλες δυο φάσεις δεν παρουσιάζουν κάποια διαφορά.



Σχήμα 1.1 Συμμετρικό Βραχυκύκλωμα [1]

Τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα, εμφανίζονται συχνότερα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και διακρίνονται σε:

- α) Μονοφασικό βραχυκύκλωμα φάσης-γης
- β) Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη
- γ) Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

Fig 1. Phase-to-earth short circuit

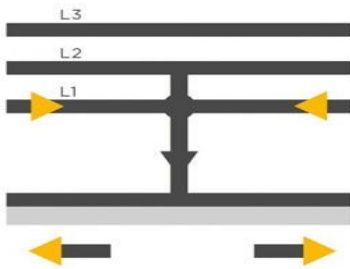


Fig 2. Phase-phase short circuit clear of earth

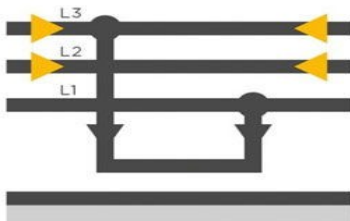
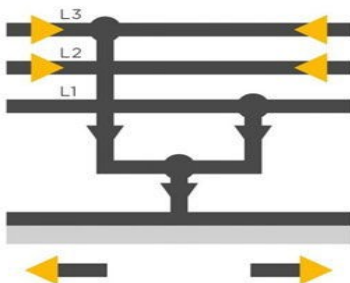
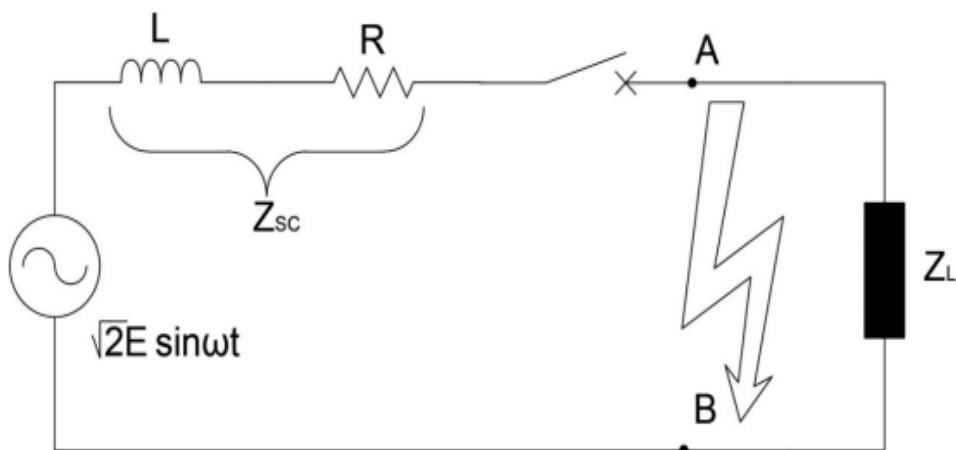


Fig 3. Phase-phase-to-earth short circuit



Σχήμα 1.2 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα [1]

Ο απλούστερος τρόπος για να παρασταθεί ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ ενός σημείου A και ενός σημείου B είναι με την χρήση μιας σταθερής πηγής εναλλασσόμενης τάσης, ενός διακόπτη και μιας σύνθετης αντίστασης, ο ρόλος της οποίας, είναι να παριστάνει όλες τις αντιστάσεις προς τα ανάντη του διακόπτη. Το δίκτυο τροφοδοτεί ένα φορτίο, η παράσταση, του οποίου, γίνεται με μια σύνθετη αντίσταση. Τη χρονική στιγμή του σφάλματος, το κύκλωμα διαρρέεται από ένα μεγάλο ρεύμα. Ο περιορισμός αυτού του ρεύματος πραγματοποιείται μόνο μέσω της σύνθετης αντίστασης του δικτύου  $Z_{sc}$ . Το συγκεκριμένο δίκτυο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.3 Απλοποιημένη αναπαράσταση δικτύου για τον υπολογισμό βραχυκυκλωμάτων[2]

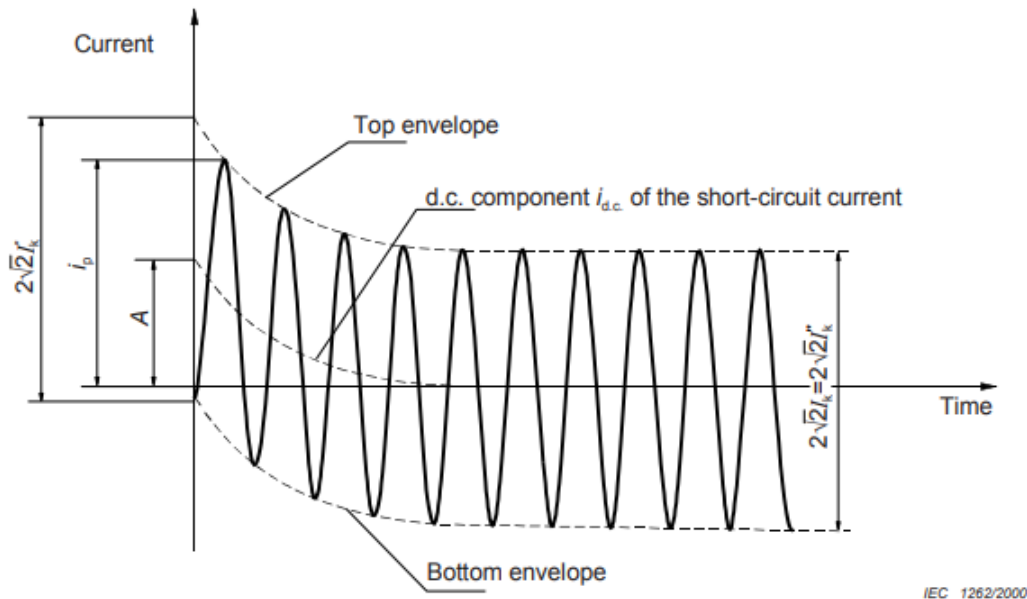
Στα ηλεκτρικά δίκτυα, τα βραχυκυκλώματα ταξινομούνται, συνήθως, με βάση την απόσταση της θέσης που συμβαίνει το σφάλμα από την γεννήτρια. Αυτή η απόσταση δεν ταυτίζεται αναγκαστικά με το φυσικό μήκος, αλλά δείχνει αν η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας έχει μεγαλύτερη ή μικρότερη τιμή από την συνολική σύνθετη αντίσταση του δικτύου ανάμεσα στο σημείο του βραχυκυκλώματος και στη γεννήτρια. Με αυτόν τον τρόπο, καταλήγουμε και σε έναν άλλον τρόπο διαχωρισμού των βραχυκυκλωμάτων σε:

α) Σφάλματα μακριά από την γεννήτρια

β) Σφάλματα κοντά στην γεννήτρια

Τα σφάλματα μακριά από την γεννήτρια είναι το πιο σύνηθες είδος σφαλμάτων σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Το μεταβατικό ρεύμα σφάλματος που αναπτύσσεται σε αυτή την κατηγορία σφαλμάτων, για τάση που υπολογίζεται από τη σχέση  $e = E \sin(\omega t + \phi)$ , είναι το άθροισμα των συνιστωσών:  $i = i_{ac} + i_{dc}$  (1.1.1)

Το ρεύμα αυτό φαίνεται σχηματικά στην γενική του μορφή στην παρακάτω εικόνα:



- $I_k''$  = initial symmetrical short-circuit current
- $i_p$  = peak short-circuit current
- $I_k$  = steady-state short-circuit current
- $i_{d.c.}$  = d.c. component of short-circuit current
- $A$  = initial value of the d.c. component  $i_{d.c.}$

Σχήμα 1.4 Ρεύμα σφάλματος για σφάλμα μακριά από την γεννήτρια[3]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η ac συνιστώσα είναι εναλλασσόμενο ρεύμα και υπολογίζεται από τη σχέση:  $i_{ac} = I \sin(\omega t + \phi)$  (1.1.2)

όπου:  $I = \frac{E}{Z_{sc}}$  είναι το μέγιστο ρεύμα και  $\phi$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της χρονικής στιγμής που εκδηλώνεται το σφάλμα και της χρονικής στιγμής που μηδενίζεται η τάση.

Η δεύτερη συνιστώσα ρεύματος ( $i_{dc}$ ) είναι μια απεριοδική φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου:  $i_{dc} = -I \sin \phi e^{-\frac{R}{L}t}$ . (1.1.3)

Η αρχική τιμή της υπολογίζεται με βάση τον χρόνο εκδήλωσης του σφάλματος, ενώ μειώνεται με ρυθμό ανάλογο του λόγου  $\frac{R}{L}$ .

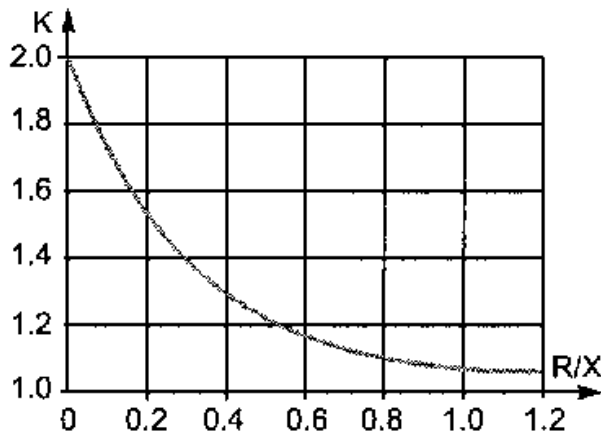
Επίσης, στα σφάλματα μακριά από την γεννήτρια, έχει σημασία να έχουμε γνώση του μέγιστου ρεύματος που θα αναπτυχθεί ( $i_p$ ), το οποίο απεικονίζεται και στο παραπάνω σχήμα. Με αυτό το ρεύμα, είναι δυνατό να υπολογισθεί η διακοπτική ικανότητα των στοιχείων ελέγχου στο κύκλωμα και να εκτιμηθεί η μηχανική αντοχή του εξοπλισμού, η οποία δοκιμάζεται από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που



αναπτύσσονται. Το ρεύμα αυτό, μπορεί να υπολογιστεί, γνωρίζοντας την rms τιμή του ρεύματος συμμετρικού βραχυκυκλώματος  $I_{ac}$  και χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

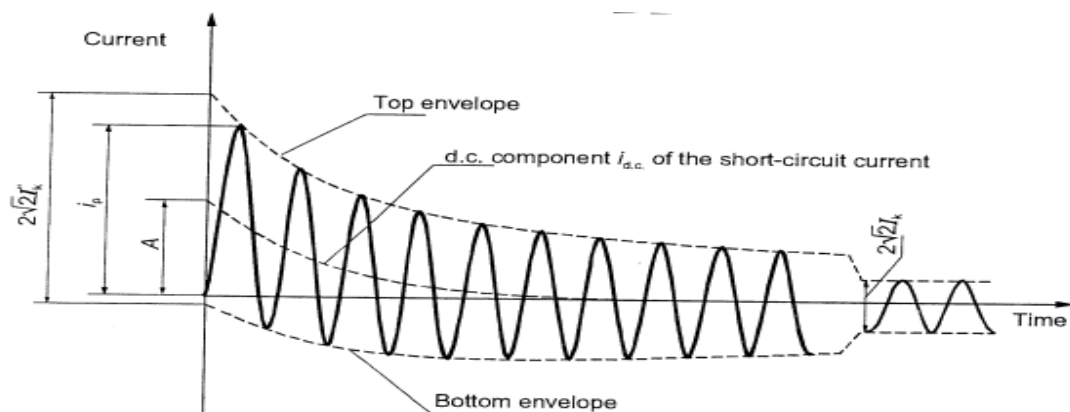
$$i_p = K I_{ac} \sqrt{2}. \quad (1.1.4)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $K$ , σε συνάρτηση με τον λόγο  $R / X$  χρησιμοποιούμε το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 1.5 Μεταβολή του συντελεστή  $K$  σε συνάρτηση με το λόγο  $R/X$ [2]

Όσον αφορά τα σφάλματα κοντά στην γεννήτρια, η γενική μορφή του ρεύματος τους φαίνεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα:



$I_k^s$  = initial symmetrical short-circuit current

$i_p$  = peak short-circuit current

$I_k$  = steady-state short-circuit current

$i_{d.c.}$  = d.c. component of short-circuit current

$A$  = initial value of the d.c. component  $i_{d.c.}$

Σχήμα 1.6 Ρεύμα σφάλματος για σφάλμα κοντά στην γεννήτρια[3]

Η σημαντική μείωση του πλάτους, που παρατηρούμε στο σχήμα, οφείλεται στο γεγονός πως εισέρχεται στο φαινόμενο και η μεταβολή της αντίστασης της γεννήτριας εξαιτίας του σφάλματος. Αυτή η κατηγορία σφαλμάτων είναι πιο σύνθετη και, προκειμένου να απλοποιηθεί, διακρίνουμε τρία χαρακτηριστικά χρονικά διαστήματα:

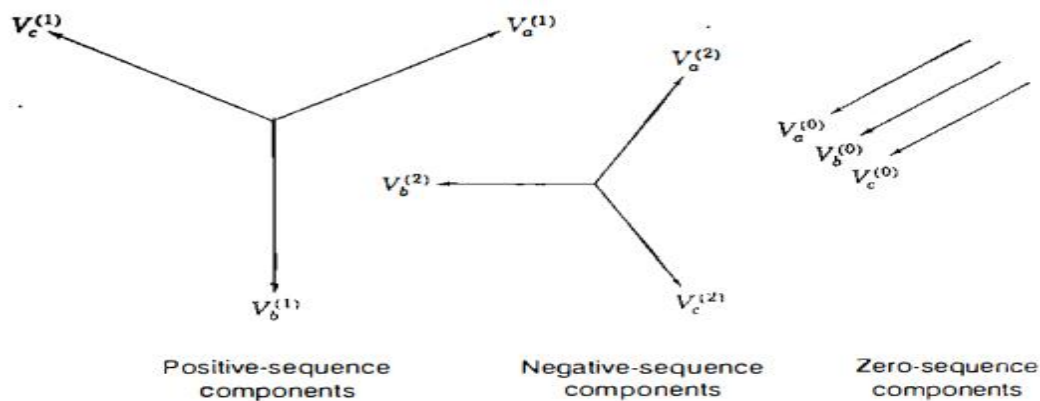
- Υπομεταβατικό (περίπου τα πρώτα 20 ms στο σφάλμα)
- Μεταβατικό (μέχρι περίπου 0,5 sec )
- Μόνιμη κατάσταση

Το συνολικό ρεύμα σφάλματος υπολογίζεται ως το άθροισμα των ξεχωριστών ρευμάτων κάθε διαστήματος. Σε αυτό το άθροισμα οφείλουμε να συνυπολογίσουμε και την απεριοδική συνεχή συνιστώσα. Όπως γίνεται κατανοητό, ο υπολογισμός τέτοιων ρευμάτων σφάλματος, στην περίπτωση των σφαλμάτων κοντά στην γεννήτρια, είναι εξαιρετικά πολύπλοκος και πραγματοποιείται, συχνά, με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

## **1.2 Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης**

### **1.2.1 Ανάλυση ασύμμετρου συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες**

Ένα σύστημα, που παρουσιάζει πλήρη φασική συμμετρία, μπορεί να μελετηθεί με την εξέταση μιας μόνο φάσης. Η ανάλυση, όμως ενός συμμετρικού συστήματος, ασύμμετρα βραχυκυκλωμένου ή φορτισμένου, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μελετώντας μια μόνο φάση, γιατί η συμπεριφορά κάθε φάσης είναι διαφορετική. Χρειάζεται, λοιπόν, η εύρεση μιας διαφορετικής μεθόδου ανάλυσης. Το 1918 ο C.L.Fortescue εισήγαγε τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών, με σκοπό την επίτευξη της ανάλυσης ασύμμετρων συστημάτων. Απέδειξε ότι στην περίπτωση ενός ασύμμετρου συστήματος, το οποίο αποτελείται από  $n$  συσχετιζόμενα ασύμμετρα διανύσματα, είναι εφικτή η ανάλυση του σε  $n$  συστήματα, το καθένα από τα οποία, αποτελείται από  $n$  συμμετρικά διανύσματα, τα οποία ονομάζονται συμμετρικές συνιστώσες των αρχικών διανυσμάτων. Τα επιμέρους συστήματα ονομάζονται ακολουθιακά. Σύμφωνα, λοιπόν, με αυτή την μέθοδο, η ανάλυση ενός ασύμμετρου τριφασικού συστήματος επιτυγχάνεται με τον γραμμικό συνδυασμό τριών συμμετρικών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται με τον όρο θετική, αρνητική και μηδενική ακολουθία και φαίνονται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 1.7 Συμμετρικές συνιστώσες ενός ασύμμετρου συστήματος[4]

Επειδή κάθε αρχικό ασύμμετρο διάνυσμα είναι ίσο με το άθροισμα των συνιστωσών του, προκύπτει ότι:

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (1.2.1.1)$$

$$V_b = V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \quad (1.2.1.2)$$

$$V_c = V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \quad (1.2.1.3)$$

Επιπλέον, κάνοντας υπολογισμούς για την φάση α, μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα και για τις άλλες δύο φάσεις, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω μετασχηματισμό(σε μητρική μορφή):

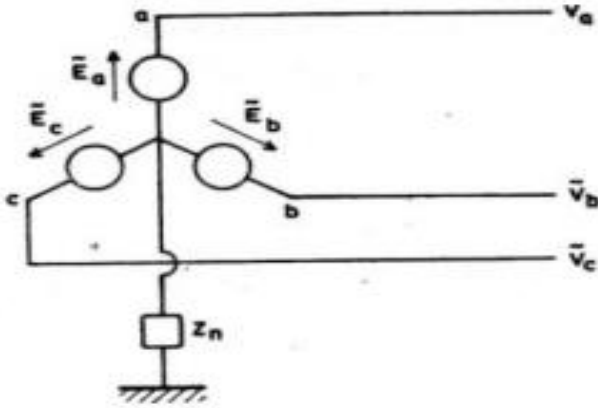
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix}$$

### 1.2.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα

Σε αυτή την περίπτωση βραχυκυκλώματος, συναντάμε τους πιο απλούς υπολογισμούς. Υποθέτουμε ένα τριφασικό σύστημα, το οποίο τροφοδοτείται από μια συμμετρική τριφασική πηγή(ισοδύναμο Thevenin) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα φορτία προ του σφάλματος δεν λαμβάνονται υπόψιν στους υπολογισμούς και καταλήγουμε στις παρακάτω σχέσεις για τα διανύσματα τάσης και ρεύματος:

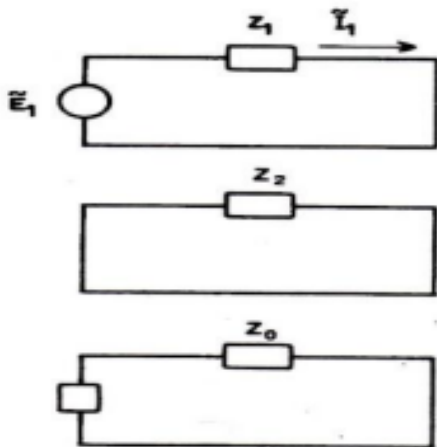
$$V_a = V_b = V_c = 0 \quad (1.2.2.1)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (1.2.2.2)$$



Σχήμα 1.8 Ισοδύναμο Thevenin τριφασικού βραχυκυκλώματος[5]

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση σε συμμετρικές συνιστώσες, όπως περιγράφηκε παραπάνω, καταλήγουμε ότι οι συμμετρικές συνιστώσες τάσης της φάσης α θα έχουν μηδενική τιμή, ενώ τα τρία κυκλώματα θα είναι ανεξάρτητα και κλειστά, λόγω συμμετρίας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 1.9 Κυκλώματα ακολουθίας τριφασικού σφάλματος[5]

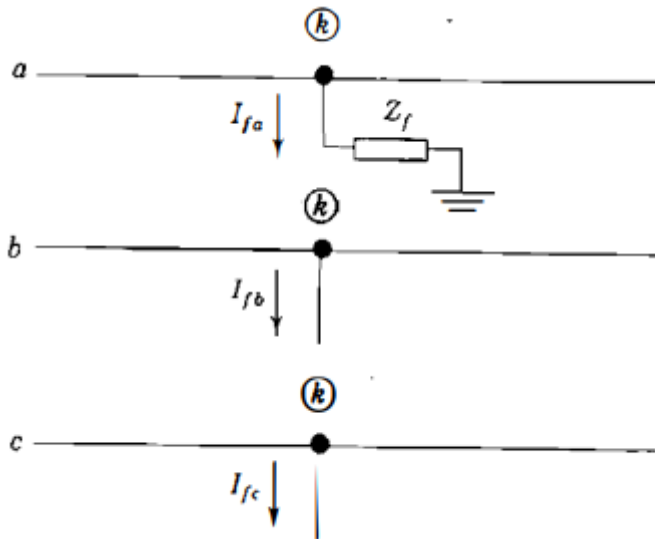
Επομένως, για να υπολογίσουμε το ρεύμα σφάλματος για την φάση α, χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$I_f = I_a = \frac{E_1}{Z_1} \quad (1.2.2.3)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι άλλες δυο φάσεις θα έχουν ρεύμα σφάλματος ίσου μέτρου και με διαφορά φάσης  $120^\circ$ .

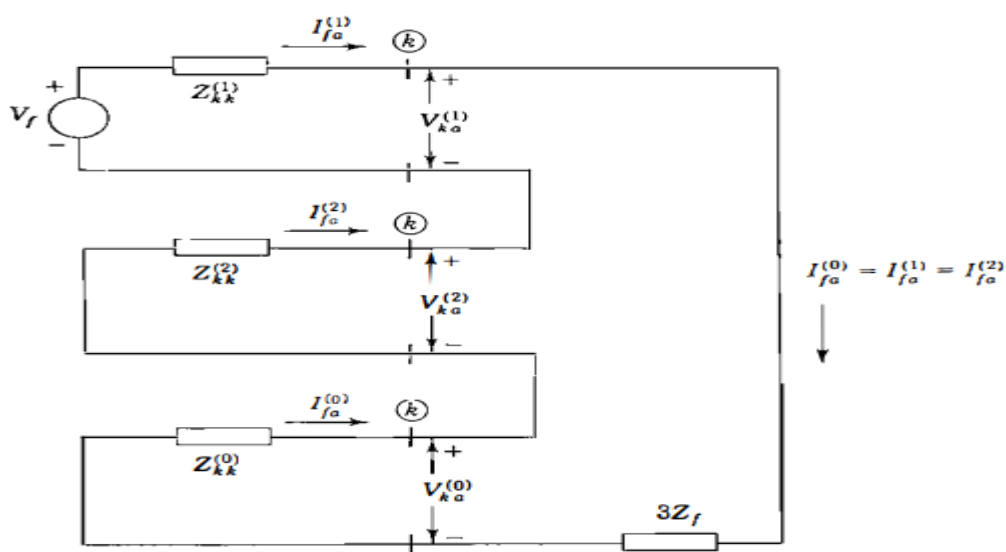
### 1.2.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα φάσης-γης

Ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα φάσης-γης μέσω αντίστασης σφάλματος  $Z_f$ , το οποίο συμβαίνει στην φάση α, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.10 Μονοφασικό σφάλμα φάσης-γης[4]

Ο τρόπος που συνδέονται τα κυκλώματα ακολουθίας θα έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 1.11 Τρόπος σύνδεσης κυκλωμάτων ακολουθίας σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη[4]

Ισχύει:

$$I_{fb} = 0 \quad (1.2.3.1)$$

$$I_{fc} = 0 \quad (1.2.3.2)$$

$$V_{ka} = Z_f \cdot I_{fa} \quad (1.2.3.3)$$

Άρα για τις συμμετρικές συνιστώσες, με χρήση της μεθόδου που περιγράφηκε, θα έχουμε:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Πραγματοποιώντας τους πολλαπλασιασμούς θα έχουμε:

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{I_{fa}}{3} \quad (1.2.3.4)$$

Με αντικαταστάσεις παίρνουμε:

$$V_{ka}^{(0)} = -Z_{kk}^{(0)} \cdot I_{fa}^{(0)} \quad (1.2.3.5)$$

$$V_{ka}^{(1)} = V_f - Z_{kk}^{(1)} \cdot I_{fa}^{(0)} \quad (1.2.3.6)$$

$$V_{ka}^{(2)} = -Z_{kk}^{(2)} \cdot I_{fa}^{(0)} \quad (1.2.3.7)$$

Και καταλήγουμε ότι:

$$V_{ka} = V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)} = V_f - (Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)}) I_{fa}^{(0)} = 3Z_f I_{fa}^{(0)} \quad (1.2.3.8)$$

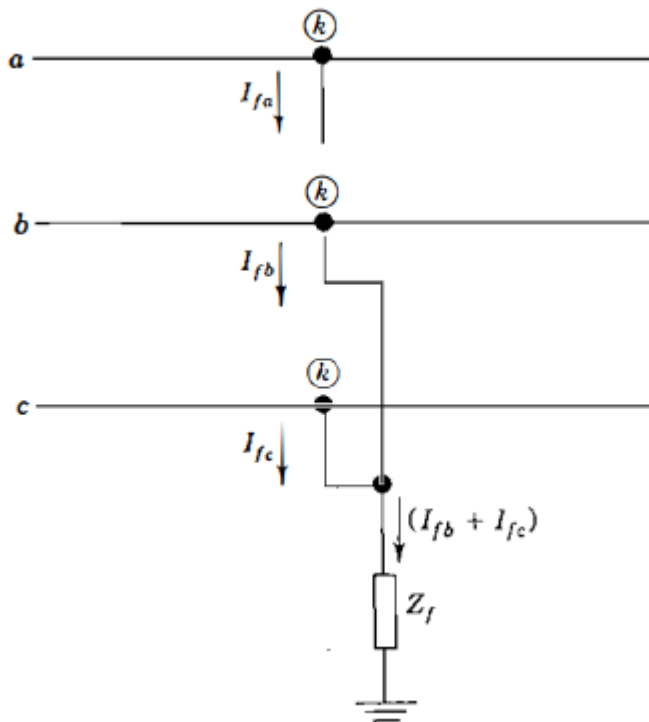
Έτσι, λύνοντας ως προς τις συμμετρικές συνιστώσες, από τις οποίες αποτελείται το ρεύμα σφάλματος της φάσης α, καταλήγουμε ότι:

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \quad (1.2.3.9)$$

Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζουμε το ζητούμενο ρεύμα σφάλματος, ως το άθροισμα των τριών συμμετρικών συνιστωσών του.

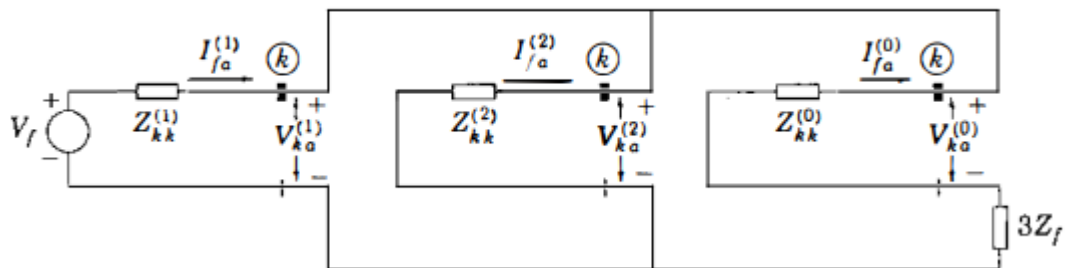
#### 1.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

Ένα διφασικό βραχυκύκλωμα με γη, το οποίο συμβαίνει μεταξύ μιας φάσης b και μιας φάσης c, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.12 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη[4]

Ενώ ο τρόπος που συνδέονται τα κυκλώματα ακολουθίας θα έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 1.13 Τρόπος σύνδεσης κυκλωμάτων ακολουθίας σε περίπτωση διφασικού σφάλματος με γη[4]

Για αυτό το βραχυκύκλωμα ισχύει:

$$I_{fa} = 0 \quad (1.2.4.1)$$

$$V_{kb} = V_{kc} = (I_{fb} + I_{fc})Z_f \quad (1.2.4.2)$$

Αφού το ρεύμα της φάσης α έχει μηδενική τιμή, εξάγουμε ότι:

$$I_{fa}^{(0)} = (I_{fb} + I_{fc})/3 \quad (1.2.4.3)$$

Άρα:

$$V_{kb} = V_{kc} = 3Z_f I_{fa}^{(0)} \quad (1.2.4.4)$$

Αντικαθιστώντας την τάση της φάσης b με την τάση της φάσης c και χρησιμοποιώντας την μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών, έχουμε ότι:

$$\begin{bmatrix} V_{ka}^{(0)} \\ V_{ka}^{(1)} \\ V_{ka}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix}$$

Από την δεύτερη και την τρίτη γραμμή της παραπάνω μητρικής μορφής παίρνουμε:

$$V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} \quad (1.2.4.5)$$

ενώ χρησιμοποιώντας την πρώτη γραμμή σε συνδυασμό με τις προηγούμενες σχέσεις εξάγουμε ότι:

$$3V_{ka}^{(0)} = V_{ka} + 2V_{kb} = (V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)}) + 2(3Z_f I_{fa}^{(0)}) \quad (1.2.4.6)$$

και έτσι προκύπτει:

$$V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} = V_{ka}^{(0)} - 3Z_f I_{fa}^{(0)} \quad (1.2.4.7)$$

$$I_{fa}^{(0)} + I_{fa}^{(1)} + I_{fa}^{(2)} = 0 \quad (1.2.4.8)$$

Με χρήση και του σχήματος 1.13 καταλήγουμε στη σχέση:

$$I_{fa}^{(1)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + \left[ \frac{Z_{kk}^{(2)} (Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \right]}$$

(1.2.4.9)

και έτσι υπολογίζουμε και τις άλλες συμμετρικές συνιστώσες:

$$I_{fa}^{(2)} = -I_{fa}^{(1)} \left[ \frac{Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \right]$$

(1.2.4.10)

$$I_{fa}^{(0)} = -I_{fa}^{(1)} \left[ \frac{Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \right]$$

(1.2.4.11)

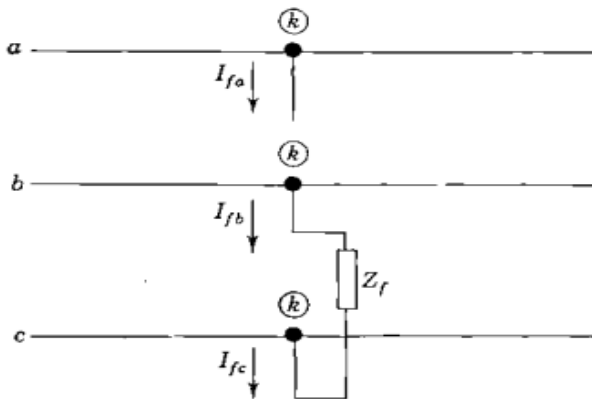


Το ζητούμενο ρεύμα σφάλματος θα ισούται με:

$$I_f = I_{fb} + I_{fc} = 3I_{fa}^{(0)} \quad (1.2.4.11)$$

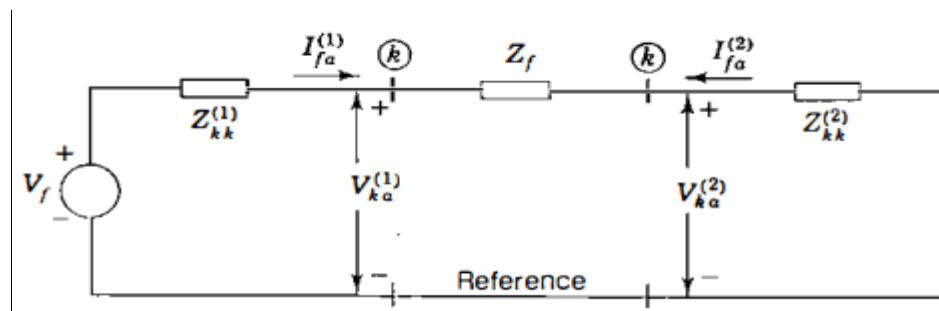
### 1.2.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

Ένα διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη, το οποίο συμβαίνει μεταξύ μιας φάσης b και μιας φάσης c, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.14 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη[4]

Ενώ ο τρόπος που συνδέονται τα κυκλώματα ακολουθίας θα έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 1.15 Τρόπος σύνδεσης κυκλωμάτων ακολουθίας σε περίπτωση διφασικού σφάλματος χωρίς γη[4]

Για αυτή την περίπτωση βραχυκυκλώματος ισχύει:

$$I_{fa} = 0 \quad (1.2.5.1)$$

$$I_{fb} = -I_{fc} \quad (1.2.5.2)$$

$$V_{kb} - V_{kc} = I_{fb}Z_f \quad (1.2.5.3)$$

Με βάση τα παραπάνω, θα έχουμε για τις συμμετρικές συνιστώσες, από τις οποίες αποτελείται το ρεύμα σφάλματος της φάσης α:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{fb} \\ -I_{fb} \end{bmatrix}$$

Συνεπώς:

$$I_{fa}^{(0)} = 0 \quad (1.2.5.4)$$

$$I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)} \quad (1.2.5.5)$$

Κάνοντας χρήση και του σχήματος 1.15 θα έχουμε:

$$I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f} \quad (1.2.5.6)$$

Χρησιμοποιώντας και τη σχέση:

$$I_{fb} = a^2 I_{fa}^{(1)} + a I_{fa}^{(2)} \quad (1.2.5.7)$$

η οποία είναι γνωστή από την ανάλυση στον χώρο των συμμετρικών συνιστωσών, έχουμε υπολογίσει το ζητούμενο ρεύμα σφάλματος.

### **1.3 Παρουσίαση των πλέον χρησιμοποιούμενων διεθνών πρότυπων υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος**

Τα βραχυκυκλώματα είναι μια δυσμενής κατάσταση για τη λειτουργία σε ένα κύκλωμα. Αυτή η κατάσταση είναι ικανή να υπερφορτίσει τον εξοπλισμό (Μ/Σ, καλώδια, γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς), αλλά και να καταστρέψει τη μόνωση. Για να μεταβεί ένα κύκλωμα, που λειτουργεί ομαλά, σε λανθασμένη λειτουργία, χρειάζεται να λάβουν μέρος ποικίλα ηλεκτρομαγνητικά και ηλεκτροχημικά φαινόμενα. Κατά κανόνα, οι τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των ρευμάτων λειτουργίας. Οι θερμικές και οι δυναμικές εντάσεις που προκαλούν τα βραχυκυκλώματα είναι ικανές να οδηγήσουν στην καταστροφή του εξοπλισμού λειτουργίας και μπορούν να αποβούν επικίνδυνες για τον άνθρωπο. Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ηλεκτρικών κυκλωμάτων, πρέπει να γίνεται υπολογισμός του μικρότερου ρεύματος βραχυκύκλωσης, προκειμένου να προσδιορισθεί ο εξοπλισμός προστασίας από υπερρεύματα, και υπολογισμός του μεγαλύτερου ρεύματος βραχυκύκλωσης, προκειμένου να διαστασιοποιηθεί ο

εξοπλισμός λειτουργίας. Μόνο τοιουτοτρόπως, είναι εφικτή η σωστή προστασία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, εξασφαλίζοντας την ασφαλή και οικονομική λειτουργία τους και αποφεύγοντας τις δυσάρεστες συνέπειες. Επομένως, είναι σημαντικό, η μέτρηση των ρευμάτων αυτών, άλλα και όλοι οι υπόλοιποι απαραίτητοι υπολογισμοί, να γίνονται με άρτιο τρόπο και με χρήση της κατάλληλης μεθόδου, που θα παρέχει την απαιτούμενη ακρίβεια. Η Ελλάδα δεν διαθέτει κανονισμούς για τον υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος σε ηλεκτρικά δίκτυα. Για αυτόν τον λόγο, ανατρέχουμε σε αντίστοιχα διεθνή πρότυπα ή κανονισμούς, που με το πέρασμα των χρόνων έχουν δημιουργηθεί σε πολλές από τις άλλες χώρες. Το πρώτο, τέτοιου είδους, πρότυπο εισήχθη στην Γερμανία το 1929 και ήταν το VDE0102. Έκτοτε, στην διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι, οι οποίες, είτε ανάγονται σε πρότυπα, είτε όχι. Εξ αυτών, οι πλέον χρησιμοποιούμενες, που λαμβάνουν γενικότερη αποδοχή και εφαρμογή, είναι αυτές των προτύπων IEC 60909 και ANSI C 37.010.

Το Πρότυπο IEC 60909 είναι ευρωπαϊκό και βασίζει τη μεθοδολογία του στο ευρέως διαδεδομένο θεώρημα Thevenin. Στο σημείο του σφάλματος, υπολογίζεται μια ισοδύναμη πηγή και, έπειτα, υπολογίζονται τα αντίστοιχα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Κάθε σημείο στο δίκτυο αντικαθίσταται από την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του. Τέτοια σημεία στο δίκτυο μπορούν να είναι μετασχηματιστές, γραμμές ή στρεφόμενες μηχανές, σύγχρονες και ασύγχρονες. Σε περίπτωση ασύμμετρου σφάλματος(μονοφασικού, διφασικού, πολλαπλού), χρησιμοποιούνται κυκλώματα συμμετρικών συνιστωσών(ευθύ, αντίστροφο και ομοπολικό σύστημα), προκειμένου να γίνει υπολογισμός των ρευμάτων. Η χρήση του συγκεκριμένου Προτύπου ενδείκνυται σε περίπτωση ύπαρξης διασυνδεόμενων, με το σύστημα, αιολικών μηχανών.

Το Πρότυπο ANSI C 37.010 είναι αμερικάνικο και στηρίζεται στην απλοποιημένη μέθοδο E/X. Απλοποιεί, δηλαδή το σύστημα ως ένα ισοδύναμο του, που περιέχει μια ισοδύναμη αντίδραση X και, από πίσω της, μια ιδανική πηγή τάσης E. Με αυτόν τον τρόπο, καθιστά τους υπολογισμούς απλούς και εύχρηστους.

Οι λόγοι που έχουν καθιερωθεί αυτά τα δυο πρότυπα σε διεθνές επίπεδο, για τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκύκλωσης, είναι κυρίως οι εξής:

-Είναι απλά και κατανοητά με ξεκάθαρες μεθοδολογίες και μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν από μεγάλο ποσοστό μηχανικών χωρίς να χρειάζονται προαπαιτούμενες γνώσεις και δεξιότητες.

-Περιέχουν απλές και εύχρηστες υπολογιστικές διαδικασίες(κυρίως το ANSI C 37.010) συγκριτικά με άλλες μεθόδους που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά επίπονο υπολογιστικό φόρτο.

-Εξάγουν αποτελέσματα, που χαρακτηρίζονται σε μεγάλο βαθμό από ακρίβεια και δεν θέτουν σε κίνδυνο τον εξοπλισμό λειτουργίας.

-Εφαρμόζονται σε μεγάλο εύρος δικτύων, σε αντίθεση με τα περισσότερα άλλα πρότυπα που χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες περιπτώσεις σφαλμάτων.

-Εισάγουν νέα δεδομένα και πραγματοποιούν απαραίτητες διορθώσεις στις νεότερες εκδόσεις τους, έπειτα από ανάλογες μελέτες και δοκιμές, προκειμένου να συμβαδίζουν με τις εκάστοτε εξελίξεις.

Μια ακόμα μέθοδος, που μπορεί να μην έχει την αποδοχή των δυο παραπάνω προτύπων, αλλά θα αναφερθεί και στη συνέχεια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, είναι η μέθοδος της υπέρθεσης ή "complete method". Η μέθοδος αυτή, στηρίζεται στην αρχή της υπέρθεσης, η οποία υπαγορεύει πως το συνολικό ρεύμα σε ένα κύκλωμα ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων που προκαλούνται από κάθε πηγή ρεύματος, λαμβάνοντας υπόψιν τον χρόνο κάθε πηγής. Απαιτεί τη διαίρεση ενός ηλεκτρικού συστήματος σε διαφορετικά τμήματα, με κάθε ένα από τα τμήματα να έχει μόνο μία πηγή ρεύματος ενεργή και τις υπόλοιπες πηγές ρεύματος απενεργοποιημένες. Για κάθε τμήμα, υπολογίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης, υποθέτοντας ότι η εκάστοτε πηγή είναι η μόνη πηγή ρεύματος στο σύστημα. Στη συνέχεια, τα ρεύματα από κάθε τμήμα συνδυάζονται μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας την αρχή της υπέρθεσης, για να υπολογιστεί το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλώματα με πολλαπλές πηγές ρεύματος ή για την αναζήτηση των περιοχών στο σύστημα που έχουν την μεγαλύτερη πιθανότητα να προκαλέσουν βραχυκυκλώματα. Είναι μια αρκετά ακριβής μέθοδος, ωστόσο μπορεί να είναι χρονοβόρα, ανάλογα με τον αριθμό των πηγών ρεύματος και τον βαθμό του εξεταζόμενου συστήματος.

Στα επόμενα κεφάλαια, παρουσιάζονται εκτενέστερα τα πρότυπα IEC 60909 και ANSI C 37.010 με ανάλυση της μεθοδολογίας τους, αλλά και των γενικότερων αρχών τους.

# Κεφάλαιο 2

## Το Πρότυπο IEC 60909

### *2.1 Γενικές πληροφορίες για το πρότυπο IEC 60909*

Μέχρι το 1962, τα βραχυκυκλώματα υπολογίζονταν με βάση τις ρυθμίσεις VDE 0670. Το 1971, έγινε απόσυρση του προτύπου VDE 0102 και το 1975, πραγματοποιήθηκε αναθεώρηση του, καθώς οι υπολογισμοί για υψηλής και χαμηλής τάσης κυκλώματα έγιναν ενιαίοι, στην Γερμανία. Στο μεταξύ, η σημαντική πρόοδος των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος οδήγησε στην εμφάνιση ποικίλων προγραμμάτων στην αγορά. Το 1988, έγινε η παρουσίαση της δημοσίευσης της IEC «Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων στα τριφασικά εναλλασσόμενα συστήματα», η οποία ήταν και η αρχική έκδοση του Προτύπου IEC 60909. Το συγκεκριμένο Πρότυπο εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης:

-στα τριφασικά εναλλασσόμενα συστήματα χαμηλής τάσης (LV)

-στα τριφασικά εναλλασσόμενα συστήματα υψηλής τάσης(HV)

Τα υπό ανάλυση συστήματα που εξετάζει λειτουργούν στην ονομαστική συχνότητα των 50 και 60 Hz και σε τάση μέχρι 550kV. Το Πρότυπο αναλύει και υπολογίζει συμμετρικά, αλλά και ασύμμετρα τριφασικά βραχυκυκλώματα. Εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της μέγιστης και του ελάχιστης τιμής του ρεύματος σφάλματος ενός τριφασικού συστήματος. Το μέγιστο ρεύμα καθορίζει τη διαστασιολόγηση του ηλεκτρικού εξοπλισμού, ενώ το ελάχιστο ρεύμα αποτελεί τη βάση για την ορθή επιλογή και την ρύθμιση των μέσων προστασίας. Επομένως, γίνεται αντιληπτό, ότι η γνώση των δύο προαναφερθέντων ρευμάτων είναι μείζονος σημασίας. Το Πρότυπο αποτελείται από 5 μέρη:

- Στο πρώτο μέρος ορίζεται μία πρακτική, γενική και σύντομη μέθοδος υπολογισμών, τα αποτελέσματα, της οποίας, μπορούν να θεωρηθούν σε μεγάλο βαθμό ακριβή.

- Το δεύτερο μέρος περιγράφει την προέλευση και τον τρόπο εφαρμογής των συντελεστών διορθώσεως, που εξασφαλίζουν τεχνική ακρίβεια στους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται στην πρώτη ενότητα.

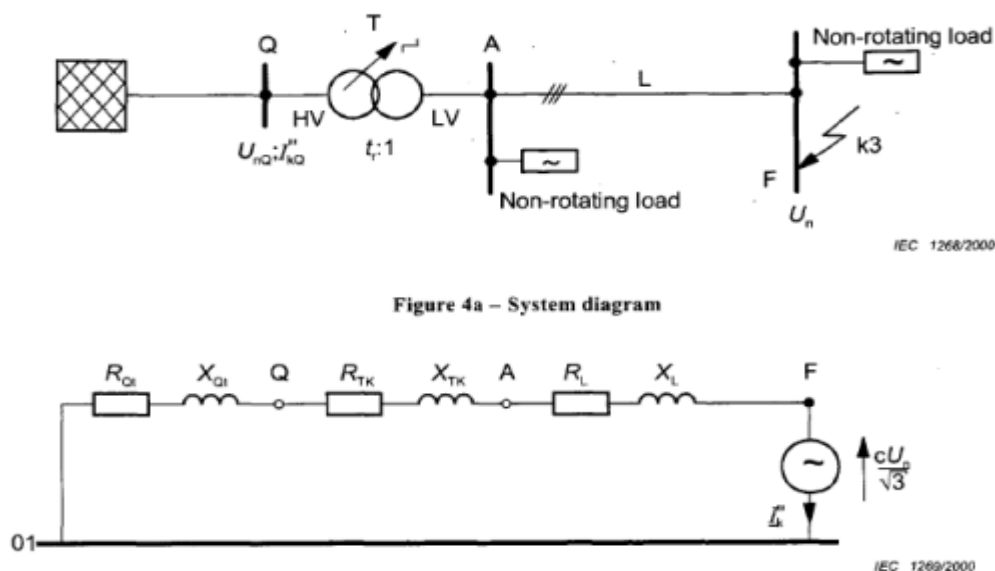
-Το τρίτο μέρος παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις παραμέτρους του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε Σ.Η.Ε., προκειμένου να καθοδηγήσει τον αναγνώστη, σε περίπτωση απουσίας στοιχείων σε συστήματα Χ.Τ., και να συγκρίνει τις προτεινόμενες από το Πρότυπο τιμές με αυτές που έχουν δοθεί από την πλευρά του κατασκευαστή, για την περίπτωση συστημάτων Μ.Τ. ή Υ.Τ.

- Το τέταρτο μέρος ορίζει τη μέθοδο με την οποία υπολογίζονται τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως, ενώ συμβαίνουν δυο ξεχωριστά, αλλά ταυτόχρονα σφάλματα με γη, όπως και τα επιμέρους ρεύματα, τα οποία διέρχονται μέσω γης σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη σε σύστημα, που έχει γειωθεί καλά ή σε σύστημα, που είναι ουδέτερα γειωμένο διαμέσου χαμηλής αντίστασης.

- Στο πέμπτο μέρος γίνεται παρουσίαση παραδειγμάτων υπολογισμού έντασης βραχυκυκλώσεως για διάφορα ηλεκτρικά συστήματα, δίνοντας την ευκαιρία στον αναγνώστη να κατανοήσει καλύτερο το Πρότυπο, διαμέσου της πρακτικής εφαρμογής του.

## 2.2 Μέθοδος ισοδύναμης πηγής τάσης

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην τοποθέτηση μιας ισοδύναμης πηγής τάσης στο σημείο που εμφανίστηκε το βραχυκύκλωμα. Η ισοδύναμη πηγή τάσης είναι η μοναδική ενεργή πηγή τάσης του εξεταζόμενου συστήματος. Το δίκτυο (network feeder) και οι μηχανές (σύγχρονες και ασύγχρονες) θα πρέπει να αντικατασταθούν από τις αντίστοιχες σύνθετες αντιστάσεις τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πάντα εφαρμόσιμη σε οποιαδήποτε τοπολογία δικτύου. Δεδομένα λειτουργίας μόνιμης κατάστασης, φορτία καταναλωτών, θέσεις των μεταγωγέων των μετασχηματιστών, διέγερση των γεννητριών κ.τ.λ είναι περιττά. Επίσης, η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί περεταίρω υπολογισμούς για τη ροή του φορτίου του συστήματος τη στιγμή του βραχυκυκλώματος. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται η μέθοδος ισοδύναμης πηγής τάσεως, σε περίπτωση δικτύου που συμβαίνει τριφασικό βραχυκύκλωμα:



Σχήμα 2.1 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μια θέση σφάλματος F α) Μονογραμμικό διάγραμμα για το σύστημα και (β) ισοδύναμο διάγραμμα για το σύστημα θετικής ακολουθίας[3]

## **2.3 Βασικοί ορισμοί και έννοιες που ορίζει το Πρότυπο IEC 60909**

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν κάποιοι βασικοί ορισμοί, έννοιες και σχέσεις που χρησιμοποιούνται από το Πρότυπο, καθώς και κάποια στοιχεία για τον τρόπο που το Πρότυπο αντιμετωπίζει μια τοπολογία και τελικώς υπολογίζει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης.

### **Ρεύμα βραχυκύκλωσης:**

Είναι το υπέρρευμα που δημιουργείται από το βραχυκύκλωμα σε ένα ηλεκτρικό σύστημα. Είναι απαραίτητο να διαχωρίζονται το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο σημείο ενός σφάλματος και το μεταφερόμενο ρεύμα στους βρόχους του συστήματος.

### **Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_k''$ :**

Είναι η rms τιμή της εναλλασσόμενης συμμετρικής συνιστώσας του ρεύματος σφάλματος που εμφανίζεται την στιγμή του βραχυκυκλώματος, όταν η σύνθετη αντίσταση παραμένει σταθερή στην αρχική της τιμή.

### **Αρχική φαινόμενη συμμετρική ισχύς βραχυκύκλωσης $S_k''$ :**

Η ισχύς βραχυκύκλωσης είναι μια φανταστική παράμετρος και προσδιορίζεται από το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και την ονομαστική τάση του συστήματος από την σχέση:

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k''$$

### **Αποσβεννύμενη συνεχής συνιστώσα $i_{d.c.}$ :**

Είναι η μέση τιμή ανάμεσα στην πάνω και την κάτω περιβάλλουσα του ρεύματος σφάλματος, που οδεύει με αργό ρυθμό προς το μηδέν.

### **Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης $i_p$ :**

Είναι η μεγαλύτερη δυνατή στιγμιαία τιμή του ρεύματος σφάλματος. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την χρονική στιγμή της έναρξης του σφάλματος. Η μέγιστη τιμή επιτυγχάνεται, όταν το σφάλμα πραγματοποιηθεί την στιγμή που το σημείο του σφάλματος έχει μηδενική τάση.

### **Συμμετρικό ρεύμα διάσπασης $I_b$ :**

Είναι η rms τιμή του ρεύματος σφάλματος τη στιγμή του ανοίγματος των επαφών του πρώτου πόλου που θα ανοίξει στον διακόπτη ισχύος.

### **Στάσιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_k$ :**

Είναι η rms τιμή του ρεύματος σφάλματος που παραμένει, αφού αποσβέσουν τα μεταβατικά φαινόμενα.

### Ισοδύναμη πηγή τάσης $cU_n/\sqrt{3}$ :

Είναι η τάση μιας ιδανικής πηγής που εφαρμόζεται στο σημείο του βραχυκυκλώματος στο ορθό σύστημα για να υπολογιστεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αυτή αποτελεί και την μοναδική ενεργή πηγή τάσης στο δίκτυο.

### Συντελεστής διόρθωσης τάσης $c$ :

Ο συγκεκριμένος συντελεστής χρησιμοποιήθηκε στην σχέση περιγραφής της ισοδύναμης πηγής τάσης και οι ενδεικτικές τιμές του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ονομαστική τάση	Συντελεστής $c$ για τον υπολογισμό	
	Μέγιστου ρεύματος σφάλματος	Ελαχίστου ρεύματος σφάλματος
Χαμηλή τάση 100 V – 1000 V		
-Συστήματα με ανοχή 6%	1.05	0.95
-Συστήματα με ανοχή 10%	1.10	0.95
Μέση τάση >1 kV – 35 kV	1.10	1.00
Υψηλή τάση >35 kV	1.10	1.00

Σχήμα 2.2 Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή διόρθωσης τάσης  $c$  [6]

Να σημειωθεί ότι η εισαγωγή του συντελεστή είναι αναγκαία για διάφορους λόγους όπως:

- Διακυμάνσεις της τάσης ανάλογα με την χρονική στιγμή και το σημείο που γίνεται το βραχυκύκλωμα στο δίκτυο
- Αλλαγές στους μεταγωγείς του μετασχηματιστή
- Φορτία και χωρητικότητες που αμελούνται από τους υπολογισμούς
- Υπομεταβατική συμπεριφορά των γεννητριών και των κινητήρων

### 2.4 Παραδοχές που υιοθετούνται στους υπολογισμούς

Το Πρότυπο IEC 60 909 υιοθετεί κάποιες παραδοχές για να απλοποιήσει τις υπολογιστικές διαδικασίες. Αυτές είναι οι εξής (Πηγή [3]):



- Όσο διαρκεί το σφάλμα, ο τύπος του σφάλματος δεν μπορεί να αλλάξει, δηλαδή όταν ένα σύστημα υφίσταται ένα βραχυκύκλωμα ανάμεσα σε τρεις φάσεις, το σφάλμα παραμένει τριφασικό και, όταν υφίσταται ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ γραμμής και γης, το σφάλμα παραμένει σφάλμα γης.

- Όσο διαρκεί το σφάλμα, δεν αλλάζει η τοπολογία του συστήματος.

- Θεωρείται ότι ένα σύστημα αλλαγής τάσεως υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) του Μ/Σ λειτουργεί στη κύρια θέση.

- Αμελούνται οι αντιστάσεις από τα ηλεκτρικά τόξα, οι οποίες προκαλούνται σε ένα σημείο σφάλματος.

- Αμελούνται οι χωρητικότητες γραμμής και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες, εκτός από αυτές της ομοπολικής ακολουθιακής συνιστώσας σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Επίσης αμελούνται τα μη στρεφόμενα φορτία.

Κατά την διαδικασία υπολογισμού του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως, γίνονται οι παρακάτω παραδοχές(Πηγή [3]):

- Για να υπολογιστούν τα μέγιστα ρεύματα σφάλματος, χρησιμοποιείται ο συντελεστής τάσεως  $c_{max}$ , που, σε περίπτωση απουσίας σχετικών εθνικών πρότυπων, επιλέγεται με βάση το σχήμα 2.2.

- Επιλέγεται αυτή η διάταξη του συστήματος και η μέγιστη συνεισφορά μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και δικτύων τροφοδοσίας, οι οποίες θα επιφέρουν τη μεγαλύτερη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως στο σημείο του σφάλματος.

- Σε περίπτωση χρησιμοποίησης ισοδύναμων σύνθετων αντιστάσεων  $ZQ$  για την αναπαράσταση εξωτερικών δικτύων, επιλέγεται η χρησιμοποίηση της ελάχιστης ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώσεως, η οποία θα είναι αντίστοιχη της μέγιστης συνεισφοράς του εξωτερικού δικτύου στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

- Για την ωμική αντίσταση  $RL$  των γραμμών (καλώδια και εναέριες γραμμές) χρησιμοποιείται η τιμή που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία 20°C.

Ανάλογα, κατά τη διαδικασία υπολογισμού του ελάχιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως, κάνουμε τις παρακάτω παραδοχές(Πηγή [3]):

- Για να υπολογιστούν τα ελάχιστα ρεύματα βραχυκύκλωσης, χρησιμοποιείται ο συντελεστής, που εξάγεται με βάση το σχήμα 2.2.

- Επιλέγεται αυτή η διάταξη του συστήματος και η μέγιστη συνεισφορά μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και δικτύων τροφοδοσίας, οι οποίες θα επιφέρουν την μικρότερη τιμή έντασης βραχυκυκλώσεως στο σημείο του σφάλματος.

-Οι κινητήρες αμελούνται.

- Για την εξαγωγή της ωμικής αντίστασης  $R_L$  των γραμμών (καλώδια και εναέριες γραμμές, ενεργοί αγωγοί και αγωγοί ουδετέρου) χρησιμοποιείται η τιμή, η οποία είναι αντίστοιχη με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20°C με βάση την εξίσωση:

$$R_L = [1 + \alpha (\theta_e - 20^\circ\text{C})] * R_{L20} \quad (2.4.1)$$

όπου:

$R_{L20}$  :

είναι η τιμή της ωμικής αντίστασης που είναι σε αντιστοιχία με θερμοκρασία 20 °C,

$\theta_e$  :

είναι η θερμοκρασία του αγωγού, στην κλίμακα βαθμών κελσίου, όταν τελειώνει το βραχυκύκλωμα,

$\alpha$  :

είναι συντελεστής που ισούται με 0,004/K, και είναι ακριβής σε επαρκή βαθμό για τις περισσότερες περιπτώσεις σχετικά με αλουμίνιο, κράμα αλουμινίου και χαλκό.

## **2.5 Σύνθετες αντιστάσεις και συντελεστές διόρθωσης**

Στην μέθοδο της ισοδύναμης πηγής τάσης, που χρησιμοποιεί το πρότυπο, γίνεται αντικατάσταση των στοιχείων του κυκλώματος από τις σύνθετες αντιστάσεις τους, ανηγμένες σε ένα επιλεγμένο επίπεδο τάσης. Επομένως, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν αυτές οι σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων, καθώς και οι συντελεστές διόρθωσης που εισάγει το πρότυπο στην διαδικασία υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Στα δίκτυα, στους μετασχηματιστές, στις εναέριες γραμμές, στα καλώδια και σε παραπλήσιο εξοπλισμό, η ορθή και η αντίστροφη συνιστώσα των σύνθετων αντιστάσεων είναι ίσες:

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} \quad (2.5.1)$$

### **2.5.1 Κυρίως δίκτυο(feeder)**

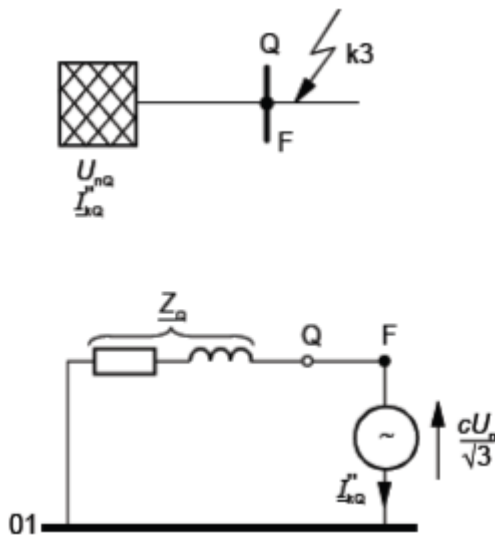
Εφόσον γνωρίζουμε μόνο την τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{kQ}''$  στο σημείο σύνδεσης Q του κυρίως δικτύου, η σύνθετη αντίσταση με την οποία μοντελοποιείται το δίκτυο, σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος, δίνεται από τον τύπο:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \quad (2.5.1.1)$$

Σε περίπτωση που είναι γνωστός ο λόγος των επιμέρους συνιστωσών της σύνθετης αντίστασης, τότε η επαγωγική αντίδραση θα εξαχθεί από τον τύπο:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (2.5.1.2)$$

Το σύστημα θα έχει την παρακάτω μορφή:

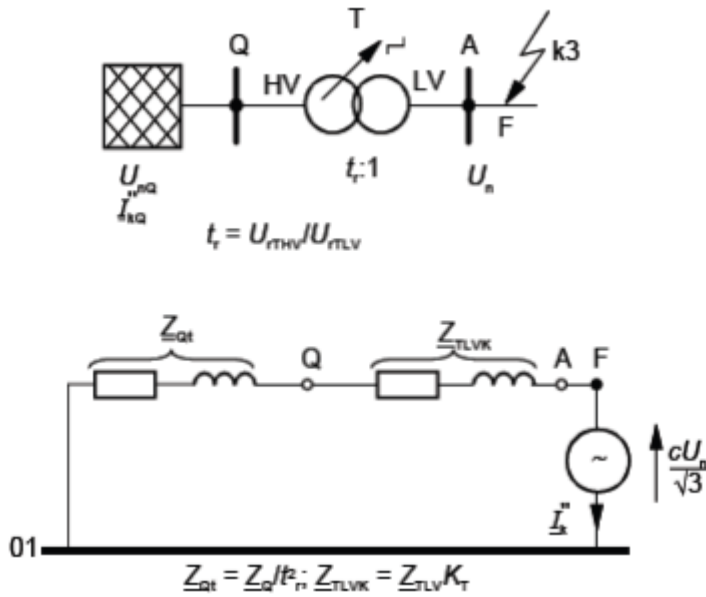


Σχήμα 2.3 Διάγραμμα συστήματος και ισοδύναμο κύκλωμα χωρίς μετασχηματιστή[3]

Σε περίπτωση που στο παραπάνω σύστημα παρεμβάλλεται ένας μετασχηματιστής μέσης ή υψηλής τάσης, τότε:

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (2.5.1.3)$$

Όπου  $t_r$  είναι ο λόγος μετασχηματισμού, όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται στην κύρια θέση. Σε αυτή την περίπτωση θα έχουμε την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα συστήματος και ισοδύναμο κύκλωμα με μετασχηματιστή[3]

### 2.5.2 Μετασχηματιστές

Η σύνθετη αντίσταση των μετασχηματιστών δυο τυλιγμάτων στο ορθό σύστημα με και χωρίς μεταγωγέα υπό φορτίο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

(2.5.2.1)

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2}$$

(2.5.2.2)

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

(2.5.2.3)

Όπου:

$P_{krT}$  :

οι ωμικές απώλειες ισχύος του μετασχηματιστή υπό ονομαστικό ρεύμα

$u_{kr}$  :

η ονομαστική τάση βραχυκυκλώματος (%) υπό ονομαστικό ρεύμα

$u_{Rr}$  :

η ονομαστική ωμική συνιστώσα της τάσης βραχυκυκλώματος (%)

Η ωμική συνιστώσα της τάσης βραχυκυκλώματος μικραίνει με το μέγεθος του Μ/Σ. Για μετασχηματιστές μεγάλου μεγέθους, η αντίσταση είναι τόσο μικρή, ώστε η σύνθετη αντίσταση να είναι σχεδόν μόνο επαγωγική. Η αντίσταση λαμβάνεται υπόψιν αν η μέγιστη τιμή που εμφανίζει το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ή η συνεχής συνιστώσα υπεισέρχεται στους υπολογισμούς.

Επίσης, σύμφωνα με το Πρότυπο, πρέπει να εισαχθεί στους υπολογισμούς και ένας συντελεστής διόρθωσης  $K_T$  για τον σωστό υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Άρα για την σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή θα έχουμε:

$$Z_{kT} = K_T Z_T \quad (2.5.2.4)$$

Για τον συντελεστή διόρθωσης θα ισχύει:

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6\chi_T} \quad (2.5.2.5)$$

Και για την σύνθετη αντίδραση του μετασχηματιστή:

$$\chi_T = \frac{X_T}{(U_{rT}^2 / S_{rT})} \quad (2.5.2.6)$$

Εφόσον γνωρίζουμε τις συνθήκες λειτουργίας μόνιμης κατάστασης των μετασχηματιστών, πριν την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, τότε χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος για τον συντελεστή διόρθωσης:

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{max}}{1 + \chi_T (I_T^b / I_{rT}) \sin \varphi_T^b} \quad (2.5.2.7)$$

όπου:

$U^b$  :

η μέγιστη τάση λειτουργίας πριν το βραχυκύκλωμα

$I_T^b$  :

το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας πριν το βραχυκύκλωμα

$\varphi_T^b$  :

η γωνία του συντελεστή ισχύος πριν το βραχυκύκλωμα

### 2.5.3 Σύγχρονες γεννήτριες

Στην περίπτωση που τα αρχικά ρεύματα βραχυκύκλωσης τροφοδοτούνται κατευθείαν από γεννήτριες, χωρίς την παρέμβαση μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα σε βιομηχανικά δίκτυα ή σε δίκτυα χαμηλής τάσης, τότε θα έχουμε για την σύνθετη αντίσταση:

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (2.5.3.1)$$

με συντελεστή διόρθωσης:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + X_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (2.5.3.2)$$

Όπου:

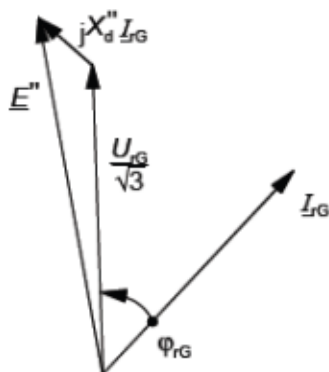
$U_n$ : η ονομαστική τάση στο σύστημα

$U_{rG}$ : η ονομαστική τάση της γεννήτριας

$Z_{GK}$ : η διορθωμένη υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας

$Z_G$ : η υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας στο ορθό σύστημα

ενώ η γωνία  $\varphi_{rG}$  της εξίσωσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα φάσεων σύγχρονης γεννήτριας σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας[3]

Ο συντελεστής διόρθωσης εισάγεται στους υπολογισμούς, επειδή αντί της υπομεταβατικής τάσης, χρησιμοποιείται η ισοδύναμη πηγή τάσης  $cU_n/\sqrt{3}$ .

Για την αντίσταση  $R_G$  της γεννήτριας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις παρακάτω τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια:

$$R_G = 0,05X_d'' \text{ για γεννήτριες με } U_{rG} > 1kV \text{ και } S_{rG} \geq 100MVA$$

$$R_G = 0,057 \text{ για γεννήτριες με } U_{rG} > 1kV \text{ και } S_{rG} < 100MVA$$

$$R_G = 0,15X_d'' \quad \text{για} \quad \text{γεννήτριες} \quad U_{rG} \leq 1000V$$

#### 2.5.4 Ασύγχρονες μηχανές

Οι ασύγχρονες μηχανές, είτε πρόκειται για κινητήρες, είτε για γεννήτριες, μέσης και χαμηλής τάσης συνεισφέρουν στο αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, στο κρουστικό ρεύμα, στο συμμετρικό ρεύμα διάσπασης, και όταν πρόκειται για ασύμμετρα σφάλματα, στο ρεύμα μόνιμης κατάστασης. Η σύνθετη αντίσταση του ασύγχρονου κινητήρα δίνεται από:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (2.5.4.1)$$

όπου:

$U_{rM}$ : η ονομαστική τάση της μηχανής

$I_{rM}$ : το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής

$S_{rM}$ : η ονομαστική ισχύς του κινητήρα

$I_{LR}/I_{rM}$ : ο λόγος του ρεύματος με ακινητοποιημένο δρομέα δια του ονομαστικού ρεύματος του κινητήρα

Αν ο λόγος των συνιστωσών της σύνθετης αντίστασης του κινητήρα είναι γνωστός, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad (2.5.4.2)$$

Για τον προαναφερθέντα λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια οι παρακάτω τιμές:

$\frac{R_M}{X_M} = 0,1$  με  $X_M = 0,995Z_M$  για κινητήρες μέσης τάσης με ισχείς  $P_{rM}$  για κάθε ζεύγος πόλων  $\geq 1MW$

$\frac{R_M}{X_M} = 0,15$  με  $X_M = 0,989Z_M$  για κινητήρες μέσης τάσης με ισχείς  $P_{rM}$  για κάθε ζεύγος πόλων <1MW

$\frac{R_M}{X_M} = 0,42$  με  $X_M = 0,922Z_M$  για κινητήρες χαμηλής τάσης

## 2.5.5 Σταθμοί παραγωγής

### 2.5.5.1 Σταθμοί παραγωγής με μεταγωγέα υπό φορτίο στον μετασχηματιστή

Για τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκύκλωσης με μεταγωγέα υπό φορτίο, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για την σύνθετη αντίσταση όλου του σταθμού παραγωγής:

$$Z_S = K_S(t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (2.5.5.1.1)$$

με συντελεστή διόρθωσης:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1 + |X_d'' - X_T| \sin \varphi_{rG}} \quad (2.5.5.1.2)$$

όπου:

$Z_S$ : η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση ενός σταθμού παραγωγής με OLTC ανηγμένη στην υψηλή τάση

$Z_G$ : η υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας(χωρίς τον συντελεστή διόρθωσης  $K_G$ )

$Z_{THV}$ : η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή ανηγμένη στην υψηλή τάση(χωρίς τον συντελεστή διόρθωσης  $K_T$ )

$U_{nQ}$ : η ονομαστική τάση για το σύστημα στο σημείο Q στα άκρα του κυρίως δικτύου

$U_{rG}$ : η ονομαστική τάση της γεννήτριας

$\varphi_{rG}$ : η γωνία ανάμεσα στο  $I_{rG}$  και το  $U_{rG}/\sqrt{3}$

$X_d''$ : η υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας σε p.u

$X_T$ : η αντίδραση του μετασχηματιστή του σταθμού παραγωγής

$t_r$ : ο ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή



### 2.5.5.2 Σταθμοί παραγωγής χωρίς μεταγωγέα υπό φορτίο στον μετασχηματιστή

Για τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκύκλωσης των σταθμών παραγωγής χωρίς μεταγωγέα υπο φορτίο στον μετασχηματιστή τους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για την σύνθετη αντίσταση όλου του σταθμού παραγωγής:

$$Z_{SO} = K_{SO}(t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (2.5.5.2.1)$$

με συντελεστή διόρθωσης:

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1 + X_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (2.5.5.2.2)$$

όπου:

$Z_{SO}$ : η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση ενός σταθμού παραγωγής χωρίς OLTC ανηγμένη στην υψηλή τάση

$Z_G$ : η υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας(χωρίς τον συντελεστή διόρθωσης  $K_G$ )

$Z_{THV}$ : η σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή ανηγμένη στην υψηλή τάση(χωρίς τον συντελεστή διόρθωσης  $K_T$ )

$U_{nQ}$ : η ονομαστική τάση για το σύστημα στο σημείο Q στα άκρα του κυρίως δικτύου

$U_{rG}$ : η ονομαστική τάση της γεννήτριας

$\varphi_{rG}$ : η γωνία ανάμεσα στο  $I_{rG}$  και το  $U_{rG}/\sqrt{3}$

$X_d''$ : η υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας σε p.u

$X_T$ : η αντίδραση του μετασχηματιστή του σταθμού παραγωγής

$t_r$ : ο ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή

$1 \pm p_T$ : εισάγεται όταν ο μετασχηματιστής του σταθμού παραγωγής έχει λήψεις λειτουργίας, αλλά όχι υπό φορτίο, με την προϋπόθεση της μόνιμης χρησιμοποίησης μιας εξ αυτών των λήψεων. Αλλιώς ισχύει  $1 \pm p_T=1$ .

$p_T$ : το εύρος ρύθμισης της τάσης του μετασχηματιστή

### 2.5.6 Στατικοί μετατροπείς

Οι μετατροπείς ισχύος συνεισφέρουν μόνο στο αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώματος και στην μέγιστη τιμή που εμφανίζει το κρουστικού ρεύμα. Δεν συνεισφέρουν στο συμμετρικό ρεύμα διάσπασης, ούτε στο ρεύμα μόνιμης κατάστασης. Για αυτό τον λόγο, αντιμετωπίζονται από το Πρότυπο με παρόμοιο τρόπο όπως οι ασύγχρονοι κινητήρες, όσον αφορά τους υπολογισμούς. Ωστόσο, θεωρούμε δυο επιπλέον παραδοχές:

$$\frac{I_{LR}}{I_{TM}} = 3 \quad (2.5.6.1)$$

$$\frac{R_M}{X_M} = 0,1 \text{ με } X_M = 0,995Z_M \quad (2.5.6.2)$$

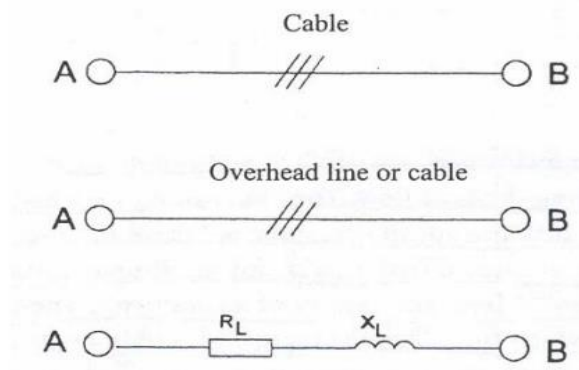
Μετατροπείς οποιασδήποτε άλλης κατηγορίας αμελούνται από το Πρότυπο.

### 2.5.7 Καλώδια και εναέριες γραμμές μεταφοράς

Η αναπαράσταση γραμμών και καλωδίων γίνεται μέσω μιας εν σειράς σύνθετου αντιστάσεως:

$$\tilde{Z}_L = R_L + jX_L$$

Προϋπόθεση για να υπολογιστεί η παραπάνω σύνθετη αντίσταση αποτελεί η γνώση κάποιων χαρακτηριστικών των γραμμών και των καλωδίων(γεωμετρικά, μονωτικά κ.τ.λ)



Σχήμα 2.6 Καλώδια και γραμμές στο ορθό σύστημα συνιστωσών[3]

## 2.6 Υπολογισμός ειδικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν παραπάνω, μπορούμε να εξάγουμε εύκολα το αρχικό συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, για κάθε είδος βραχυκυκλώματος. Οι ζητούμενες σχέσεις για τον υπολογισμό του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος Σφάλματος	Αρχικό Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος ( $I_k^*$ )
Τριφασικό (με ή χωρίς γη)	$I_{k_3}^* = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_1}$
Μονοφασικό	$I_{k_1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 }$
Διφασικό με γη	$I_{k_{\epsilon\epsilon\epsilon}}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n Z_3}{ Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 }$
Διφασικό χωρίς γη	$I_{k_2}'' = \frac{c U_n}{ Z_1 + Z_2 }$

Πίνακας 2.1 Σχέσεις υπολογισμού αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος για κάθε είδος βραχυκυκλώματος

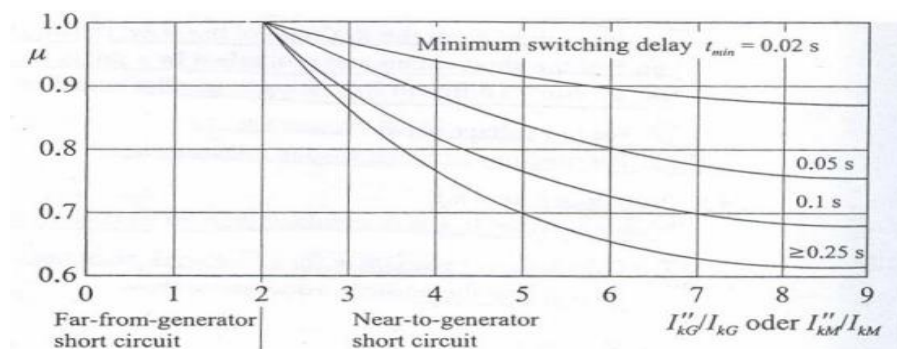
Ωστόσο, τα υπόλοιπα ρεύματα ενός σφάλματος έχουν πιο πολύπλοκο τρόπο υπολογισμού. Σε αυτή την ενότητα, θα μελετηθούν αυτά τα ρεύματα και θα παρατεθούν ορισμένες εξισώσεις που απαιτούνται για τον υπολογισμό τους.

### 2.6.1 Συμμετρικό ρεύμα διακοπής

Ως συμμετρικό ρεύμα διακοπής ορίζεται η ενεργός τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Διαρρέει διαμέσου του διακόπτη την χρονική στιγμή που διαχωρίζονται για πρώτη φορά οι επαφές και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις σφαλμάτων κοντά στην γεννήτρια. Σε περιπτώσεις σφαλμάτων μακριά από την γεννήτρια ισούται με το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Εξαρτάται από τη θέση που έχει εγκατασταθεί ο διακόπτης σε σχέση με την θέση που πραγματοποιείται το βραχυκύκλωμα. Για τις σύγχρονες μηχανές ισχύει:

$$I_a = \mu * I_k^* \quad (2.6.1.1)$$

Ο συντελεστής  $\mu$  μπορεί να ληφθεί γραφικά όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.7 Συντελεστής  $\mu$  για τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής[3]

όπου  $t_{\min}$  είναι ο ελάχιστος χρόνος αποκοπής.

Διαφορετικά, ο συντελεστής  $\mu$  μπορεί να ληφθεί από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\mu = 0,84 + 0,26 e^{-0,26} (I_k''/I_r), \text{ για } t_{\min} = 0,02 \text{ s}$$

$$\mu = 0,71 + 0,51 e^{-0,30} (I_k''/I_r), \text{ για } t_{\min} = 0,05 \text{ s}$$

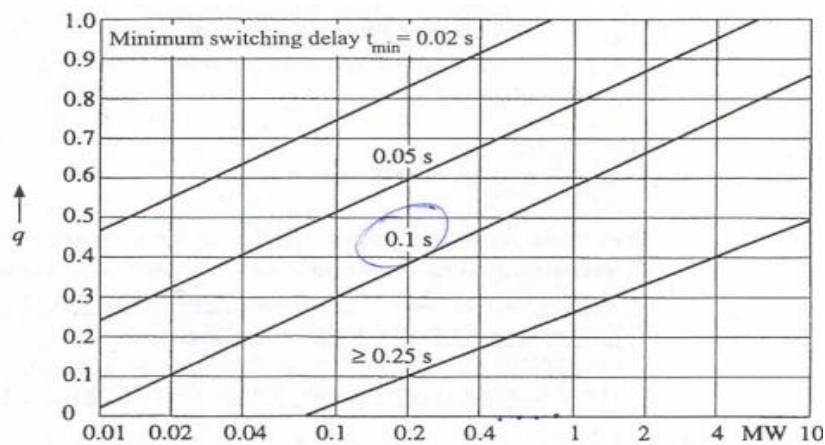
$$\mu = 0,62 + 0,72 e^{-0,32} (I_k''/I_r), \text{ για } t_{\min} = 0,10 \text{ s}$$

$$\mu = 0,56 + 0,94 e^{-0,38} (I_k''/I_r), \text{ για } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s}$$

Όσον αφορά τις ασύγχρονες μηχανές ισχύει:

$$I_a = \mu * q * I_{kM}'' \quad (2.6.1.2)$$

Η χρήση του συντελεστή  $q$  γίνεται στους επαγωγικούς κινητήρες και λαμβάνει υπόψιν του τον γρήγορο ρυθμό που εξασθενεί το βραχυκύκλωμα του κινητήρα, καθώς απουσιάζει το πεδίο διέγερσης. Μπορεί να εξαχθεί είτε σχηματικά, είτε αλγεβρικά. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τον τρόπο που επιδρά ο συντελεστής στην ενεργό ισχύ ανά ζευγάρι πόλων του κινητήρα  $m$  και στον ελάχιστο χρόνο που καθυστερεί ο διακόπτης  $t_{\min}$ :



Σχήμα 2.8 Ο συντελεστής  $q$  συναρτήσει των  $m$  και  $t_{\min}$ [3]

Διαφορετικά ο συντελεστής  $q$  μπορεί να ληφθεί από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$q = 1.03 + 0.12 * \ln m \quad \text{για } t_{\min} = 0.02s$$

$$q = 0.79 + 0.12 * \ln m \quad \text{για } t_{\min} = 0.05s$$

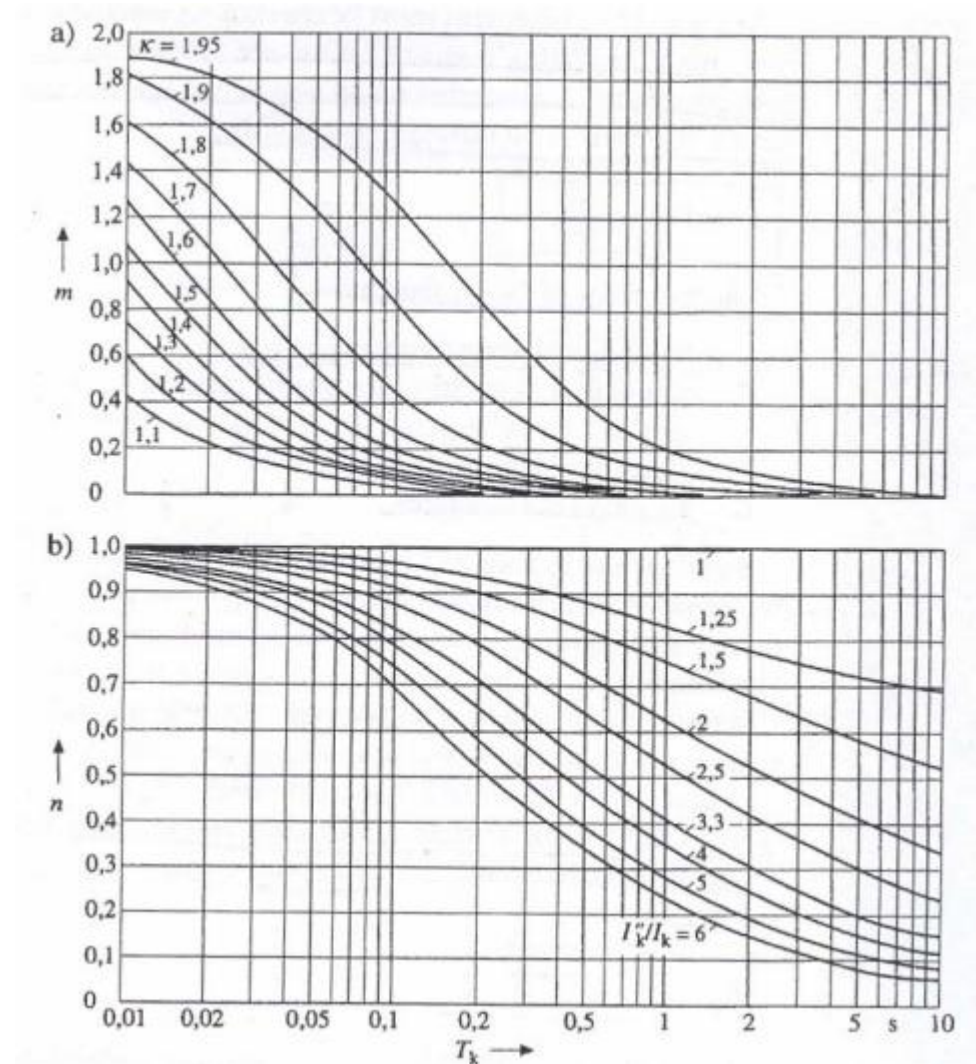
$$q = 0.57 + 0.12 * \ln m \quad \text{για } t_{\min} = 0.10s$$

$$q = 0.26 + 0.12 * \ln m \quad \text{για } t_{\min} = 0.25s$$

$$q_{\max} = 1$$

### 2.6.2 Θερμικό ρεύμα βραχυκύκλωσης

Κατά τη διέλευση ενός θερμικού ρεύματος  $I_m$ , είναι σημαντικό να ελεγχθεί κατά πόσο ικανοποιείται η βραχύχρονη θερμική ισορροπία του συστήματος. Ο ενεργός χρόνος αντοχής στο ρεύμα, καθορίζεται από το μέγεθος και τη συμπεριφορά στο χρόνο του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Από την ενεργό τιμή αυτού, παράγεται η ίδια ποσότητα θερμότητας με το μεταβαλλόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά τον χρόνο βραχυκυκλώματος στις DC απεριοδικές και AC περιοδικές του συνιστώσες. Ένας τρόπος υπολογισμού του θερμικού ρεύματος βραχυκύκλωσης προκύπτει μέσω της ενεργούς τιμής του αρχικού συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και μέσω των συντελεστών  $m$  και  $n$ , οι οποίοι φαίνονται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 2.9 Οι συντελεστές  $m$  και  $n$ [3]

Ισχύει:

$$I_m = I_k \sqrt{m + n} \quad (2.6.2.1)$$

Ο συντελεστής  $m$  μπορεί, επίσης, να υπολογιστεί αλγεβρικά από τη σχέση:

$$m = \frac{1}{2 * f * t_k * \ln(\kappa - 1)} \left[ e^{4 * f * t_k * \ln(\kappa - 1)} - 1 \right] \quad (2.6.2.2)$$

Ο συντελεστής  $m$  αφορά την DC απεριοδική συνιστώσα, ενώ ο συντελεστής  $n$  αφορά την AC περιοδική συνιστώσα για τριφασικό βραχυκύκλωμα. Όσον αφορά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος και τον ελάχιστο χρόνο αντοχής στο θερμικό ρεύμα, προκύπτουν από τα δεδομένα των κατασκευαστών του εξοπλισμού προστασίας.

### 2.6.3 Μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Για την μέγιστη τιμή που εμφανίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $i_p$  έγινε αναφορά και στο κεφάλαιο 1.1. Συναντάται όσο διαρκεί η περίοδος που ακολουθεί μετά από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος και, όπως προαναφέρθηκε, εξαρτάται από τον συντελεστή  $\kappa$  που εξάγεται από τον λόγο  $R/X$  με χρήση του διαγράμματος που παρατέθηκε. Υπολογίζοντας τη μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, γίνεται προσδιορισμός του δυναμικού φορτίου των ηλεκτρονικών συστημάτων.

Οι συνήθεις τιμές για το  $\kappa$  είναι:

$\kappa < 1,4$  σε περιπτώσεις δημόσιων δικτύων

$\kappa \leq 1,8$  αμέσως μετά τον μετασχηματιστή δικτύου

Ένας άλλος, αλγεβρικός, τρόπος υπολογισμού του συντελεστή  $\kappa$  είναι:

$$\kappa = 1.02 + 0.98 * e^{-3 * \frac{R}{X}} \quad (2.6.3.1)$$

Πρακτικά, με τον συντελεστή  $\kappa$  λαμβάνεται υπόψιν ο τρόπος που επιδρά η φθίνουσα DC απεριοδική συνιστώσα του ρεύματος σφάλματος.

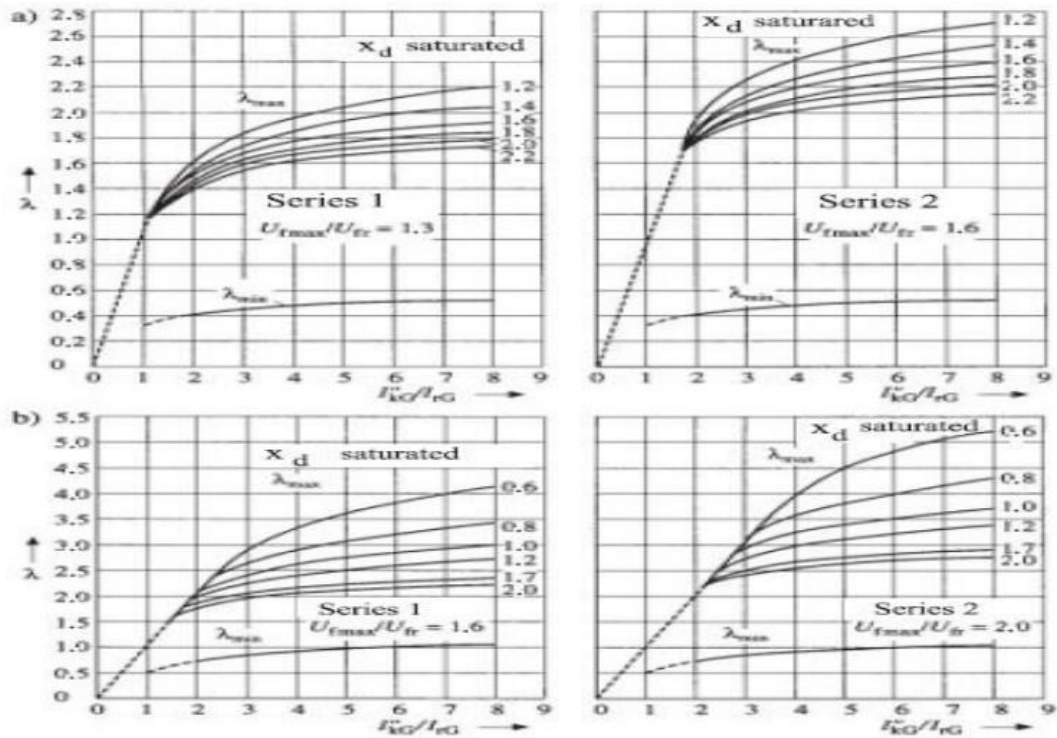
### 2.6.4 Ρεύμα μόνιμης κατάστασης

Ως ορισμός του ρεύματος μόνιμης κατάστασης, για σφάλμα κοντά σε γεννήτρια, θεωρείται η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης, αφού εξασθενήσει το μεταβατικό φαινόμενο. Η τιμή του προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$I_{kS} = \lambda I_{rGt} \quad (2.6.4.1)$$

όπου  $I_{rGt}$  είναι η τιμή ονομαστικής έντασης ρεύματος της γεννήτριας, ανηγμένη στο τύλιγμα υψηλής τάσης του μετασχηματιστή μονάδος και  $\lambda$  συντελεστής, που

προκύπτει από δεδομένα όπως ο κορεσμός του σιδήρου στον ρότορα, η κορεσμένη τιμή σύγχρονης αντίδρασης της γεννήτριας, η δράση του αυτόματου ρυθμιστή της τάσης και το σύστημα διέγερσης. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του συντελεστή  $\lambda$  φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.10 Συντελεστής  $\lambda$  για α)συνεισφορά γεννήτριας με κυλινδρικό δρομέα β)συνεισφορά γεννήτριας με έκτυπους πόλους[3]

# Κεφάλαιο 3

## Το Πρότυπο ANSI C 37.010

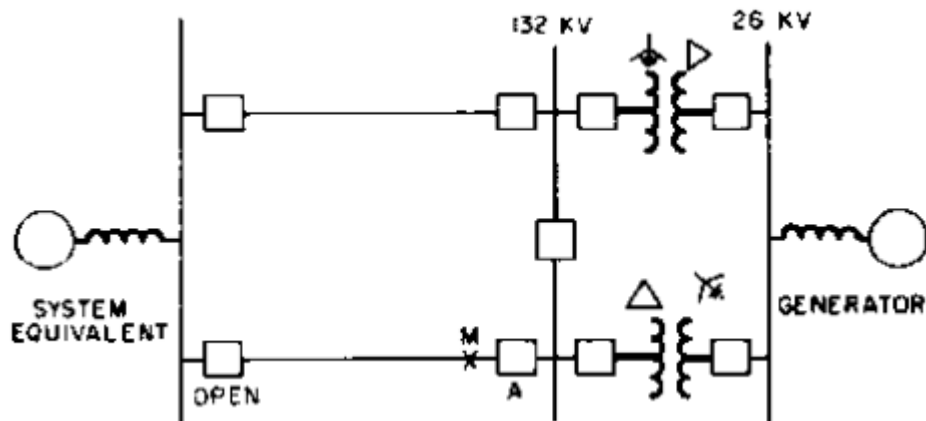
### 3.1 Γενικές πληροφορίες για το Πρότυπο ANSI C 37.010

Το πρότυπο ANSI C 37.010 είναι ένα πρότυπο της Αμερικανικής Εταιρείας Πολιτικών και Ηλεκτρολόγων (ANSI) και του Ινστιτούτου Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) που καθορίζει τις προδιαγραφές για τους ηλεκτρικούς διακόπτες τάσης από 1 kV έως 38 kV και προσδιορίζει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά και τις δοκιμές που πρέπει να περάσουν για να είναι συμβατοί με το πρότυπο. Τα βασικά χαρακτηριστικά που καλύπτει είναι η ακρίβεια, η αξιοπιστία, η αντοχή σε διάφορες συνθήκες και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των διακοπών. Σε ένα από τα κεφάλαια του, το Πρότυπο εμβαθύνει στα βραχυκυκλώματα και αποφεύγει τις διάφορες μεθόδους υπολογισμού ρευμάτων σφάλματος που έχουν δημοσιοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, κρίνοντας πως η εφαρμογή τους μπορεί να γίνει πολύ δύσκολη και επίπονη σε περιπτώσεις πολύπλοκων δικτύων. Εισάγει, λοιπόν, την απλοποιημένη μέθοδο E/X, αλλά και την μέθοδο E/X με προσαρμογή για να υπολογισθεί η φθίνουσα ac και dc συνιστώσα του ρεύματος σφάλματος στις στρεφόμενες μηχανές.

### 3.2 Η απλοποιημένη μέθοδος E/X

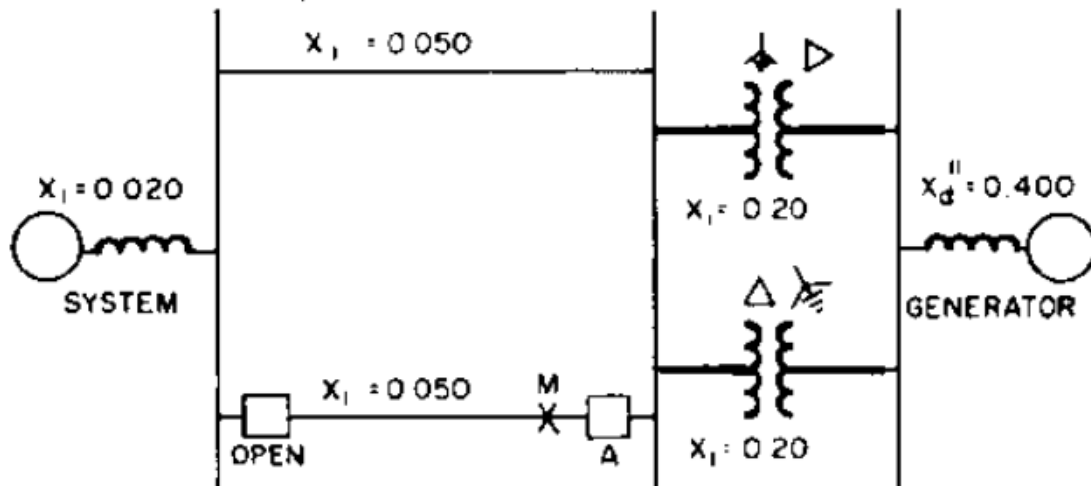
Η απλοποιημένη μέθοδος E/X είναι η πρώτη που εισάγει το Πρότυπο. Πρόκειται για μια μέθοδο που αντιμετωπίζει το εκάστοτε ηλεκτρικό σύστημα ως ένα όμοιο δίκτυο που αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης E και μια ισοδύναμη αντίδραση X. Με αυτό τον τρόπο, μια απλή διαίρεση E/X [ $E/X_1$  για τριφασικά βραχυκυκλώματα και  $3E/(2X_1 + X_0)$  για μονοφασικά βραχυκυκλώματα φάσης-γης], παρέχει επαρκή ακρίβεια για την επιλογή κατάλληλου διακόπτη για το κύκλωμα. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε μπορούν να συγκριθούν με το 100% της συμμετρικής ικανότητας διακοπής ρεύματος του διακόπτη όταν είναι γνωστό ότι ο X/R λόγος του συστήματος [ $(X_1/R_1)$  για τριφασικά βραχυκυκλώματα και  $(2X_1+X_0)/(2R_1+R_0)$  για διφασικά βραχυκυκλώματα με γη] είναι 17 ή λιγότερο στα 60 Hz. Η απλοποιημένη διαδικασία E/X μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να απαιτείται ο προσδιορισμός της αντίστασης R του συστήματος αν το E/X για τα τριφασικά σφάλματα δεν υπερβαίνει το 80% της συμμετρικής δυνατότητας διακοπής του διακόπτη. Επίσης, στην περίπτωση των μονοφασικών σφαλμάτων φάσης-γης, αν ο λόγος  $3E/(2X_1 + X_0)$  υπερβαίνει το 70% της συμμετρικής δυνατότητας διακοπής του διακόπτη, η απλοποιημένη μέθοδος δεν χρησιμοποιείται. Ένα παράδειγμα της απλοποιημένης μεθόδου E/X φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Στο πρώτο σχήμα φαίνεται ένα σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται η απλοποιημένη μέθοδος E/X:





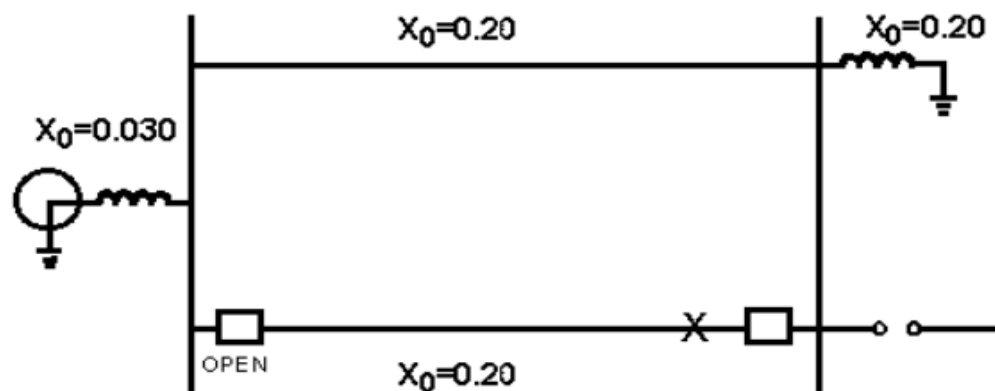
Σχήμα 3.1 Εικονογράφηση ενός συστήματος με την απλοποιημένη μέθοδο E/X[7]

Στη συνέχεια, φαίνονται οι αντιδράσεις θετικής ακολουθίας για το παραπάνω σύστημα:



Σχήμα 3.2 Αντιδράσεις θετικής ακολουθίας του συστήματος του σχήματος 3.1[7]

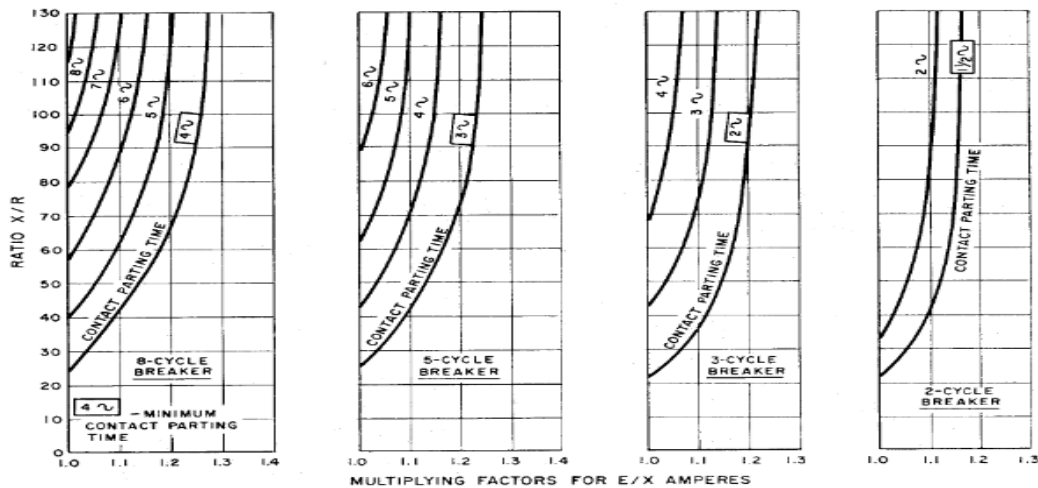
Ενώ για την μηδενική ακολουθία θα έχουμε:



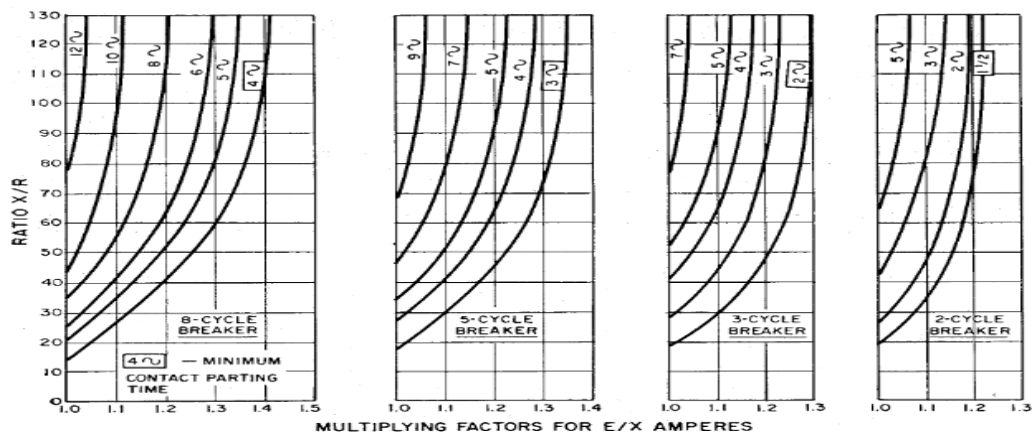
Σχήμα 3.3 Αντιδράσεις μηδενικής ακολουθίας του συστήματος 3.1[7]

### 3.3 Η μέθοδος E/X με προσαρμογή για τον υπολογισμό των ac και dc συνιστωσών

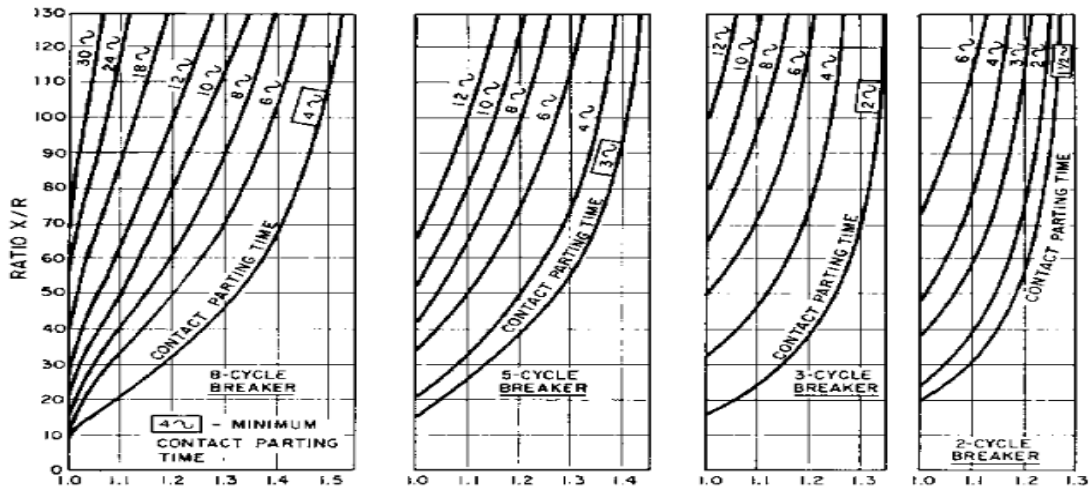
Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για να επιτύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την απλοποιημένη μέθοδο E/X. Εισάγει μια μεθοδολογία υπολογισμού, που περιέχει συντελεστές διόρθωσης. Οι συντελεστές διόρθωσης προκύπτουν συναρτήσει του λόγου X/R του συστήματος στο σημείο του σφάλματος, ο οποίος, όμως, είναι δύσκολο να υπολογιστεί με απόλυτη ακρίβεια. Για αυτόν το λόγο, το Πρότυπο υιοθετεί μια μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία το εξεταζόμενο κύκλωμα χωρίζεται σε δυο ξεχωριστά κυκλώματα αποτελούμενα εξ'ολοκλήρου από αντιστάσεις R και αντιδράσεις X αντίστοιχα. Μειώνοντας την τιμή των ξεχωριστών κυκλωμάτων διαδοχικά, λαμβάνουμε μια τιμή για την ισοδύναμη αντίσταση R και μια για την ισοδύναμη αντίδραση X και βρίσκουμε τον ζητούμενο λόγο X/R για το σύστημα. Οι συντελεστές διόρθωσης που χρησιμοποιούμε για να συμπεριλάβουμε τις ac και dc συνιστώσες στους υπολογισμούς μας φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 3.4 Διορθωτικοί συντελεστές σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος υπό την επίδραση της ac και dc συνιστώσας[7]



Σχήμα 3.5 Διορθωτικοί συντελεστές σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος υπό την επίδραση της ac και dc συνιστώσας[7]

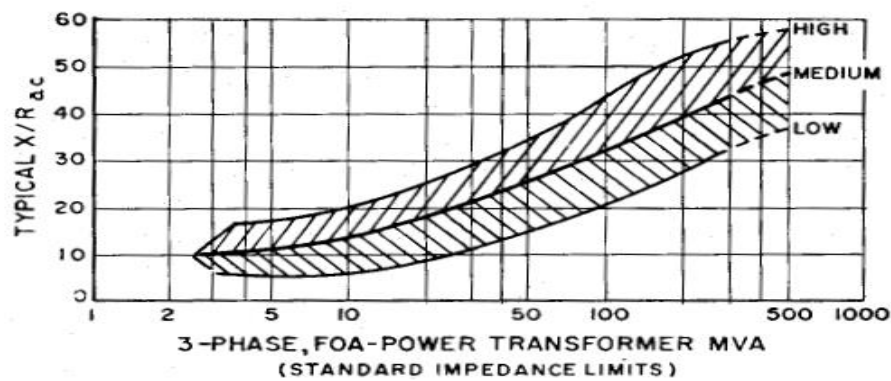


Σχήμα 3.6 Διορθωτικοί συντελεστές σε περίπτωση τριφασικού και μονοφασικού σφάλματος υπό την επίδραση μόνο της dc συνιστώσας[7]

Επιπλέον, σύμφωνα με το Πρότυπο, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα εύρος τιμών για τον λόγο  $X/R$  για τα επιμέρους στοιχεία ενός κυκλώματος (στα 60Hz). Συγκεκριμένα:

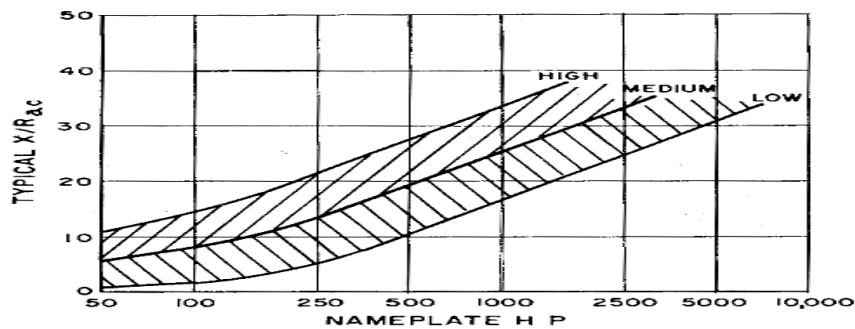
-Για μεγάλες γεννήτριες: 40-120 (με τυπική τιμή 80)

-Για μετασχηματιστές ισχύος:



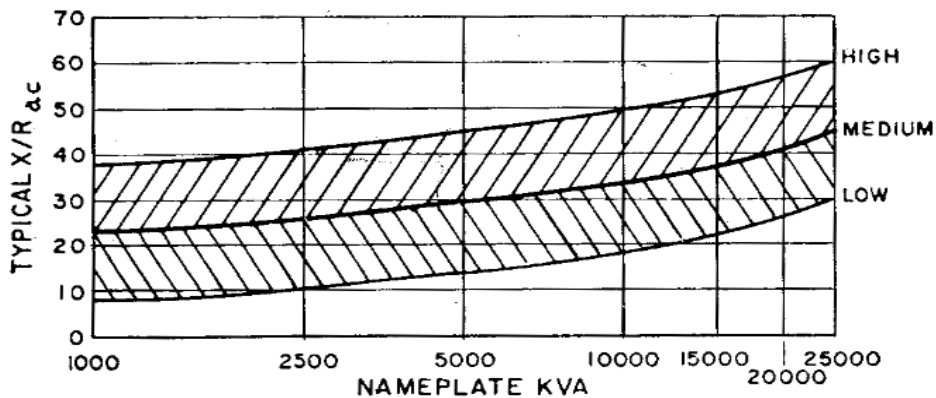
Σχήμα 3.7 Εύρος τιμών λόγου  $X/R$  για μετασχηματιστές ισχύος[7]

-Για κινητήρες επαγωγής:



Σχήμα 3.8 Εύρος τιμών λόγου  $X/R$  για κινητήρες επαγωγής[7]

-Για μικρές γεννήτριες και σύγχρονους κινητήρες:



Σχήμα 3.9 Εύρος τιμών X/R για μικρές γεννήτριες και σύγχρονους κινητήρες[7]

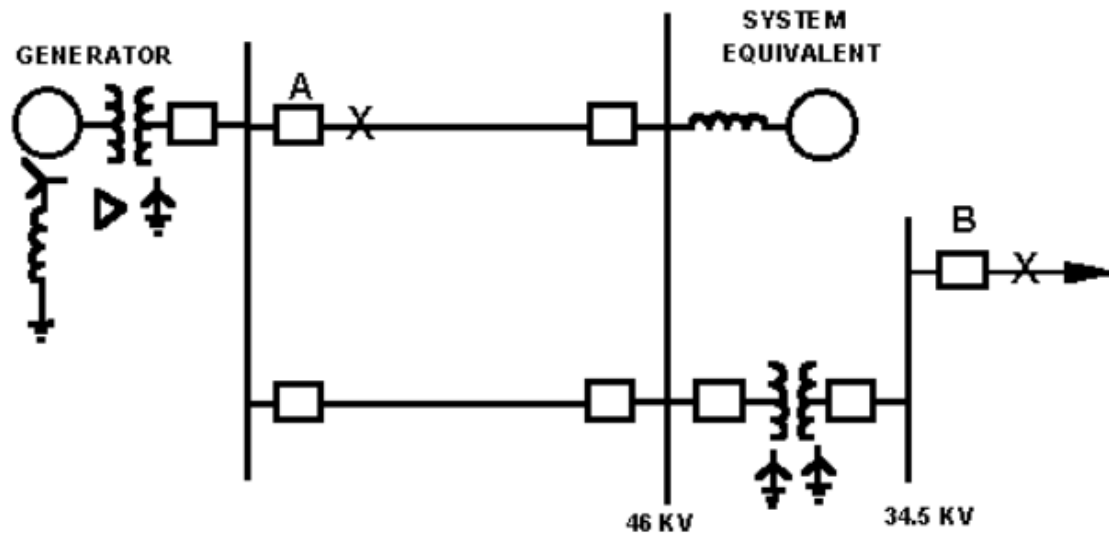
-Για αντιδραστήρες: 40-120(με τυπική τιμή 80)

-Για ανοιχτές γραμμές: 2-16(με τυπική τιμή 5)

-Για υπόγεια καλώδια: 1-3(με τυπική τιμή 2)

Ο λόγος X/R είναι αρκετά σημαντικός αφού μας δείχνει τον βαθμό που εξασθενεί η dc συνιστώσα.

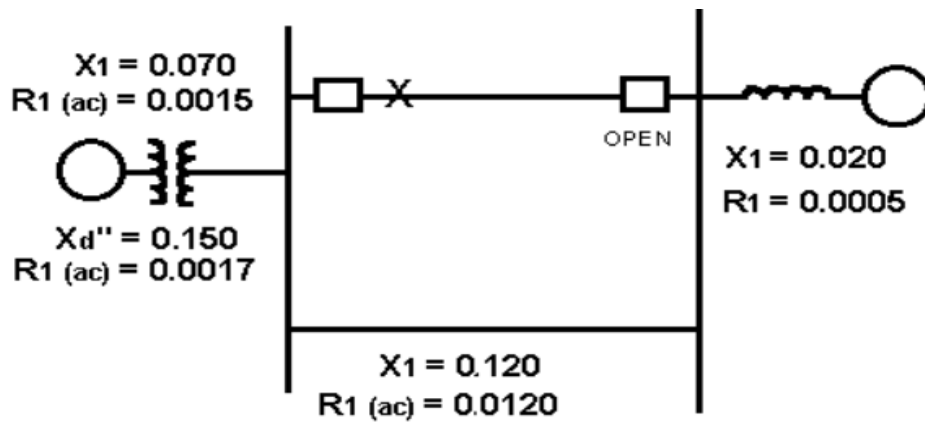
Ένα παράδειγμα της μεθόδου E/X με προσαρμογή για τον υπολογισμό των ac και dc συνιστωσών του ρεύματος σφάλματος φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Στο πρώτο σχήμα φαίνεται ένα σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται η μέθοδος:



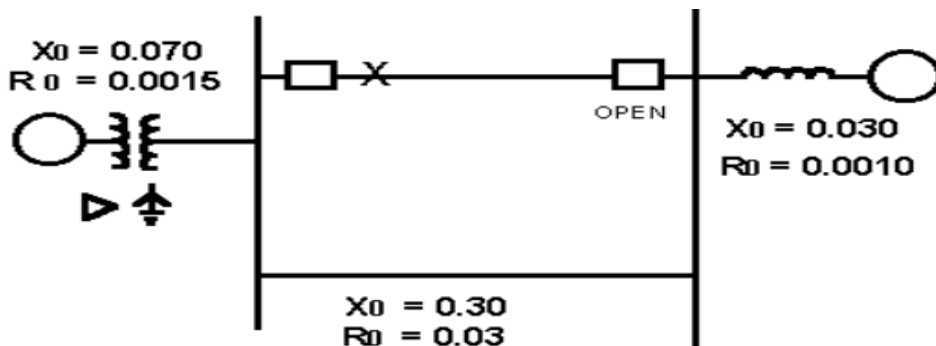
Σχήμα 3.10 Εικονογράφηση ενός συστήματος με την μέθοδο E/X με προσαρμογή για τον υπολογισμό των ac και dc συνιστωσών[7]

Δεδομένου ότι μέσω των διακοπών A και B παράγονται μεγαλύτερα ρεύματα σφάλματος, υπολογίζουμε αυτά τα ρεύματα στην μια πλευρά του κάθε διακόπτη.

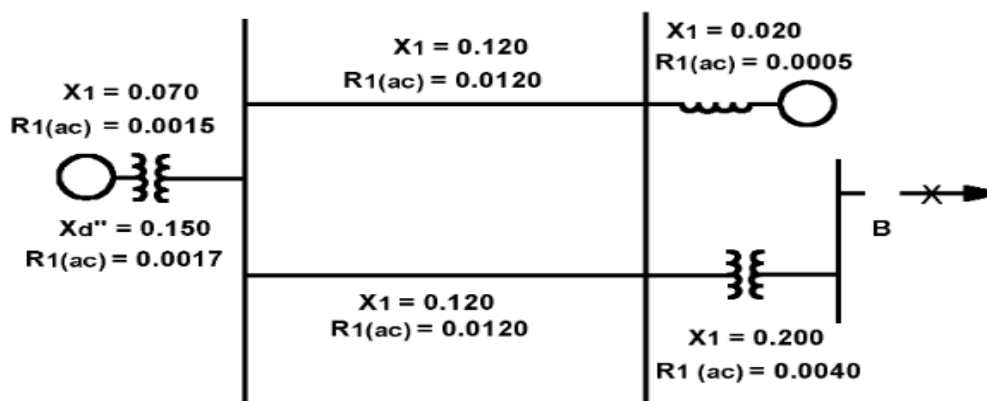
Στη συνέχεια, φαίνονται οι αντιστάσεις θετικής και μηδενικής ακολουθίας για τους διακόπτες A και B:



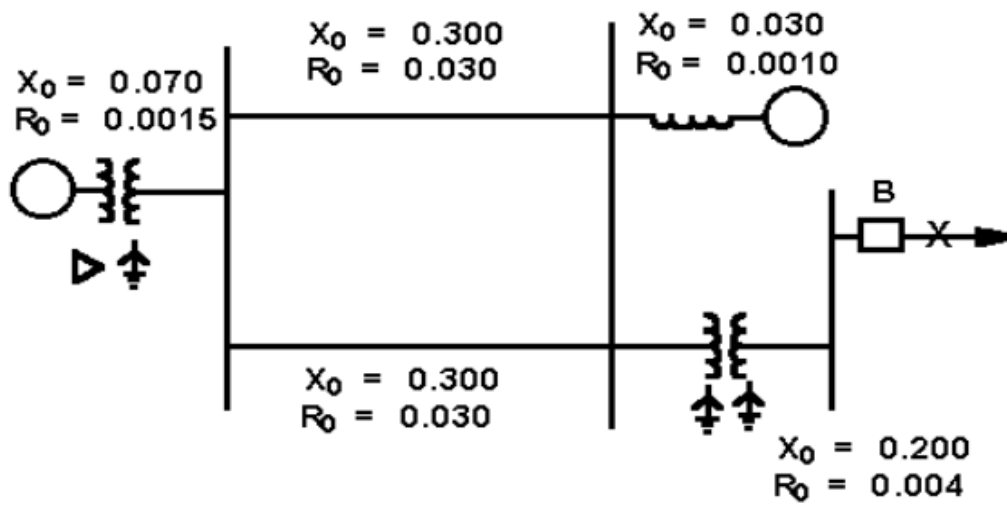
Σχήμα 3.11 Αντιστάσεις θετικής ακολουθίας του συστήματος(για τον διακόπτη A)[7]



Σχήμα 3.12 Αντιστάσεις μηδενικής ακολουθίας του συστήματος(για τον διακόπτη A)[7]



Σχήμα 3.10 Αντιστάσεις θετικής ακολουθίας του συστήματος(για τον διακόπτη B)[7]



Σχήμα 3.11 Αντιστάσεις μηδενικής ακολουθίας του συστήματος(για τον διακόπτη B)[7]

# Κεφάλαιο 4

## Συστήματα Γείωσης

### 4.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία γείωσης εκτελείται, όταν γίνεται σύνδεση μιας εγκατάστασης, ενός κυκλώματος ή μια συσκευής με τη γη ή με αγώγιμο σώμα, το οποίο έχει τέτοιο μέγεθος που να το καθιστά ικανό να συμπεριφέρεται όπως η γη. Σύστημα γείωσης καλούνται τα οριζόντια και κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης που αποτελούνται από διασυνδεδεμένους, γυμνούς αγωγούς τοποθετημένους εντός της γης και παρέχουν μία κοινή γείωση για μεταλλικές κατασκευές ή ηλεκτρικές συσκευές. Τα ηλεκτρόδια γείωσης είναι αγωγοί κάποιου γεωμετρικού σχήματος, που είναι τοποθετημένα εντός του εδάφους, με σκοπό να επιφέρουν την καλύτερη εφικτή επαφή με τη γη και κατ'επέκταση να διαχύσουν αποτελεσματικότερα τα πιθανά ρεύματα σφάλματος ή τις πιθανές κεραυνοπληξίες στη γη. Στο τρέχον κεφάλαιο, θα αναφερθούμε σε κάποιες αρχές που ακολουθούνται στον σχεδιασμό συστημάτων γείωσης, αντλώντας πληροφορίες από ορισμένα πρότυπα που έχουν δημοσιευθεί για αυτόν τον σκοπό. Μια από τις βασικές απαιτήσεις όλων των προτύπων είναι τα ηλεκτρόδια γείωσης να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο αγώγιμα, αλλά και να παρουσιάζουν αντοχή και σταθερότητα στο πέρασ του χρόνου, εξαλείφοντας φαινόμενα, όπως οι διαβρώσεις και οι καταπονήσεις. Στόχος των συστημάτων γείωσης είναι η παροχή των μέσων μεταφοράς των ηλεκτρικών ρευμάτων στη γη σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, όπως και σε συνθήκες σφαλμάτων, αποφεύγοντας την υπέρβαση των ορίων του εξοπλισμού ή την δυσμενή επιρροή στη λειτουργία της εγκατάστασης, καθώς επίσης και η επιβεβαίωση ότι οι άνθρωποι που βρίσκονται στις γειωμένες εγκαταστάσεις δεν είναι εκτεθειμένοι στον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. επικρατεί η λάθος αντίληψη, ότι είναι ασφαλές να αγγίξουμε οποιοδήποτε αντικείμενο έχει γειωθεί. Το μέγιστο ρεύμα, που μπορεί να εκτεθεί κάποιος ακίνδυνα δεν έχει απλή σχέση με την αντίσταση γείωσης ενός συστήματος. Αυτό σημαίνει, ότι είναι πιθανόν μια εγκατάσταση χαμηλής αντίστασης γείωσης να είναι περισσότερο επικίνδυνη από μια εγκατάσταση σχετικά υψηλής αντίστασης γείωσης, εφόσον η τελευταία διαθέτει ένα προσεκτικά σχεδιασμένο σύστημα γείωσης. Ο τύπος του εδάφους, η γεωμετρία ή ο τρόπος τοποθέτηση των ηλεκτροδίων γείωσης στο χώρο μπορούν να συμβάλλουν, ώστε να εμφανιστούν υψηλά δυναμικά στη γη και κατ'επέκταση ένα σύστημα γείωσης να κριθεί επισφαλές. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι σε όλες τις περιπτώσεις είναι απαραίτητη η διεξαγωγή διεξοδικής μελέτης.

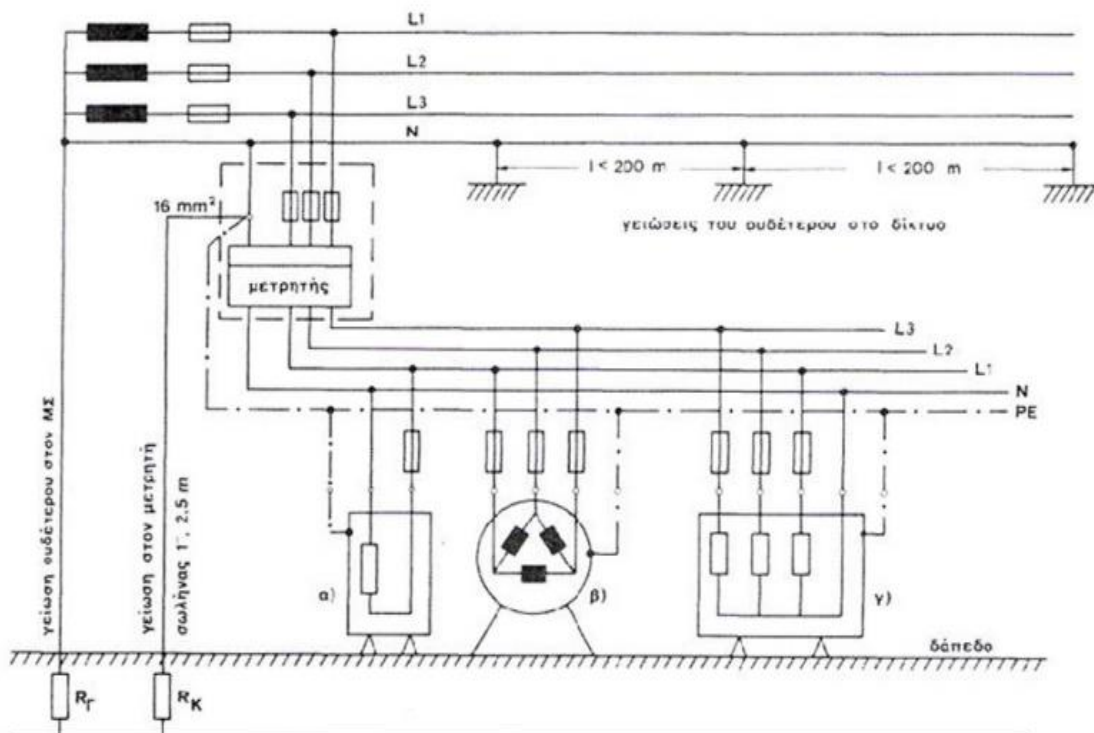
## 4.2 Είδη γειώσεων

Υπάρχουν τρία είδη γειώσεων, ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιούνται, και είναι:

- Η γείωση λειτουργίας
- Η γείωση προστασίας
- Η γείωση ασφάλειας

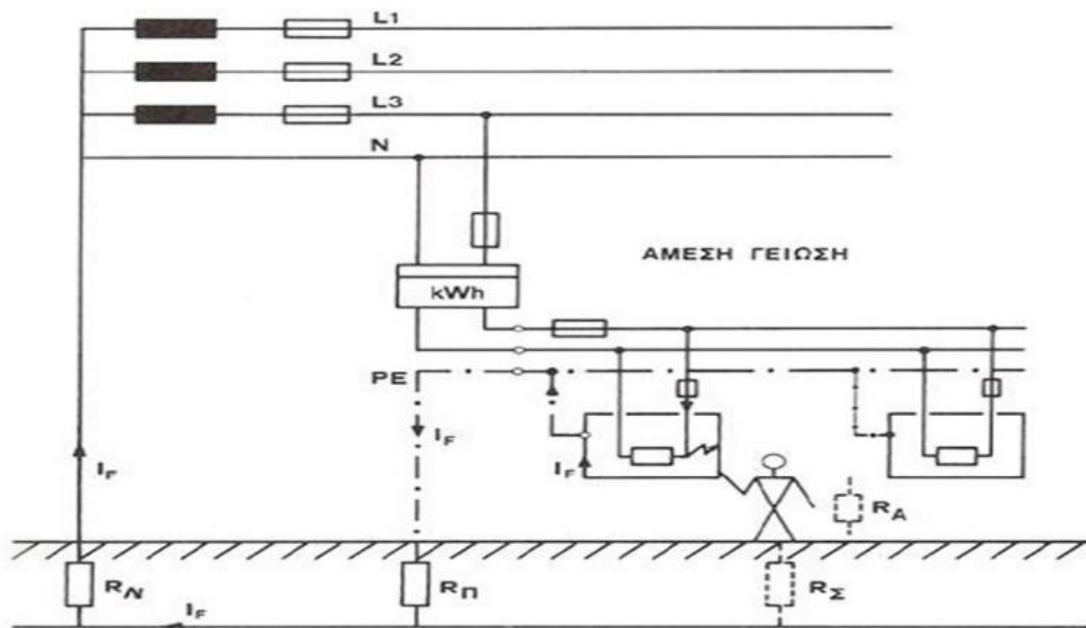
Γείωση λειτουργίας ορίζεται ως η γείωση ενός σημείου ενός ενεργού κυκλώματος και είναι απαραίτητη για την κανονική λειτουργία. Παραδείγματα αυτού του είδους γείωσης είναι η γείωση Μ/Σ υποβιβασμού, η γείωση σιδηροτροχιάς ηλεκτρικού σιδηροδρόμου, η κατά διαστήματα γείωση ουδέτερου του δικτύου ΧΤ και γενικά περιπτώσεις που χρησιμοποιείται η γη ως δεύτερος αγωγός.

Ως γείωση προστασίας ορίζεται η γείωση κάποιου μεταλλικού μέρους, το οποίο δεν αποτελεί στοιχείο σε ενεργό κύκλωμα. Η γείωση προστασίας συμβάλλει στη μείωση των τάσεων επαφής. Είναι μονίμως συνεχής, που σημαίνει πως δεν παρεμβάλλονται διάκενα ή αντιστάσεις. Οι μέθοδοι γείωσης προστασίας είναι η ουδετέρωση(TN) και η άμεση γείωση(TT).



Σχήμα 4.1 Ουδετέρωση(TN)[8]





Σχήμα 4.2 Άμεση γείωση(TT)[8]

Τέλος, η γείωση ασφάλειας μεταφέρει στατικά ηλεκτρικά φορτία ή διοχετεύει κεραυνικά ρεύματα στη γη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γείωση ΣΑΠ.

### 4.3 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης

Τα ηλεκτρόδια γείωσης χωρίζονται στα πρωτεύοντα και στα βοηθητικά. Τα πρωτεύοντα έχουν σχεδιαστεί συγκεκριμένα για σκοπούς γείωσης, ενώ οι σκοποί εγκατάστασης των βοηθητικών ηλεκτροδίων είναι διαφορετικοί από αυτούς της γείωσης. Ένα τυπικό πρωτεύον ηλεκτρόδιο αποτελείται από πλέγματα γείωσης, ράβδους γείωσης, και γείωση φρεατίων. Ένα τυπικό βοηθητικό ηλεκτρόδιο γείωσης αποτελείται από υπόγειες μεταλλικές υποδομές και τον οπλισμό θεμελίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε περίπτωση που έχουν συνδεθεί με το πλέγμα γείωσης. Για να υλοποιηθεί κάποιο σύστημα γείωσης, συναντώνται ποικίλα είδη ηλεκτροδίων γείωσης. Ενδεικτικά, κάποια από αυτά είναι:

- Γειωτής πλάκας
- Γειωτής ράβδου
- Ταινίες γείωσης και οριζόντια καλώδια

- Γειωτής πλέγματος
- Γειωτής αστέρα
- Γειωτής τριγώνου
- Γειωτής τύπου E
- Τετράγωνο πασσάλων

#### **4.4 Θεμελιακή γείωση**

Η θεμελιακή γείωση αποτελεί έναν από τους καλύτερους και δημοφιλέστερους τρόπους γείωσης. Πρόκειται για έναν γειωτή ταινίας, η τοποθέτηση, του οποίου, γίνεται στα θεμέλια κάτω από τα κτίρια, μέσα στο σκυρόδεμα. Είναι ένας ιδιαίτερος τρόπος να υλοποιηθεί η γείωση της ηλεκτρικής εγκατάστασης ενός κτιρίου και η τοποθέτηση του γίνεται μέσα στις συνδετήριους δοκούς, στα πέδιλα ή στα περιμετρικά τοιχεία, σχηματίζοντας κλειστό βρόγχο. Δημιουργείται αγωγήμη σύνδεση του με τον μεταλλικό οπλισμό από το σκυρόδεμα εντός των θεμελίων του κτιρίου.

Με αυτό τον τρόπο, ολόκληρος ο οπλισμός της θεμελίωσης λειτουργεί ως ηλεκτρόδιο γείωσης και εμφανίζει πολύ καλή αγωγιμότητα προς τη γη, μιας και έχει πολύ μεγάλο όγκο και μήκος. Η αντίσταση γείωσης του θεμελιακού γειωτή είναι σχετικά χαμηλή(>2Ω), καθώς το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων διατηρείται υγρό καθ'όλη τη διάρκεια του έτους.

Η θεμελιακή γείωση συνιστάται από όλα τα πρότυπα και τους κανονισμούς ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Τα βασικά πλεονεκτήματα της είναι τα εξής:

- Απόλυτη συμμόρφωση με τους κανονισμούς ασφάλειας
- Χαμηλές τιμές αντίστασεως γείωσης
- Μηχανική προστασία-Αντοχή στο χρόνο
- Εξαλείφει τις βηματικές τάσεις
- Αναμονές γείωσης σε όλα τα σημεία στον εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου, ώστε να υπάρξει άμεση σύνδεση των μεταλλικών μερών μηχανημάτων, σωληνώσεων κλπ.
- Η θεμελιακή γείωση εγκαθίσταται με εύκολο τρόπο, καθώς τοποθετείται σε ήδη υπάρχουσα εκσκαφή και δεν απαιτεί ειδικό χώρο, όπως οι υπόλοιποι τρόποι γείωσης.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες της θεμελιακής γείωσης:



Σχήμα 4.3 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες θεμελιακής γείωσης[8]

#### 4.5 Αντίσταση γείωσης

Αντίσταση γείωσης ορίζουμε την αντίσταση που συναντάται από ένα ηλεκτρόδιο γείωσης έως την άπειρη γη, ενώ στο έδαφος δεν βρίσκονται περεταίρω ηλεκτρόδια. Άπειρη γη θεωρούμε κάποιο στοιχείο στο έδαφος(στην επιφάνεια του) σε απόσταση άπειρη σε σχέση με τον γειωτή. Προκειμένου να γίνει όσο το δυνατόν ελάχιστη η ανύψωση δυναμικού γης(GPR), θα πρέπει να παρέχεται χαμηλή αντίσταση από ένα καλό σύστημα γείωσης. Συνήθως, η αντίσταση γείωσης που συναντάμε έχει τιμή μικρότερη από 1Ω. Για να καθορίσουμε τη διάταξη και το μέγεθος του συστήματος γείωσης, ένα από τα βασικότερα βήματα είναι να εκτιμηθεί η αντίσταση γείωσης. Η έκταση που καταλαμβάνει το σύστημα γείωσης, που, συνήθως, είναι γνωστή εκ των πρώτων βημάτων σχεδίασης, είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση γείωσης. Σε περίπτωση ομοιόμορφου μοντέλου εδάφους, μπορεί να προσεγγιστεί μια ελάχιστη τιμή της αντίστασης γείωσης με τον παρακάτω τύπο:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (4.5.1)$$

Όπου:

$R_g$ : η αντίσταση γείωσης μετρημένη σε Ω

$\rho$ : η ειδική αντίσταση του εδάφους

A: η περιοχή που καταλαμβάνει το πλέγμα γείωσης

Για τον υπολογισμό ενός άνω ορίου για την αντίσταση γείωσης σε ένα σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4.5.2)$$

Όπου:

$L_T$ : το συνολικό μήκος των αγωγών που έχουν θαφτεί

$h$ : το βάθος του πλέγματος σε m

Για τον υπολογισμό της ολικής αντίστασης ενός συστήματος γείωσης ομοιογενούς εδάφους, αποτελούμενο από κάθετα (ράβδοι) ή οριζόντια (πλέγμα) ηλεκτρόδια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (4.5.3)$$

με:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{\alpha'} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (4.5.4)$$

και:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \cdot L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (4.5.5)$$

όπου:

$R_1$ : η αντίσταση του πλέγματος

$R_2$ : η αντίσταση γείωσης όλων των ράβδων

$L_C$ : το μήκος όλων των αγωγών του πλέγματος

$2\alpha'$ : η διάμετρος του αγωγού

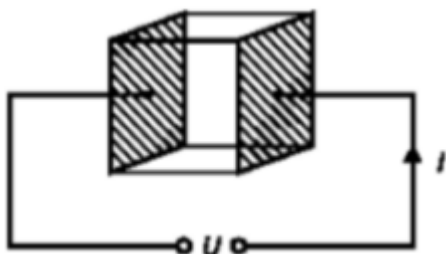
$L_R$ : το μήκος για κάθε ράβδο

$2b$ : η διάμετρος της ράβδου

$n_R$ : ο αριθμός των ράβδων που έχουν τοποθετηθεί εντός της περιοχής A

#### 4.6 Ειδική αντίσταση του εδάφους

Σε όλα τα συστήματα γείωσης θα πρέπει αρχικά να λαμβάνεται υπόψιν το έδαφος μέσα στο οποίο θα τοποθετηθούν οι αγωγοί του συστήματος γείωσης (πλέγμα, ηλεκτρόδιο γείωσης). Ως ειδική αντίσταση  $\rho$  του εδάφους ορίζουμε την αντίσταση του υλικού του εδάφους που εμφανίζει κάποιος κύβος μοναδιαίας ακμής, αν γίνει τοποθέτηση των επίπεδων ηλεκτροδίων σε δύο απέναντι πλευρές του και εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού  $U$  μεταξύ αυτών.



Σχήμα 4.4 Ειδική αντίσταση του εδάφους[8]

Η ειδική αντίσταση του εδάφους δείχνει σε τι βαθμό αντιστέκεται το έδαφος της ροής του ηλεκτρισμού και μετρώντας την, αποκτούνται σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με το έδαφος, που βοηθούν έναν ηλεκτρολόγο μηχανικό να πετύχει τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης, που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις της αντίστασης γείωσης.

Σε αρκετές περιπτώσεις, κατά τη διαδικασία κατασκευής ενός συστήματος γείωσης, κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε βελτιωτικό υλικό. Οι βασικότεροι λόγοι που οδηγούμαστε σε αυτή την επιλογή είναι:

- Μεγάλη τιμή ειδικής αντίστασης του εδάφους
- Περιορισμός στο χώρο εγκατάστασης
- Έδαφος που εμφανίζει διαβρώσεις
- Μεταβολές της ειδικής αντίστασης του εδάφους στη διάρκεια του χρόνου λόγω ασταθών καιρικών συνθηκών
- Μείωση των εξόδων

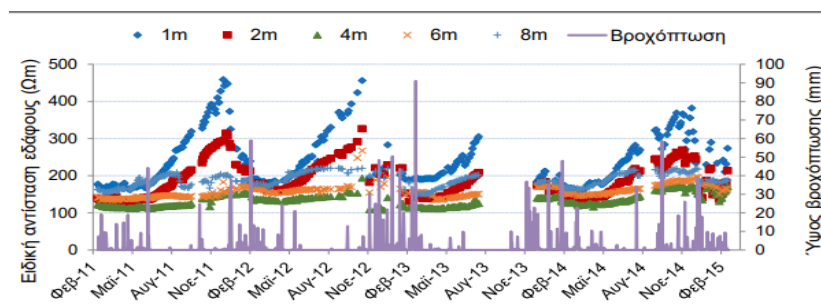
Η τοποθέτηση του βελτιωτικού γίνεται μέσα στο όρυγμα, που θα γίνει εγκατάσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και γίνεται ανάμειξη με το φυσικό έδαφος, προκειμένου

να μειωθεί, κοντά στο ηλεκτρόδιο γείωσης, η τιμή ειδικής αντίστασης του εδάφους και κατ'επέκταση της αντίστασης γείωσης.

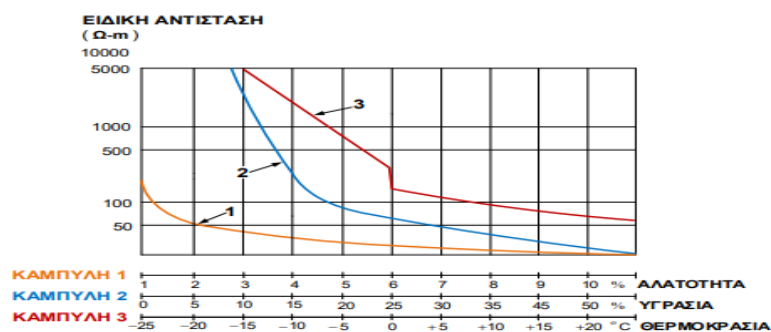
Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους παρουσιάζει πολυπλοκότητα. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους προκύπτει ως συνάρτηση της πυκνότητας και της σύστασης του. Κάποιοι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι:

- Ο τύπος του εδάφους.
- Το μέγεθος των κόκκων στο έδαφος.
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους.
- Τα διαλυμένα άλατα στο νερό που περιέχεται στο έδαφος.
- Η θερμοκρασία και η πίεση.
- Η ένταση του πεδίου (voltage gradient).
- Η μορφή της τάσης.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η μεταβολή για την ειδική αντίσταση ενός εδάφους συναρτήσει της εποχικότητας και με βάση τους παράγοντες υγρασίας, θερμοκρασίας και αλατότητας:



Σχήμα 4.5 Εποχική μεταβολή για την ειδική αντίσταση του εδάφους σε περίοδο 4 ετών[8]



Σχήμα 4.6 Τρόπος που επιδρούν η υγρασία, η θερμοκρασία και η αλατότητα στην ειδική αντίσταση του εδάφους[8]

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ειδική αντίσταση διαφόρων τύπων εδάφους, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020:

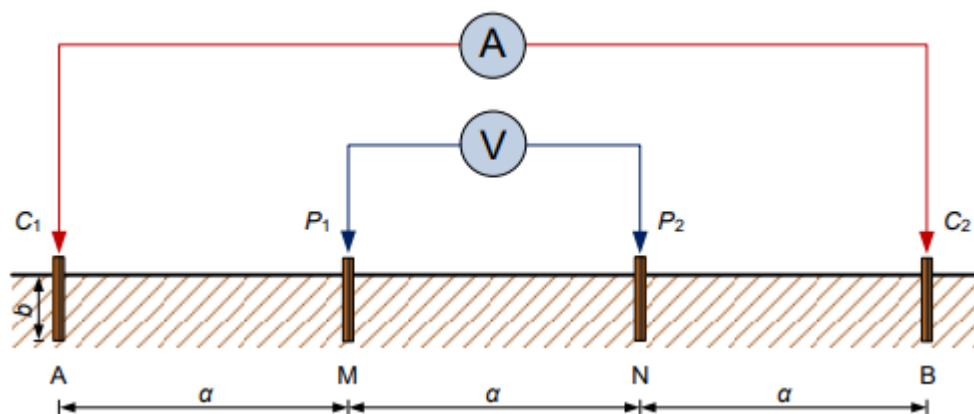
Φύση του εδάφους	Ειδική αντίσταση [Ω·m]
Βαλτώδες έδαφος	μερικές μονάδες – 30
Προσχώσεις	20 – 100
Μαυρόχωμα	10 – 150
Υγρή τύρφη	5 – 100
Μαλακή άργιλος	50
Μάργα και συμπκνωμένη άργιλος	100 – 200
Ιουρασική μάργα	30 – 40
Αργιλώδης άμμος	50 – 500
Πυριτική άμμος	200 – 3.000
Γυμνό πετρώδες έδαφος	1.500 – 3.000
Πετρώδες έδαφος καλυμμένο με χλόη	300 – 500
Μαλακός ασβεστόλιθος	100 – 300
Συμπαγής ασβεστόλιθος	1.000 – 5.000
Ρηγματωμένος ασβεστόλιθος	500 – 1.000
Σχιστόλιθος	50 – 300
Μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος	800
Γρανίτης και ψαμμίτης ανάλογα με τη φθορά	1.500 – 10.000
Γρανίτης και πολύ τροποποιημένος ψαμμίτης	100 – 600

Πίνακας 4.1 Ειδική αντίσταση διαφόρων τύπων εδάφους σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 60364:2020

Όπως γίνεται αντιληπτό, η πολυπλοκότητα που παρουσιάζει η μέτρηση της ειδικής αντίστασης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών τεχνικών, οι οποίες παρουσιάζουν εξίσου καλά αποτελέσματα. Ορισμένες από αυτές είναι:

-Μέθοδος Wenner

Η διάταξη της συγκεκριμένης μεθόδου φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 4.7 Διάταξη ηλεκτροδίων για την μέθοδο Wenner[9]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, γίνεται χρήση τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων, που τοποθετούνται εντός ευθείας γραμμής και ισαπέχουν ανάμεσα τους απόσταση  $a$ . Το κάτω άκρο αυτών των ηλεκτροδίων τοποθετείται μερικώς στο έδαφος, ενώ το πάνω άκρο τους, χρησιμοποιείται για σύνδεση με ένα όργανο μέτρησης, το γειωσόμετρο. Το ρεύμα κυκλοφορεί ανάμεσα στα ηλεκτρόδια στην άκρη και, μεταξύ των δυο μεσαίων ηλεκτροδίων, γίνεται μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Η διαφορά δυναμικού διαιρεμένη με το ρεύμα ορίζουν τη φαινόμενη αντίσταση και εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση ενός εδάφους. Η τιμή φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους  $\rho_a$  εξάγεται ως εξής:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + 2a / \sqrt{a^2 + 4b^2} - a / \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4.6.1)$$

όπου:

R: είναι η φαινόμενη αντίσταση

a: η απόσταση ανάμεσα στα βοηθητικά ηλεκτρόδια

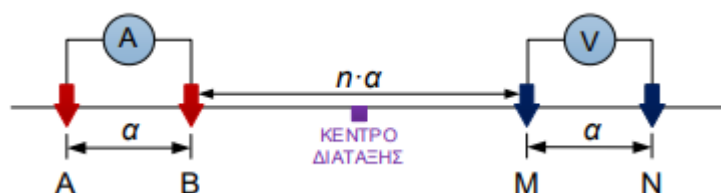
b: το βάθος που έχουν τοποθετηθεί τα ηλεκτρόδια

-Μέθοδος Διπόλου-Διπόλου

Η διάταξη αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει δυο ηλεκτρόδια ρεύματος A και B σε απόσταση  $a$  και δυο ηλεκτρόδια δυναμικού M και N, που βρίσκονται, και αυτά, σε απόσταση  $a$ . Η απόσταση ανάμεσα σε αυτά τα ζεύγη είναι υποχρεωτικά ακέραιο πολλαπλάσιο αυτής των ατομικών ζευγών, επομένως ισούται με  $n \cdot a$ . Για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στη διάταξη διπόλου-διπόλου χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\rho_a = \pi a \cdot \frac{\Delta U}{I} \cdot n(n+1)(n+2) \quad (4.6.2)$$

Σχηματικά οι συνδεσμολογίες θα είναι:



Σχήμα 4.8 Διάταξη ηλεκτροδίων για την μέθοδο Διπόλου-Διπόλου[9]

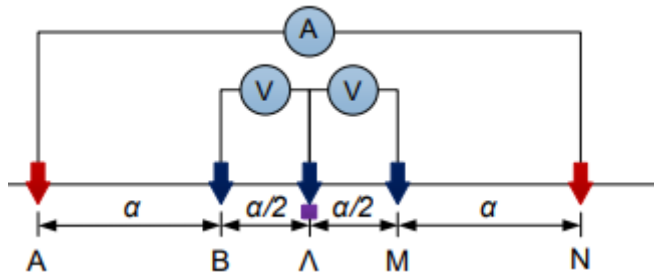


### -Μέθοδος Lee

Η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει ομοιότητες με τη Wenner με τη διαφορά ότι, στο κέντρο της διάταξης, τοποθετείται ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού. Με αυτό τον τρόπο, πραγματοποιούμε δυο μετρήσεις (μια για το αριστερό και μια για το δεξί μέρος της διάταξης), χωρίς να χρειαστεί να μετακινήσουμε τα ηλεκτρόδια ρεύματος. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στη διάταξη Lee χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\rho_a = 4\pi\alpha \cdot \frac{\Delta U_{MA}}{I} \quad \text{ή} \quad \rho_a = 4\pi\alpha \cdot \frac{\Delta U_{NA}}{I} \quad (4.6.3)$$

Σχηματικά θα έχουμε:



Σχήμα 4.9 Διάταξη ηλεκτροδίων για την μέθοδο Lee[9]

Βέβαια, το δυσκολότερο κομμάτι του υπολογισμού της ειδικής αντίστασης ενός εδάφους δεν είναι η μεθοδολογία που θα χρησιμοποιήσουμε για την μέτρηση, αλλά η ερμηνεία των τιμών για τη φαινόμενη ειδική αντίσταση που εξάγονται από μετρήσεις στον εκάστοτε εξεταζόμενο χώρο. Ο βασικός σκοπός είναι η δημιουργία ενός μοντέλου εδάφους που θα προσεγγίζει στον καλύτερο δυνατό βαθμό το πραγματικό έδαφος. Τα μοντέλα για την ειδική αντίσταση του εδάφους που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι:

### -Ομοιογενές μοντέλο

Το ομοιογενές μοντέλο εδάφους χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε περιπτώσεις ύπαρξης μέτριας διαφοροποίησης στη φαινόμενη ειδική αντίσταση. Οι υπολογισμοί, με βάση το ομοιογενές μοντέλο, μπορούν να είναι εξαιρετικά ακριβείς σε ομοιογενή εδάφη, ωστόσο τέτοιου είδους εδάφη δεν συναντώνται συχνά στην πραγματικότητα. Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης εδάφους στο ομοιογενές μοντέλο, παίρνουμε τον μέσο όρο των μετρηθεισών φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (4.6.4)$$

-Διστρωματικό μοντέλο

Το διστρωματικό μοντέλο (two-layer soil model) αποτελεί μια καλή εναλλακτική λύση για περιπτώσεις στις οποίες η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σε αξιοσημείωτο βαθμό με το βάθος. Για την εξαγωγή του μοντέλου απαιτείται πλήθος μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος αποστάσεων μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων μέτρησης. Μάλιστα, σε πολλές περιπτώσεις εδαφών η μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σ' έναν μόνο άξονα (κατεύθυνση) δεν είναι αρκετή και απαιτείται η επανάληψη των μετρήσεων σε περισσότερους του ενός άξονες. Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπαρίσταται από ένα ανώτερο στρώμα πεπερασμένου πάχους που έχει ως αρχή την επιφάνεια του εδάφους και από ένα κατώτερο στρώμα απείρου θεωρητικά πάχους το οποίο βρίσκεται κάτω από το άνω στρώμα. Ο απότομος βαθμός αλλαγής της ειδικής αντίστασης στα όριά τους, μεταβαίνοντας από το ένα στρώμα στο άλλο, περιγράφεται από τον συντελεστή ανάκλασης, ο οποίος ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (4.6.5)$$

όπου  $\rho_1$  και  $\rho_2$  οι ειδικές αντιστάσεις του ανώτερου και κατώτερου στρώματος αντίστοιχα.

## **4.7 Μέτρα προστασίας στα συστήματα γείωσης**

### **4.7.1 Πρότυπα και κανονισμοί**

Η σχεδίαση-εγκατάσταση των συστημάτων γείωσης διέπεται από πρότυπα και κανονισμούς που έχουν ως στόχο να προστατεύσουν τα άτομα, τα ζώα, αλλά και τα αγαθά εντός των περιοχών με ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Δεν επιδέχονται παραλείψεις ή παρερμηνείες, καθώς μας καθοδηγούν στον τρόπο που θα ασφαλίσουμε τις εγκαταστάσεις που επιθυμούμε στον μέγιστο βαθμό. Σε περίπτωση που δεν τηρηθούν, μπορούν να αναπτυχθούν στην επιφάνεια της γης δυναμικά ικανά να προκαλέσουν ατυχήματα ηλεκτροπληξίας και όχι μόνο. Ορισμένες συνθήκες που οδηγούν σε τέτοια ατυχήματα είναι:

- Ρεύμα σφάλματος υψηλής έντασης, για τα δεδομένα της έκτασης και της αντίστασης γείωσης του συστήματος γείωσης.

-Δημιουργία υψηλών δυναμικών στην επιφάνεια της γης, εξαιτίας της τιμής ειδικής αντίστασης του εδάφους ή της κατανομής των ρευμάτων εδάφους.

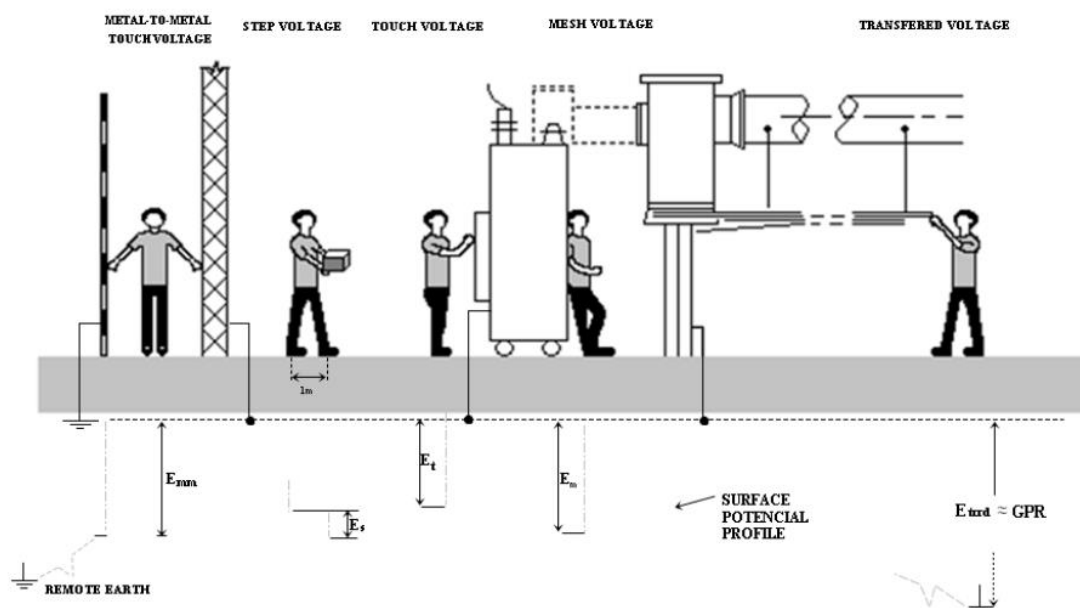
-Ακούσια ύπαρξη ενός ατόμου σε τέτοιο χρόνο και θέση, που συνδέει δια του σώματος του δυο σημεία που έχουν υψηλή διαφορά δυναμικού.

-Το σφάλμα και η επαφή σώματος διαρκούν μεγάλο χρονικό διάστημα, προκαλώντας ζημιές στον ανθρώπινο οργανισμό, δεδομένης της υψηλής ροής ρεύματος μέσα του.

Διεθνώς, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή συμμορφώνει με τις συστάσεις της όλα τα πρότυπα και τους κανονισμούς. Ορισμένα από τα πρότυπα που θα ληφθούν υπόψιν στο τρέχον κεφάλαιο είναι το ANSI/IEEE Std 80-2000, το IEC 60479-1:2018 και το ΕΛΟΤ EN 62305-3:2011.

#### 4.7.2 Επιτρεπτά όρια τάσης

Στην παρακάτω εικόνα, φαίνονται οι βασικές περιπτώσεις ηλεκτροπληξίας με βάση το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000:



Σχήμα 4.10 Βασικές περιπτώσεις ηλεκτροπληξίας[10]

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι κίνδυνοι και τα όρια ασφαλείας των τάσεων που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα:

-Τάση επαφής ανάμεσα σε δυο μεταλλικές επιφάνειες

Είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δυο μεταλλικά αντικείμενα, τα οποία βρίσκονται σε άμεση σύνδεση διαμέσου επαφής χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι. Εμφανίζεται σε περιπτώσεις που μεταλλικά αντικείμενα, όπως σωλήνες ή φράχτες

δεν είναι συνδεδεμένα με το πλέγμα γείωσης. Πρακτικά, είναι αρκετά πολύπλοκο να υπολογίσουμε αυτού του είδους τις τάσεις και ο μόνος τρόπος που μπορούμε να περιορίσουμε τους κινδύνους που οφείλονται στην επαφή ανάμεσα στις μεταλλικές επιφάνειες είναι να δημιουργούμε σύνδεση πιθανών επικίνδυνων σημείων με το πλέγμα γείωσης.

-Βηματική τάση

Βηματική τάση ορίζουμε τη διαφορά δυναμικού που βιώνει ένας άνθρωπος στην επιφάνεια της γης, του οποίου τα πόδια απέχουν 1m και δεν βρίσκεται σε επαφή με κανένα αντικείμενο, που είναι γειωμένο. Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος ορίζουμε τα όρια για μια μέγιστη τιμή βηματικής τάσης και είναι:

-Για βάρος σώματος 50 kg:

$$E_{step} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.7.2.1)$$

-Για βάρος σώματος 70 kg:

$$E_{step} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.7.2.2)$$

όπου:

$C_s$ : είναι συντελεστής που ορίζεται ως:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (4.7.2.3)$$

$\rho_s$ : είναι η ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας

$t_s$ : είναι η διάρκεια του ρεύματος

-Τάση επαφής

Τάση επαφής ορίζουμε τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο δυναμικό στην επιφάνεια της γης και στην ανύψωση δυναμικού γης, τη στιγμή που ένα άτομο στέκεται και, ταυτόχρονα, έχει το ένα χέρι του σε επαφή με μία κατασκευή, η οποία είναι γειωμένη. Όμοια, ορίζουμε τα όρια για μια μέγιστη τιμή τάσης επαφής και είναι:

-Για βάρος σώματος 50 kg:

$$E_{touch} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.7.2.4)$$

-Για βάρος σώματος 70 kg:

$$E_{touch} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.7.2.5)$$

-Μεταφερόμενη τάση

Η μεταφερόμενη τάση είναι μία ιδιαίτερη περίπτωση τάσης επαφής, όπου γίνεται μεταφορά τάσης μέσα ή έξω από κάποια εγκατάσταση από ή προς κάποιο απομακρυσμένο εξωτερικό σημείο. Συνήθως, συναντάμε την μεταφερόμενη τάση σε δύο περιπτώσεις:

-Όταν ένας άνθρωπος εντός της περιοχής του συστήματος γείωσης, βρίσκεται σε επαφή με κάποιον γειωμένο αγωγό σε απομακρυσμένο σημείο.

-Όταν ένας άνθρωπος στέκεται σε ένα απομακρυσμένο σημείο και βρίσκεται σε επαφή με κάποιον αγωγό, συνδεδεμένο με το πλέγμα γείωσης του συστήματος.

Λόγω της πολυπλοκότητας του, δεν κρίνεται καθόλου συμφέρον να σχεδιαστεί ένα πλέγμα γείωσης που θα βασίζεται στην τάση επαφής, που έχει προκληθεί από κάποια εξωτερική μεταφερόμενη τάση. Συνεπώς, ο συνηθέστερος τρόπος που αντιμετωπίζουμε τους κινδύνους από τέτοιου είδους τάσεις είναι η χρήση συσκευών απομόνωσης.

### **4.7.3 Επιτρεπτά όρια ρεύματος και αντίσταση του ανθρώπινου σώματος**

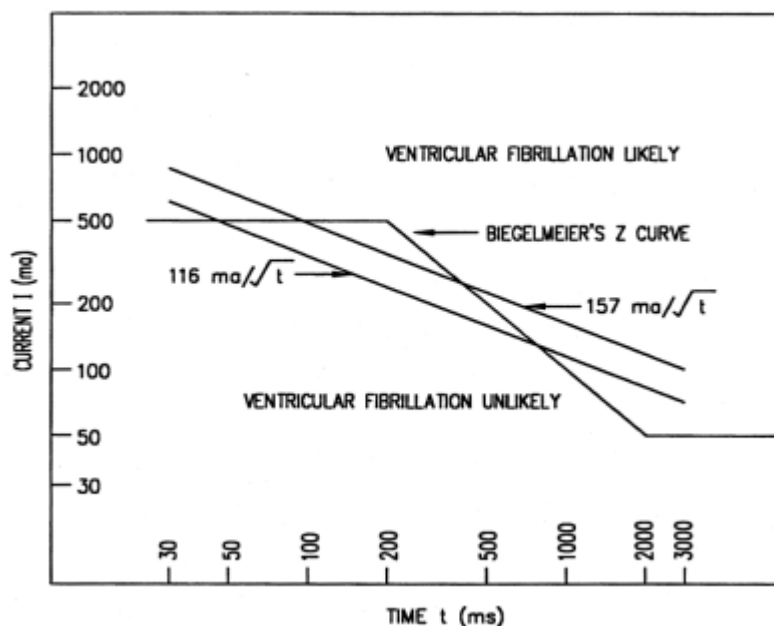
Η αντίσταση του οργανισμού του ανθρώπου απαρτίζεται από ωμικά και χωρητικά στοιχεία και εξαρτάται από:

- τη διαδρομή του ρεύματος μέσα στο σώμα
- το είδος και την τιμή της τάσης επαφής
- τη διάρκεια του φαινομένου
- την υγρασία του δέρματος
- την ασκούμενη πίεση
- τη θερμοκρασία
- την επιφάνεια της επαφής

Η αντίσταση μετριέται στη διαδρομή χέρι-χέρι ή χέρι-πόδι, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις το ρεύμα διέρχεται της καρδιάς. Η αντίσταση στην έναρξη της επαφής στην διαδρομή χέρι-χέρι ή χέρι-πόδι για 50 ή 60 Hz θεωρείται προσεγγιστικά 1000Ω σε ποσοστό 95% του πληθυσμού, 750Ω σε ποσοστό 50% και 500Ω σε ποσοστό 5%. Η συνολική αντίσταση του ανθρώπινου οργανισμού για τάση 25 έως 200V κυμαίνεται από 1,5kΩ έως μερικά ΜΩ.

Όσον αφορά το ηλεκτρικό ρεύμα, για να καθορίσουμε τα όρια ασφαλείας ενός συστήματος γείωσης, πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας τη συχνότητα, την ένταση και την διάρκεια του.

Ως όριο αντίληψης, δηλαδή ως ελάχιστη τιμή του ρεύματος που γίνεται αντιληπτή, θεωρούμε τα 1 έως 2 mA. Ως όριο απαγκίστρωσης, δηλαδή ως μέγιστη τιμή του ρεύματος επαφής που ένα άτομο μπορεί να ελευθερωθεί από το ηλεκτρόδιο, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή, θεωρούμε τα 5 έως 10mA. Μεγαλύτερες τιμές ρεύματος οδηγούν σε μυϊκές συσπάσεις, ενώ ακόμα μεγαλύτερες (περίπου 60mA) μπορούν να προκαλέσουν και καρδιακές ανακοπές. Σε συχνότητα 50 ή 60 Hz το όριο που ορίζουμε ως αυτό που μπορεί να προκαλέσει θάνατο είναι 0,1 A. Το ρεύμα που διαρρέει το σώμα του ανθρώπου συναρτηίσει του χρόνου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.11 Ρεύμα που διαρρέει το σώμα του ανθρώπου συναρτηίσει του χρόνου[11]

#### 4.7.4 Ηλεκτροχημική διάβρωση και επιλογή υλικών ηλεκτροδίων γείωσης

Η ηλεκτροχημική διάβρωση είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα υλικά των συστημάτων γείωσης. Παρατηρείται όταν δύο διαφορετικά μέταλλα

έρχονται σε επαφή, ταυτόχρονα με την εμφάνισή τους σε ένα αγώγιμο υγρό, τον ηλεκτρολύτη. Τότε, η άνοδος, που ονομάζεται το υλικό που είναι λιγότερο ευγενές (χημικά ενεργό) διαβρώνεται έντονα, ενώ η κάθοδος, που ονομάζεται το υλικό που είναι περισσότερο ευγενές (χημικά αδρανές) παραμένει σχετικά αλώβητο. Η φύση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης επηρεάζεται από το πόσο κοντά είναι η «ευγένεια» που χαρακτηρίζει τα δυο μέταλλα, από τη αναλογία της επιφάνειας ανάμεσα τους και από το πόσο αγώγιμος είναι ο ηλεκτρολύτης. Οι περισσότεροι θεωρούν ότι χρησιμοποιώντας διμεταλλικές επαφές ή επικαλύπτοντας τις συνδέσεις με πίσσα ή ακόμα πραγματοποιώντας τη σύνδεση μέσα στο φρεάτιο, εξαλείφουν πλήρως τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Δυστυχώς, αυτή είναι μια λανθασμένη αντίληψη και μπορεί να επιφέρει τον περιορισμό της διάρκειας ζωής μιας γείωσης σε μερικούς μόλις μήνες. Αυτό συμβαίνει διότι, ναι μεν με τα παραπάνω μέτρα αποφεύγεται η διάβρωση στη σύνδεση μεταξύ τους, αλλά η ύπαρξη τους στο ίδιο μέσο, το χώμα, ευνοεί την ηλεκτρόλυση, με αποτέλεσμα τη διάβρωση του λιγότερο ευγενούς υλικού. Οι βασικότεροι τρόποι αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου είναι η επίστρωση ή βαφή του ανώτερου μετάλλου, η επιλογή διαλυμάτων με σχετικά χαμηλή αγωγιμότητα, ενώ θα πρέπει και τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται να μην έχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην αναλογία τους.

Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψιν αυτό το φαινόμενο, αλλά και επιζητώντας καλή μηχανική αντοχή και γενικότερη αντοχή στις διαβρώσεις, πρέπει να επιλέγουμε τα κατάλληλα υλικά ηλεκτροδίων γείωσης. Στο πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 αναφέρονται κάποια υλικά που χρησιμοποιούνται επί το πλείστον όπως:

#### -Χαλκός

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό, καθώς παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και μηχανική αντοχή.

#### -Επιχαλκωμένος χάλυβας

Χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις υπόγειων ηλεκτροδίων και, σπανίως, ως πλέγμα γείωσης.

#### -Χάλυβας

Έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τον χαλκό, αλλά έχει χαμηλότερο κόστος και συμβάλλει στην μείωση γαλβανικών φαινομένων μεταξύ διαφορετικών μετάλλων μέσα στη γη

#### -Αλουμίνιο

Χρησιμοποιείται σπανιότερα, καθώς μπορεί να διαβρωθεί από μόνο του σε συγκεκριμένα εδάφη.

Στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 62305-3:2011 παρέχονται οδηγίες για τη σωστή χρήση υλικού ηλεκτροδίων γείωσης σε σχέση με την αντοχή του στη διάβρωση:

Υλικό	Συνιστώμενη χρήση		Αντοχή σε διάβρωση		
	Στο έδαφος	Στο σκυρόδεμα	Άριστη	Μειωμένη	Καμία
Χαλκός	Συμπαγής Πολύκλωνος <sup>1</sup> Ως επικάλυψη <sup>2</sup>	Συμπαγής Πολύκλωνος <sup>1</sup> Ως επικάλυψη <sup>2</sup>	Σκυρόδεμα, υγρά εδάφη, περιβάλλον με χλωριούχα άλατα	Θειούχο περιβάλλον, όξινα και οργανικά εδάφη	
Χάλυβας θερμά επιψευδαργυρωμένος <sup>3</sup>	Συμπαγής	Συμπαγής	Σκυρόδεμα, σε ξηρά ουδέτερα εδάφη	Περιβάλλον με χλωριούχα άλατα	Σε επαφή με χαλκό
Χάλυβας επιχαλκωμένος <sup>2</sup>	Συμπαγής	Συμπαγής	Σκυρόδεμα, υγρά εδάφη, περιβάλλον με χλωριούχα άλατα	Θειούχο περιβάλλον, όξινα και οργανικά εδάφη	
Ανοξειδωτος χάλυβας	Συμπαγής Πολύκλωνος	Συμπαγής Πολύκλωνος	Σε κάθε περιβάλλον πλην ολίγων εξαιρέσεων	Περιβάλλον με χλωριούχα άλατα	
Αλουμίνιο	Ακατάλληλη	Ακατάλληλη	Περιβάλλον με μικρή συγκέντρωση διοξειδίου του θείου	Σε αλκαλικό περιβάλλον	Σε επαφή με χαλκό

Πίνακας 4.2 Προτεινόμενη χρήση υλικού ηλεκτροδίων γείωσης σε σχέση την αντοχή του σε διάβρωση, με βάση το ΕΛΟΤ 62305-3:2011

#### 4.8 Σχεδιασμός συστημάτων γείωσης

Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης στόχος μας είναι η επίτευξη βέλτιστου δυνατού επιπέδου ασφάλειας ταυτόχρονα με ένα αποδεκτό κόστος. Στο τρέχον κεφάλαιο, θα περιγράψουμε αναλυτικά τη διαδικασία σχεδιασμού, όπως αυτή παρουσιάζεται στο πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000.

-Αρχικά, απαιτείται αναλυτική μελέτη του εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί, έχοντας μετρήσει την ειδική αντίσταση του και έχοντας καθορίσει το μοντέλο που απαιτείται (ομοιογενές, διστρωματικό κλπ).

-Υπολογίζουμε τα μέγιστα επιτρεπτά όρια για τις βηματικές τάσης και τάσης επαφής, με τον τρόπο υπολογισμού που έχει υποδειχθεί παραπάνω.



-Καθορίζουμε την τιμή του μέγιστου ρεύματος πλέγματος  $I_G$  το οποίο υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (4.8.1)$$

Όπου  $D_f$  είναι ο συντελεστής εξασθένισης και  $I_g$  είναι ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος.

Ο συντελεστής  $D_f$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D_f = \frac{I_F}{I_f} \quad (4.8.2)$$

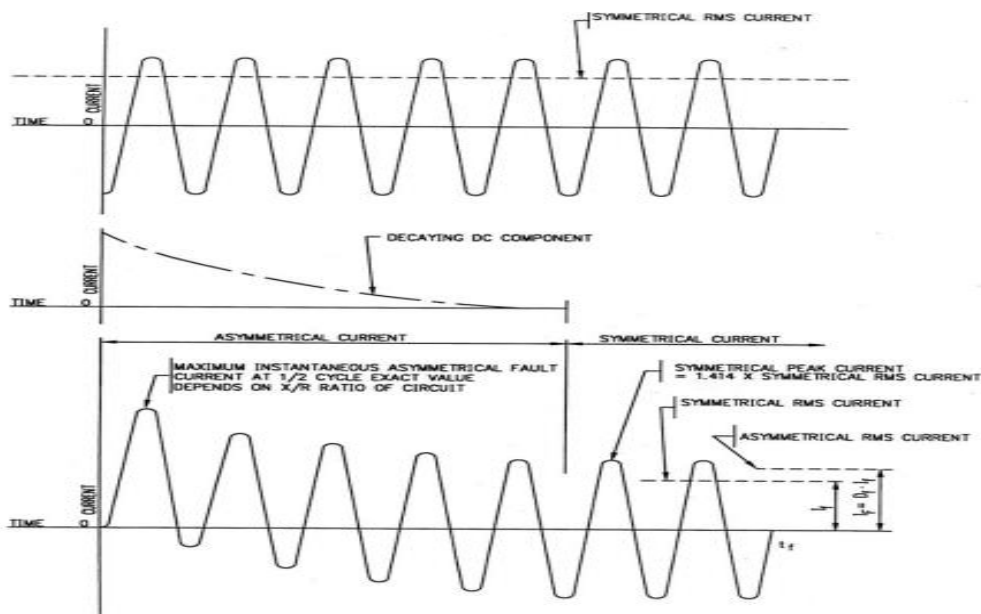
όπου  $I_f$  είναι η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος και  $I_F$  είναι το ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος.

Το συμμετρικό ρεύμα πλέγματος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (4.8.3)$$

Όπου  $S_f$  είναι ο συντελεστής καταμερισμού για το ρεύμα σφάλματος. Ο συντελεστής  $S_f$  εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως από τη θέση που συμβαίνει το σφάλμα, από την αντίσταση του πλέγματος γείωσης, από αγωγούς προστασίας και από θαμμένα καλώδια και σωλήνες, μεταλλικά θωρακισμένα στην περιοχή ή συνδεδεμένα απευθείας στο σύστημα γείωσης

Παρακάτω, φαίνεται σχηματικά η σχέση που έχουν οι πραγματικές τιμές του ρεύματος σφάλματος και οι τιμές  $I_F$ ,  $I_f$ , και  $D_f$  για σφάλμα διάρκειας  $t_f$ :



Σχήμα 4.12 Σχέση των πραγματικών τιμών του ρεύματος σφάλματος με τις τιμές  $I_F$ ,  $I_f$ , και  $D_f$  για σφάλμα διάρκειας  $t_f$  [10]

-Υπολογίζουμε την αντίσταση γείωσης του εδάφους, προκειμένου να προσδιορίσουμε τις ηλεκτρικές ιδιότητες του.

-Υπολογίζουμε την ανύψωση δυναμικού γης(GPR).Σε περίπτωση που παρουσιάζει τιμή μικρότερη του επιτρεπτού ορίου της τάσης επαφής δεν απαιτείται περεταίρω μελέτη.

-Υπολογίζουμε τις τάσεις βρόχου και βηματικές τάσεις.

-Αν οι τάσεις που υπολογίσαμε βρίσκονται εντός των καθορισμένων ορίων, τότε για να ολοκληρωθεί η σχεδίαση, απαιτείται μόνο να προστεθούν οι συνδέσεις των συσκευών, που βρίσκονται στον υποσταθμό, στο σύστημα γείωσης.

-Αν οι τάσεις που υπολογίσαμε βρίσκονται εκτός ορίων, τότε είναι απαραίτητη η αναθεώρηση του σχεδιασμού και, για να επιτευχθεί βελτίωση, κρίνεται αναγκαίο να πυκνωθεί το πλέγμα γείωσης ή να αυξηθεί η επιφάνεια του συστήματος γείωσης.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω βήματα, μπορούμε να επιτύχουμε τον σχεδιασμό ενός ικανοποιητικού συστήματος γείωσης, που θα εκτονώνει τα αναπτυσσόμενα ηλεκτρικά ρεύματα παρέχοντας την ανάλογη προστασία στους ανθρώπους γύρω του, αλλά και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του.

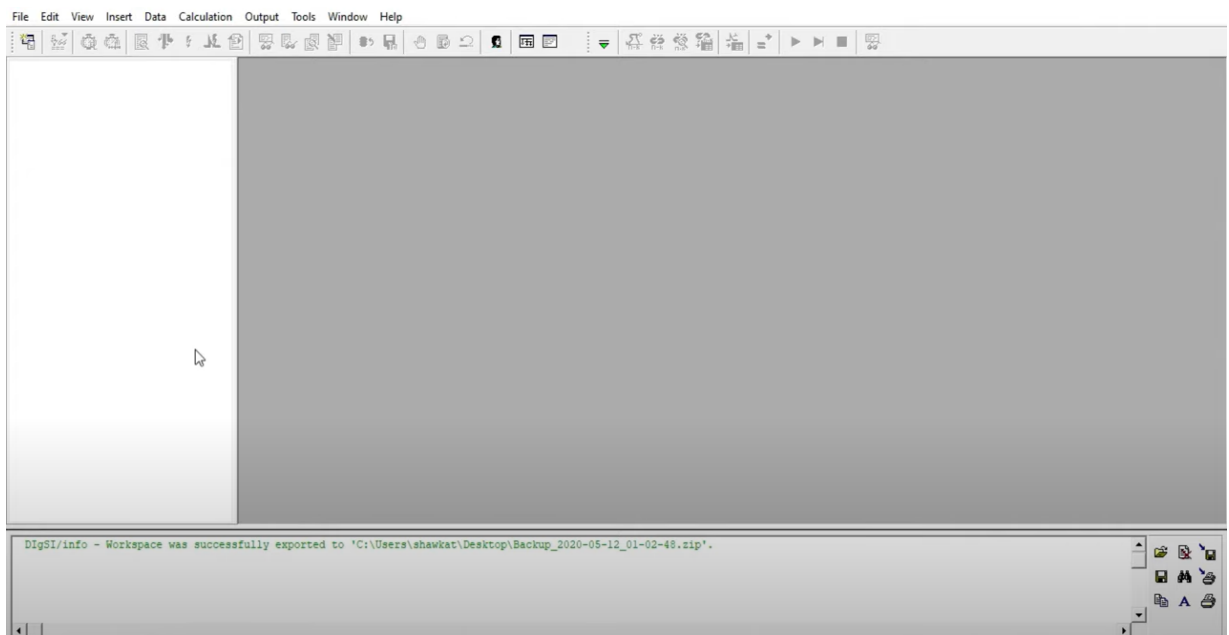
# Κεφάλαιο 5

## Υπολογιστική Προσομοίωση Σφαλμάτων σε Αιολικό Πάρκο

### 5.1 Περιγραφή του λογισμικού *Powerfactory*

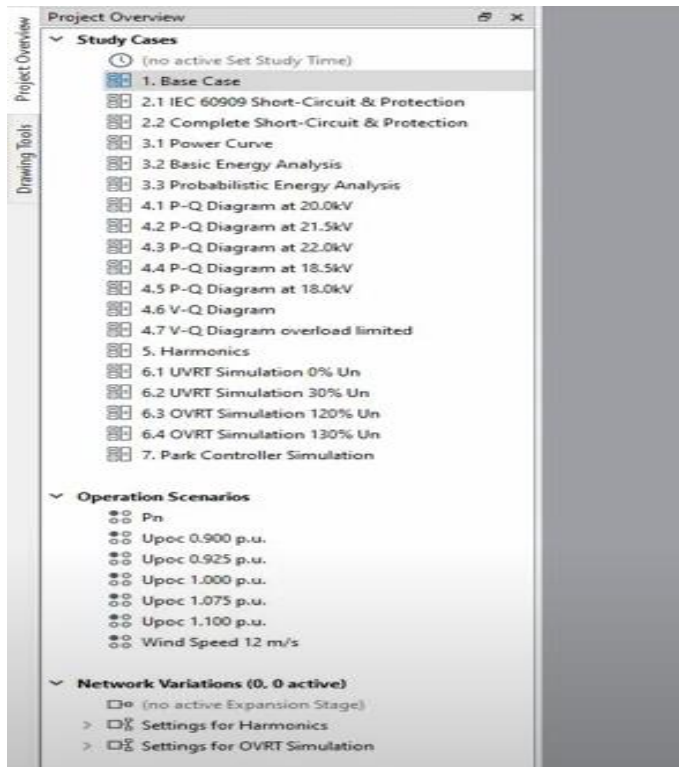
Όπως γίνεται αντιληπτό και στα παραπάνω κεφάλαια, ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης με χρήση διεθνών προτύπων είναι μια αρκετά πολύπλοκη και επίπονη διαδικασία. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ειδικών λογισμικών που προσομοιώνουν βραχυκυκλώματα σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Powerfactory της εταιρείας DigSILENT. Το Powerfactory είναι ένα προηγμένο λογισμικό για την ανάλυση και τον σχεδιασμό ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος. Καλύπτει μεγάλο φάσμα λειτουργικότητας, από βασικές λειτουργίες έως πολύπλοκες εφαρμογές, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η καταναμημένη παραγωγή, η προσομοίωση πραγματικού χρόνου και η παρακολούθηση απόδοσης για δοκιμές και επίβλεψη συστημάτων. Το λογισμικό παρέχει εύκολο περιβάλλον χρήσης και προηγμένες δυνατότητες παρουσίασης των αποτελεσμάτων και προσφέρει δυνατότητες συνεργασίας και ενσωμάτωσης με άλλα λογισμικά και πρωτόκολλα στο πεδίο της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακολούθως, θα γίνει μια σύντομη επεξήγηση του τρόπου χρήσης του λογισμικού. Το περιβάλλον του Powerfactory φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



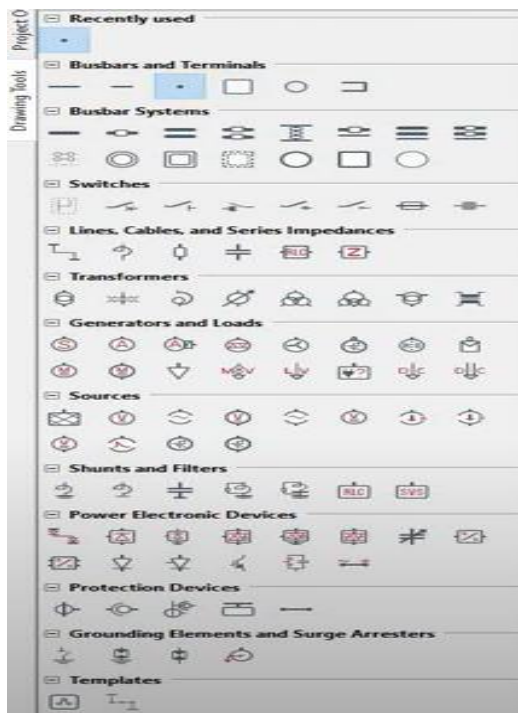
Εικόνα 5.1 Περιβάλλον του λογισμικού *Powerfactory*

Για τον σχεδιασμό του δικτύου που επιθυμούμε, επιλέγουμε **New project** και δημιουργούμε ένα study case:



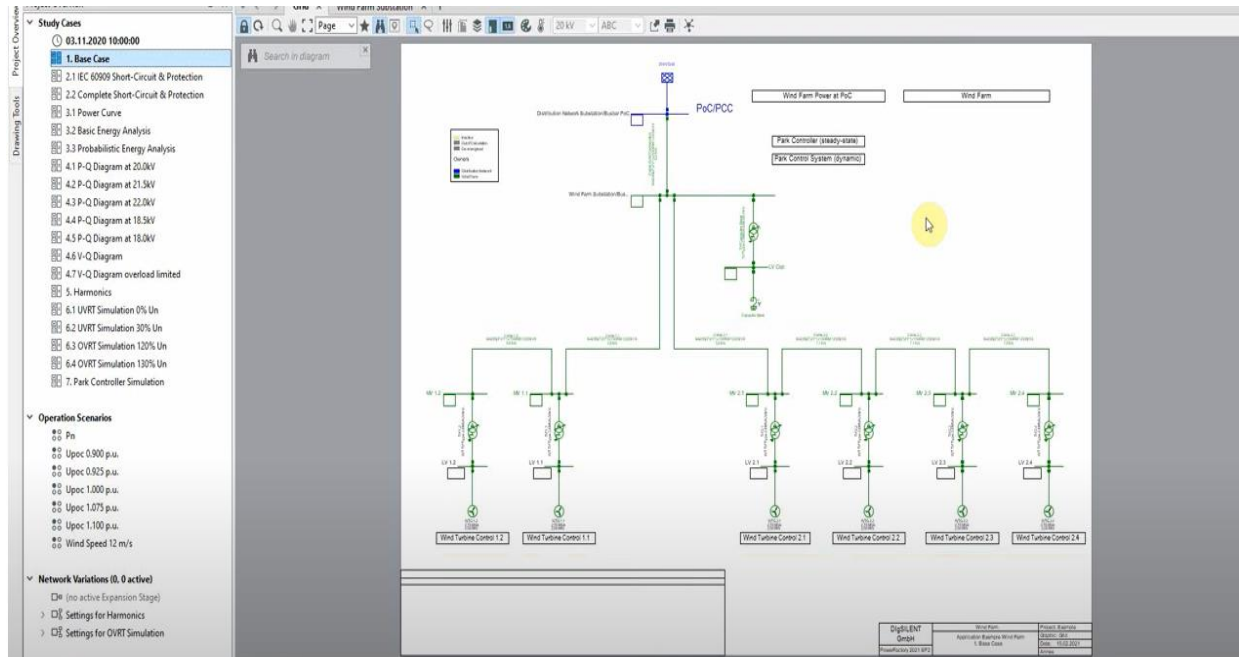
Εικόνα 5.2 Study Cases του Powerfactory

Για τον σχεδιασμό του συστήματος χρησιμοποιούμε τα εργαλεία σχεδιασμού:



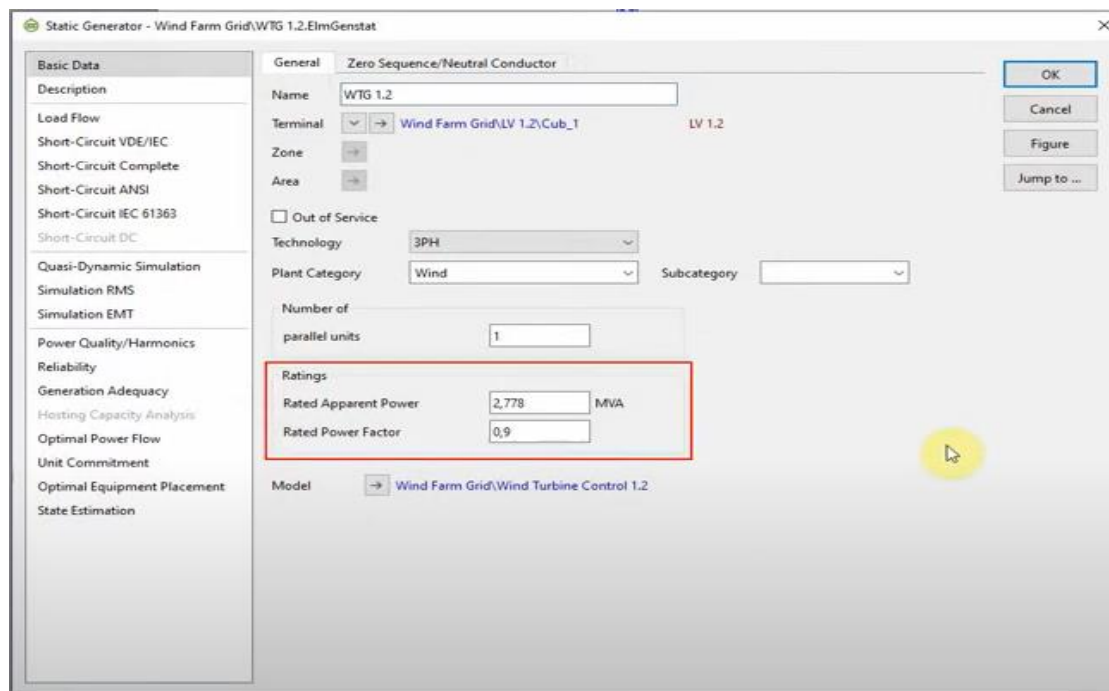
Εικόνα 5.3 Εργαλεία Σχεδιασμού

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να μελετήσουμε ένα αιολικό πάρκο που θα έχει, για παράδειγμα, την ακόλουθη μορφή:



Εικόνα 5.4 Αιολικό πάρκο στο Powerfactory

Στη συνέχεια, ορίζουμε τις τιμές που θέλουμε για το δίκτυο τροφοδότησης και τις ανεμογεννήτριες:

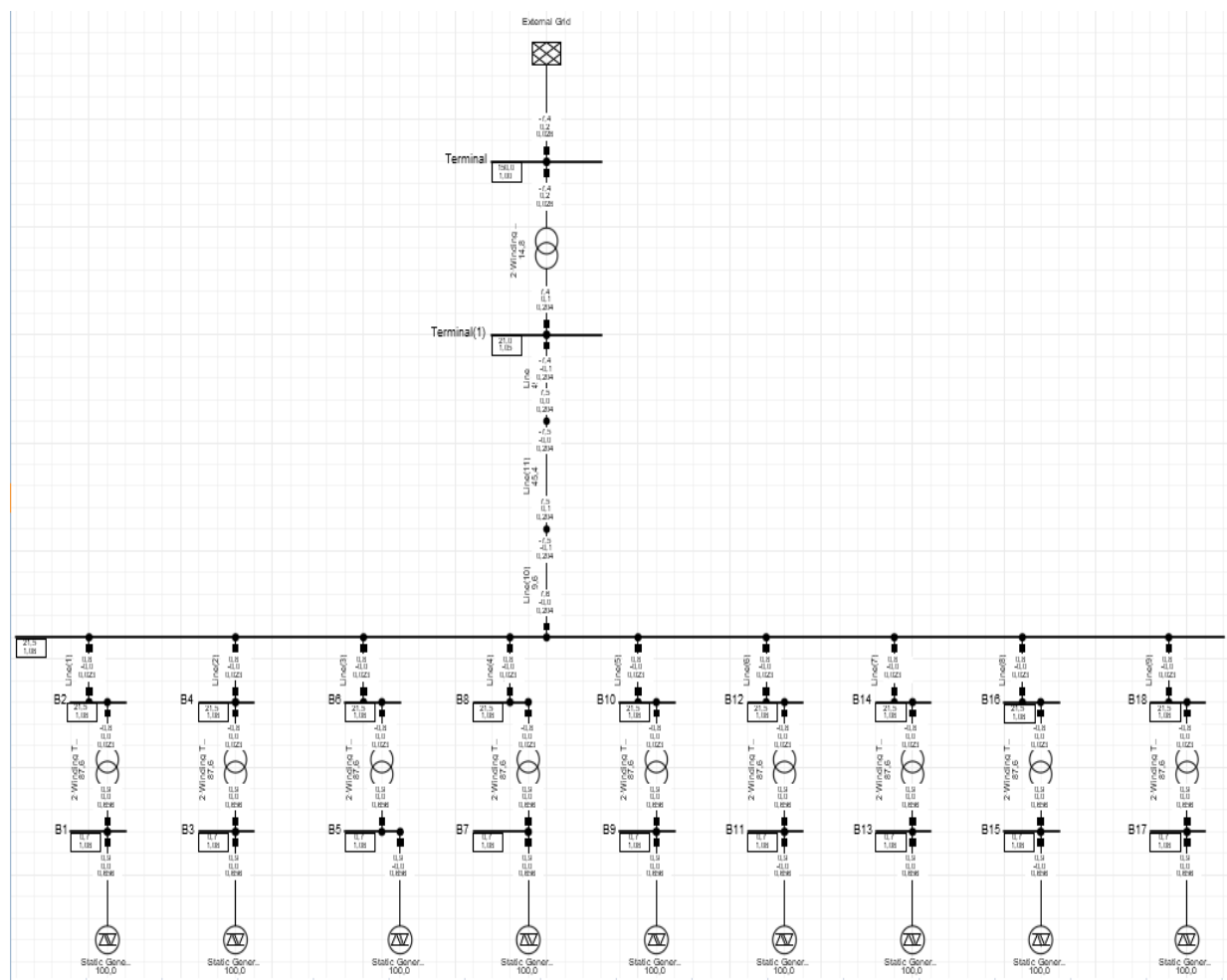


Εικόνα 5.5 Ορισμός παραμέτρων των ανεμογεννητριών

Έτσι, έχουμε δημιουργήσει ένα σύστημα για να προσομοιώσουμε τα σφάλματα που επιθυμούμε. Το Powerfactory μας δίνει τη δυνατότητα να εξάγουμε τις τιμές ρευμάτων σφάλματος που επιθυμούμε με χρήση του προτύπου IEC 60909, του προτύπου ANSI C 37.010, αλλά και της μεθόδου complete.

## 5.2 Προσομοίωση σφαλμάτων σε δίκτυο MT στο λογισμικό Powerfactory

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι αρκετά πολύπλοκος χωρίς τη χρήση κάποιου κατάλληλου λογισμικού. Χρησιμοποιήθηκε, λοιπόν, το Powerfactory για να προσομοιωθούν ασύμμετρα σφάλματα εντός ενός δικτύου διανομής μέσης τάσης με κατανεμημένη παραγωγή (Αιολικό Πάρκο). Συγκεκριμένα, η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ένα αιολικό πάρκο εννέα ανεμογεννητριών υπό συνθήκες σφάλματος. Το διάγραμμα του δικτύου, όπως αυτό προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα, φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα δικτύου διανομής MT που προσομοιώθηκε στο Powerfactory

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, το δίκτυο τροφοδότησης είναι συνδεδεμένο με τον ζυγό 150kV του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Στη συνέχεια, παρεμβάλλεται ένας Μ/Σ υποβιβασμού τάσης 150/21kV, ενώ, από τον ζυγό μέσης τάσης 21kV μέχρι το κέντρο ελέγχου του αιολικού πάρκου, γίνεται μεσολάβηση υπόγειου τριπολικού καλωδίου ΜΤ και εναέριας γραμμής ΜΤ. Οι ζυγοί χαμηλής τάσης(0,7kV)για τις εννέα ανεμογεννήτριες έχουν ονομαστεί Β1,Β3..Β17 και οι ζυγοί μέσης τάσης(21,5kV) έχουν ονομαστεί Β2,Β4...Β18.

Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό Powerfactory μας δίνει τη δυνατότητα να στηρίξουμε την προσομοίωση των ασύμμετρων σφαλμάτων στο πρότυπο IEC 60909, στο πρότυπο ANSI C 37.010 και στη μέθοδο complete. Με βάση, λοιπόν, αυτές τις τρεις μεθόδους κάναμε προσομοίωση για μονοφασικό σφάλμα(LG) και διφασικό σφάλμα προς γη(LLG).

Ανάλογα με τη μέθοδο, στην οποία στηριζόμαστε, μπορούμε να εξάγουμε από το λογισμικό αρκετές τιμές που εκφράζουν το βραχυκύκλωμα(ειδικά ρεύματα, ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κλπ).Ενδεικτικά, παρακάτω φαίνονται όλα τα αποτελέσματα που λάβαμε στον ζυγό χαμηλής(Β1) και μέσης(Β2) τάσης της πρώτης ανεμογεννήτριας για μονοφασικό και διφασικό σφάλμα:

#### B1

IEC60909 - 2016			complete			ANSI		
kA	Initial Short-Circuit Current A	20,897	kA	Initial Short-Circuit Current A	20,803	kA	Sym. Momentary Current	17,582
kA	Initial Short-Circuit Current B	0	kA	Initial Short-Circuit Current B	0	kA	Asym. Momentary Current, calculated	21,11
kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Current	22,479	kA	Momentary 3*10	17,582
kA	Peak Short-Circuit Current	45,752	kA	3*10	20,803	kA	3*10	17,582
kA	Short-Circuit Breaking Current	20,897	kA	Transient Neutral Current, Magnitude	0	kA	Sym. Momentary Current	17,582
kA	Short-Circuit Current	20,897	kA	Transient Zero-Sequence Current, Magnitude	6,726	kA	Asym. Momentary Current, Duty	28,131
kA	Initial Short-Circuit Current	20,897	kA	3*10'	20,803	kA	Asym. Momentary Peak Current, Duty	47,471
kA	Steady-State Short-Circuit Current	20,897	kA	Transient Positive-Sequence Current, Magnitude	6,726	kA	Asym. Momentary Current, calculated	21,11
kA	Thermal equivalent Short-Circuit Current	22,568	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	6,934	kA	Asym. Momentary Peak Current, calculated	36,548
kA	Initial Short-Circuit Current C	0	kA	Neutral Current, Magnitude	0	kA	Sym. Interrupting Current	17,582
kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	6,934	kA	Neutral Current, Magnitude	0
kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	6,966	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	6,934	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	5,861
kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	6,966	kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	5,861
p.u.	Zero-Sequence Impedance, Magnitude	0,433	kA	Initial Short-Circuit Current C	0	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	5,861
deg	Positive-Sequence Impedance, Angle	78,024				kA	2 cycle Sym. Interrupting Current	0
deg	Zero-Sequence Impedance, Angle	90				kA	Asym. Momentary Peak Current, calculated	36,548
p.u.	Positive-Sequence Impedance, Magnitude	5,513						
kA	Neutral Current, Magnitude	0						
kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Current	22,568						
kA	3*10	20,897						
kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	6,966						

Εικόνα 5.6 Υπολογισμοί μονοφασικού σφάλματος σε ζυγό χαμηλής τάσης(Β1)

B2								
IEC60909 - 2016			complete			ANSI		
kA	Initial Short-Circuit Current A	0,74	kA	Initial Short-Circuit Current A	0,724	kA	Sym. Momentary Current	0,663
kA	Initial Short-Circuit Current B	0	kA	Initial Short-Circuit Current B	0	kA	Asym. Momentary Current, calculated	0,663
kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	3*10'	0,724	kA	Momentary 3*10	0,663
kA	Peak Short-Circuit Current	1,356	kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Cu	0,753	kA	3*10	0,663
kA	Short-Circuit Breaking Current	0,74	kA	3*10	0,724	kA	Sym. Momentary Current	0,663
kA	Short-Circuit Current	0,74	kA	Transient Neutral Current, Magnitude	0	kA	Asym. Momentary Current, Duty	1,061
kA	Initial Short-Circuit Current	0,74	kA	Transient Zero-Sequence Current, Magnit	0,24	kA	Asym. Momentary Peak Current, Duty	1,791
kA	Steady-State Short-Circuit Current	0,74	kA	Transient Positive-Sequence Current, Ma	0,24	kA	Asym. Momentary Current, calculated	0,663
kA	Thermal equivalent Short-Circuit Current	0,77	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	0,241	kA	Asym. Momentary Peak Current, calculati	0,939
kA	Initial Short-Circuit Current C	0	kA	Neutral Current, Magnitude	0	kA	Sym. Interrupting Current	0,663
kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	0,241	kA	Neutral Current, Magnitude	0
kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	0,247	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	0,241	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	0,221
kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	0,247	kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	0,221
p.u.	Zero-Sequence Impedance, Magnitude	11,648	kA	Initial Short-Circuit Current C	0	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	0,221
deg	Positive-Sequence Impedance, Angle	65,149				kA	2 cycle Sym. Interrupting Current	0,663
deg	Zero-Sequence Impedance, Angle	7,735				kA	Asym. Momentary Peak Current, calculati	0,939
p.u.	Positive-Sequence Impedance, Magnitude	0,906						
kA	Neutral Current, Magnitude	0						
kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Current	0,77						
kA	3*10	0,74						
kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	0,247						

Εικόνα 5.7 Υπολογισμοί μονοφασικού σφάλματος σε ζυγό μέσης τάσης(B2)

B1								
IEC60909 - 2016			complete			ANSI		
kA	Initial Short-Circuit Current A	0	kA	Initial Short-Circuit Current A	0	kA	Sym. Momentary Current	19,23
kA	Initial Short-Circuit Current B	24,696	kA	Initial Short-Circuit Current B	24,515	kA	Asym. Momentary Current, calculated	23,112
kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	3*10'	41,624	kA	Momentary 3*10	32,147
kA	Peak Short-Circuit Current	0	kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Current	27,151	kA	3*10	32,147
kA	Short-Circuit Breaking Current	0	kA	3*10	41,624	kA	Sym. Momentary Current	19,23
kA	Short-Circuit Current	0	kA	Transient Neutral Current, Magnitude	0	kA	Asym. Momentary Current, Duty	30,768
kA	Initial Short-Circuit Current	0	kA	Transient Zero-Sequence Current, Magnitude	12,339	kA	Asym. Momentary Peak Current, Duty	51,922
kA	Steady-State Short-Circuit Current	0	kA	Transient Positive-Sequence Current, Magnitude	13,114	kA	Asym. Momentary Current, calculated	23,112
kA	Thermal equivalent Short-Circuit Current	0	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	13,875	kA	Asym. Momentary Peak Current, calculated	40,017
kA	Initial Short-Circuit Current C	25,321	kA	Neutral Current, Magnitude	0	kA	Sym. Interrupting Current	19,23
kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	14,747	kA	Neutral Current, Magnitude	0
kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	13,978	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	0,896	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	11,408
kA	Positive-Sequence Current, Magnitude	14,859	kA	Rated Short-Time Current (Tk)	0	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	0,693
p.u.	Zero-Sequence Impedance, Magnitude	0,433	kA	Initial Short-Circuit Current C	25,127	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude	10,716
deg	Positive-Sequence Impedance, Angle	78,024				kA	2 cycle Sym. Interrupting Current	0
deg	Zero-Sequence Impedance, Angle	90				kA	Asym. Momentary Peak Current, calculated	40,017
p.u.	Positive-Sequence Impedance, Magnitude	5,513						
kA	Neutral Current, Magnitude	0						
kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Current	27,346						
kA	3*10	41,935						
kA	Negative-Sequence Current, Magnitude	0,905						

Εικόνα 5.8 Υπολογισμοί διφασικού σφάλματος σε ζυγό χαμηλής τάσης(B1)



B2

IEC60909 - 2016				complete				ANSI			
kA	Initial Short-Circuit Current A		0	kA	Initial Short-Circuit Current A		0	kA	Sym. Momentary Current		2,345
kA	Initial Short-Circuit Current B		2,939	kA	Initial Short-Circuit Current B		2,738	kA	Asym. Momentary Current, calculated		2,408
kA	Rated Short-Time Current (Tk)		0	kA	3*Io'		0,424	kA	Momentary 3*Io		0,362
kA	Peak Short-Circuit Current		0	kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Cu		2,851	kA	3*Io		0,362
kA	Short-Circuit Breaking Current		0	kA	3*Io		0,424	kA	Sym. Momentary Current		2,345
kA	Short-Circuit Current		0	kA	Transient Neutral Current, Magnitude		0	kA	Asym. Momentary Current, Duty		3,753
kA	Initial Short-Circuit Current		0	kA	Transient Zero-Sequence Current, Magnit		0,138	kA	Asym. Momentary Peak Current, Duty		6,333
kA	Steady-State Short-Circuit Current		0	kA	Transient Positive-Sequence Current, Ma		1,486	kA	Asym. Momentary Current, calculated		2,408
kA	Thermal equivalent Short-Circuit Current		0	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude		0,141	kA	Asym. Momentary Peak Current, calculati		4,011
kA	Initial Short-Circuit Current C		2,591	kA	Neutral Current, Magnitude		0	kA	Sym. Interrupting Current		2,345
kA	Rated Short-Time Current (Tk)		0	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude		1,524	kA	Neutral Current, Magnitude		0
kA	Zero-Sequence Current, Magnitude		0,146	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude		1,44	kA	Positive-Sequence Current, Magnitude		1,305
kA	Positive-Sequence Current, Magnitude		1,639	kA	Rated Short-Time Current (Tk)		0	kA	Negative-Sequence Current, Magnitude		1,234
p.u.	Zero-Sequence Impedance, Magnitude		11,648	kA	Initial Short-Circuit Current C		2,397	kA	Zero-Sequence Current, Magnitude		0,121
deg	Positive-Sequence Impedance, Angle		65,149					kA	2 cycle Sym. Interrupting Current		2,345
deg	Zero-Sequence Impedance, Angle		7,735					kA	Asym. Momentary Peak Current, calculati		4,011
p.u.	Positive-Sequence Impedance, Magnitude		0,906								
kA	Neutral Current, Magnitude		0								
kA	Max. Thermal equivalent Short-Circuit Current		3,057								
kA	3*Io		0,437								
kA	Negative-Sequence Current, Magnitude		1,552								

Εικόνα 5.9 Υπολογισμοί διφασικού σφάλματος σε ζυγό μέσης τάσης(B2)

Βασικό στοιχείο για την σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης είναι να προσδιοριστεί το μέγιστο ρεύμα σφάλματος προς γη, το οποίο προκύπτει ως:

$$I_f = 3 I_o$$

Όπως φαίνεται και στις εικόνες 5.6-5.9, χρησιμοποιούμε την τιμή του **zero-sequence current** και την τριπλασιάζουμε για να λάβουμε την τιμή του ρεύματος που επιθυμούμε.

Συνεπώς, από τις τιμές που μας έδωσε η προσομοίωση στο Powerfactory, θα εστιάσουμε την μελέτη μας στην τιμή του ρεύματος  $I_f$  και έτσι καταστρώνονται οι παρακάτω πίνακες:

### IEC 60909

		LG	LLG	wft	
WT	Bus	I <sub>f</sub> (kA)	I <sub>f</sub> (kA)	I <sub>fmax</sub> (kA)	U(kV)
1	1	20,897	41,935	41,935	0,7
2	3	20,917	41,968	41,968	0,7
3	5	21,008	42,117	42,117	0,7
4	7	21,037	42,164	42,164	0,7
5	9	20,978	42,068	42,068	0,7
6	11	20,933	41,995	41,995	0,7
7	13	20,892	41,927	41,927	0,7
8	15	20,867	41,888	41,888	0,7
9	17	20,996	42,096	42,096	0,7
1	2	0,740	0,437	0,740	21,5
2	4	0,744	0,439	0,744	21,5
3	6	0,763	0,449	0,763	21,5
4	8	0,769	0,452	0,769	21,5
5	10	0,757	0,445	0,757	21,5
6	12	0,748	0,441	0,748	21,5
7	14	0,739	0,436	0,739	21,5
8	16	0,734	0,434	0,734	21,5
9	18	0,761	0,447	0,761	21,5

Πίνακας 5.1 Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος σφάλματος προς γη σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60909

### Complete

		LG	LLG	wft	
WT	Bus	I <sub>f</sub> (kA)	I <sub>f</sub> (kA)	I <sub>fmax</sub> (kA)	U(kV)
1	1	20,803	41,624	41,624	0,7
2	3	20,821	41,968	41,968	0,7
3	5	19,302	35,536	35,536	0,7
4	7	20,929	41,831	41,831	0,7
5	9	20,876	41,745	41,745	0,7
6	11	20,836	41,678	41,678	0,7
7	13	20,799	41,617	41,617	0,7
8	15	20,777	41,581	41,581	0,7
9	17	20,892	41,770	41,770	0,7
1	2	0,724	0,424	0,724	21,5
2	4	0,727	0,426	0,727	21,5
3	6	0,746	0,434	0,746	21,5
4	8	0,752	0,438	0,752	21,5
5	10	0,740	0,432	0,740	21,5
6	12	0,731	0,427	0,731	21,5
7	14	0,723	0,423	0,723	21,5
8	16	0,718	0,421	0,718	21,5
9	18	0,743	0,433	0,743	21,5

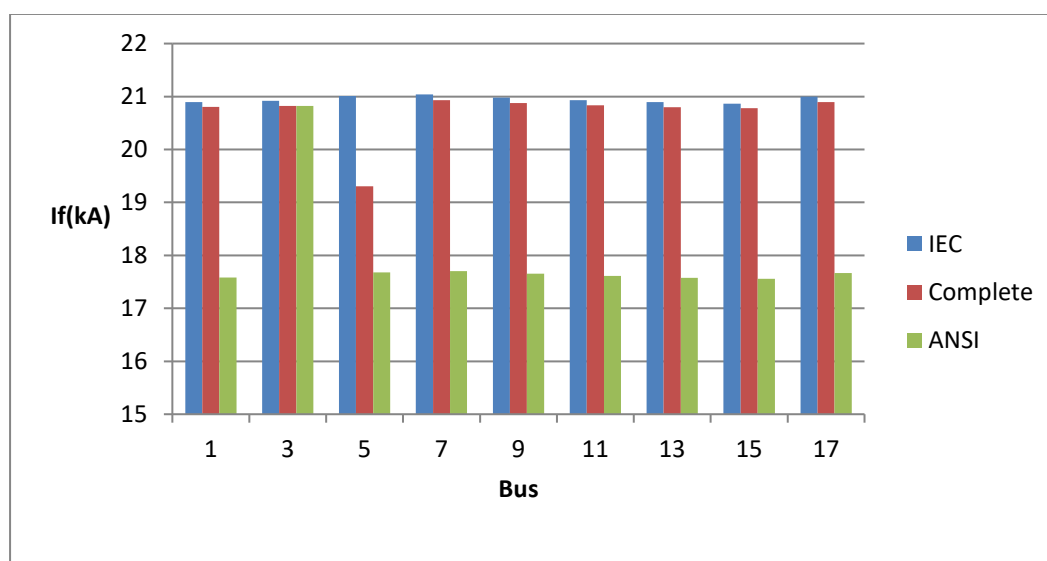
Πίνακας 5.2 Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος σφάλματος προς γη σύμφωνα με τη μέθοδο Complete

## ANSI C 37010

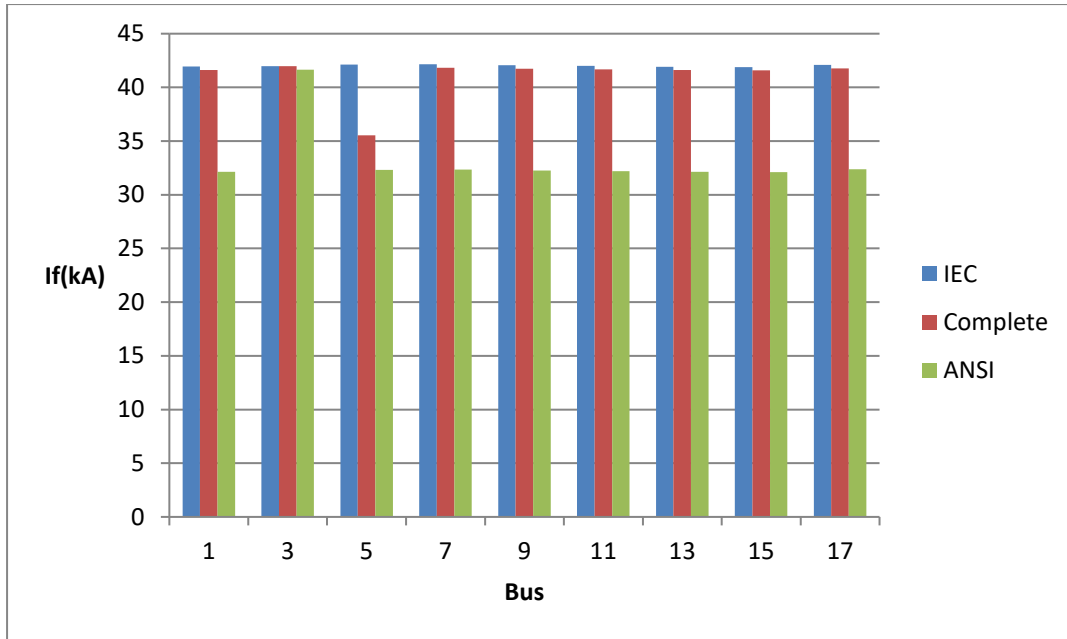
		LG	LLG	wft	
WT	Bus	$I_f$ (kA)	$I_f$ (kA)	$I_{fmax}$ (kA)	U(kV)
1	1	17,582	32,147	32,147	0,7
2	3	20,821	41,654	41,654	0,7
3	5	17,679	32,308	32,308	0,7
4	7	17,704	32,350	32,350	0,7
5	9	17,653	32,265	32,265	0,7
6	11	17,613	32,200	32,200	0,7
7	13	17,577	32,140	32,140	0,7
8	15	17,556	32,105	32,105	0,7
9	17	17,668	32,390	32,290	0,7
1	2	0,663	0,362	0,663	21,5
2	4	0,667	0,363	0,667	21,5
3	6	0,684	0,371	0,684	21,5
4	8	0,689	0,373	0,689	21,5
5	10	0,678	0,368	0,678	21,5
6	12	0,670	0,364	0,670	21,5
7	14	0,662	0,361	0,662	21,5
8	16	0,658	0,359	0,658	21,5
9	18	0,682	0,370	0,682	21,5

Πίνακας 5.3 Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος σφάλματος προς γη σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI C 37010

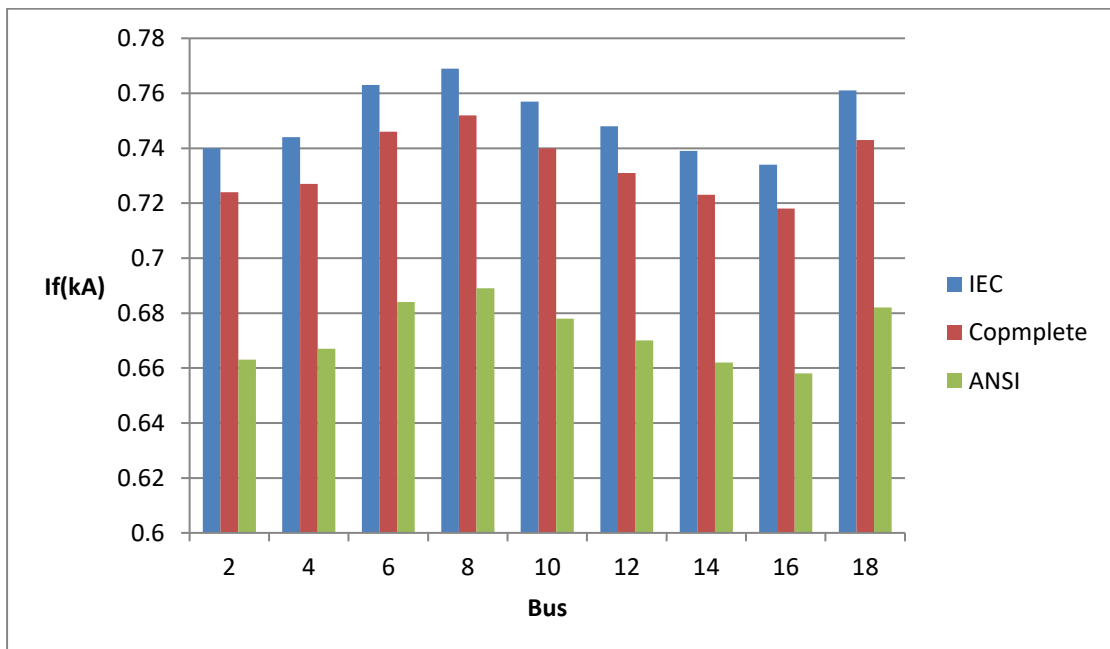
Από τους πίνακες, παρατηρούμε ότι και στις 3 μεθόδους λαμβάνουμε τον χειρότερο τύπο σφάλματος wft(worst fault type) στην MT στο μονοφασικό σφάλμα και στην ΧΤ στο διφασικό σφάλμα προς γη. Για να συγκρίνουμε καλύτερα τις τρεις μεθόδους, θα παρουσιάσουμε τα υπολογισμένα ρεύματα σφάλματος και γραφικά:



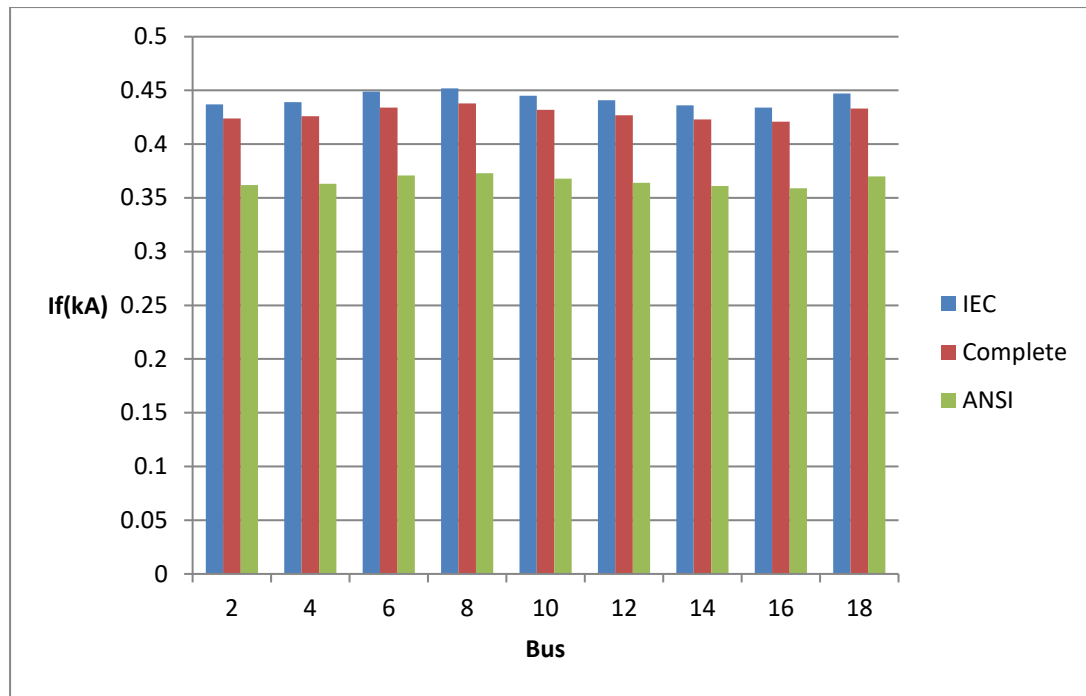
Σχήμα 5.2 Ένταση ρεύματος σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα στους ζυγούς ΧΤ



Σχήμα 5.3 Ένταση ρεύματος σφάλματος για διφασικό σφάλμα στους ζυγούς XT



Σχήμα 5.4 Ένταση ρεύματος σφάλματος για μονοφασικό σφάλμα στους ζυγούς MT



Σχήμα 5.5 Ένταση ρεύματος σφάλματος για διφασικό σφάλμα στους ζυγούς ΜΤ

Παρατηρούμε, ότι τόσο στους ζυγούς χαμηλής τάσης, όσο και στους ζυγούς μέσης τάσης, το Πρότυπο IEC 60909 δίνει τη μέγιστη τιμή ρεύματος σφάλματος, κάνει, δηλαδή, την πιο απαισιόδοξη εκτίμηση. Οι τιμές που λαμβάνουμε από το Πρότυπο IEC είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές του Προτύπου ANSI, για κάθε τύπο και θέση σφάλματος, γεγονός που εξηγείται και από την ύπαρξη του συντελεστή διόρθωσης τάσης  $c$ . Αντίθετα, τα αποτελέσματα της μεθόδου complete είναι πολύ κοντά σε αυτά του Προτύπου IEC 60909 και παρουσιάζουν μια ελάχιστη πιο απαισιόδοξη εκτίμηση.

Για την σύγκριση των μεθόδων IEC 60909 και ANSI, που έχουν τη μεγαλύτερη απόκλιση, θα εισάγουμε την μέση ποσοστιαία απόκλιση APD (Average Percentage Difference). Αυτή ορίζεται ως:

$$APD_{i-ii}(\%) = \frac{\sum_{j=1}^N [\Delta I_f(\%)]_j}{N}$$

όπου:

$$\Delta I_f(\%) = \frac{I_f^i - I_f^{ii}}{\min(I_f^i, I_f^{ii})} \cdot 100$$

και

N: Πλήθος A/Γ

Συνεπώς ισχύει:

$$APD_{IEC-ANSI}^{LG}(\%) = \frac{\sum_{j=1}^9 \left[ \frac{I_{fLG}^{IEC} - I_{fLG}^{ANSI}}{I_{fLG}^{ANSI}} \cdot 100 \right]_j}{9}$$

και

$$APD_{IEC-ANSI}^{LLG}(\%) = \frac{\sum_{j=1}^9 \left[ \frac{I_{fLLG}^{IEC} - I_{fLLG}^{ANSI}}{I_{fLLG}^{ANSI}} \cdot 100 \right]_j}{9}$$

Άρα για μονοφασικό σφάλμα στους ζυγούς ΧΤ προκύπτει:

$$APD=16,8\%$$

Για διφασικό σφάλμα στους ζυγούς ΧΤ προκύπτει:

$$APD=27,1\%$$

Για μονοφασικό σφάλμα στους ζυγούς MT προκύπτει:

$$APD=11,3\%$$

Για διφασικό σφάλμα στους ζυγούς MT προκύπτει:

$$APD=20,9\%$$

Όπως είχε γίνει αντιληπτό και από τα γραφήματα, και στις τέσσερις περιπτώσεις οι μέθοδοι IEC και ANSI παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση διφασικού σφάλματος, συναντάμε τις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη APD(>20%). Η μικρότερη τιμή του δείκτη εντοπίζεται για μονοφασικό σφάλμα στους ζυγούς MT(11,3%), ωστόσο είναι μια αρκετά μεγάλη τιμή για να μας επιτρέψει να αποφανθούμε ότι η απόκλιση των μεθόδων εξαλείφεται.

Επιπλέον, παραθέτουμε, στον παρακάτω πίνακα, την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ θετικής και μηδενικής ακολουθίας κατά IEC 60909 όπως μετρήθηκαν από την προσομοίωση:

	Z <sub>0</sub> (pu)	Z <sub>0</sub> angle(deg)	Z <sub>1</sub> (pu)	Z <sub>1</sub> angle(deg)
B1	0,433	90	5,513	78,024
B3	0,433	90	5,508	78,094
B5	0,433	90	5,484	78,413
B7	0,433	90	5,477	78,515
B9	0,433	90	5,492	78,309
B11	0,433	90	5,504	78,151
B13	0,433	90	5,514	78,007
B15	0,433	90	5,520	77,923
B17	0,433	90	5,488	78,370
B2	11,648	7,735	0,906	65,149
B4	11,602	7,674	0,898	65,625
B6	11,394	7,390	0,860	67,913
B8	11,328	7,296	0,848	68,683
B10	11,461	7,484	0,872	67,150
B12	11,565	7,625	0,891	66,019
B14	11,659	7,750	0,908	65,030
B16	11,715	7,821	0,919	64,470
B18	11,422	7,430	0,865	67,590

Πίνακας 5.4 Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ θετικής και μηδενικής ακολουθίας κατά IEC 60909

Παρατηρούμε ότι στους ζυγούς χαμηλής τάσης ισχύει  $Z_0 < Z_1$  και στους ζυγούς μέσης τάσης ισχύει  $Z_0 > Z_1$ .

# Κεφάλαιο 6

## Υπολογιστική Προσομοίωση Συστήματος Γείωσης Αιολικού Πάρκου υπό Συνθήκες Σφάλματος

### 6.1 Σχεδίαση και κατασκευή συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου

Με το σύστημα γείωσης σε ένα αιολικό πάρκο πρέπει να εξασφαλίζεται η ασφάλεια, τόσο των ανθρώπων, που βρίσκονται εντός αυτού, όσο και του εξοπλισμού, εφόσον υποστεί ένα βραχυκύκλωμα. Προκειμένου να σχεδιάσουμε και να μοντελοποιήσουμε ένα σύστημα γείωσης, θα πρέπει να διευκρινιστούν κάποια απαραίτητα στοιχεία, όπως το μοντέλο του εδάφους(διστρωματικό, τριστρωματικό κλπ) και η μορφολογία του, το ρεύμα σφάλματος που αναπτύσσεται και το βάρος του ατόμου που πιθανόν να βρεθεί στη θέση που θα συμβεί το σφάλμα. Επιπλέον, θα πρέπει να καθοριστούν οι μέθοδοι υπολογισμού για την ειδική αντίσταση του εδάφους, για την αντίσταση γείωσης, για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής. Τέτοιες μέθοδοι μας παρέχονται σε ορισμένα Πρότυπα, όπως τα IEEE Std. 80, IEEE Std. 81 και EN 50522. Αναλυτικά, τα βήματα που ακολουθούμε για να μελετήσουμε και να κατασκευάσουμε το σύστημα γείωσης ενός αιολικού πάρκου είναι τα παρακάτω[Πηγή:10]:

1. Επιλέγουμε τις υποψήφιες θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και των κέντρων ελέγχου.
2. Μετράμε την ειδική αντίσταση του εδάφους (συνήθως με τη μέθοδο Wenner) για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας ή κέντρου ελέγχου.
3. Εντοπίζουμε άλλες θέσεις στο αιολικό πάρκο (με χαμηλή ειδική αντίσταση εδάφους) που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την αντίσταση γείωσης (πηγάδια, χώμα κλπ.).
4. Υπολογίζουμε το μοντέλου εδάφους βάσει μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους για όλες τις θέσεις στις οποίες έχουμε μετρήσεις.
5. Σχεδιάζουμε τυπικό πλέγμα γείωσης για κάθε ανεμογεννήτρια (λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του κατασκευαστή της αλλά και των Προτύπων) ή κέντρο ελέγχου.
6. Καθορίζουμε τη μέγιστη τιμή και τη διάρκεια του ρεύματος σφάλματος του αιολικού πάρκου.



7. Υπολογίζουμε την αντίσταση γείωσης για κάθε ανεξάρτητο σύστημα γείωσης ανεμογεννήτριας.

8. Υπολογίζουμε το εγχυόμενο ρεύμα σφάλματος σε κάθε σύστημα γείωσης.

9. Υπολογίζουμε τη μέγιστη επιτρεπόμενη ασφαλή βηματική τάση και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ασφαλή τάση επαφής για κάθε σύστημα γείωσης (εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και τη διάρκεια του σφάλματος).

10. Υπολογίζουμε τη βηματική τάση και την τάση επαφής για κάθε σημείο στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το πλέγμα γείωσης.

11. Ελέγχουμε τις τιμές των παραπάνω μεγεθών. Είναι επιθυμητό:

-Η συνολική αντίσταση γείωσης του πάρκου να είναι μικρότερη από  $1\Omega$ .

-Η αντίσταση γείωσης της κάθε ανεμογεννήτριας να είναι μικρότερη από  $10\Omega$ .

-Οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής να μην ξεπερνούν τα ασφαλή όρια, όπως αυτά ορίζονται από το Πρότυπο.

12. Εάν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του βήματος 11, τότε η σχεδίαση έχει ολοκληρωθεί (οπότε ακολουθεί το βήμα 15), αλλιώς το επόμενο βήμα 13.

13. Βελτιώνουμε το σύστημα γείωσης με:

-Αύξηση της επιφάνειας του συστήματος γείωσης.

-Πύκνωση του πλέγματος γείωσης.

-Προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων.

-Προσθήκη χώματος με χαμηλή ειδική αντίσταση ή βελτιωτικών εδάφους.

-Διασύνδεση του συστήματος γείωσης με άλλο σύστημα γείωσης.

-Αλλαγή προς το αυστηρότερο του κριτηρίου για το χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Εφόσον εξασφαλίζεται από τα μέσα προστασίας ότι ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρότερος, τότε τα όρια ασφαλείας για τη βηματική τάση και την τάση επαφής έχουν μεγαλύτερες τιμές.

-Χρήση κατάλληλου υλικού επιφανείας (συνήθως χαλκιού) στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης, εάν αυτό επιφέρει αλλαγή στα όρια ασφαλείας.

14. Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία από το βήμα 3.

15. Κατασκευάζουμε το σύστημα γείωσης.

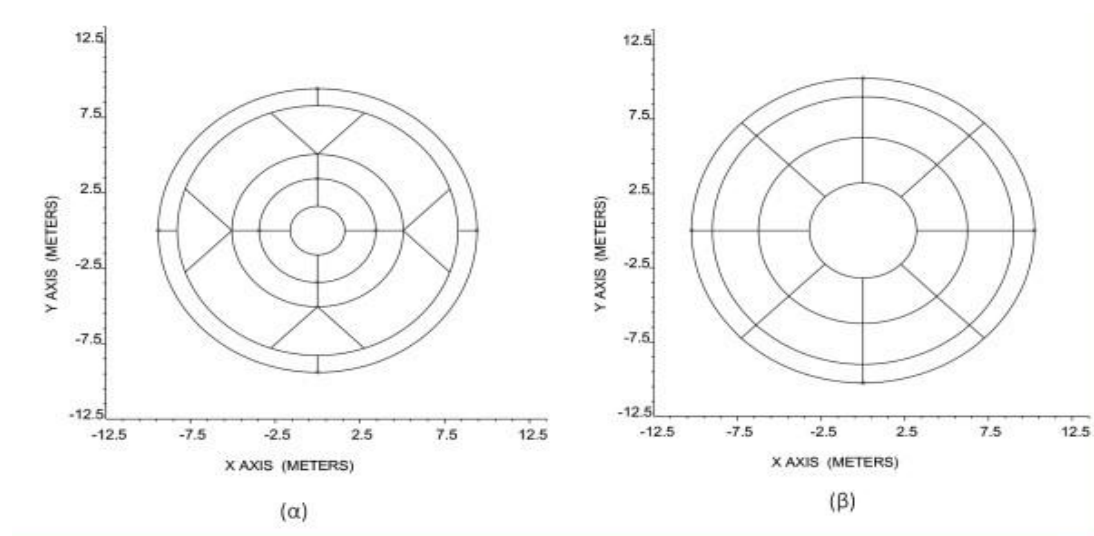
16. Μετράμε την αντίσταση γείωσης.

17. Πραγματοποιούμε τυχόν επιπλέον βελτιώσεις, όπου τούτο είναι τεχνικά αναγκαίο και εφικτό.

Η παραπάνω μεθοδολογία έχει χρησιμοποιηθεί για να σχεδιαστούν αρκετά αιολικά πάρκα της χώρας και έχει επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

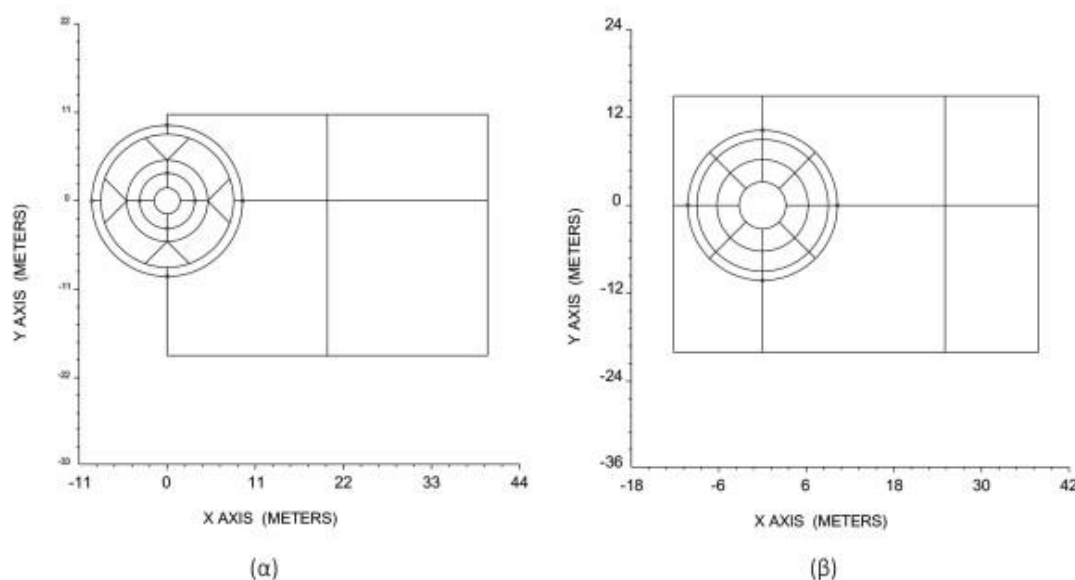
Επίσης, η συγκεκριμένη μεθοδολογία καθίσταται αναγκαία, διότι τα αιολικά πάρκα είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, εγκατεστημένα σε ορεινές περιοχές, στις οποίες το έδαφος παρουσιάζει υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, συνεπώς οι κατασκευαστές οφείλουν να είναι σε θέση να επεκτείνουν ένα σύστημα γείωσης, προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση γείωσης και να εξαλειφθούν οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, όποτε είναι αναγκαίο. Βέβαια, η ειδική αντίσταση ενός εδάφους μεταβάλλεται εντός ενός έτους, επηρεαζόμενη από τον καιρικές αλλαγές, εμφανίζοντας μεγαλύτερες τιμές κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όποτε και είναι προτιμότερο να γίνονται οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό της. Επιπλέον, είναι σημαντικό, το κάθε σύστημα γείωσης να μπορεί να γίνει ανεξάρτητο με χρήση φρεατίων, προκειμένου να είναι εφικτό να μετρηθεί η αντίσταση γείωσης κάθε επιμέρους συστήματος γείωσης, τόσο ενώ πραγματοποιείται η κατασκευή όσο και όταν το απαιτούν λόγοι ελέγχου ή συντήρησης. Τοιουτοτρόπως, είναι δυνατόν, αφενός, να ελεγχθεί πόσο ακριβείς είναι οι υπολογισμοί της μελέτης, και αφετέρου να ενισχυθεί το σύστημα γείωσης, σε περιπτώσεις που καθίσταται απαραίτητο.

Με βάση τα παραπάνω, από τους κατασκευαστές των ανεμογεννητριών προτείνεται ένα τυπικό σύστημα γείωσης, το οποίο απαρτίζουν το θεμελιακό και το περιμετρικό σύστημα γείωσης. Παραδείγματα από τυπικά συστήματα γείωσης φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 6.1 Τυπικά συστήματα γείωσης[12]

Σε περιπτώσεις που, λόγω του βραχώδους εδάφους, το σύστημα γείωσης, που προτείνεται από τον κατασκευαστή δεν είναι αξιόπιστο, τροποποιούμε το περιμετρικό σύστημα γείωσης, καθώς αυξάνοντας την έκταση που καλύπτει το σύστημα γείωσης οδηγούμαστε σε μείωση της αντίστασης γείωσης. Το θεμελιακό σύστημα γείωσης είναι δύσκολο να ενισχυθεί, λόγω του μεγάλου κόστους που απαιτείται. Παράδειγμα επέκτασης του περιμετρικού συστήματος γείωσης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 6.2 Ενισχύμενα συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών[12]

Για κάθε ανεμογεννήτρια, ανάλογα και με τη δομή του εδάφους, είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η κατασκευή διαφορετικού συστήματος γείωσης και, στη συνέχεια, η διασύνδεση των μεμονωμένων συστημάτων γείωσης των ανεμογεννητριών. Οι διαδοχικές ανεμογεννήτριες έχουν απόσταση μεγαλύτερη από 200m και, συνεπώς, μεγαλύτερη από την τιμή ενεργού μήκους του συστήματος γείωσης. Το αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού, είναι η συμπεριφορά του συστήματος γείωσης της κάθε ανεμογεννήτριας ως ανεξάρτητο στη μεταβατική κατάσταση (κεραυνοπληξία).

Τέλος, για να περιγραφεί πλήρως ένα σύστημα γείωσης, χρειάζεται να είναι γνωστά, εκτός από τα γεωμετρικά στοιχεία, και τα απαραίτητα υλικά που απαιτούνται, αλλά και οι σημαντικές παρατηρήσεις αναφορικά με το κατασκευαστικό στάδιο. Δεδομένου του κόστους, των συνθηκών διάβρωσης του κάθε υλικού και διαφόρων πρακτικών ζητημάτων, συνήθως επιλέγεται η χρήση ταινίας επιψευδαργυρωμένου χάλυβα, εντός του θεμελίου, ενώ για τις θαμμένες στο χώμα γειώσεις επιλέγεται επικασιτερωμένος χαλκός. Είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλων σφιγκτήρων (συνδέσμων) ανάμεσα στα υλικά γείωσης σε κατάλληλα σημεία, όπως και ανάμεσα στη γείωση και στα σίδερα της θεμελίωσης, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.3 Σφιγκτήρας γείωσης αγωγών (α) και σφιγκτήρας γείωσης αγωγού / ταινίας (β)[12]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται θεμέλια ανεμογεννητριών μετά την εγκατάσταση του θεμελιακού συστήματος γείωσης:



Σχήμα 6.4 Θεμελιακό σύστημα γείωσης ανεμογεννητριών με χρήση χαλύβδινων ταινιών[12]

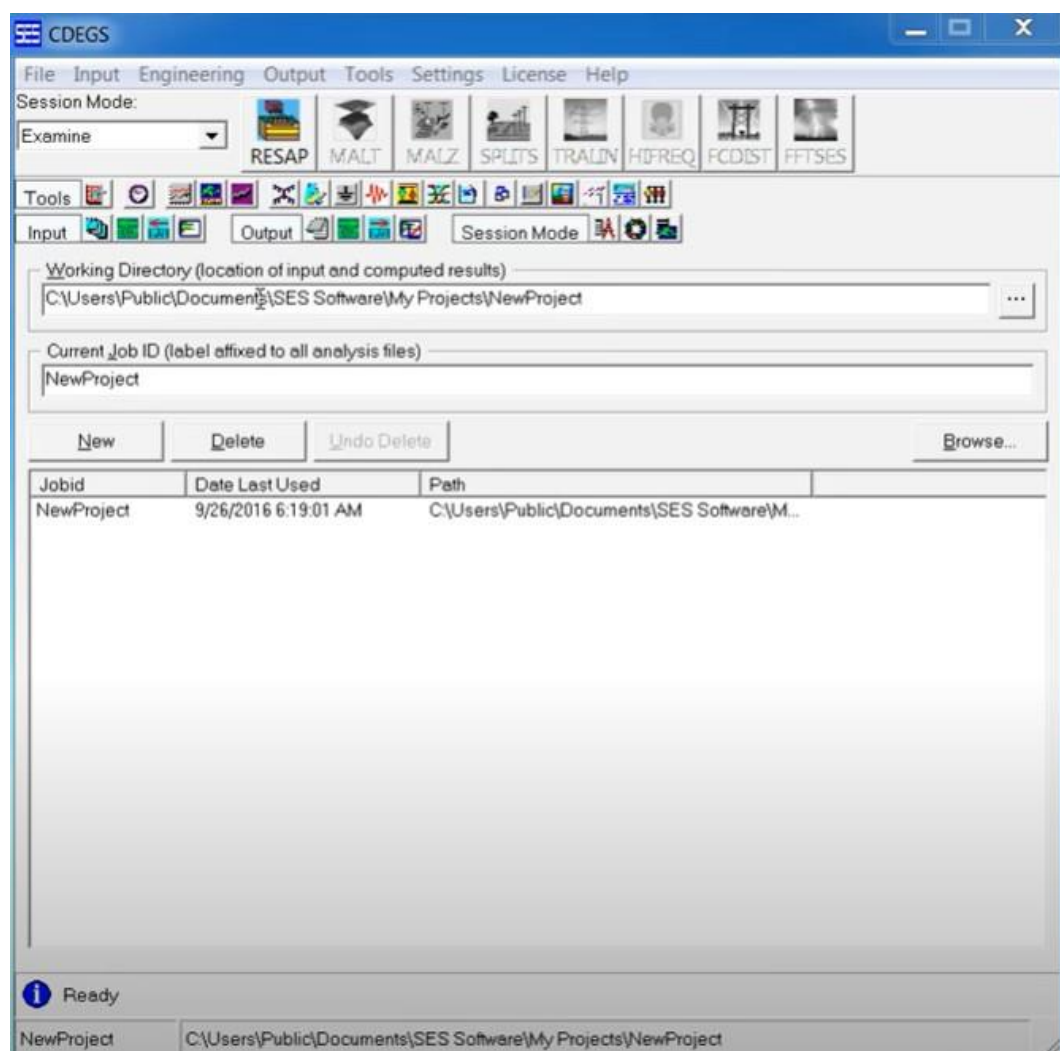
## 6.2 Περιγραφή του λογισμικού CDEGS

### 6.2.1 Γενικά

Το CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding, and Soil Structure Analysis) είναι ένα λογισμικό που αναπτύσσεται και διανέμεται από την εταιρεία Safe Engineering Services & Technologies Ltd. Η Safe Engineering Services &

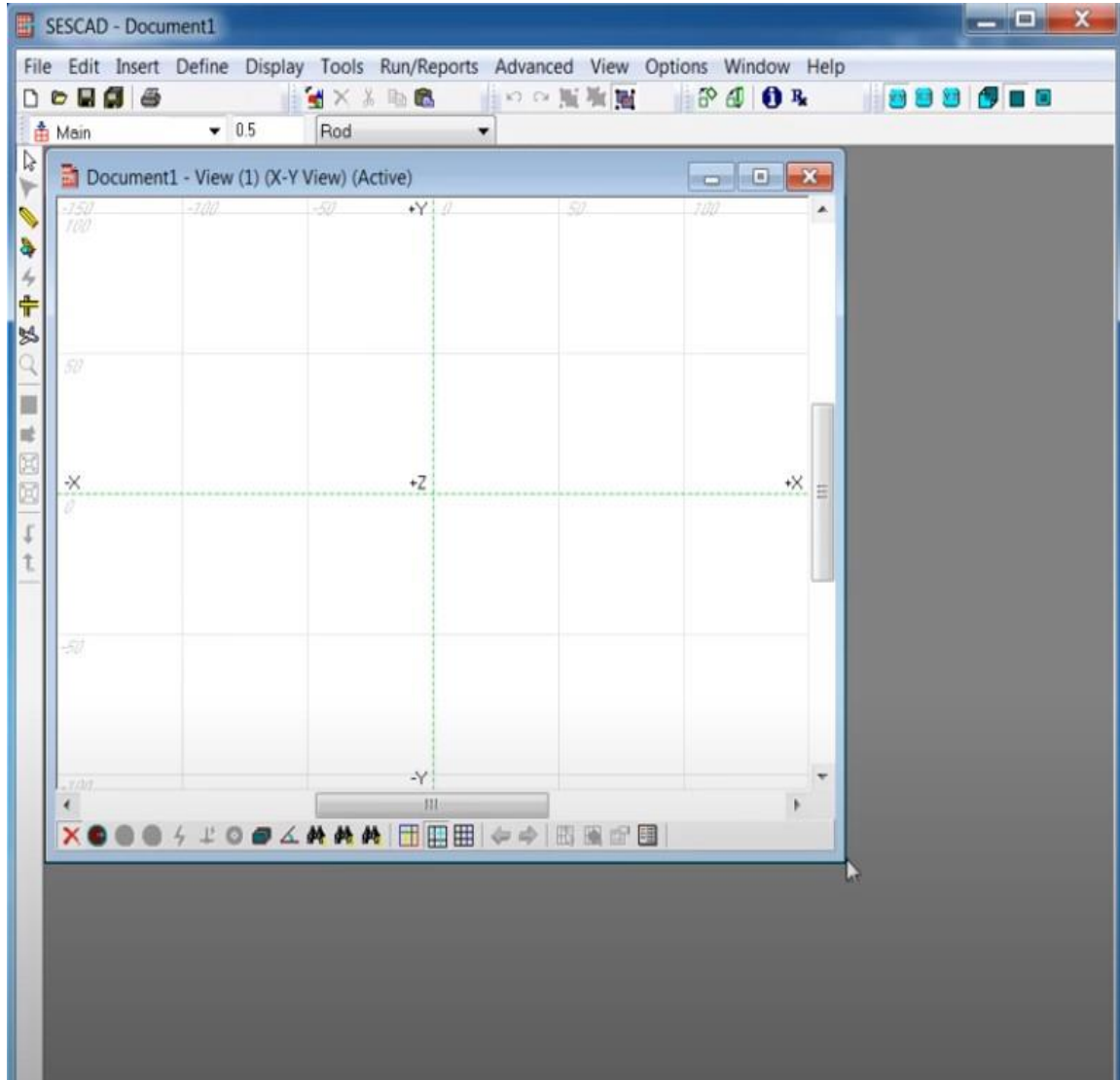
Technologies Ltd είναι μια εταιρεία που εξειδικεύεται στον τομέα των ηλεκτρικών, ηλεκτρονικών και ενεργειακών λύσεων, και παρέχει λογισμικά, υπηρεσίες σχεδιασμού, κατάρτιση και συμβουλευτικές υπηρεσίες στους τομείς αυτούς. Το CDEGS αποτελεί ένα από τα προϊόντα της εταιρείας που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της γείωσης και των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που παράγονται από ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Αυτό το λογισμικό χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των επικοινωνιακών, της ενέργειας και της βιομηχανίας, όπου είναι σημαντικό να διασφαλίζεται η σωστή γείωση των εγκαταστάσεων για την προστασία από υψηλές τάσεις και ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Επιπλέον, το CDEGS επιτρέπει την ανάλυση των ηλεκτρικών διανομών, την εκτίμηση του κινδύνου αστραπών και παρέχει πληροφορίες για την απόδοση γείωσης και τις επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε διάφορες εγκαταστάσεις. Είναι ένα ισχυρό εργαλείο για επαγγελματίες που ασχολούνται με τη σχεδίαση και τον έλεγχο ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και την ασφάλεια των ηλεκτρικών συστημάτων.

Το περιβάλλον του CDEGS έχει την παρακάτω μορφή:



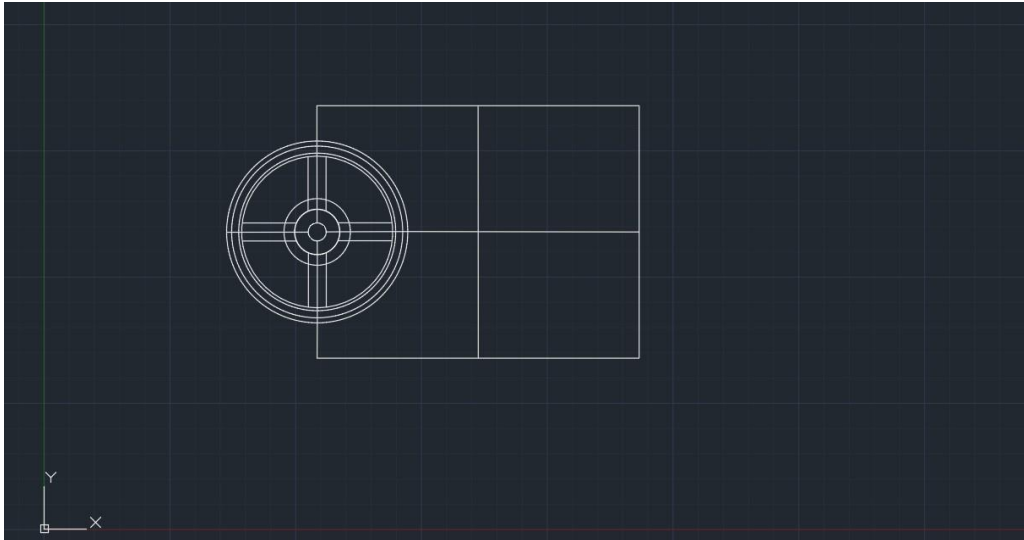
Εικόνα 6.1 Το περιβάλλον του CDEGS

Αρχικά, ορίζουμε στο **Working Directory** έναν φάκελο με τα αρχεία που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Στη συνέχεια, επιλέγουμε τον επιλύτη **MALT->Specify** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε τον επιλύτη **SESCAD**. Εκεί εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο:

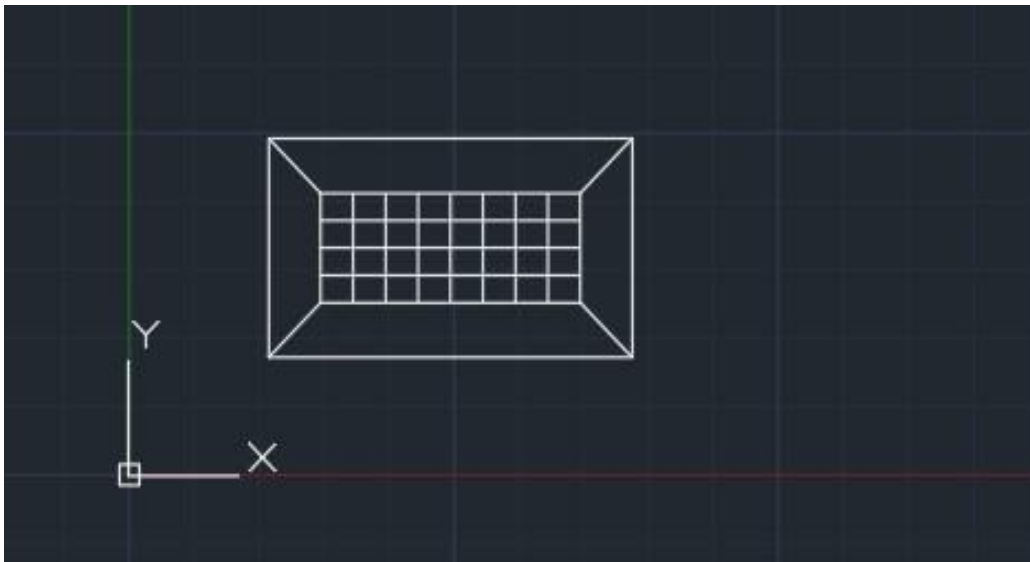


Εικόνα 6.2 Επιλύτης SESCAD

Επιλέγουμε **File->Import** και εισάγουμε τα σχέδια που μας χρειάζονται για την προσομοίωση που επιθυμούμε να κάνουμε. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα σχέδια για τις ανεμογεννήτριες και το κέντρο ελέγχου σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα **AutoCAD** όπως φαίνονται αντίστοιχα παρακάτω. Το επιλεγμένο πλέγμα γείωσης για τις ανεμογεννήτριες έχει μήκος 32 m και πλάτος 25 m και είναι τοποθετημένο στα 0.6 m. Για το πλέγμα γείωσης του Κτιρίου Ελέγχου επιλέχθηκαν διαστάσεις 10 m × 4 m ενώ η απόσταση του περιμετρικού αγωγού από το υπόλοιπο πλέγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο σε βάθος 1m, είναι 2m.



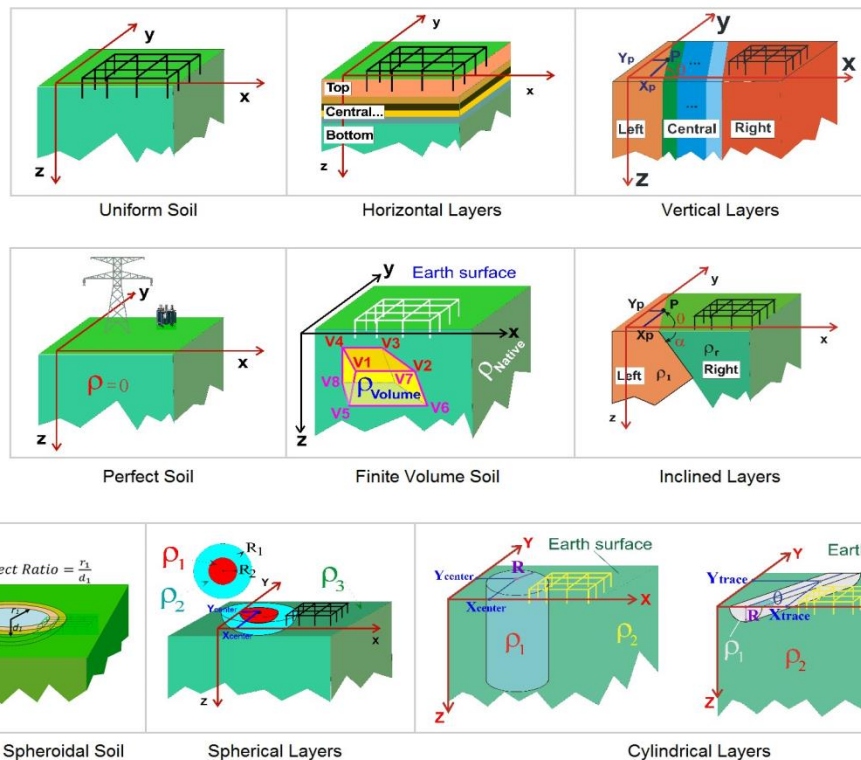
*Εικόνα 6.3 Πλέγμα γείωσης ανεμογεννητριών*



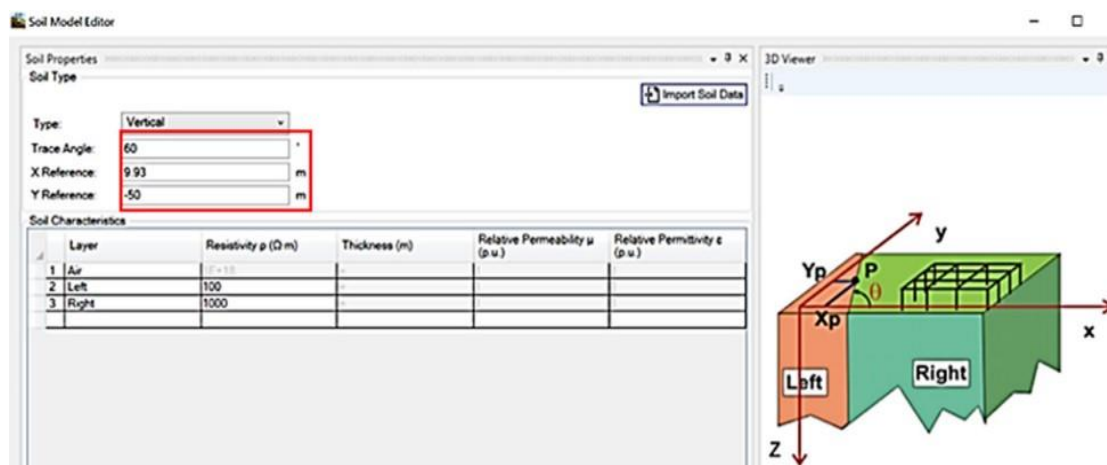
*Εικόνα 6.4 Πλέγμα γείωσης Κτιρίου Ελέγχου*

### **6.2.2 Ανάλυση εδάφους**

Το επόμενο στάδιο για την πραγματοποίηση των επιθυμητών προσομοιώσεων είναι ο καθορισμός της δομής του εδάφους. Αφού έχουμε εισάγει τα σχέδια, επιλέγουμε **Define->Soil model**. Το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε τη μορφή του εδάφους (διστρωματικό, τριστρωματικό κλπ) και την γεωμετρική μορφή του και να εισάγουμε τις αντίστοιχες τιμές ειδικών αντιστάσεων που χρειαζόμαστε:



Εικόνα 6.5 Επιλογή μοντέλου εδάφους



Εικόνα 6.6 Εισαγωγή παραμέτρων εδάφους

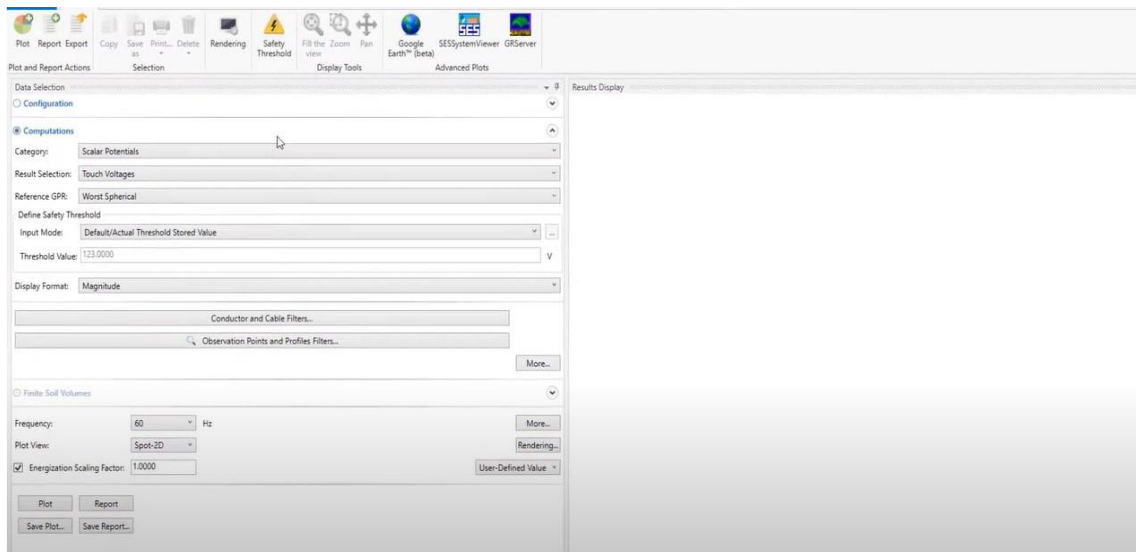
### 6.2.3 Εξαγωγή της τιμής Αντίστασης Γείωσης

Έχοντας εισάγει όλα τα απαιτούμενα δεδομένα, μπορούμε να επιστρέψουμε στο αρχικό παράθυρο (Εικόνα 6.1) και επιλέγουμε **MALT->Compute**. Εκεί, επιλέγοντας **Examine** και έπειτα **Report** μπορούμε να εξάγουμε την τιμή της αντίστασης γείωσης που επιθυμούμε.



## 6.2.4 Εξαγωγή Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής

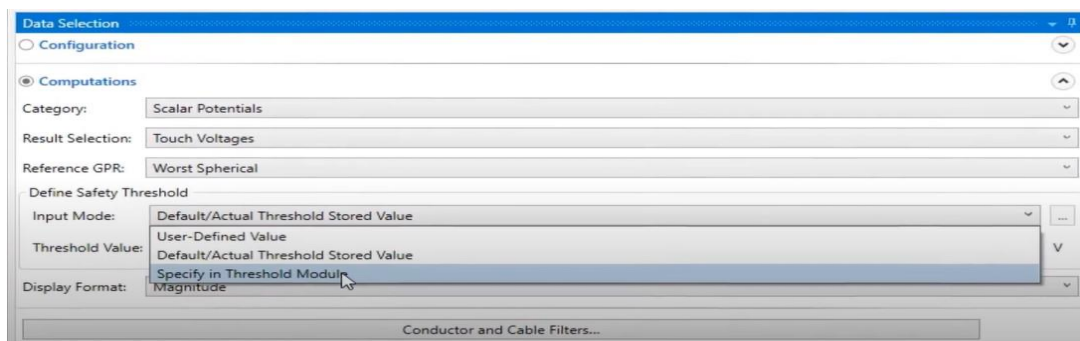
Η εξαγωγή των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής είναι πιο πολύπλοκη από αυτή της αντίστασης γείωσης, καθώς απαιτεί την εισαγωγή ορισμένων παραμέτρων, προκειμένου να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αρχικά, για να πραγματοποιήσουμε τις ζητούμενες μετρήσεις, προσθέτουμε κάποια σημεία υπολογισμού στα σχέδια που έχουν σχεδιαστεί στο Autocad, αφού υπολογίζουμε στο επίπεδο του εδάφους που προκύπτει από το πως ορίζονται οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Επιλέγουμε **Malt->Examine** και οδηγούμαστε στην παρακάτω καρτέλα:



Εικόνα 6.7 Καρτέλα μέτρησης βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής

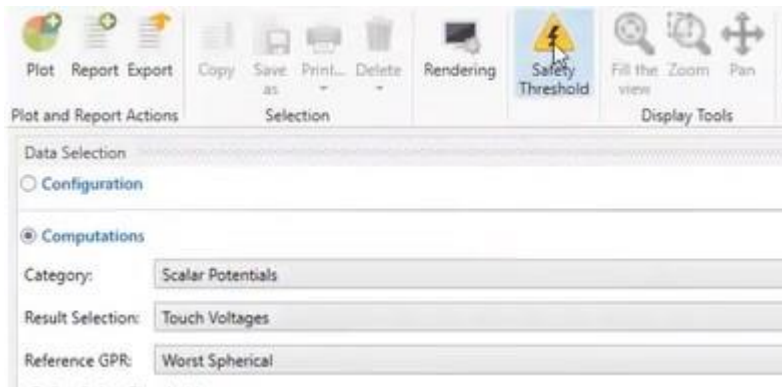
Επιλέγουμε το είδος τάσης που θέλουμε να εξάγουμε, ενώ στο κάτω μέρος της καρτέλας μπορούμε να ορίσουμε το μέγιστο ρεύμα σφάλματος στο **Energization Scaling Factor**.

Σε περίπτωση που θέλουμε να αλλάξουμε το **Threshold Value**, επιλέγουμε **Specify in Threshold Module**:



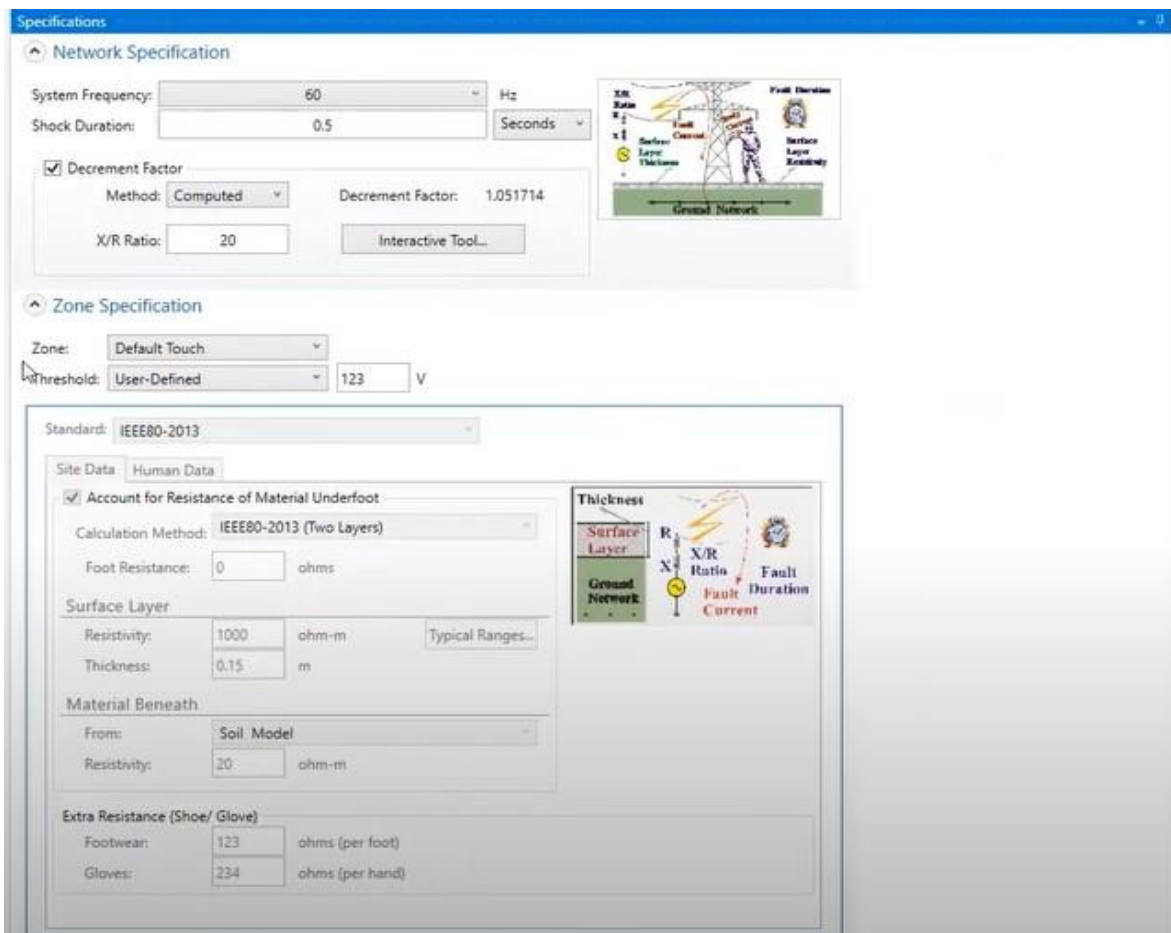
Εικόνα 6.8 Αλλαγή του **Threshold Value** με επιλογή του **Specify in Threshold Module**

Και ορίζουμε τις επιθυμητές παραμέτρους επιλέγοντας **Safety Threshold** στο πάνω μέρος της καρτέλας:



Εικόνα 6.9 Επιλογή του **Safety Threshold**, για διαμόρφωση των παραμέτρων της προσομοίωσης

Έπειτα, εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα:

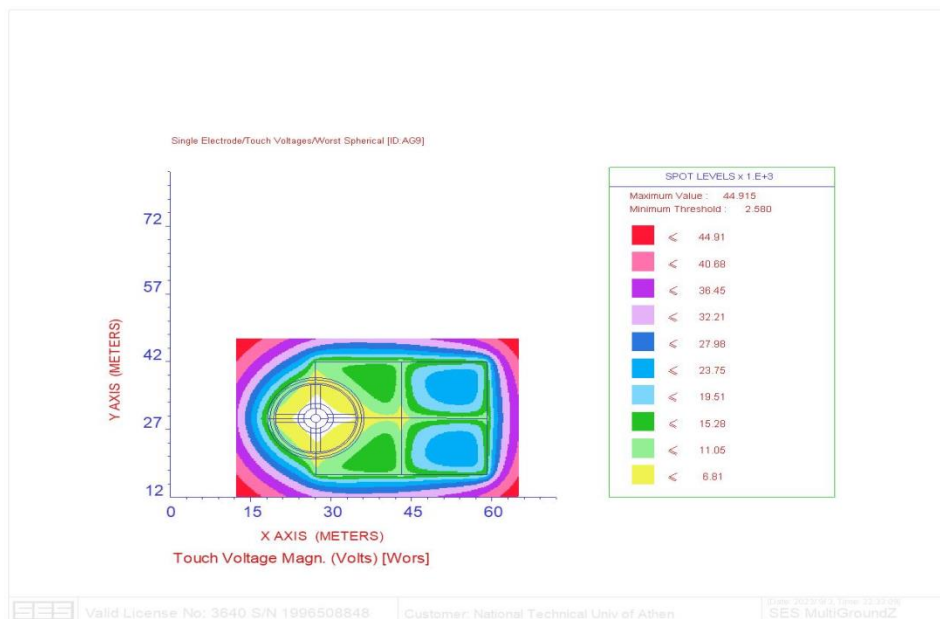


Εικόνα 6.10 Καρτέλα μετά την επιλογή του **Safety Threshold**, για διαμόρφωση των παραμέτρων της προσομοίωσης

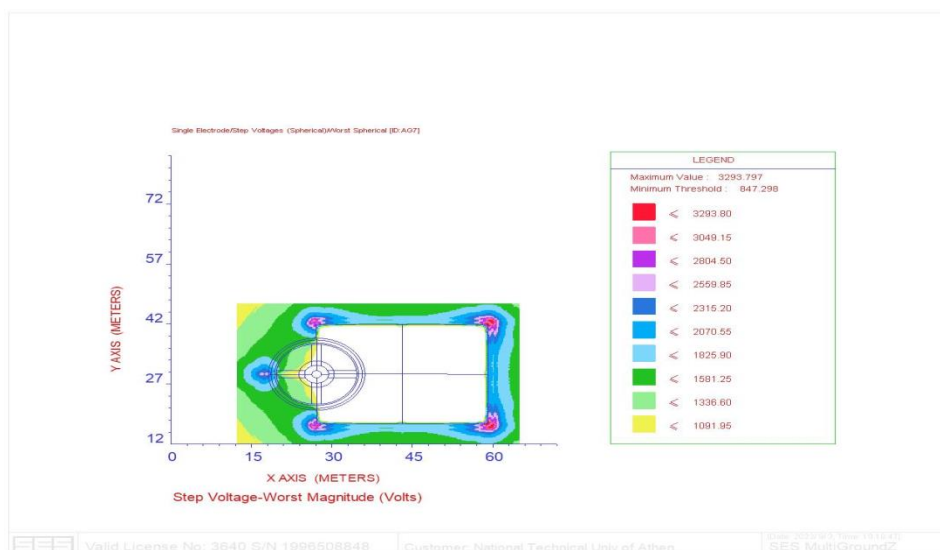
Σε αυτή την καρτέλα, μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα, τη διάρκεια σφάλματος, τη μέθοδο υπολογισμού και το υλικό επιφάνειας του συστήματος(χαλίκι, άσφαλτο κλπ).

Επίσης, επιλέγοντας **Human Data**, μπορούμε να ορίσουμε τις παραμέτρους ενός ανθρώπου που υφίσταται το σφάλμα, όπως, για παράδειγμα, το βάρος του.

Έχοντας εισάγει όλα τα στοιχεία που επιθυμούμε, επιστρέφουμε στην αρχική καρτέλα(Εικόνα 6.7) και επιλέγουμε **Plot**, για να λάβουμε τα ζητούμενα γραφήματα για τις τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε έχουν, αντίστοιχα, την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 6.11 Ενδεικτικό αποτέλεσμα μέτρησης τάσεων επαφής στο CDEGS



Εικόνα 6.12 Ενδεικτικό αποτέλεσμα μέτρησης βηματικών τάσεων στο CDEGS

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, το γράφημα που προκύπτει δείχνει πως κατανέμονται οι τάσεις στο χωρίο, που έχει επιλεγεί, υπό μορφή χρωματικού κώδικα, για την επίτευξη μιας εποπτικής εικόνας τήρησης ή μη των αντίστοιχων ορίων ασφαλείας.

### **6.3 Προσομοίωση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου**

Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφούν τα στάδια της προσομοίωσης του συστήματος γείωσης του αιολικού πάρκου εννέα ανεμογεννητριών με την χρήση του λογισμικού CDEGS.

#### **6.3.1 Προσδιορισμός μέγιστου ρεύματος σφάλματος**

Ο χειρότερος τύπος και θέση σφάλματος για μια ανεμογεννήτρια είναι το μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT και μας δίνει το υψηλότερο ρεύμα σφάλματος  $I_f$ . Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα ρεύματα σφάλματος(σε kA)για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT, με τις τρεις μεθόδους που υπολογίστηκαν στο λογισμικό Powerfactory(Κεφάλαιο 5).

A/Γ	IEC(kA)	ANSI(kA)	Complete(kA)
1	0,740	0,663	0,724
2	0,744	0,667	0,727
3	0,763	0,684	0,746
4	0,769	0,689	0,752
5	0,757	0,678	0,74
6	0,748	0,67	0,731
7	0,739	0,662	0,723
8	0,734	0,658	0,718
9	0,761	0,682	0,743

*Πίνακας 6.1 Ρεύματα σφάλματος όπως προσομοιώθηκαν στο Powerfactory για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT*

#### **6.3.2 Μέτρηση ειδικής αντίστασης του εδάφους**

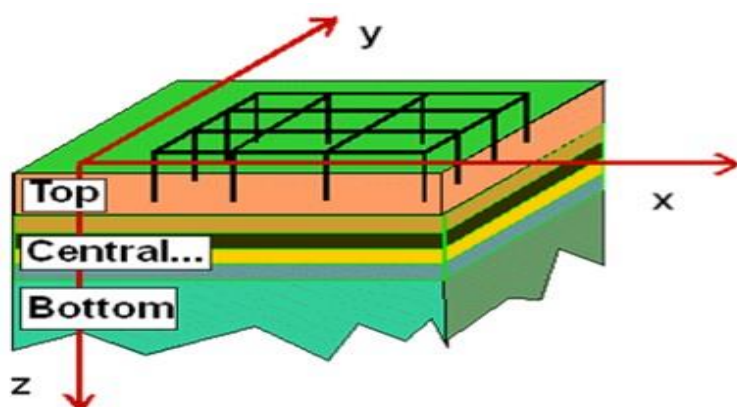
Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι ζητούμενες τιμές ειδικής αντίστασης, για τις εννέα ανεμογεννήτριες, αντλήθηκαν από την Διπλωματική Εργασία: «**Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα**» του Νικόλαου Κ. Γουβάλα. Όπως περιγράφεται στη συγκεκριμένη εργασία, η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στις υποψήφιες θέσεις τοποθέτησης των ανεμογεννητριών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο

Wenner(Κεφάλαιο 4). Σε τέτοιου είδους μετρήσεις, που απαιτείται υψηλή ακρίβεια και είναι σημαντικό να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα, συνηθίζεται να εφαρμόζεται η μέθοδος Wenner σε δύο άξονες διεύθυνσης και για διαφορετικές αποστάσεις  $a$  μεταξύ των διαδοχικών ηλεκτροδίων. Στο τέλος των μετρήσεων, μπορούμε να θεωρήσουμε ως τελικές τιμές ειδικής αντίστασης του εδάφους τον μέσο όρο όλων των μετρήσεων. Με βάση τις τιμές ειδικής αντίστασης που προκύπτουν, καθορίζουμε και το μοντέλο εδάφους για κάθε υποψήφια θέση τοποθέτησης των ανεμογεννητριών(μονοστρωματικό ή διστρωματικό). Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, η δομή του εδάφους για κάθε υποψήφια θέση φαίνεται παρακάτω:

Έδαφος	Μοντέλο Εδάφους	$h_1$ (m)	$\rho_1$ ( $\Omega m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega m$ )
A/Γ 1	Διστρωματικό	16,89	5281,03	0,26
A/Γ 2	Διστρωματικό	2	908,29	7207,08
A/Γ 3	Διστρωματικό	2	615,08	17177
A/Γ 4	Διστρωματικό	6,16	4737,51	2397,28
A/Γ 5	Μονοστρωματικό	100	4857,88	4857,88
A/Γ 6	Μονοστρωματικό	100	1891,47	1891,47
A/Γ 7	Διστρωματικό	2	730,55	24175,9
A/Γ 8	Μονοστρωματικό	100	5310,44	5310,44
A/Γ 9	Μονοστρωματικό	100	7254,68	7254,68
K/E	Διστρωματικό	4,52	1179,4	11290,1

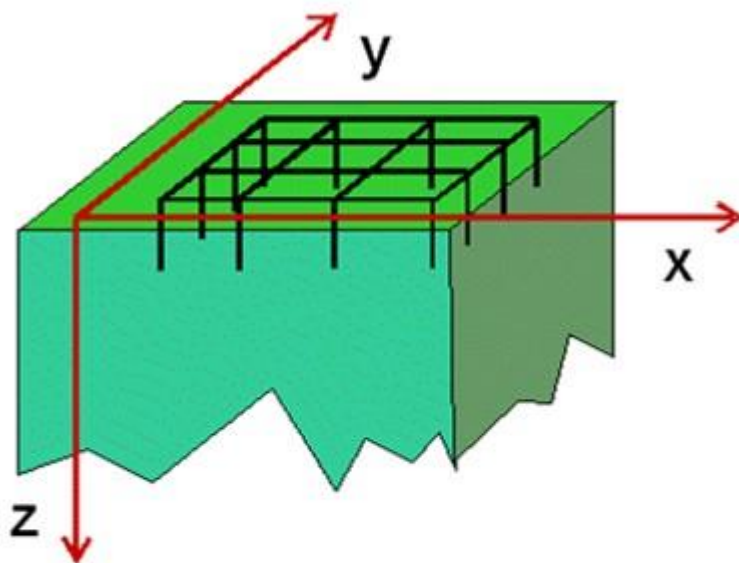
Πίνακας 6.2 Δομή εδάφους για κάθε υποψήφια θέση των ανεμογεννητριών

Επομένως, για τις ανεμογεννήτριες 1,2,3,4,7 και για το Κέντρο Ελέγχου χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα CDEGS πολυστρωματικό μοντέλο και ,συγκεκριμένα, διστρωματικό(Horizontal soil model):



Εικόνα 6.13 Πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους

Ενώ για τις ανεμογεννήτριες 5,6,8,9 χρησιμοποιήθηκε μονοστρωματικό μοντέλο(Uniform soil):



Εικόνα 6.14 Μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους

### 6.3.3 Υπολογισμός Αντίστασης Γείωσης για κάθε σύστημα γείωσης

Η διαδικασία μέτρησης της συνολικής αντίστασης γείωσης σε ένα αιολικό πάρκο, είναι αρκετά χρονοβόρα και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική οικονομική επιβάρυνση. Συχνά, μάλιστα, είναι πάρα πολύ δύσκολο, ή ίσως και αδύνατο, να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, αφού στην περιοχή του έργου μπορεί να υφίστανται τοπογραφικοί και χωροταξικοί περιορισμοί. Επίσης, οι μετρήσεις της αντίστασης γείωσης που πραγματοποιούνται σε ένα εκτεταμένο σύστημα γείωσης, πιθανόν να μην είναι ακριβείς, λόγω της έλλειψης των κατάλληλων αποστάσεων για την εκτέλεση τους, γεγονός που είναι ικανό να οδηγήσει σε σφάλματα μείζονος σημασίας. Για τους παραπάνω λόγους προτείνεται να κατασκευάζεται το σύστημα γείωσης με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι εφικτό να μετρηθεί η αντίσταση γείωσης του κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης (ανεμογεννητριών, κέντρου ελέγχου) του αιολικού πάρκου. Οι σχετικά μικρές αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών συστημάτων γείωσης μας δίνουν τη δυνατότητα να αμελούμε τη σύνθετη αντίσταση των αγωγών διασύνδεσης. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω υπολογίστηκε η αντίσταση γείωσης για τις επιμέρους ανεμογεννήτριες και για το Κτίριο Ελέγχου και κάνουμε την παραδοχή ότι η τιμή συνολικής αντίστασης γείωσης που εμφανίζει το αιολικό πάρκο θα είναι ίση με την παράλληλη σύνθεση αυτών των τιμών. Με χρήση του CDEGS, με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 6.2.3, εξάγουμε τις παρακάτω τιμές αντιστάσεων γείωσης:

	R(Ω)
A/Γ 1	49,171
A/Γ 2	58,987
A/Γ 3	79,515
A/Γ 4	50,124
A/Γ 5	71,318
A/Γ 6	27,769
A/Γ 7	102,010
A/Γ 8	77,962
A/Γ 9	106,510
ΚΕ	104,390

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα μέτρησης αντιστάσεων γείωσης στο CDEGS

Ο διαμοιρασμός του ρεύματος σφάλματος  $I_f$  στα επιμέρους συστήματα γείωσης γίνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αντίσταση τους, γεγονός που προκύπτει από την παράλληλη συνδεσμολογία και τον υποκαταμεριστή ρεύματος ( $S_f$ ) που αυτή συνεπάγεται. Για το ρεύμα πλέγματος  $I_{gi}$ , που διοχετεύεται στο έδαφος, μέσω του  $i$  συστήματος γείωσης, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$I_{gi} = S_{fi} \cdot I_f \quad (6.3.3.1)$$

$$S_{fi} = \frac{Z_{eqi}}{Z_{eqi} + R_{gi}}$$

(6.3.3.2)

$$Z_{eqi} = \frac{1}{\sum_{j \neq i}^N \frac{1}{R_{gj}} + \frac{1}{R_{g\ c/c}}}$$

(6.3.3.3)

Στον πίνακα που ακολουθεί, περιέχονται οι συντελεστές καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος, που αντιστοιχούν σε κάθε επιμέρους σύστημα γείωσης:

	Sf
A/Γ 1	0,126
A/Γ 2	0,105
A/Γ 3	0,078
A/Γ 4	0,124
A/Γ 5	0,087
A/Γ 6	0,223
A/Γ 7	0,061
A/Γ 8	0,079
A/Γ 9	0,058
ΚΕ	0,059

Πίνακας 6.4 Συντελεστές καταμερισμού ρεύματος σφάλματος

### 6.3.4 Υπολογισμός Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής

Όπως προαναφέρθηκε, ο χειρότερος τύπος και θέση σφάλματος σε μια ανεμογεννήτρια είναι το μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT και μας δίνει το υψηλότερο ρεύμα σφάλματος  $I_f$ . Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που λάβαμε από την Α/Γ 1 για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT(IEC->0,74kA,Complete->0,724kA,ANSI->0,663kA). Για να προσομοιωθεί η απόκριση του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης, θεωρήσαμε ισοδύναμα μεμονωμένα συστήματα γείωσης, τα οποία διαρρέουν τα αντίστοιχα ρεύματα πλέγματος του συστήματος που είναι διασυνδεδεμένο. Στον πίνακα, παρακάτω, έχει γίνει υπολογισμός του ρεύματος πλέγματος  $I_g$  για κάθε ανεξάρτητο σύστημα γείωσης για μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά MT της Α/Γ 1, σύμφωνα και με τους τρεις τρόπους για τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος:

	$I_g(\text{IEC})$	$I_g(\text{Complete})$	$I_g(\text{ANSI})$
Α/Γ 1	93,24A	91,22A	83,54A
Α/Γ 2	77,70A	76,02A	69,62A
Α/Γ 3	57,72A	56,47A	51,71A
Α/Γ 4	91,76A	89,78A	82,21A
Α/Γ 5	64,38A	62,99A	57,68A
Α/Γ 6	165,02A	161,45A	147,85A
Α/Γ 7	45,14A	44,16A	40,44A
Α/Γ 8	58,46A	57,20A	52,38A
Α/Γ 9	42,92A	41,99A	38,45A
ΚΕ	43,66A	42,72A	39,12A

Πίνακας 6.5 Ρεύματα πλέγματος για κάθε υποψήφια θέση των ανεμογεννητριών

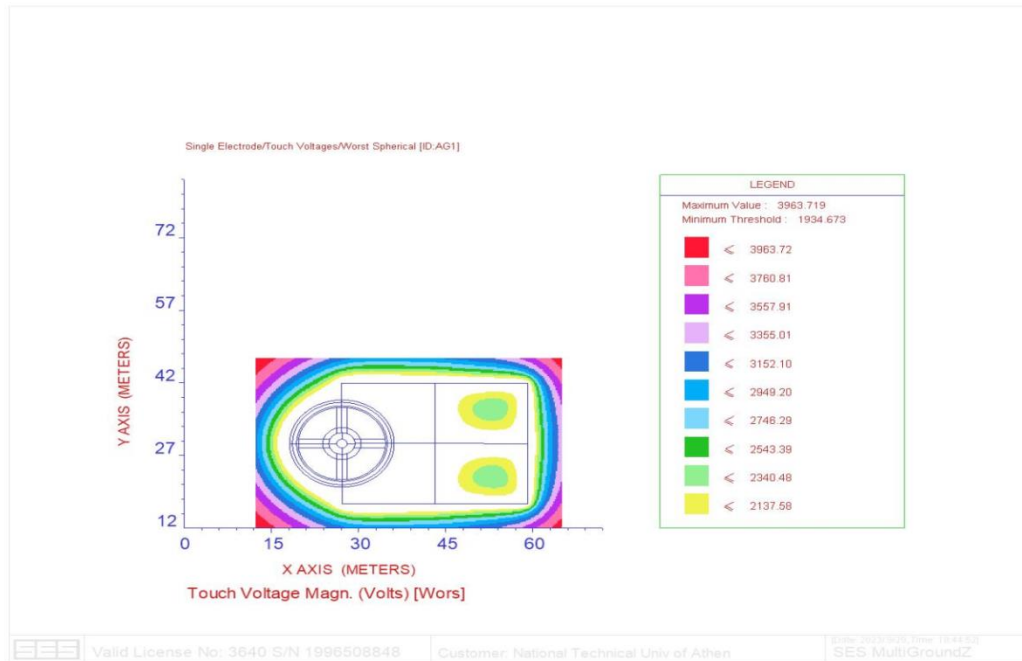
Με βάση τα παραπάνω, υπολογίστηκαν στο λογισμικό CDEGS οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, ορίζοντας συχνότητα συστήματος 50Hz και ανθρώπινο βάρος 70kg. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν και στις εννέα ανεμογεννήτριες για διάρκεια σφάλματος 0,5 και 1 δευτερολέπτου και για τα τρία πιθανά ρεύματα σφάλματος. Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν, αρχικά, ορίζοντας στο **Surface Layer** του προγράμματος την αντίσταση και το πάχος να ισούνται με 0,δηλαδή χωρίς να υπάρχει υλικό επιφάνειας. Σε περίπτωση που στα αποτελέσματα υπάρχουν σημεία του πλέγματος που αναπτύσσουν τάσεις, οι οποίες ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια, το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να αλλαχθούν οι τιμές στις παραμέτρους του **Surface Layer** και να χρησιμοποιηθεί ως υλικό επιφάνειας είτε χαλίκι(αντίσταση 2500Ω, πάχος 5cm-10cm), είτε άσφαλτος(αντίσταση 10000Ω, πάχος 5cm-10cm) προκειμένου να αυξηθούν οι τιμές των ορίων ασφαλείας. Όλες οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.



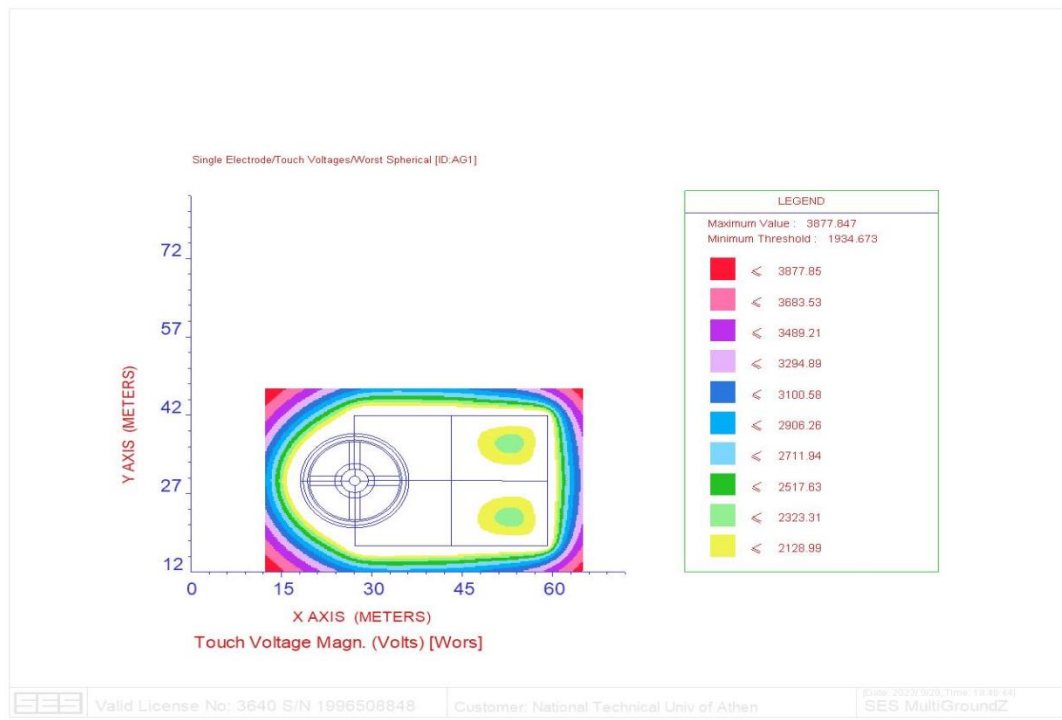
### 6.3.4.1 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 1

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

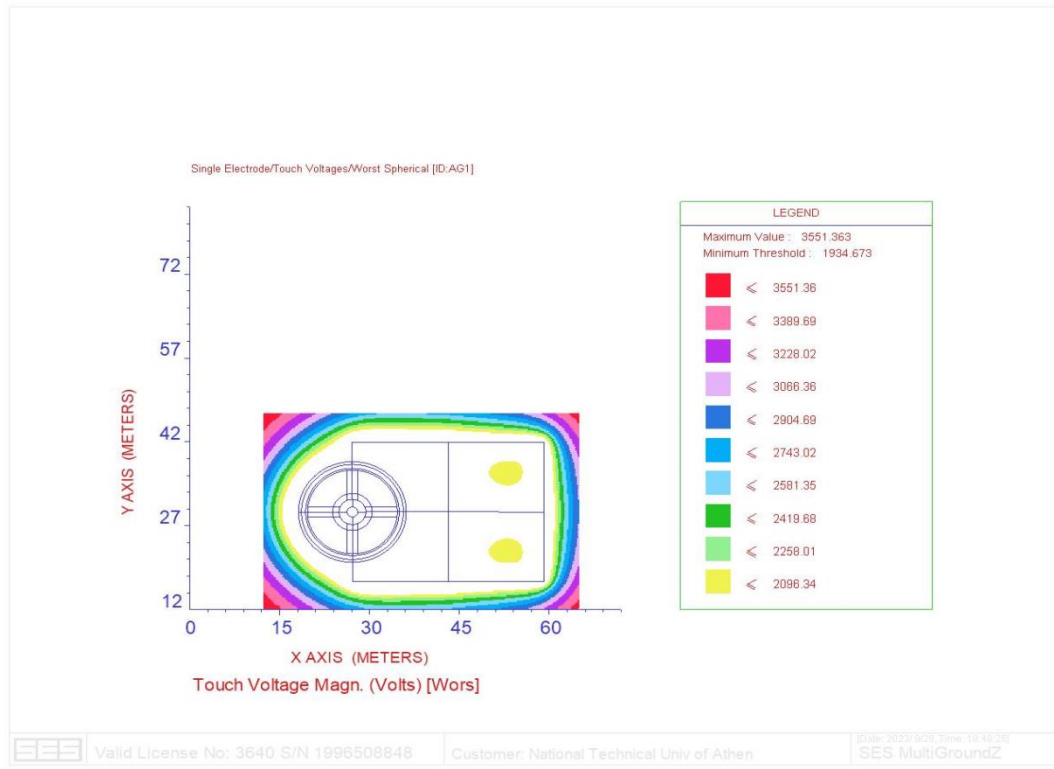
#### IEC



#### Complete

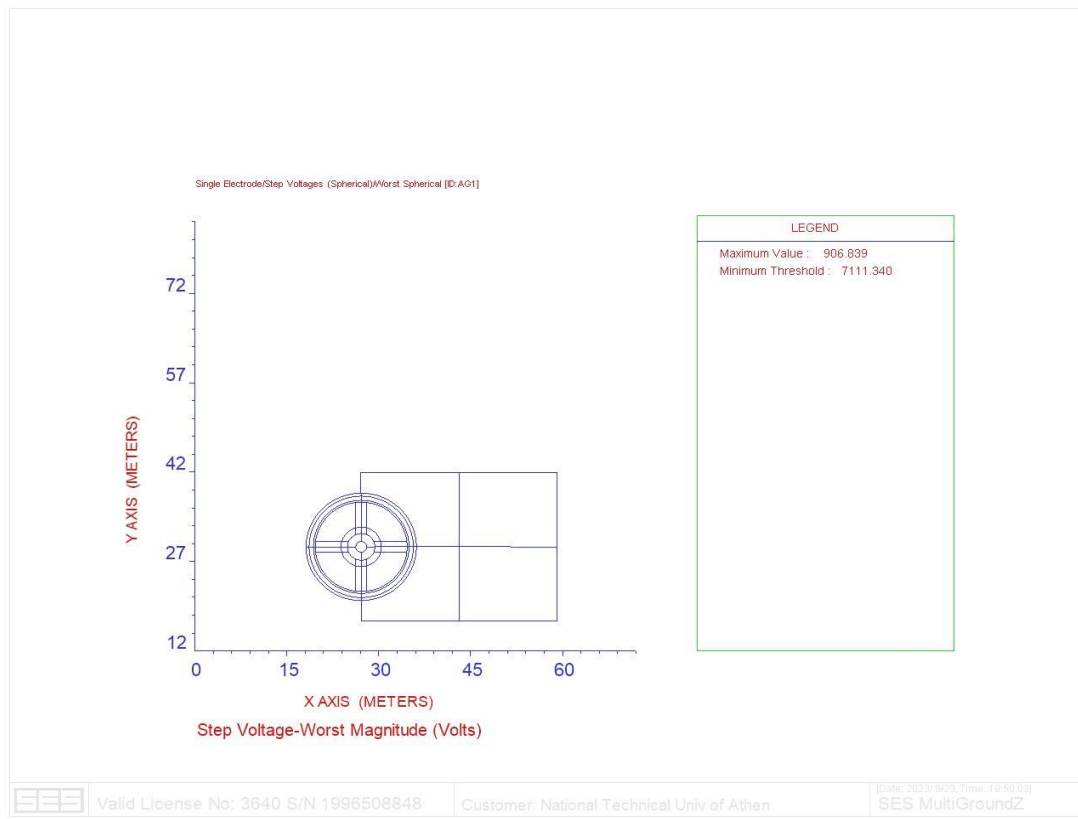


#### ANSI

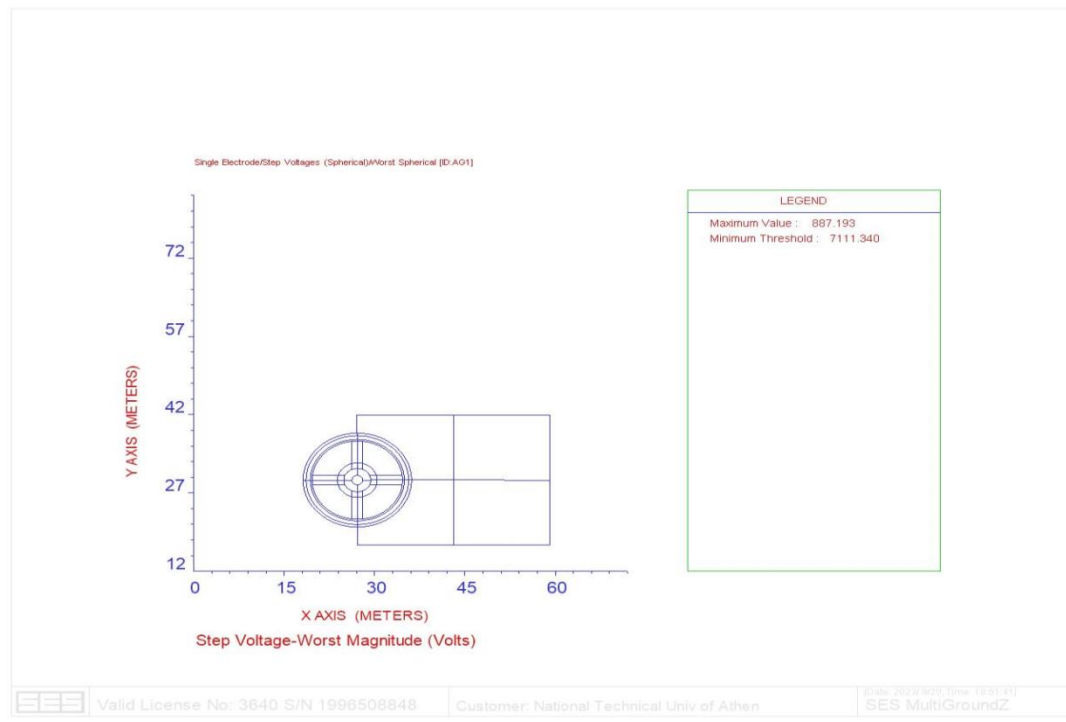


Σχήμα 6.5 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 1 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec  
Και βηματικές τάσεις:

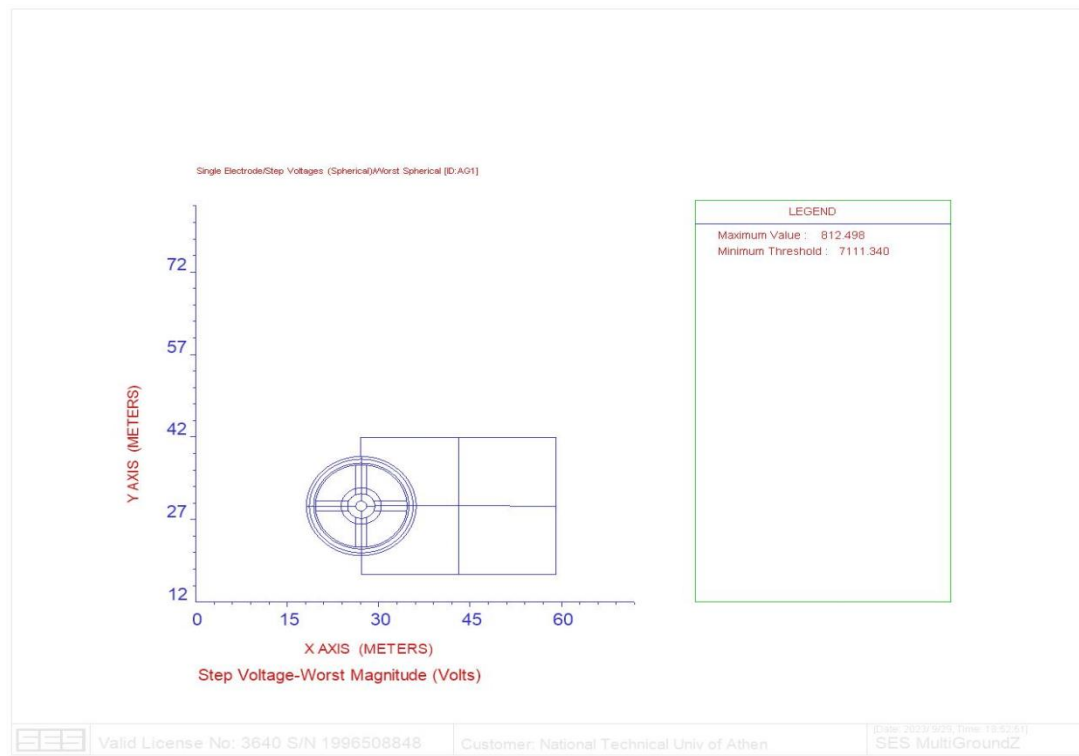
**IEC**



## Complete



## ANSI

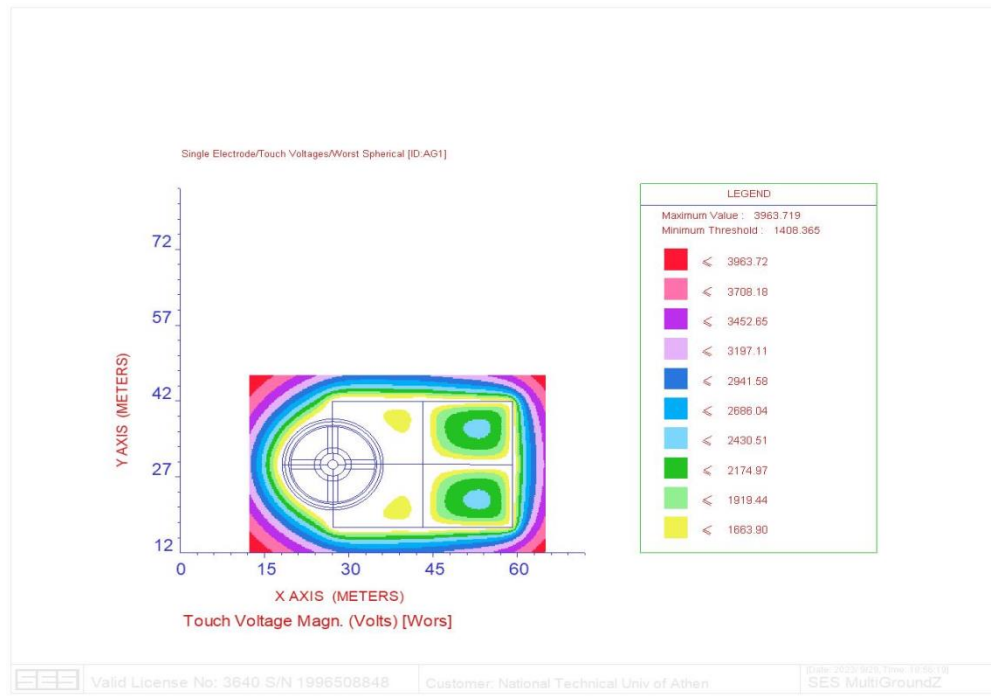


Σχήμα 6.6 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 1 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

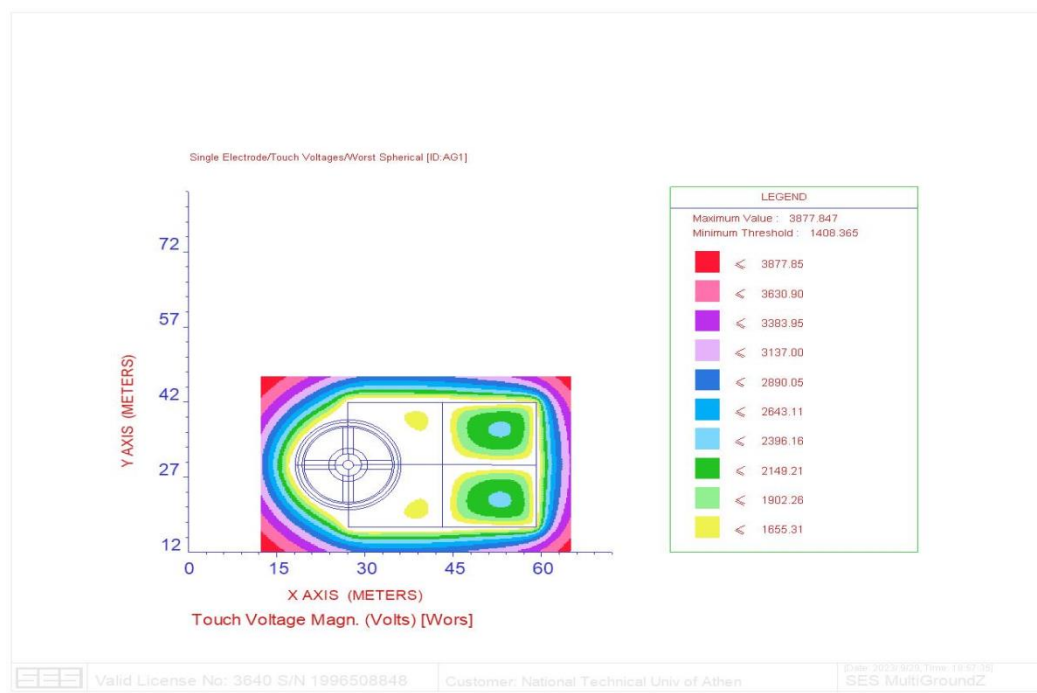
Παρατηρούμε οτι τόσο οι τάσεις επαφής, όσο και οι βηματικές τάσεις, υπολογίστηκαν μέσα στα επιτρεπτά όρια και δεν χρειάζεται η προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας.

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

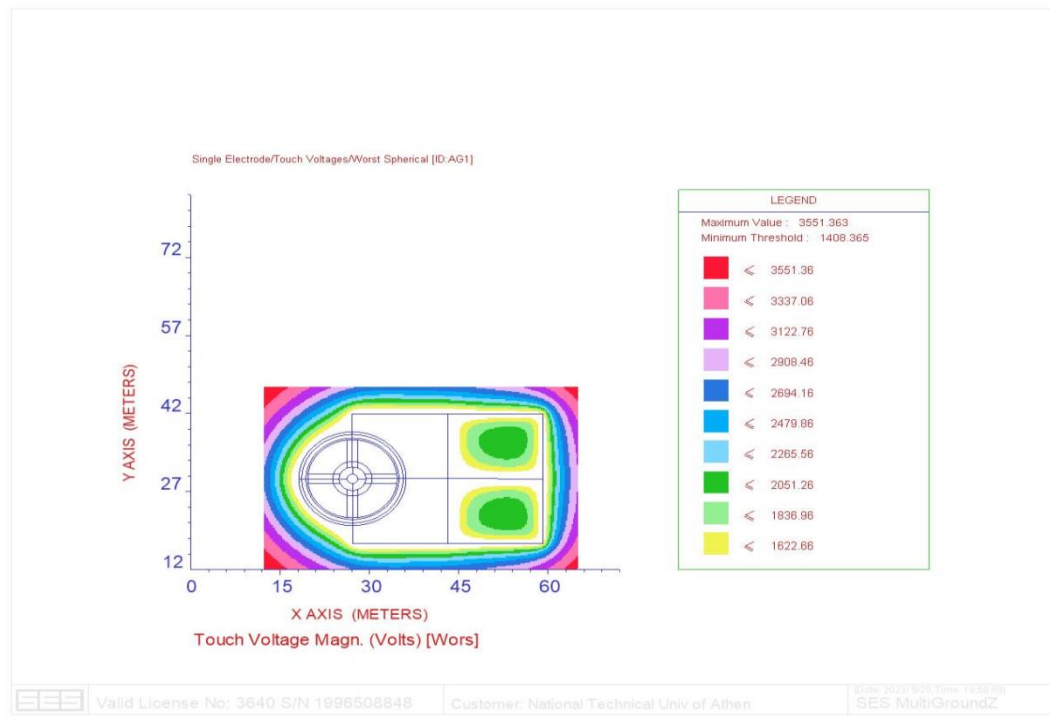
### IEC



### Complete



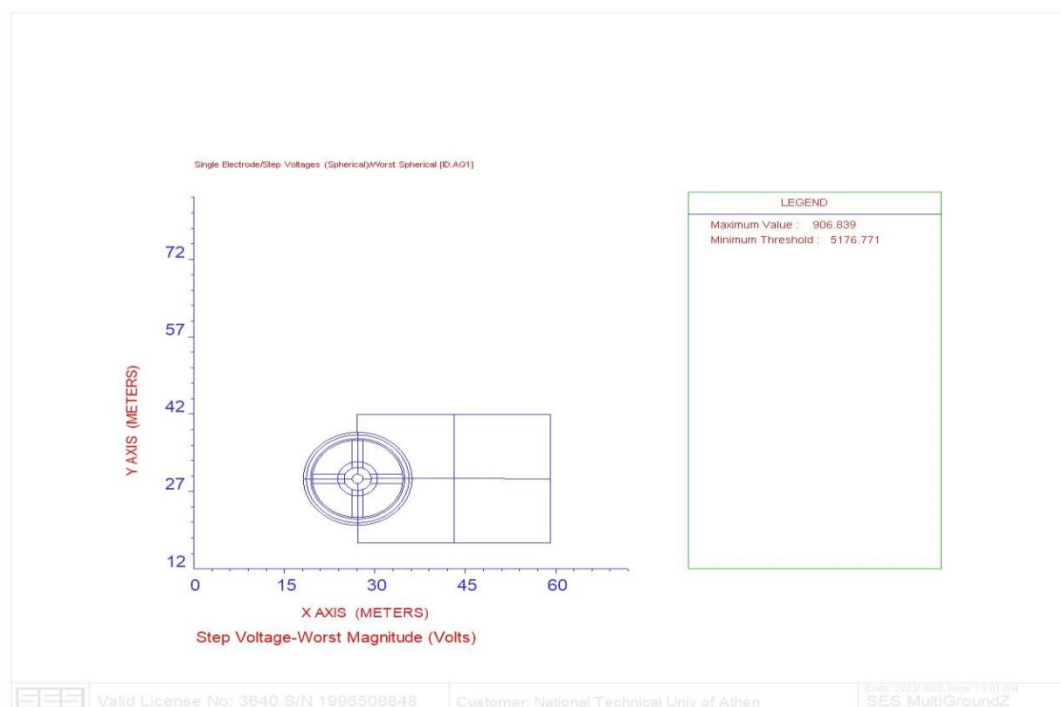
## ANSI



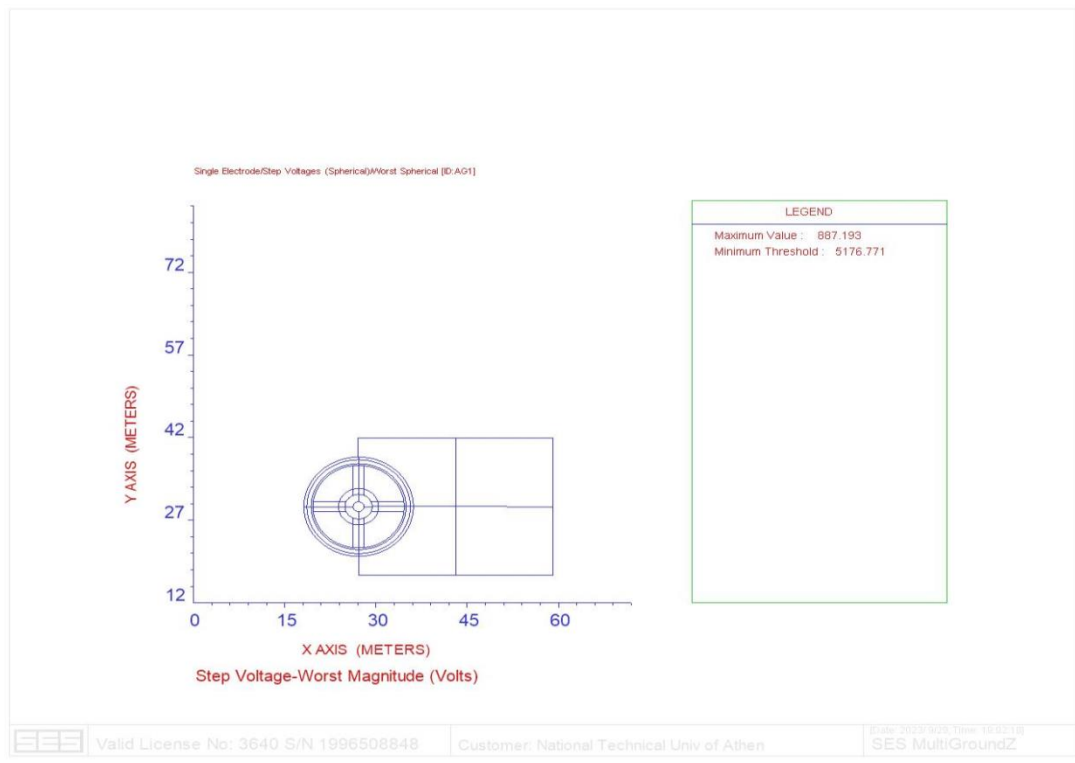
Σχήμα 6.7 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 1 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

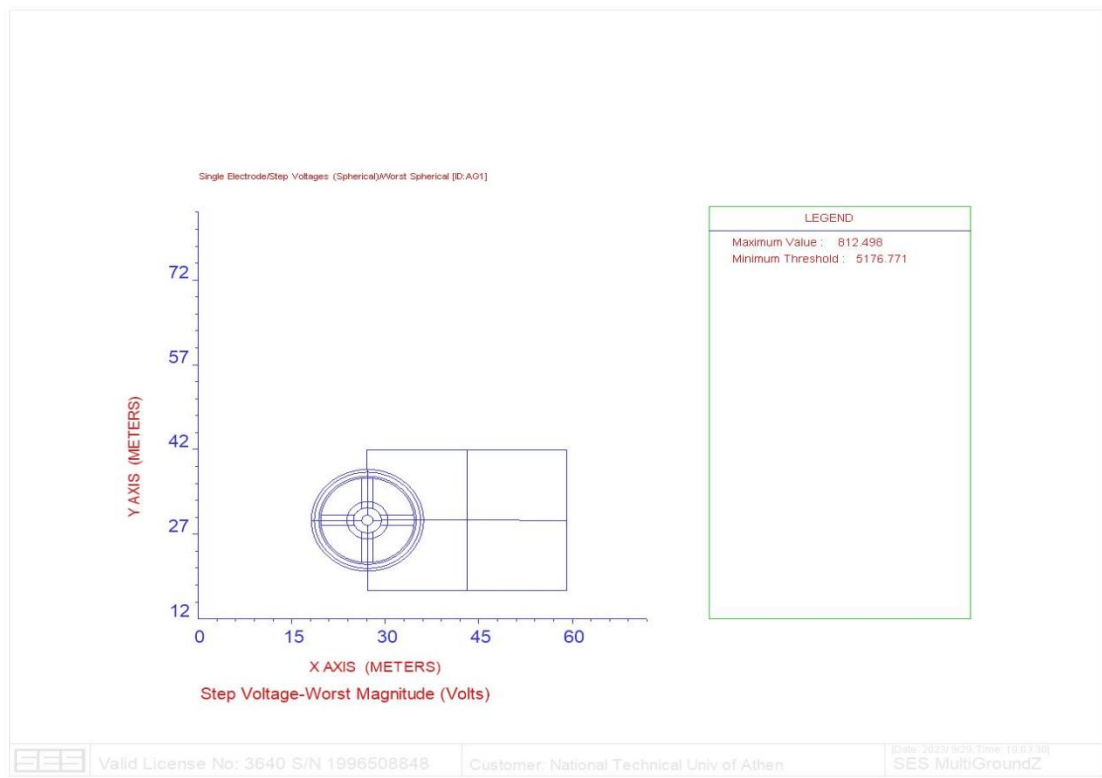
## IEC



## Complete



## ANSI



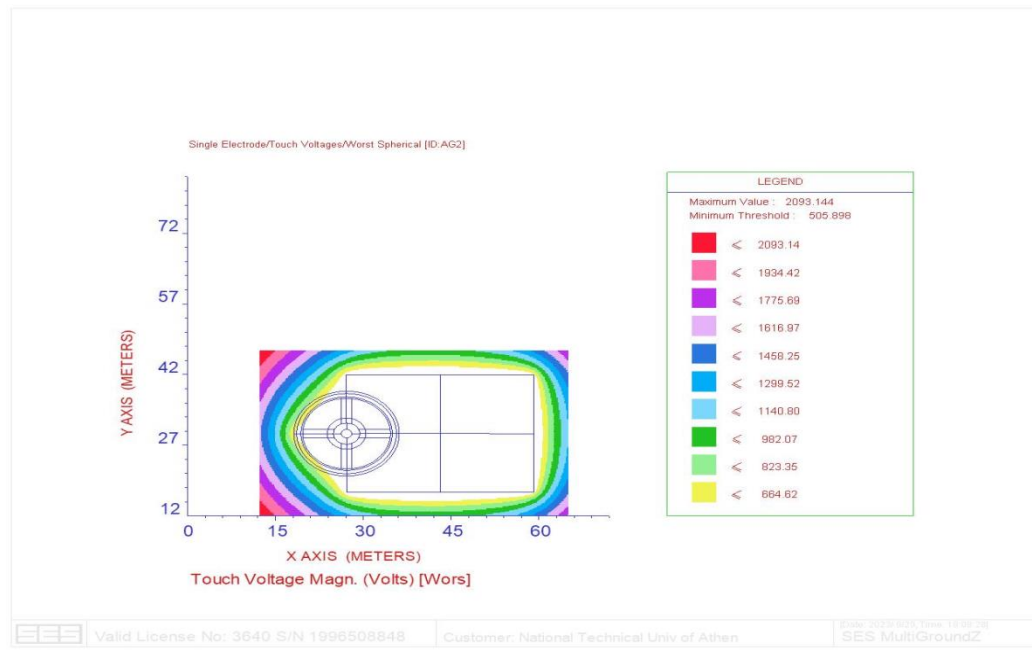
Σχήμα 6.8 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 1 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Όπως φαίνεται στα γραφήματα, και πάλι, οι τάσεις που υπολογίστηκαν βρίσκονται εντός επιτρεπτών ορίων και το σύστημα γείωσης της ΑΓ 1 θεωρείται απόλυτα ασφαλές.

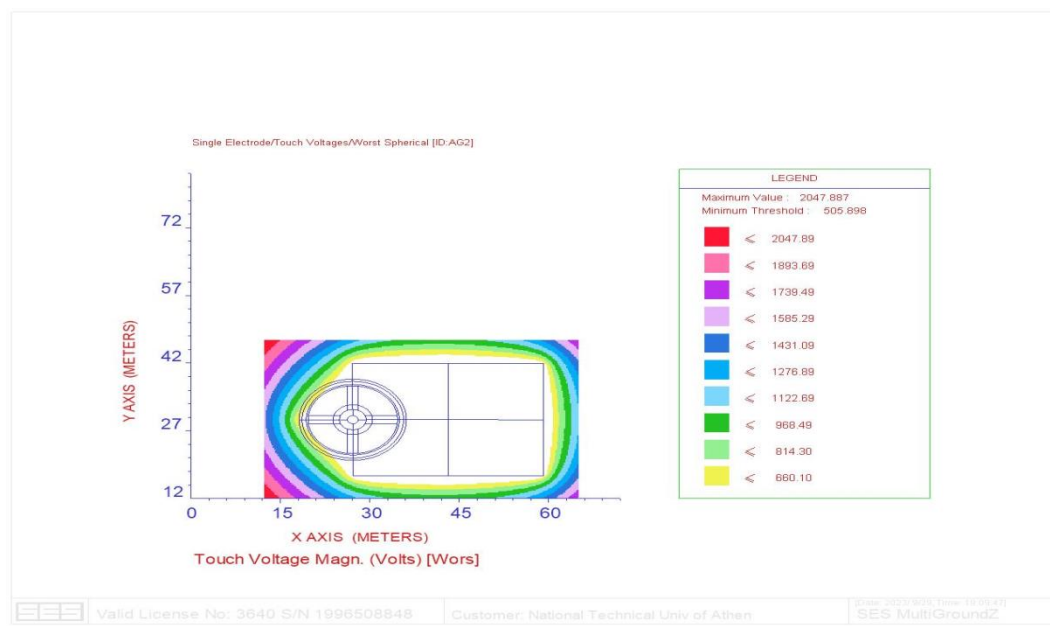
### 6.3.4.2 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 2

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

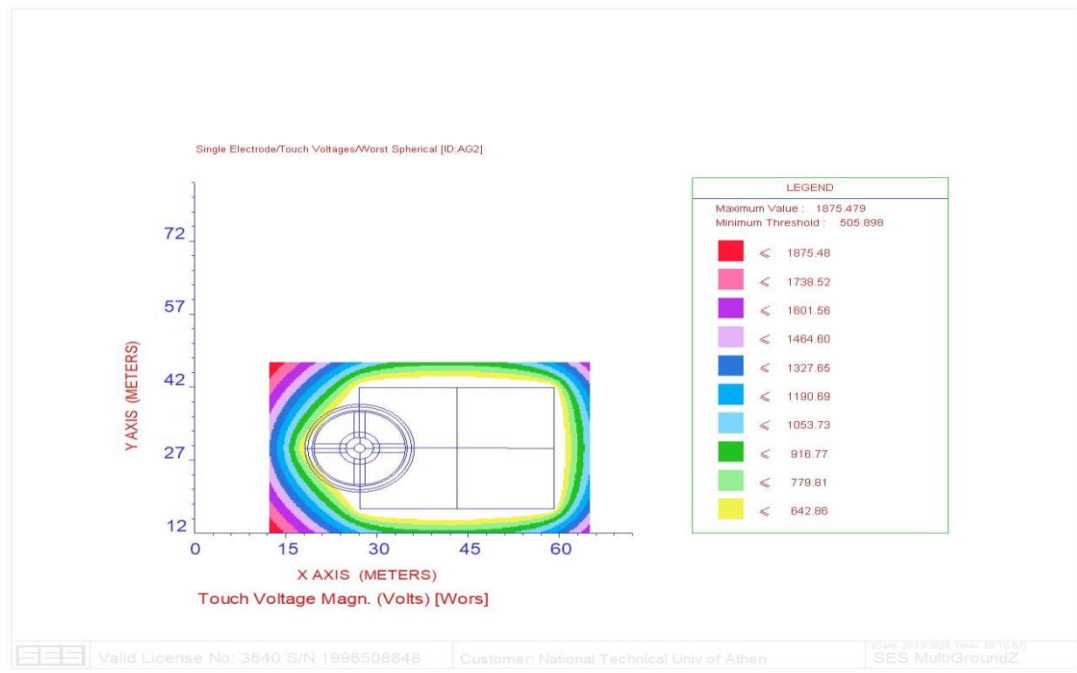
#### IEC



#### Complete



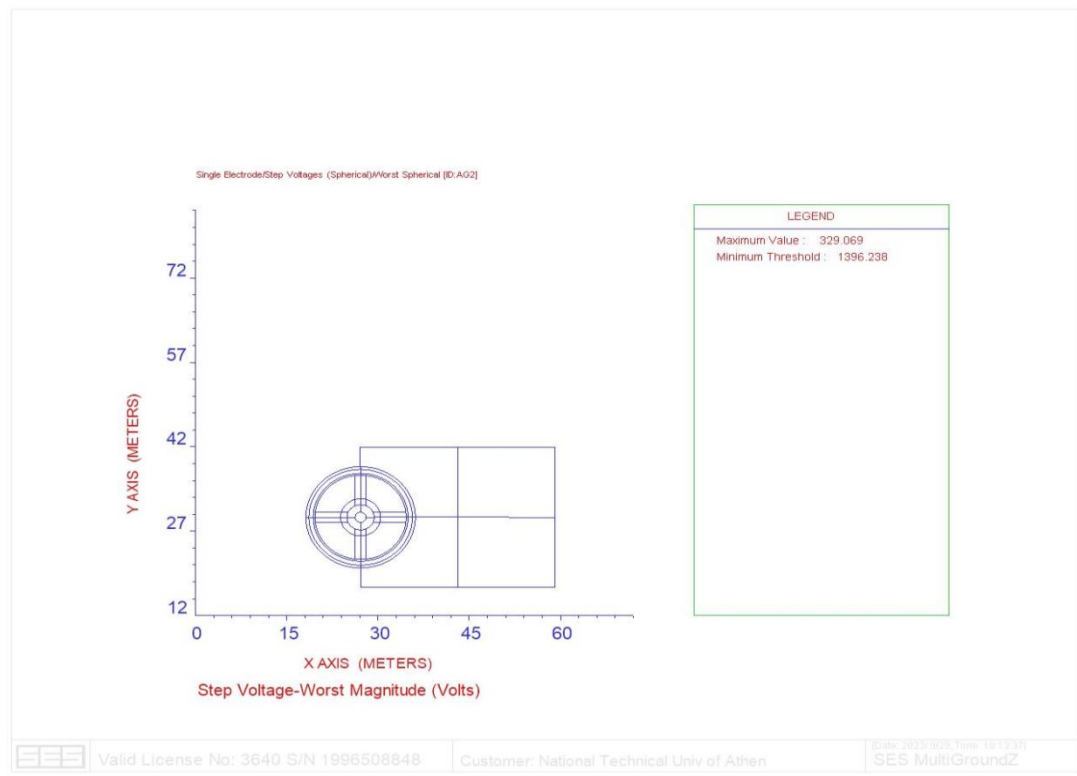
## ANSI



Σχήμα 6.9 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 2 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

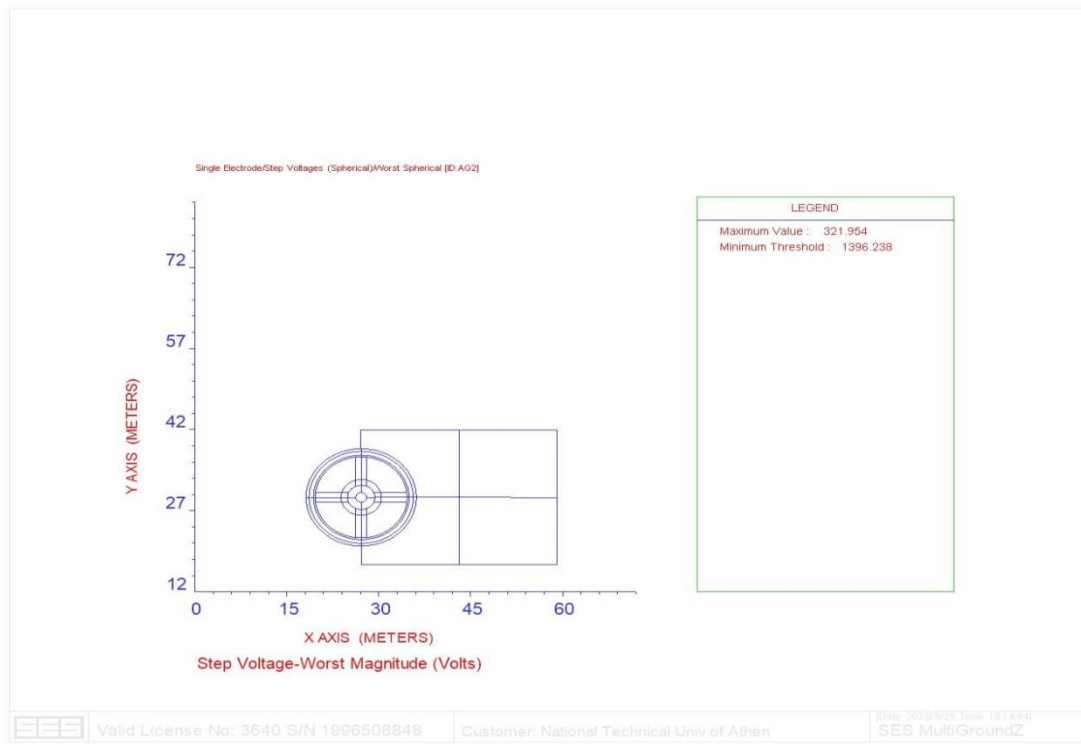
Και βηματικές τάσεις:

## IEC

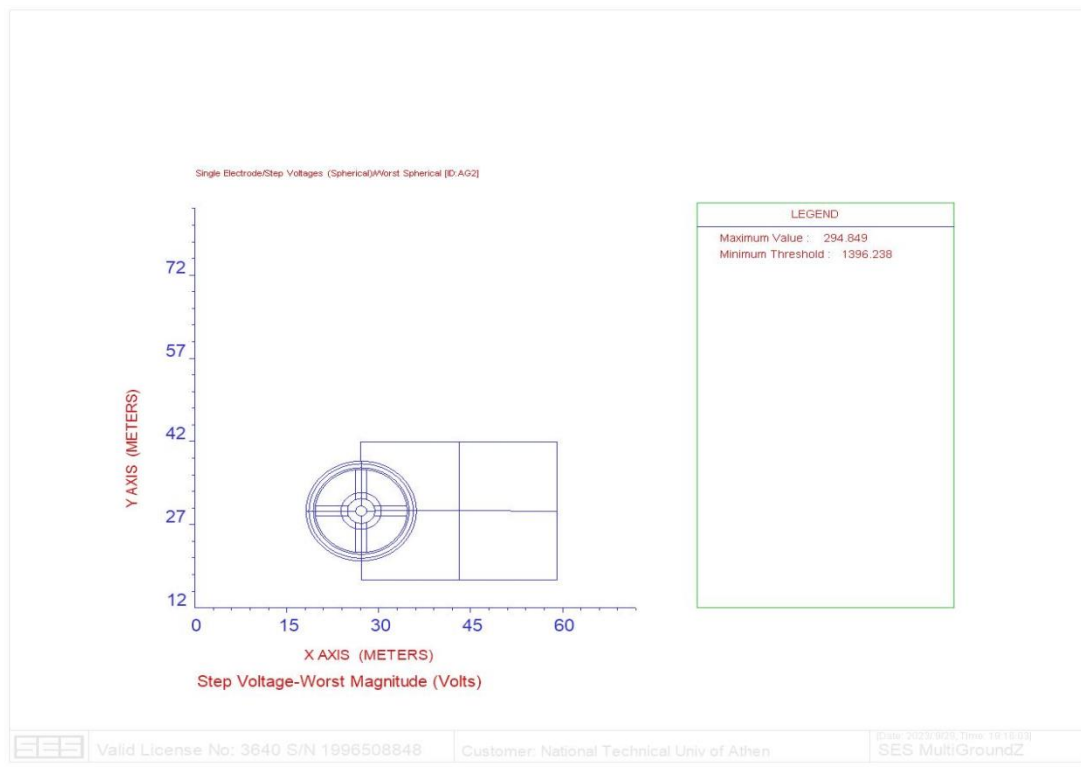




## Complete



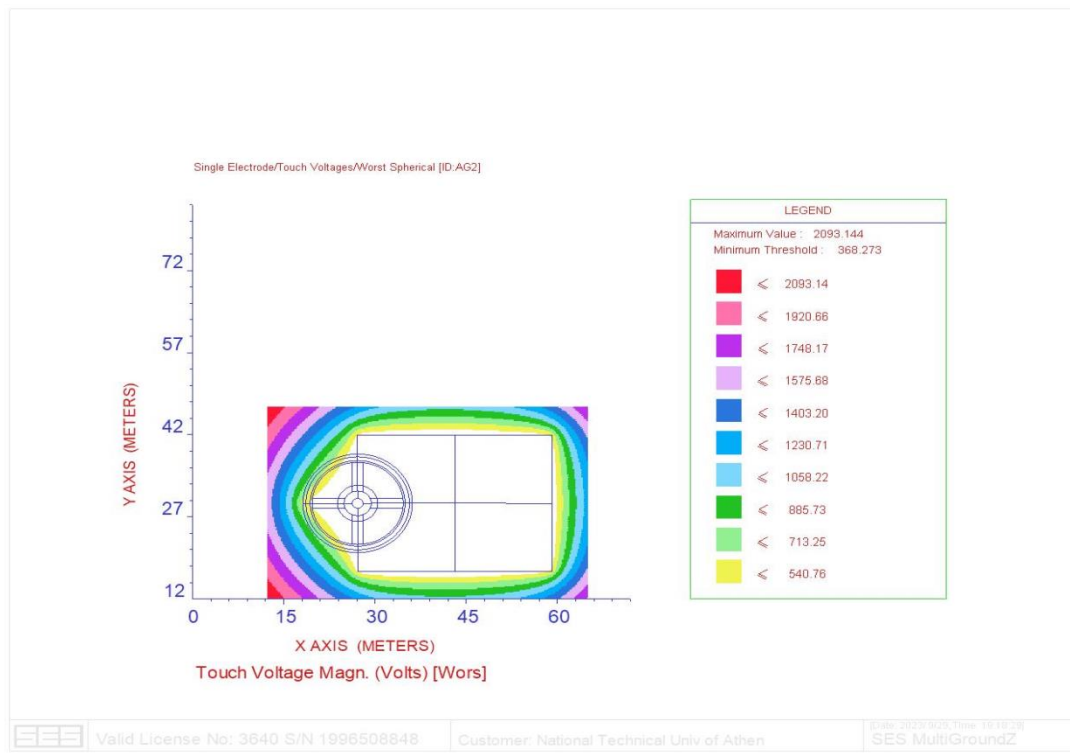
## ANSI



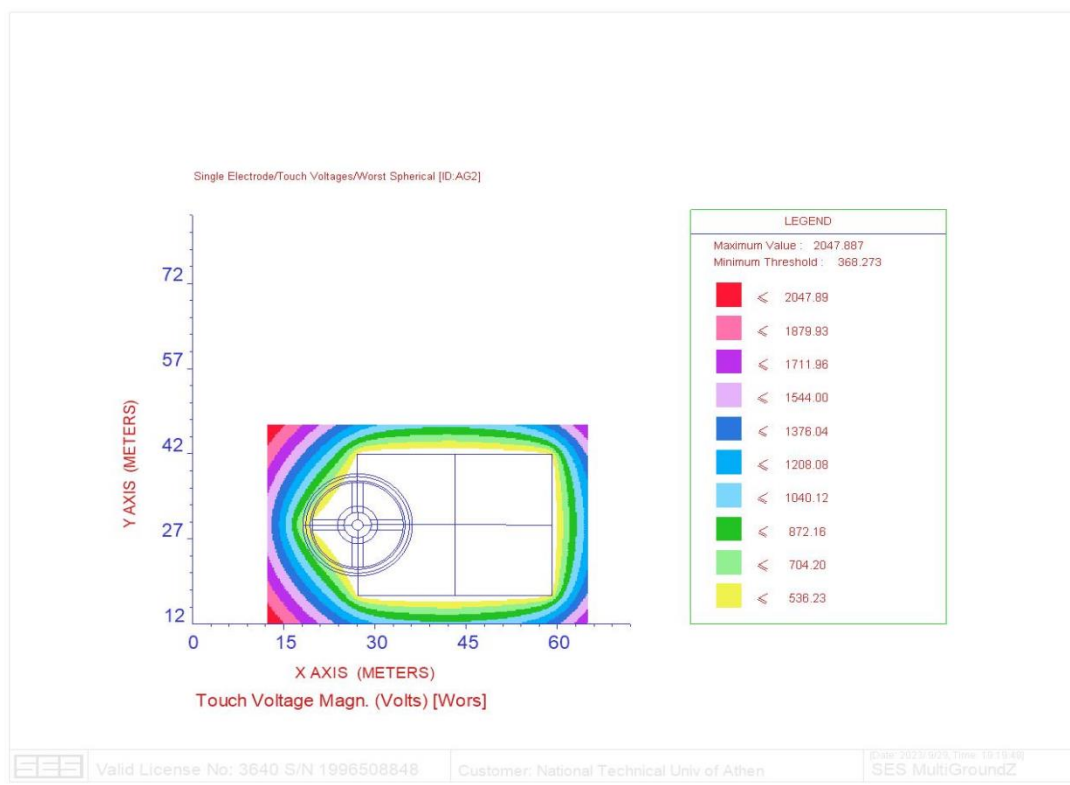
Σχήμα 6.10 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις επαφής στην Α/Γ 2 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

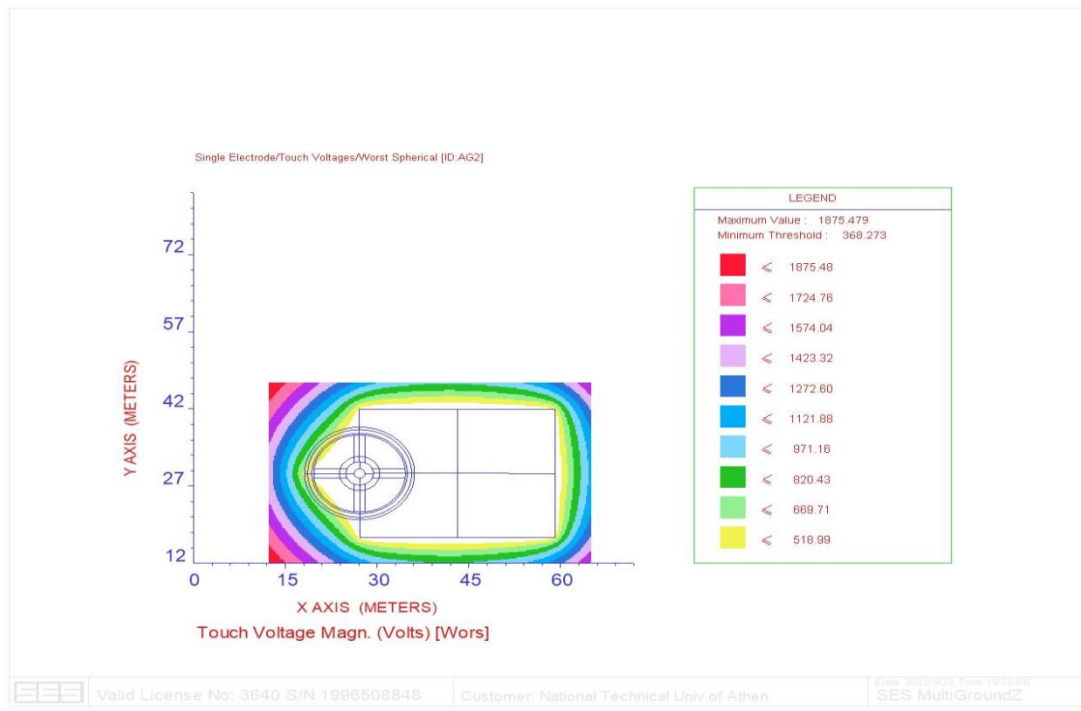
**IEC**



**Complete**



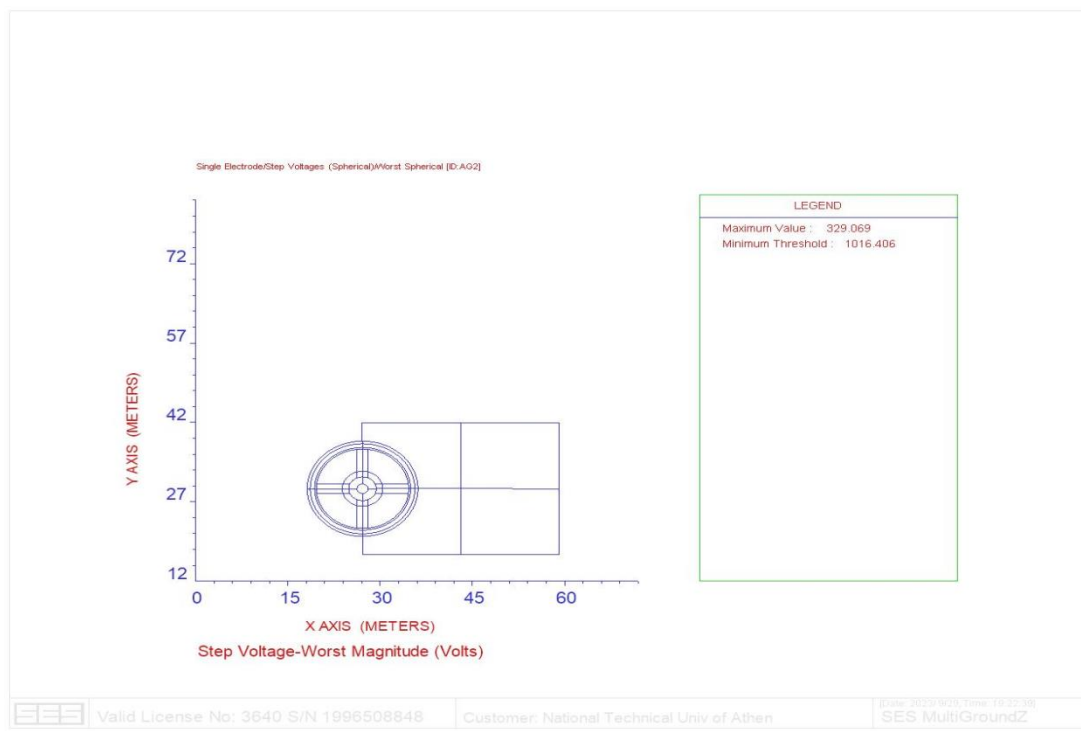
## ANSI



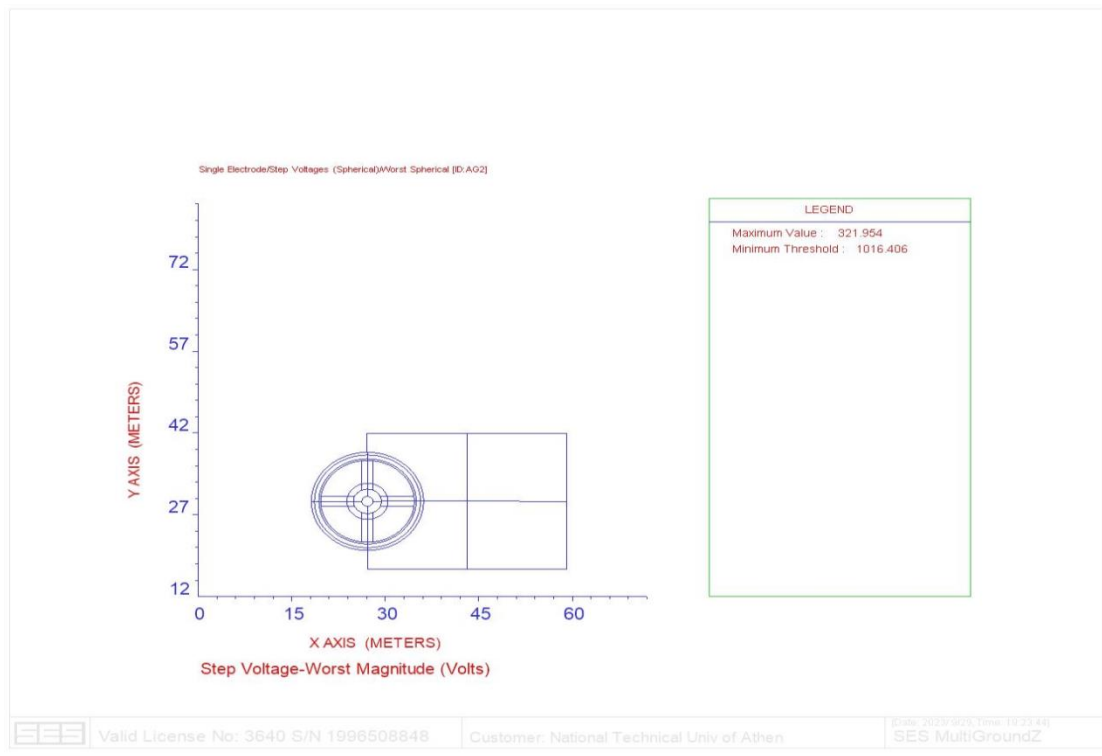
Σχήμα 6.11 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 2 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

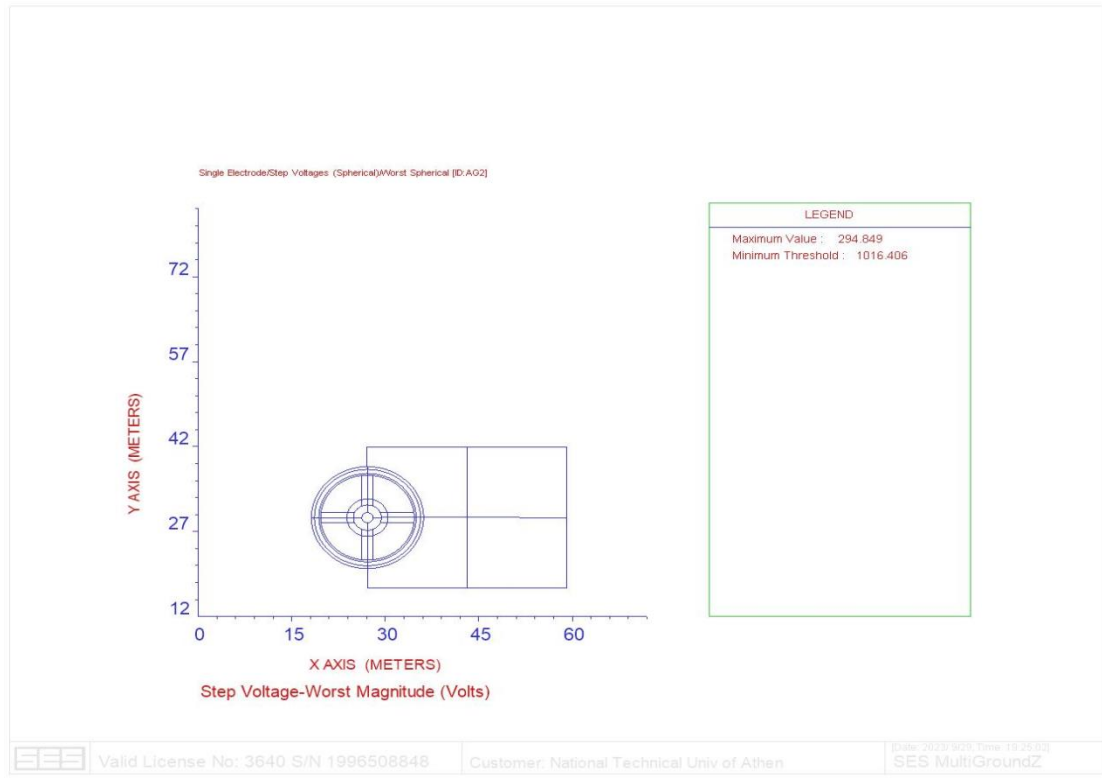
## IEC



## Complete



## ANSI



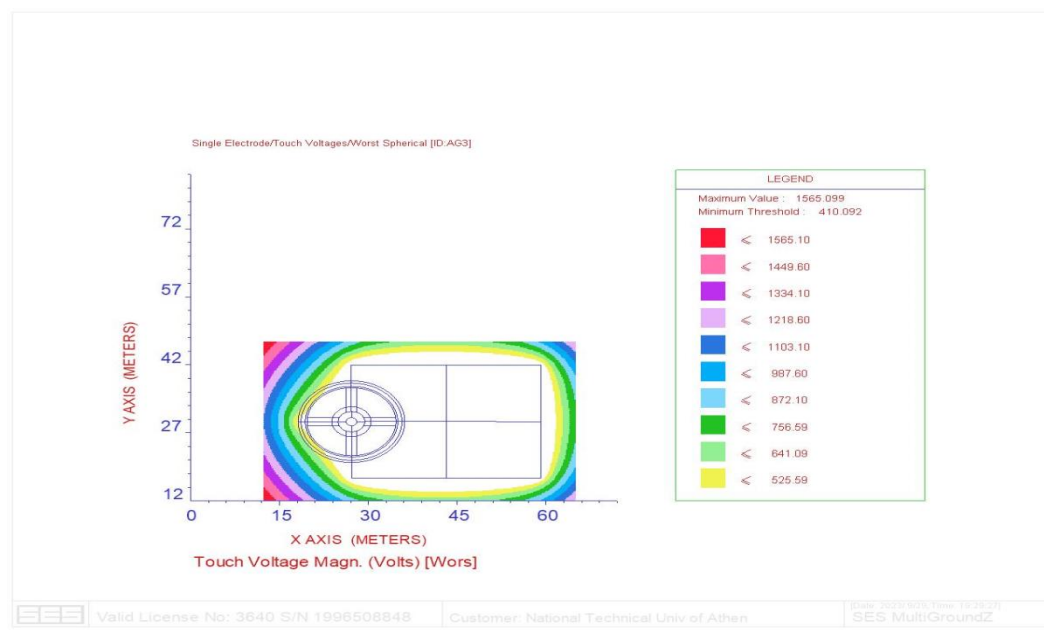
Σχήμα 6.12 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 2 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Παρατηρούμε ότι οι επικίνδυνες τάσεις επαφής αναπτύσσονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 3m του πυλώνα της ΑΓ 2, συνεπώς δεν απαιτείται η προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας.

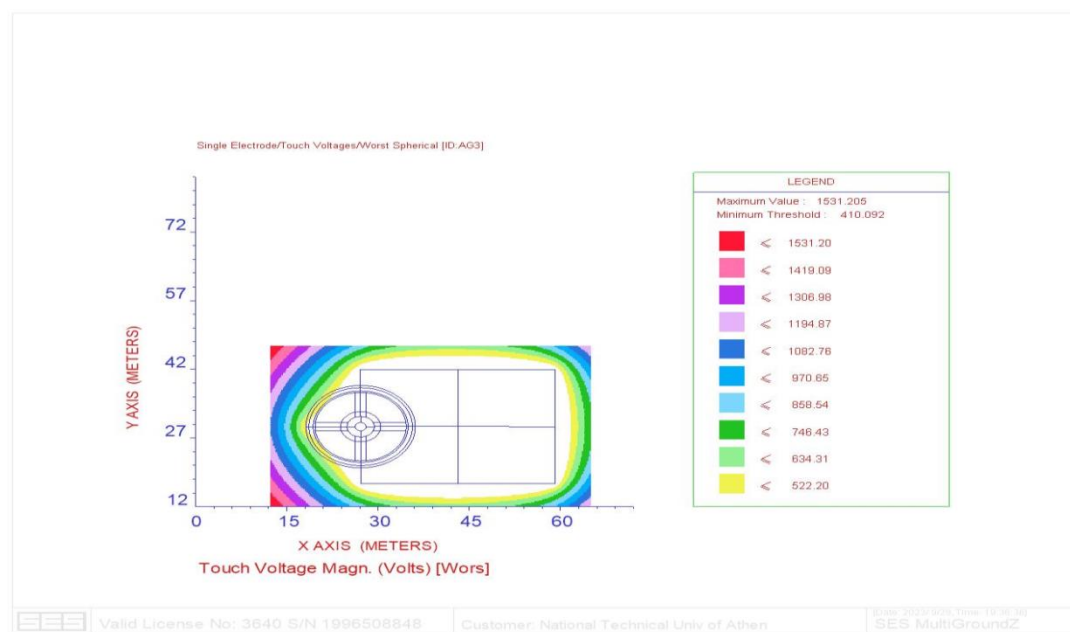
### 6.3.4.3 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 3

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

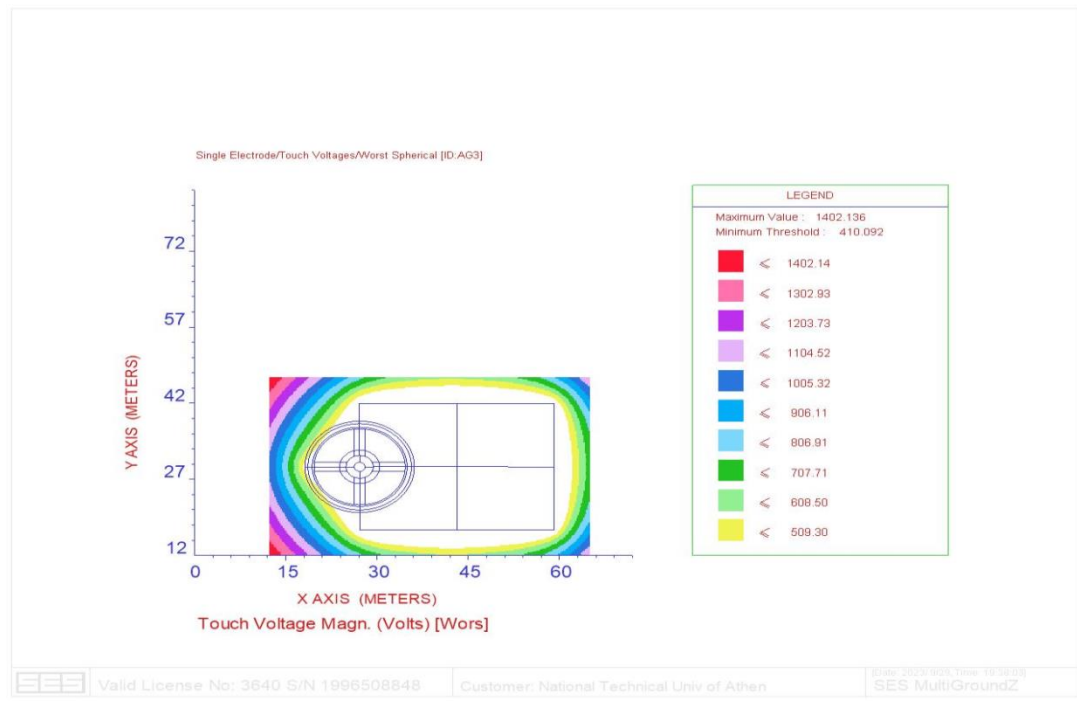
#### IEC



#### Complete



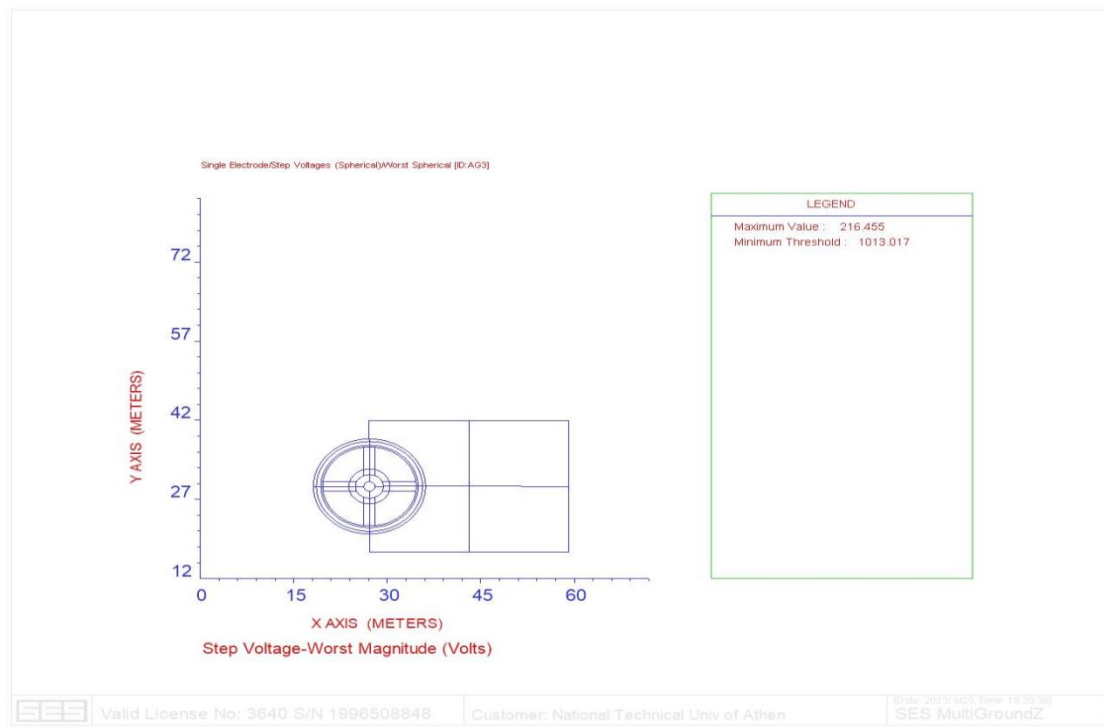
## ANSI



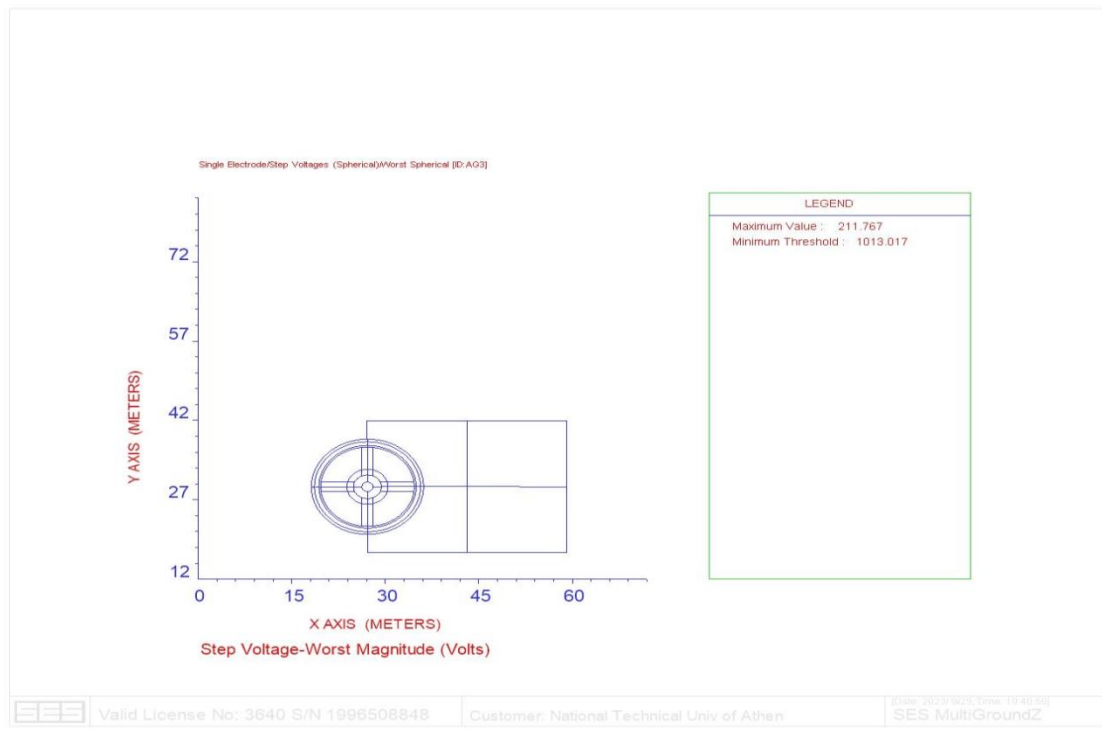
Σχήμα 6.13 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 3 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Και βηματικές τάσεις:

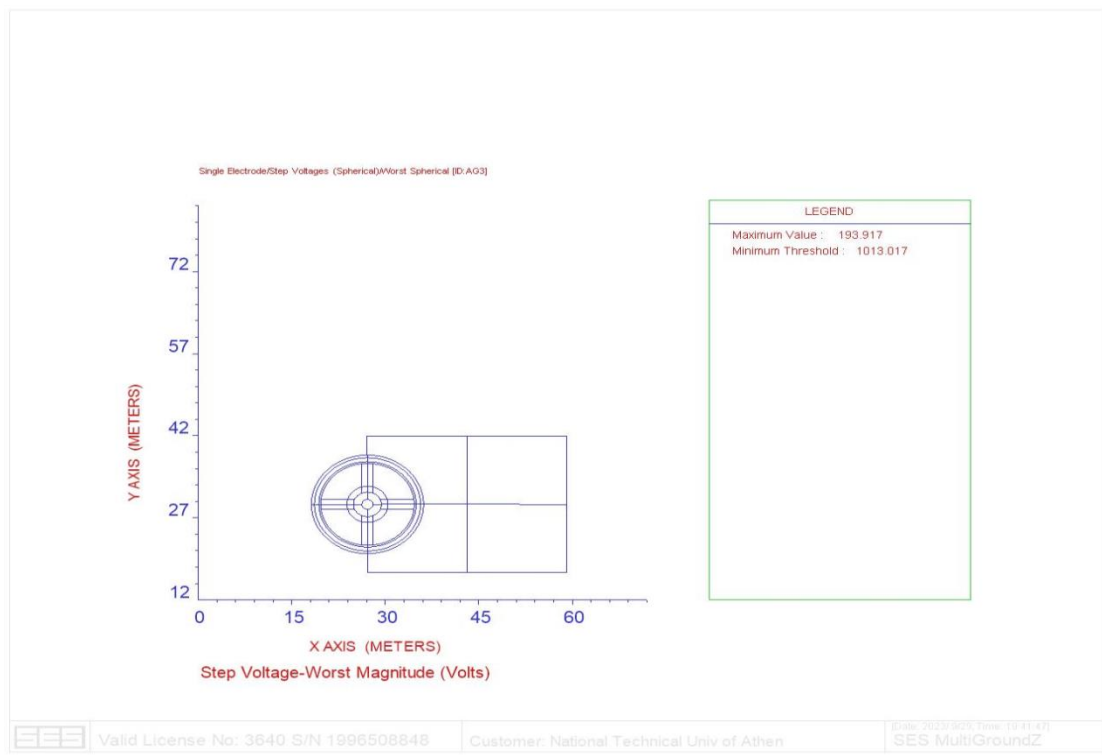
## IEC



## Complete



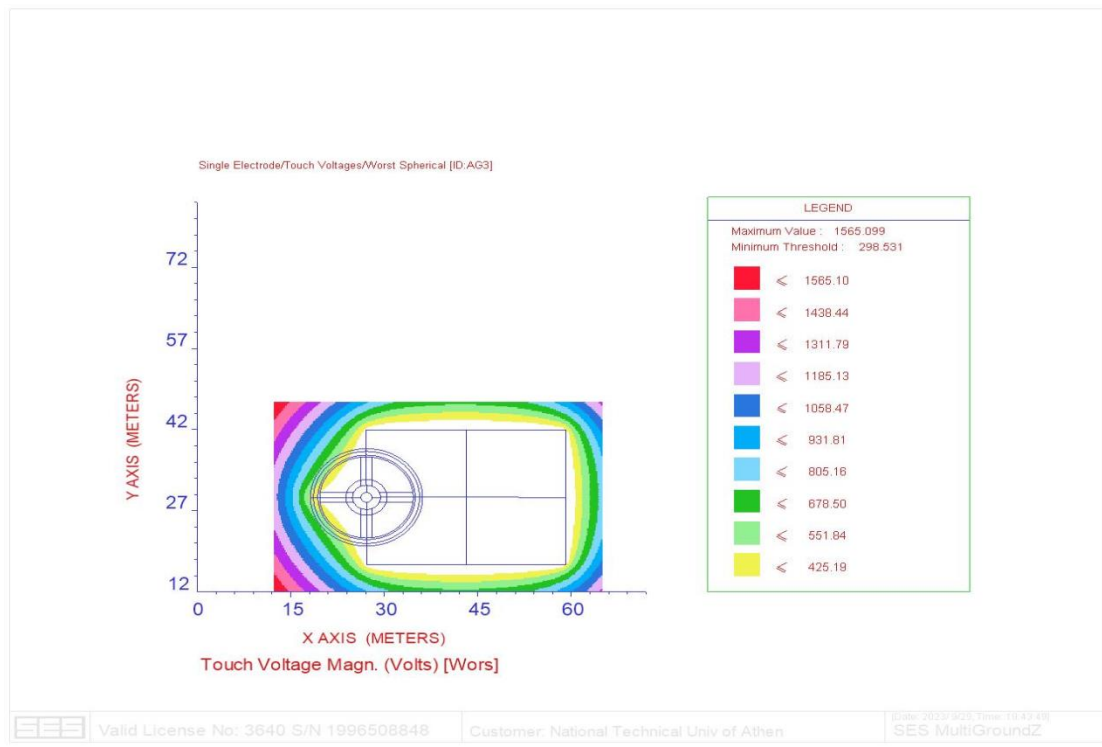
## ANSI



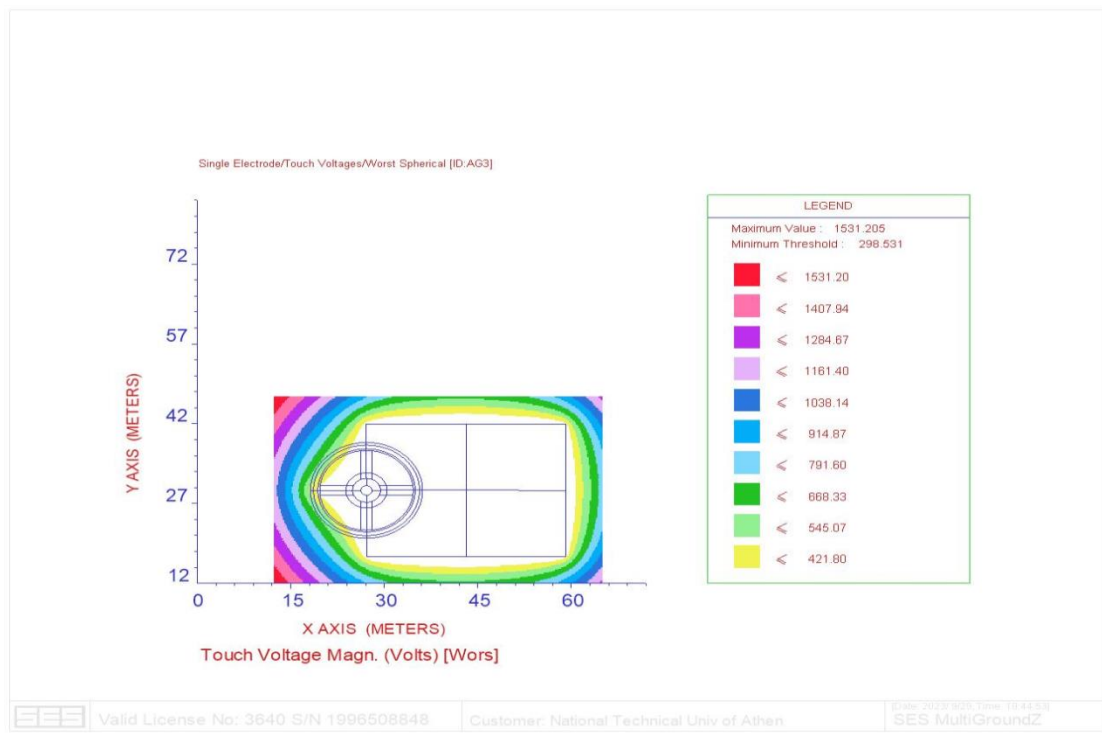
Σχήμα 6.14 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 3 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

### IEC

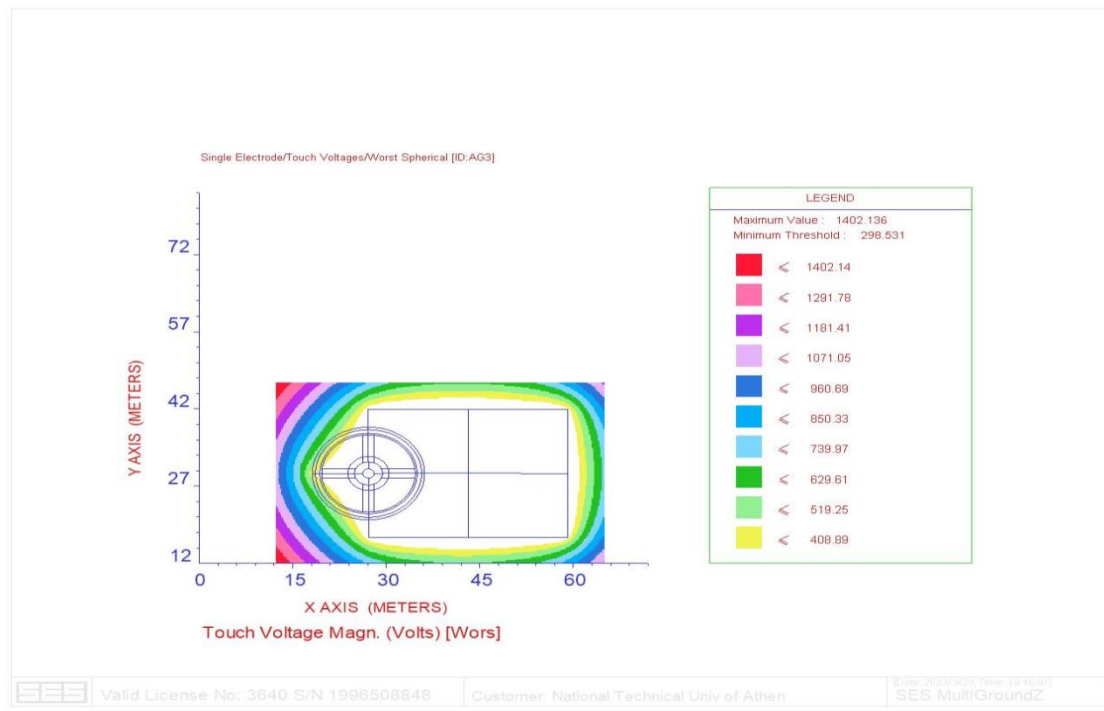


### Complete





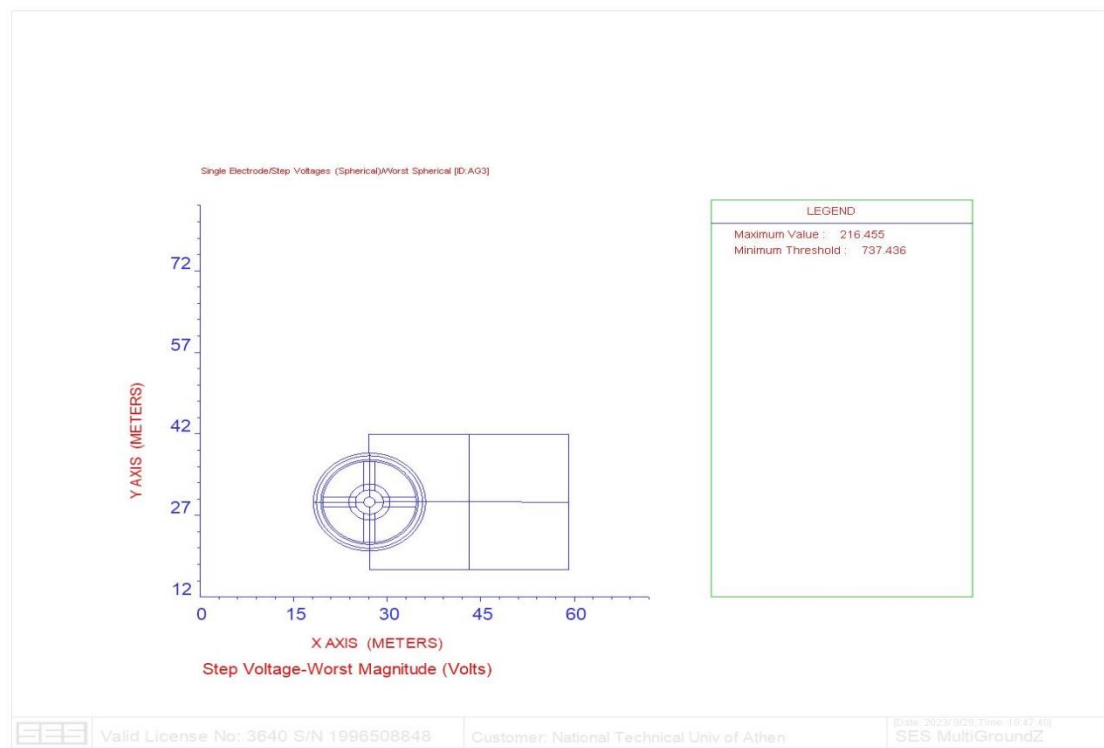
## ANSI



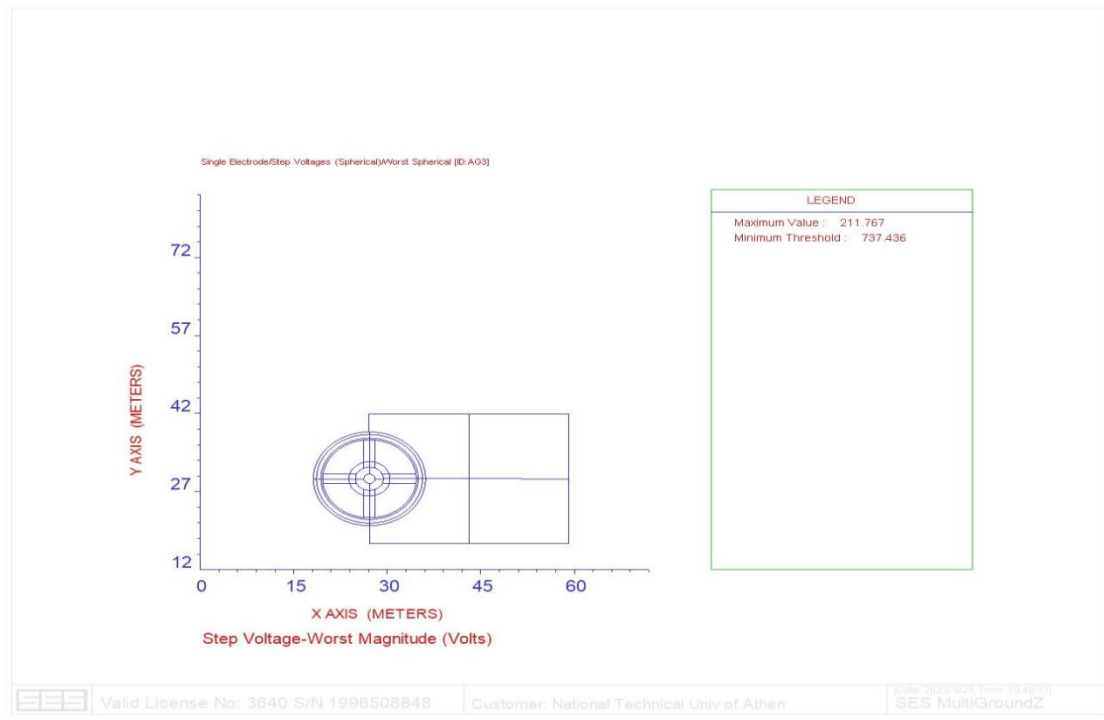
Σχήμα 6.15 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 3 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

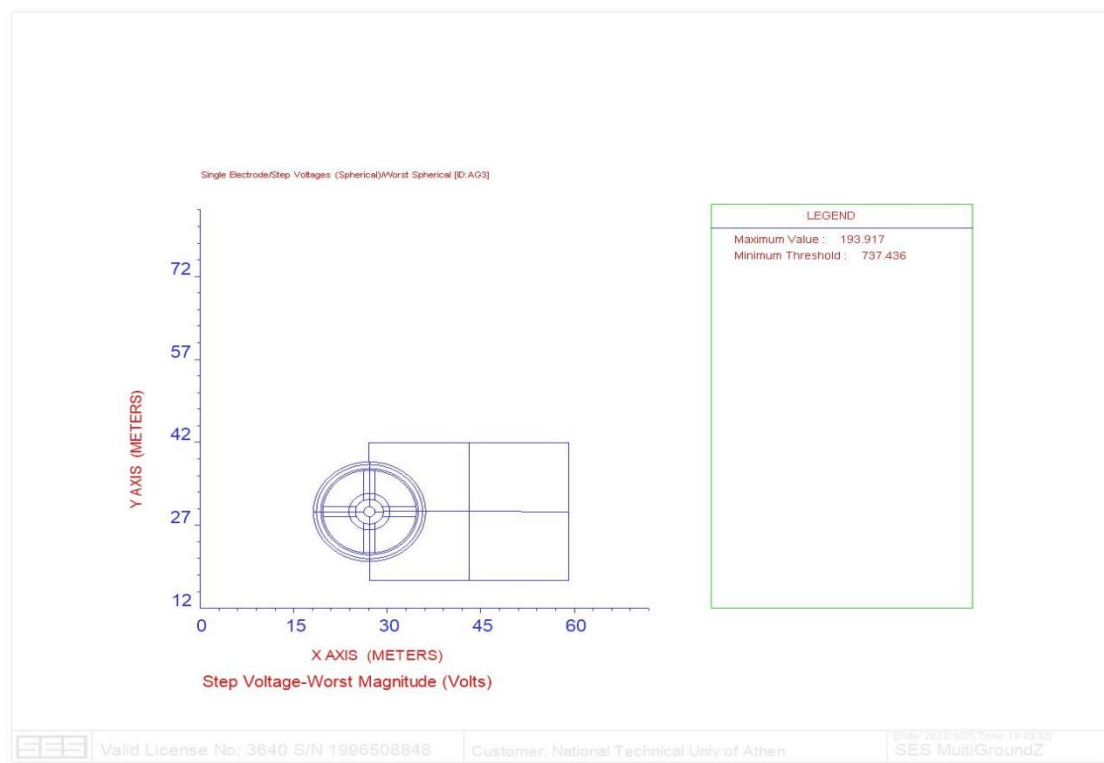
## IEC



## Complete



## ANSI



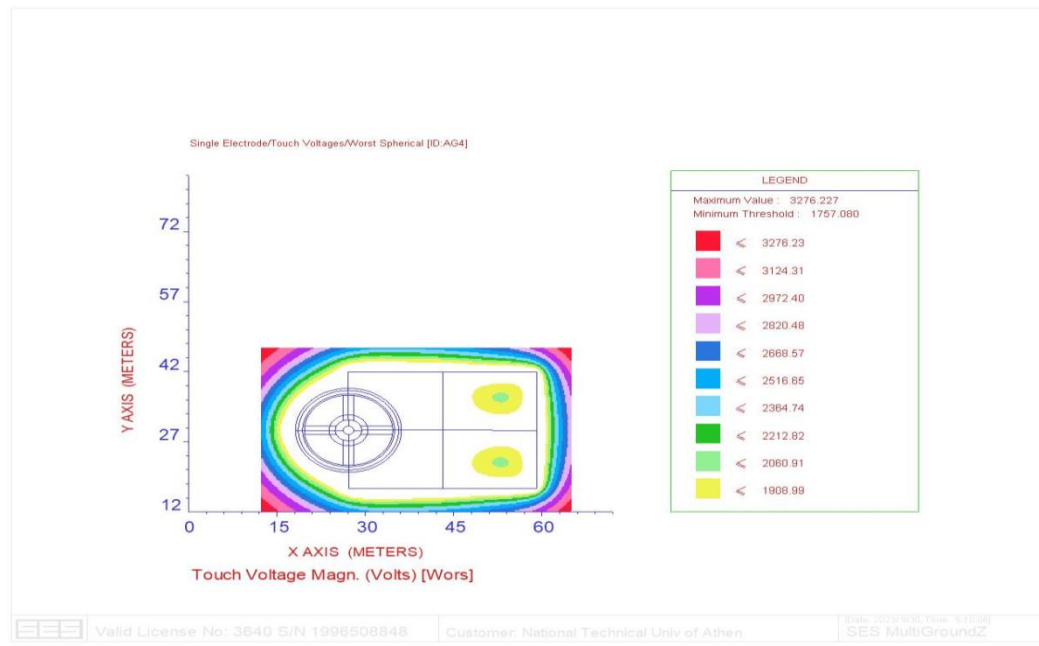
Σχήμα 6.16 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 3 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και στην τρίτη ανεμογεννήτρια, οι επικίνδυνες τάσεις επαφής αναπτύσσονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 2,5m από τον πυλώνα της, επομένως δεν απαιτείται η προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας.

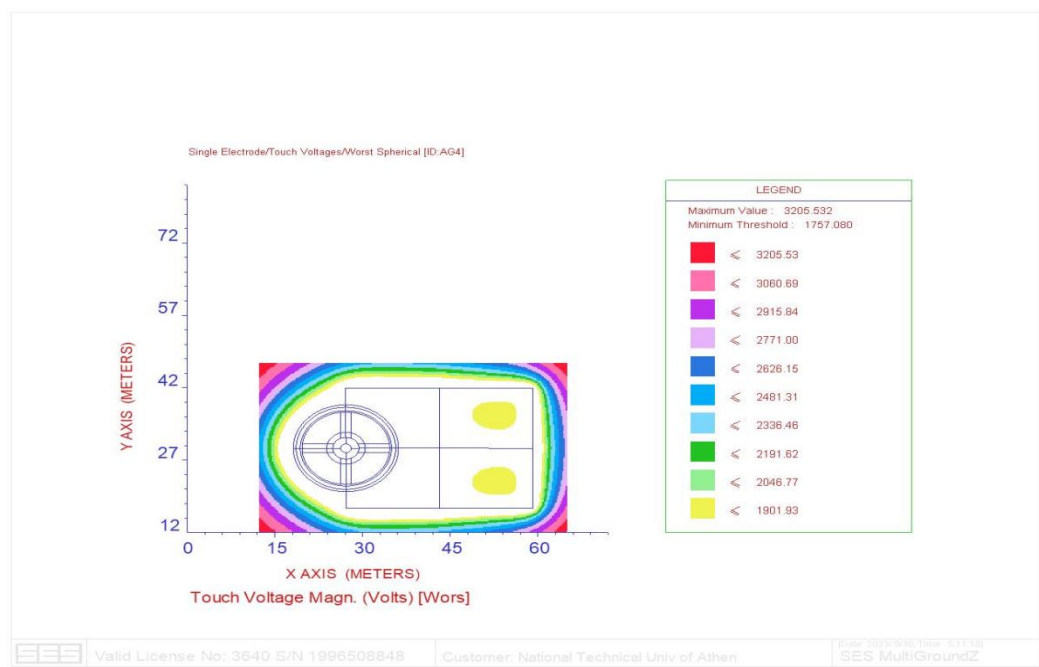
#### 6.3.4.4 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 4

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

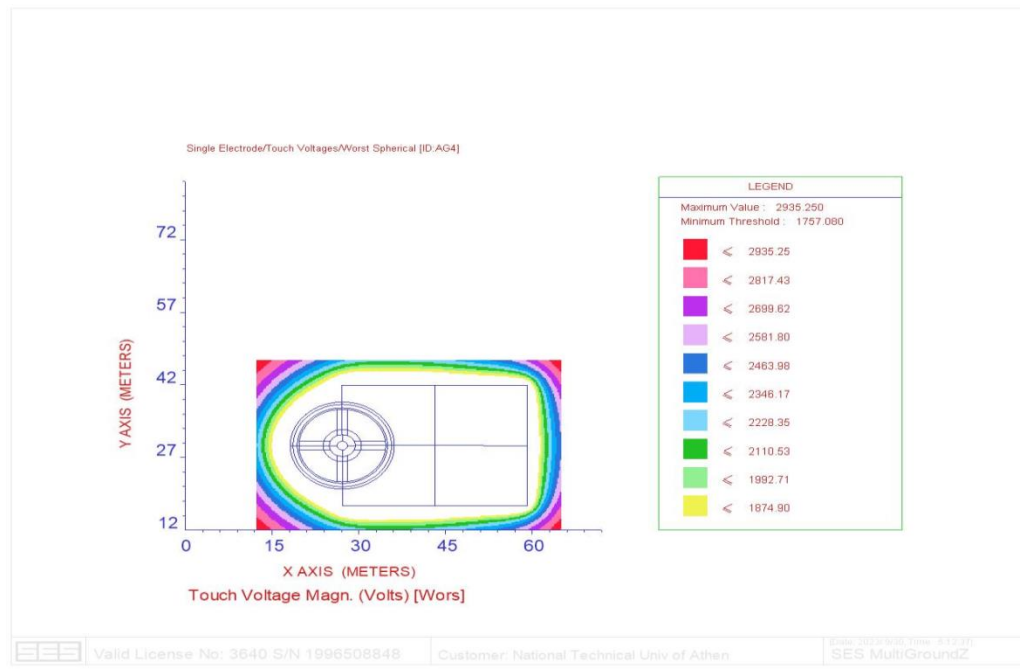
#### IEC



#### Complete



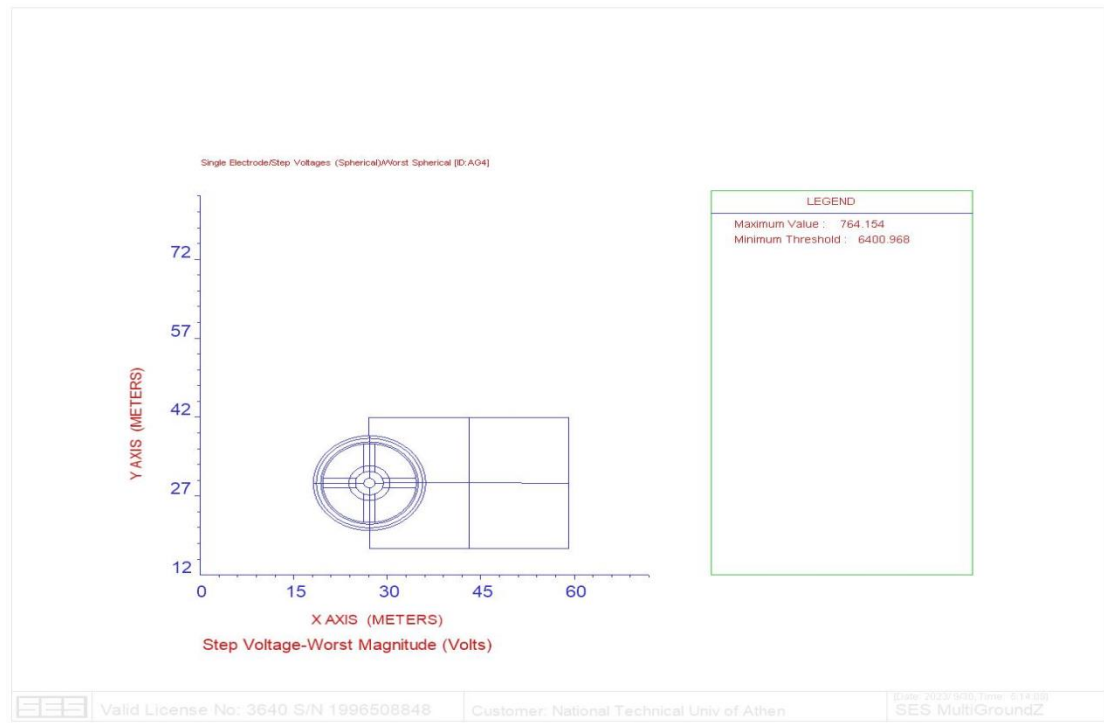
## ANSI



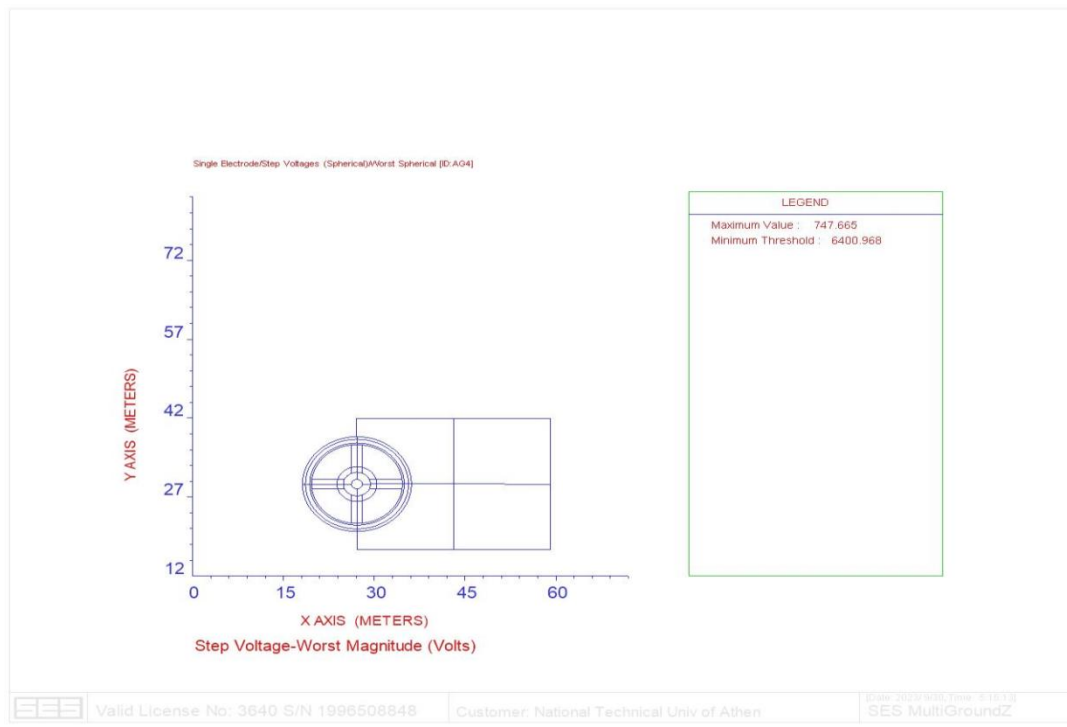
Σχήμα 6.17 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 4 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Και βηματικές τάσεις:

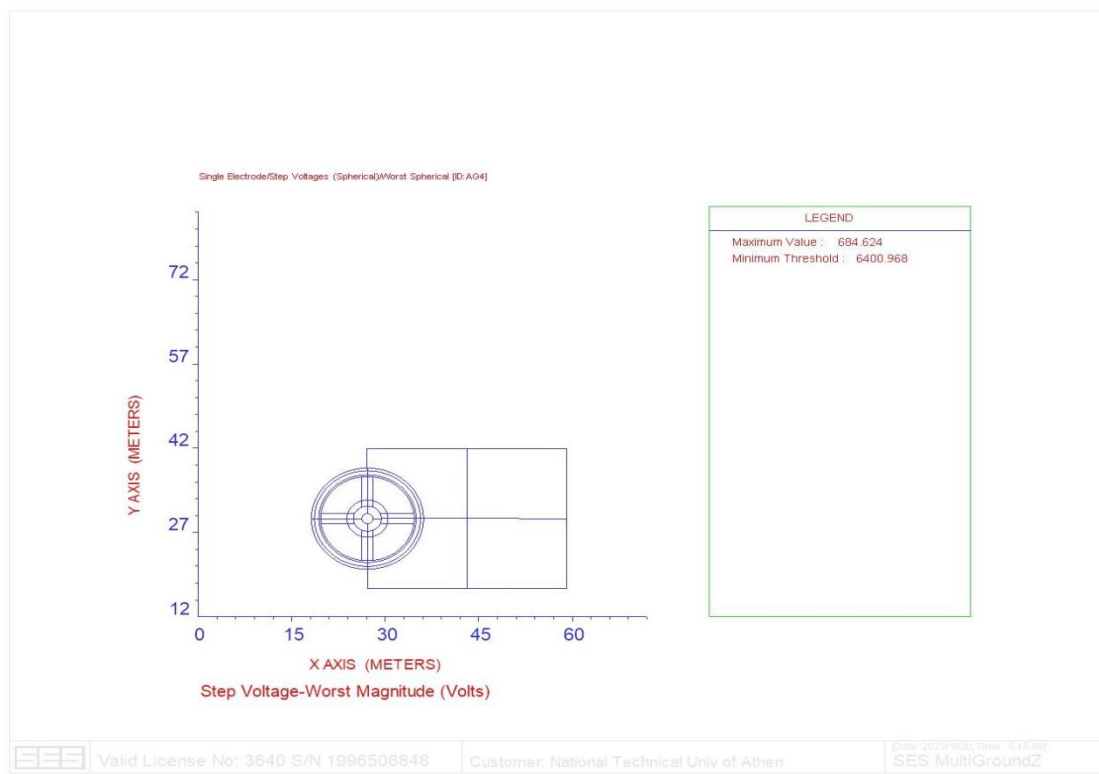
## IEC



## Complete



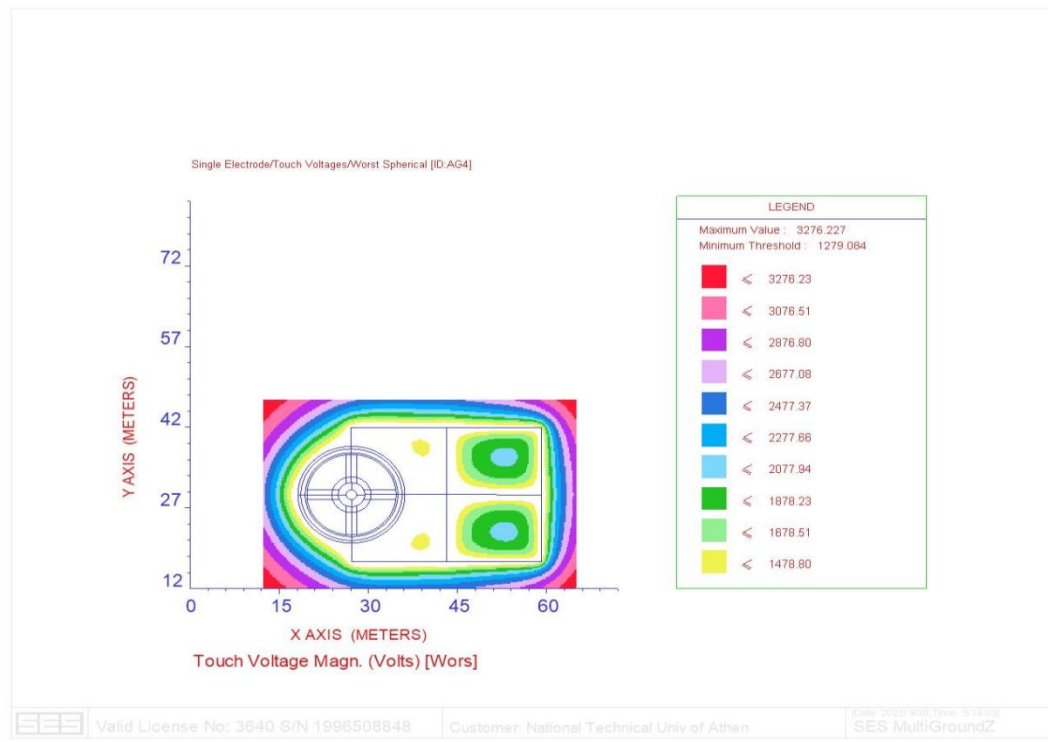
## ANSI



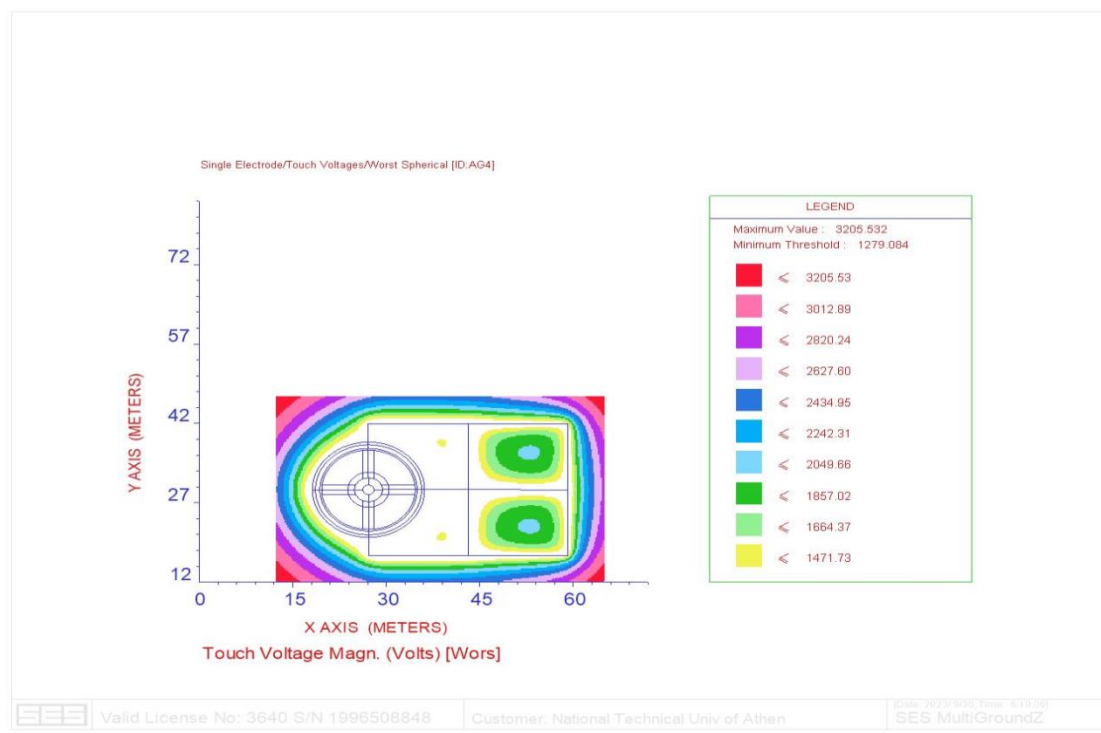
Σχήμα 6.18 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην A/Γ 4 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

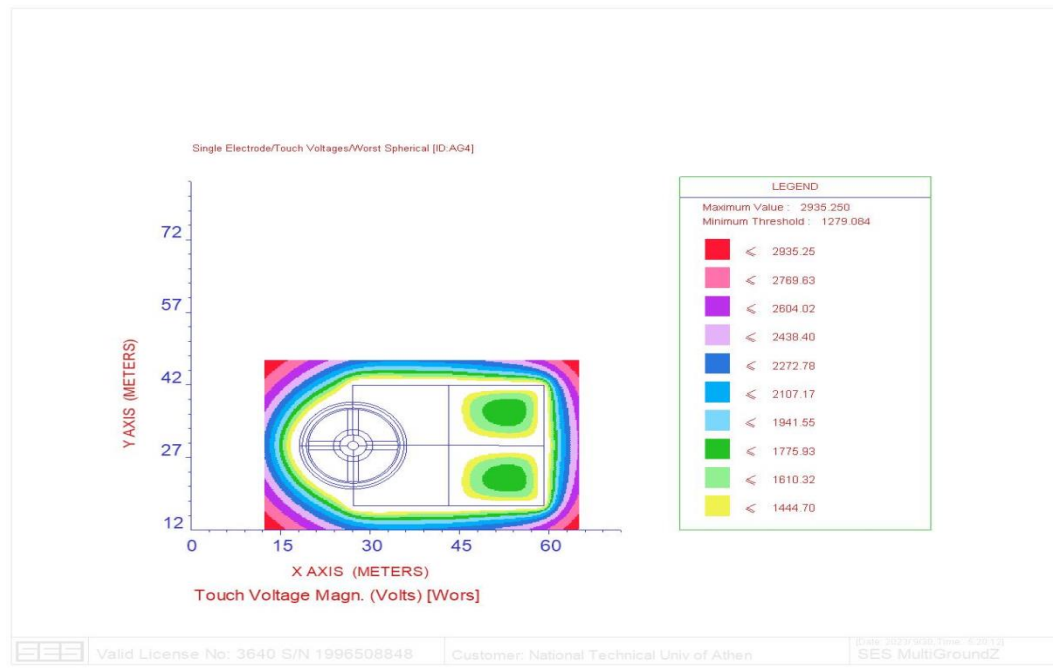
### IEC



### Complete



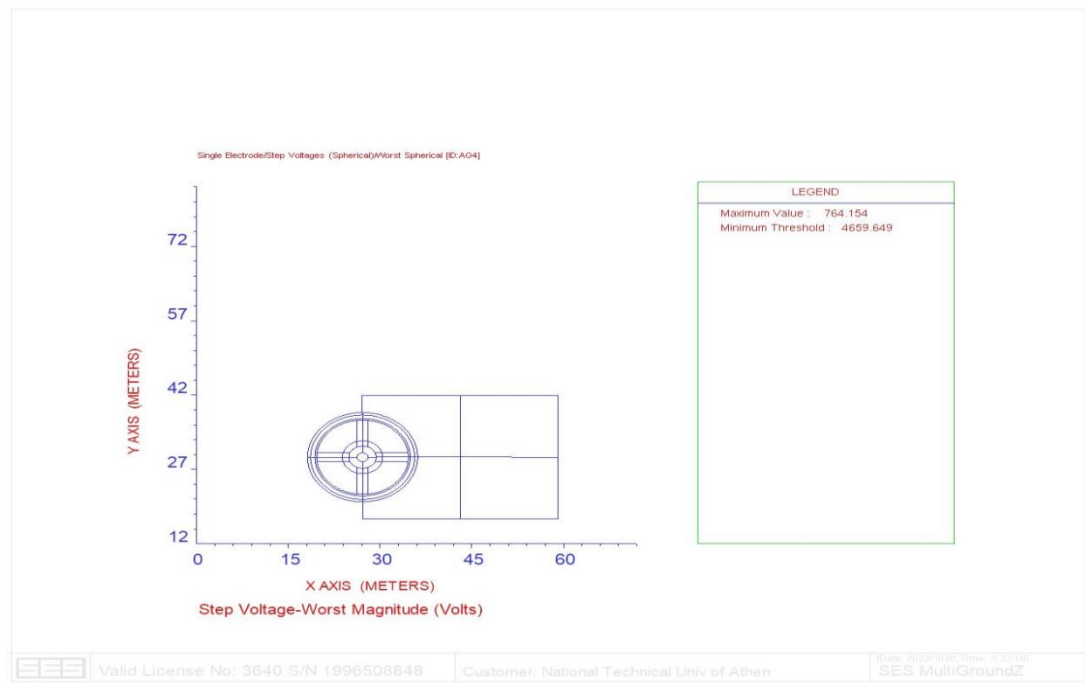
## ANSI



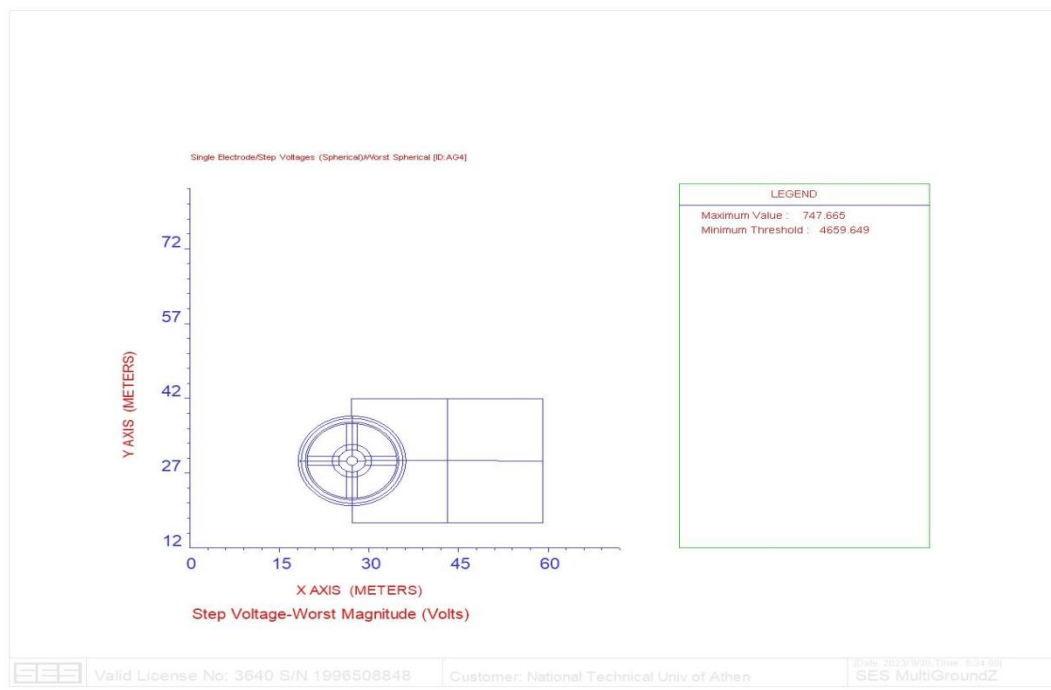
Σχήμα 6.19 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 4 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

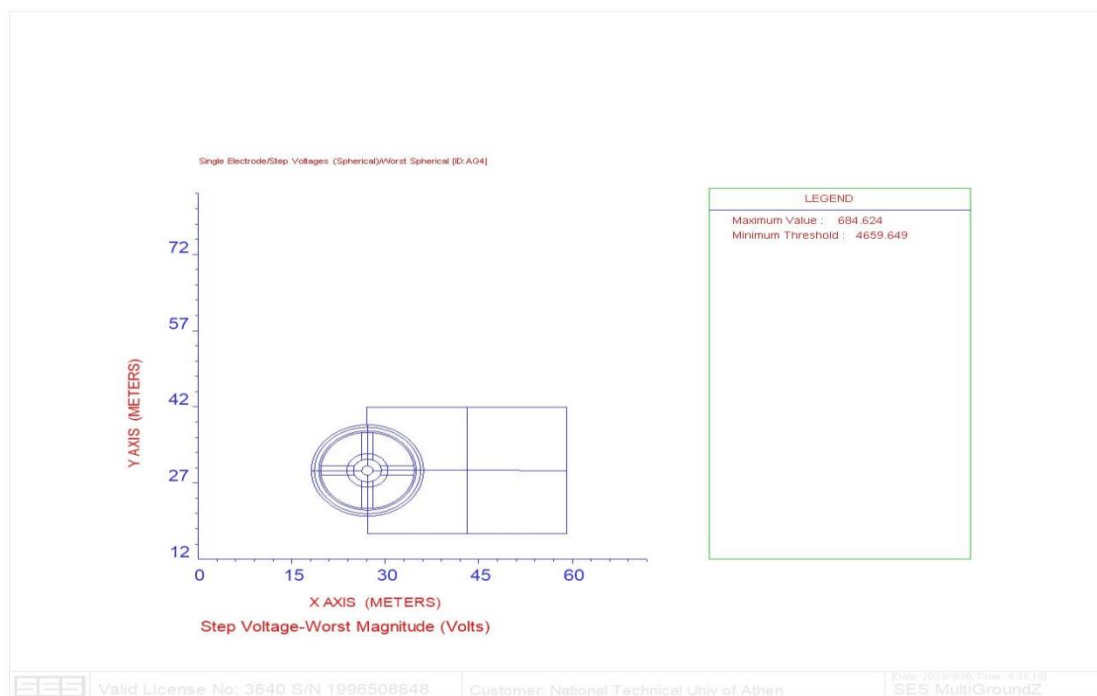
## IEC



## Complete



## ANSI



Σχήμα 6.20 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 4 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

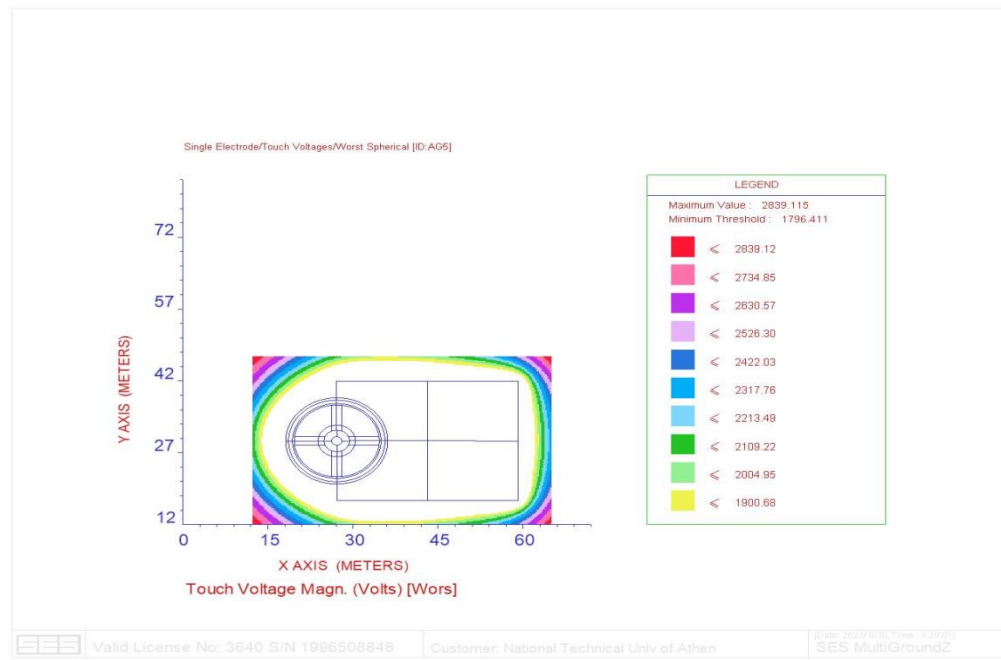


Οι τάσεις που υπολογίστηκαν είναι εντός ορίων, επομένως δεν χρειάζεται η προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας και το σύστημα θεωρείται απόλυτα ασφαλές.

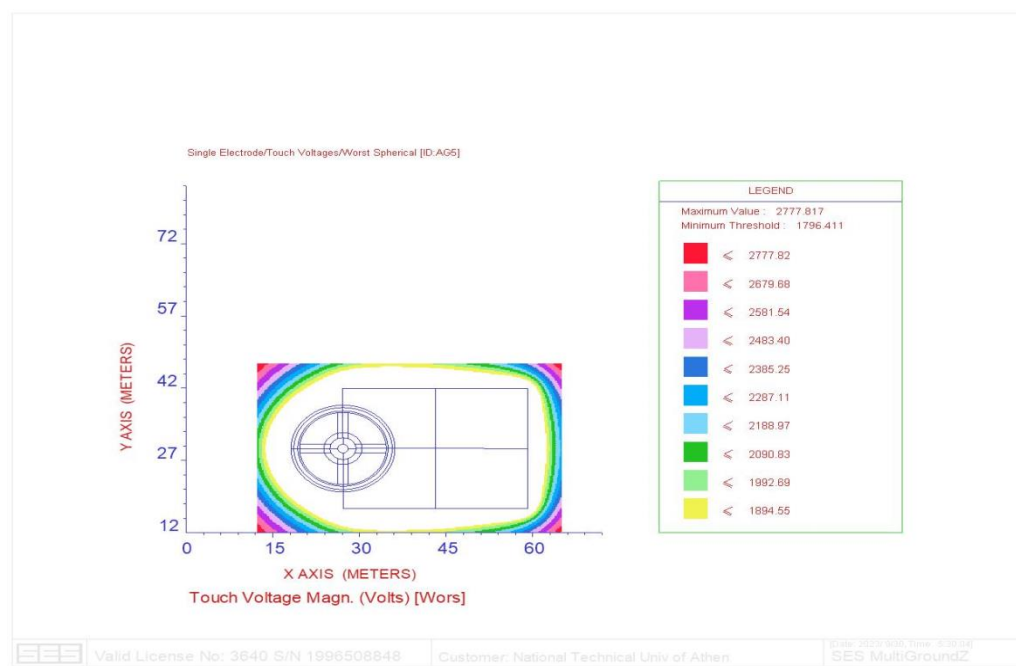
### 6.3.4.5 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 5

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec,έχουμε τάσεις επαφής:

#### IEC



#### Complete



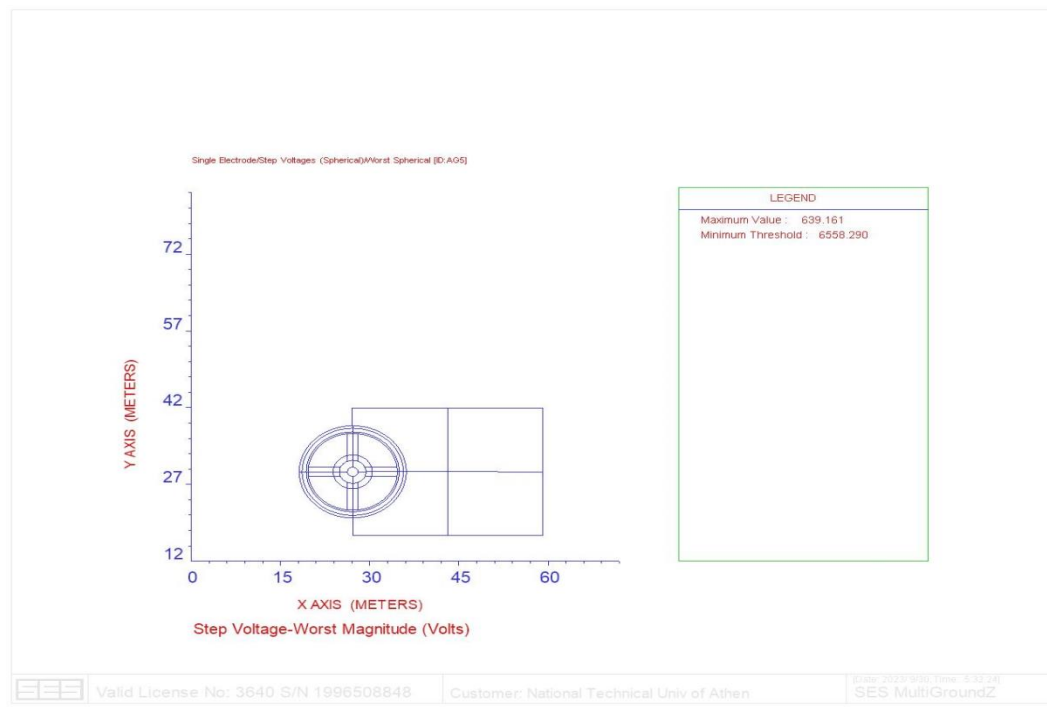
## ANSI



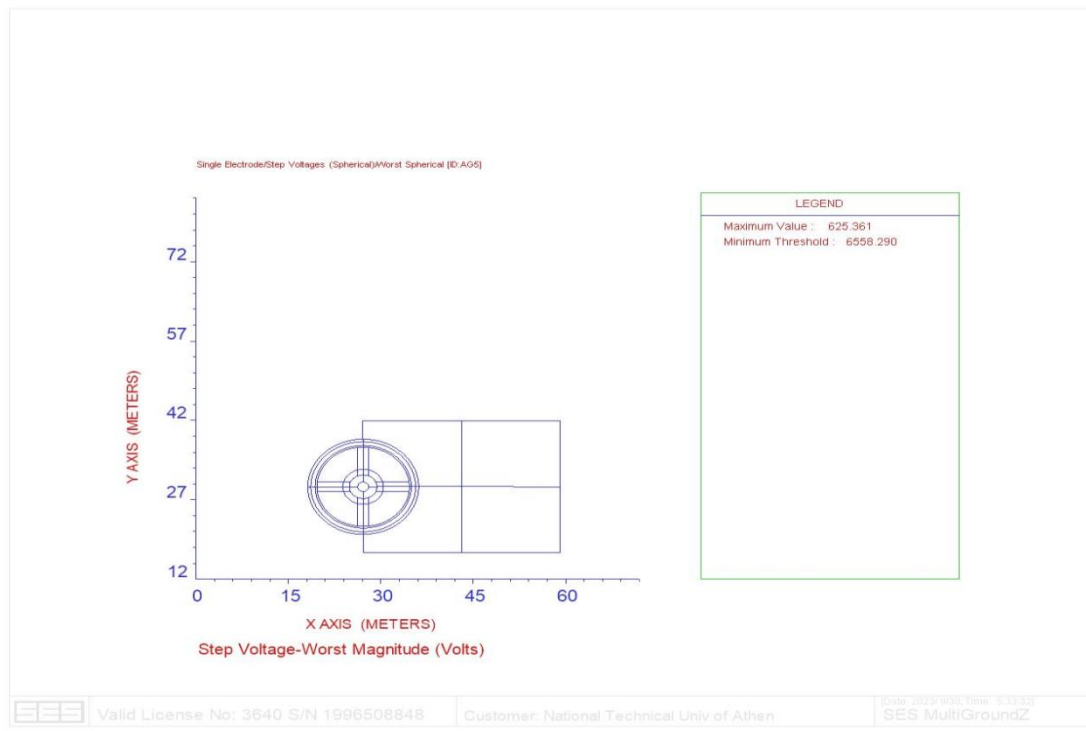
Σχήμα 6.21 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 5 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Και βηματικές τάσεις:

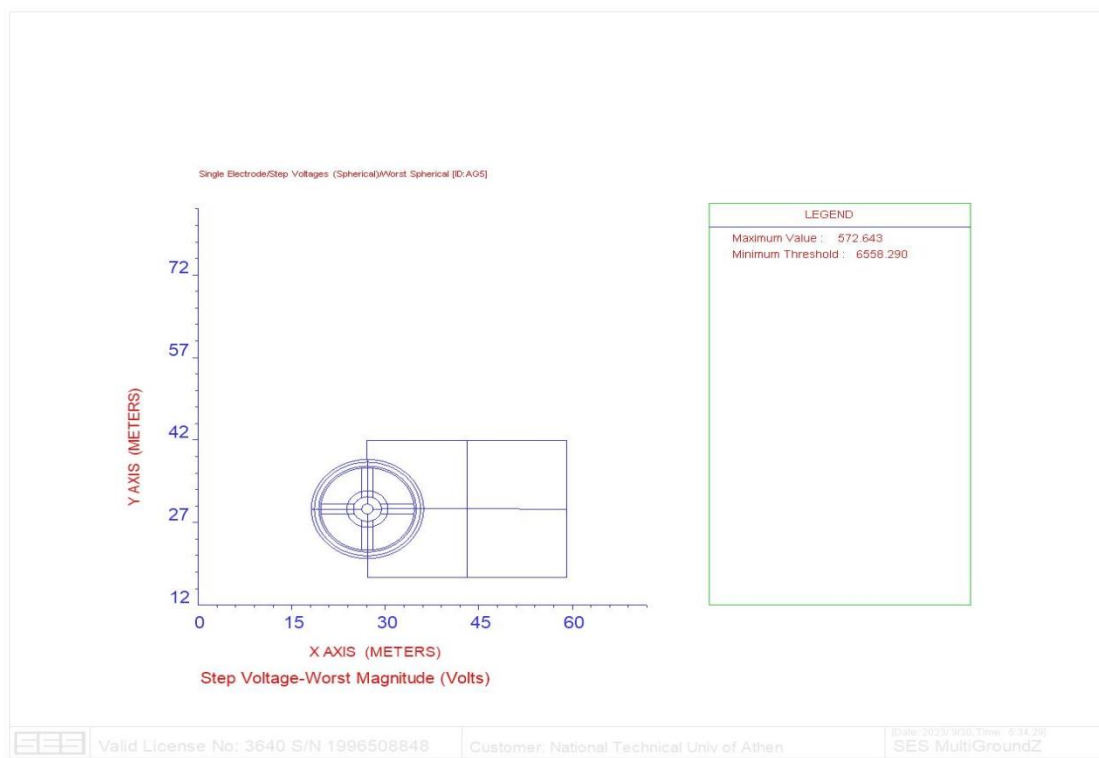
## IEC



## Complete



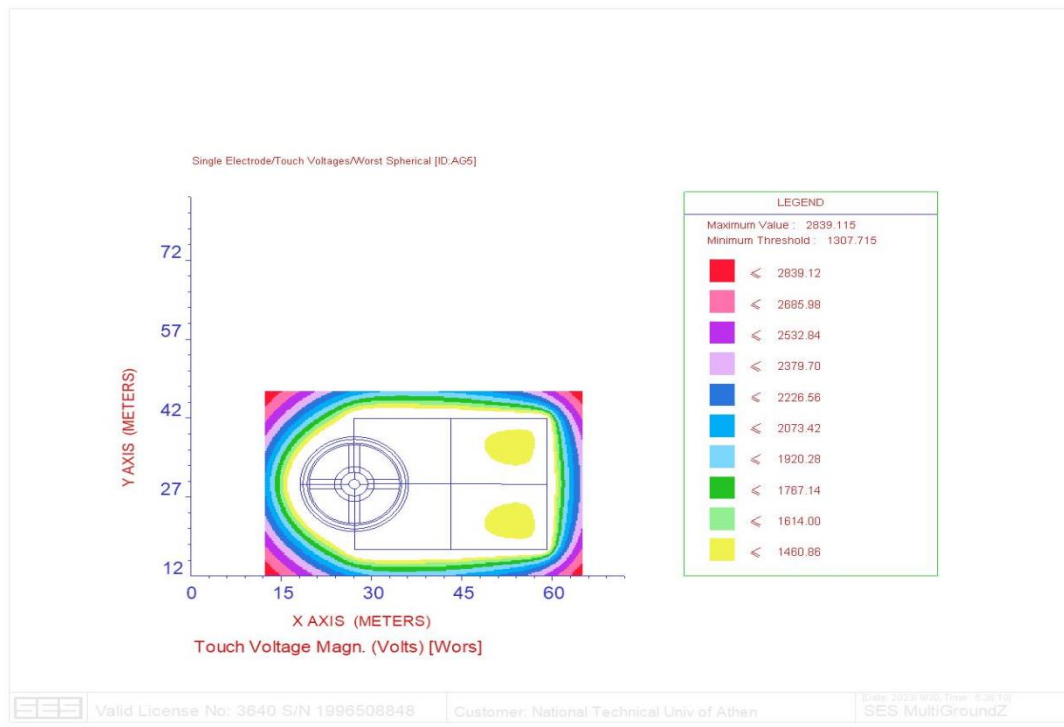
## ANSI



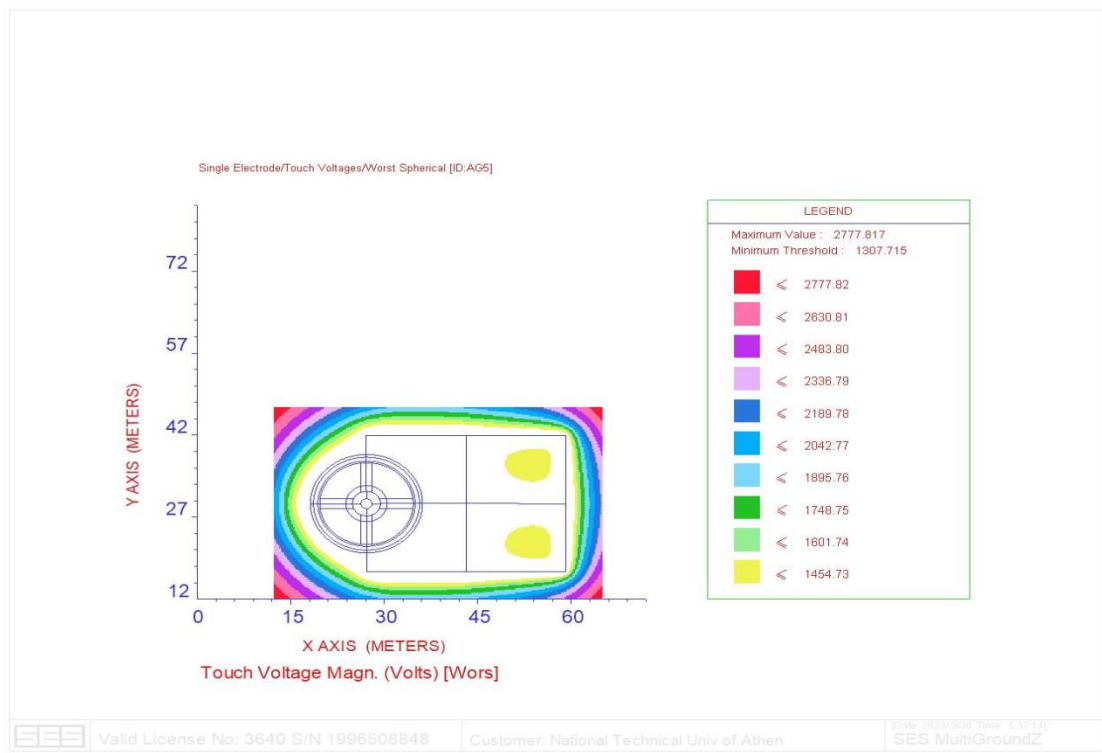
Σχήμα 6.22 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 5 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

### IEC



### Complete



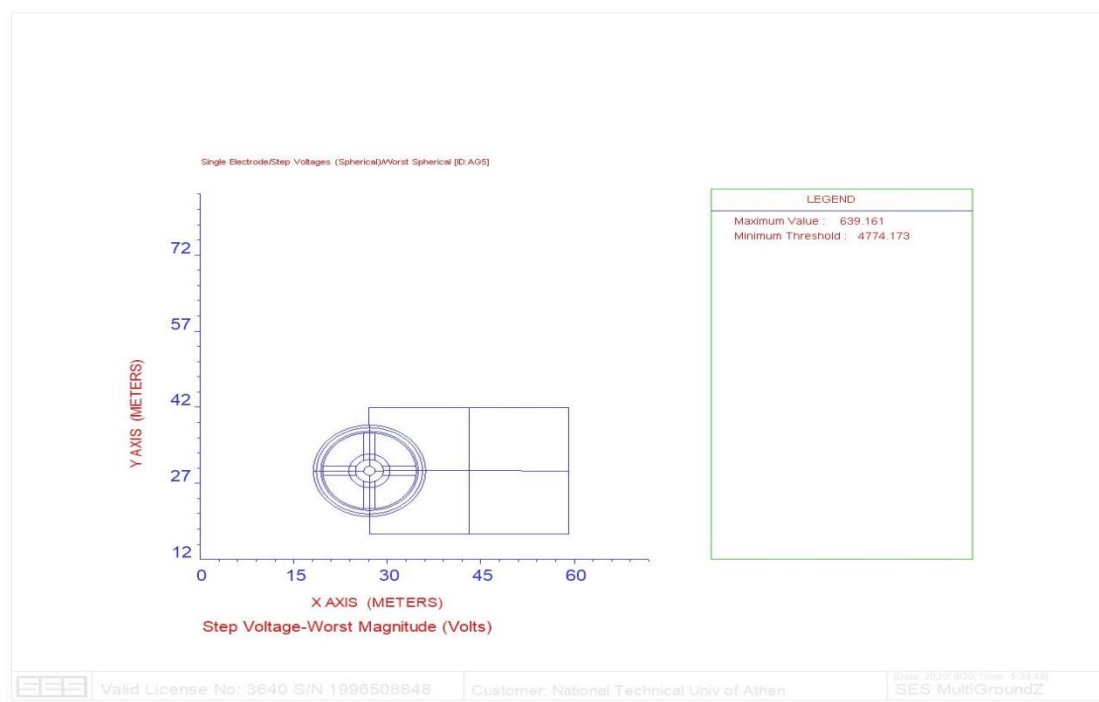
## ANSI



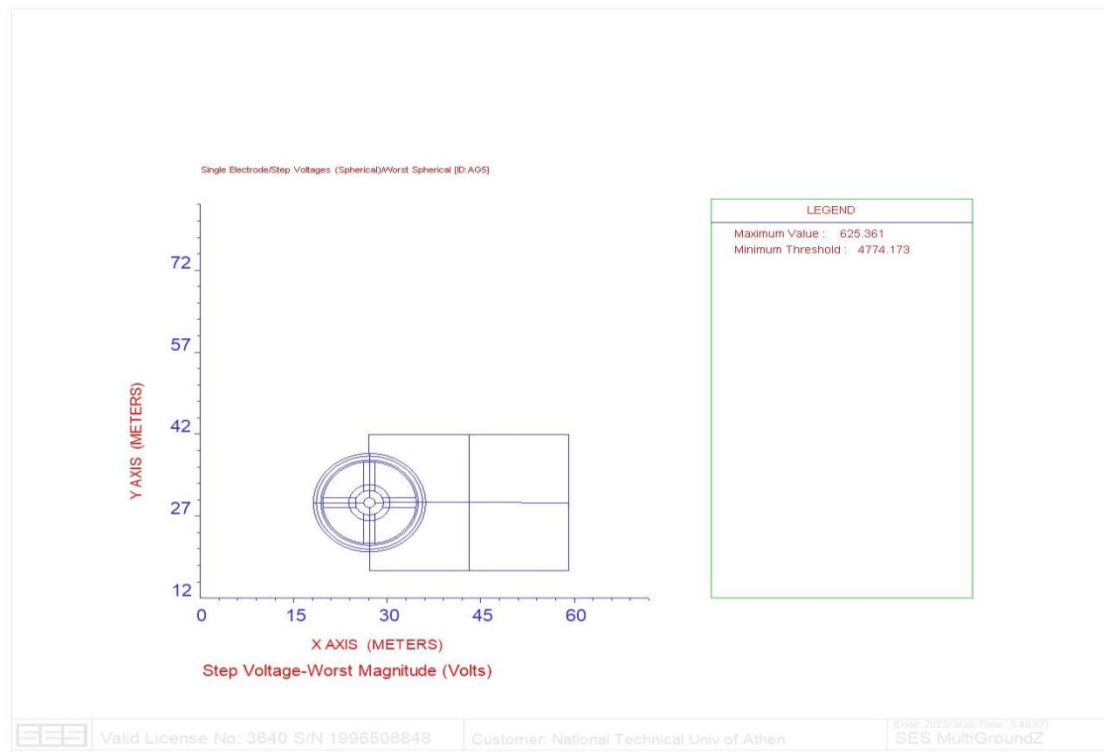
Σχήμα 6.23 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 5 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

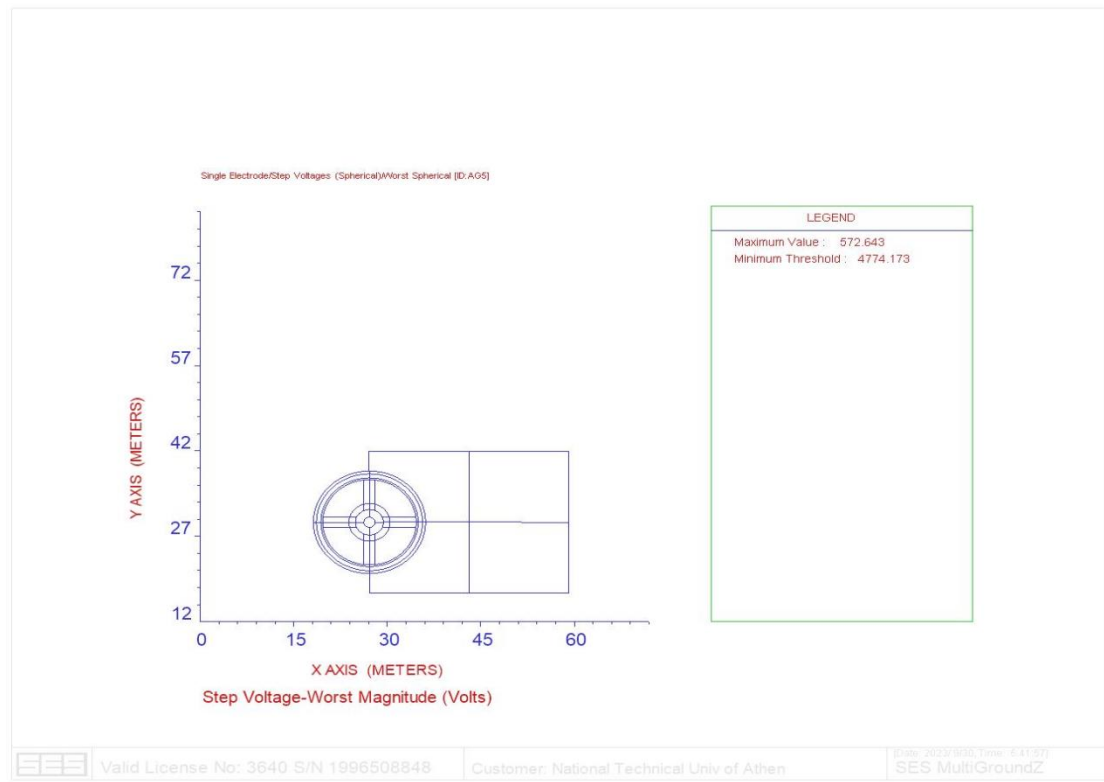
## IEC



## Complete



## ANSI



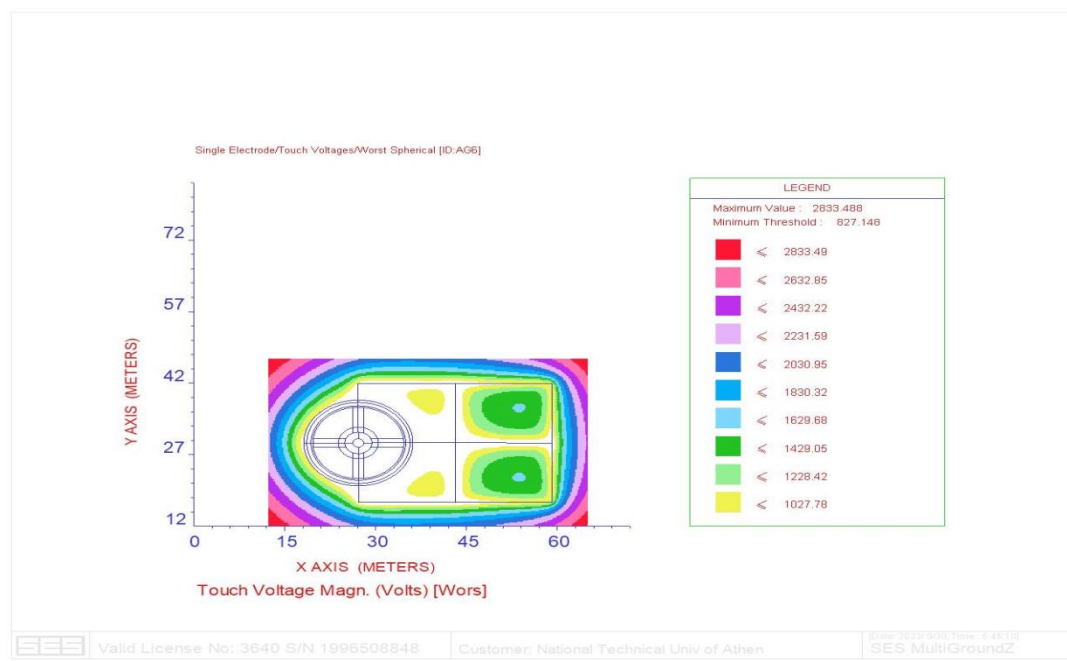
Σχήμα 6.24 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 5 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Οι τάσεις που υπολογίστηκαν είναι εντός ορίων, επομένως δεν χρειάζεται η προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας.

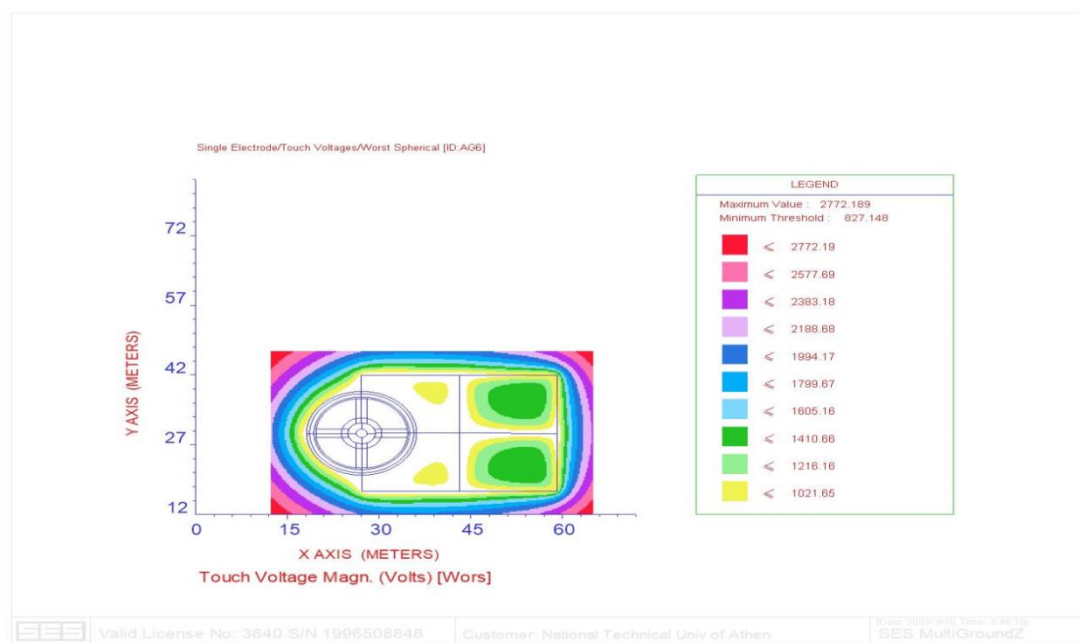
### 6.3.4.6 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 6

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

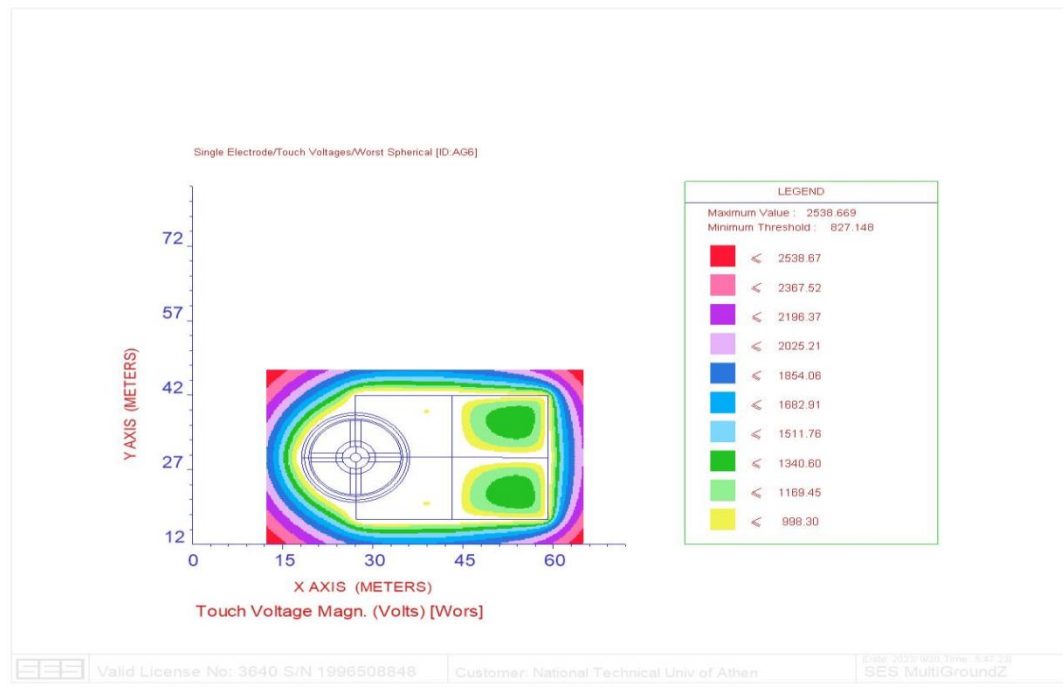
#### IEC



#### Complete



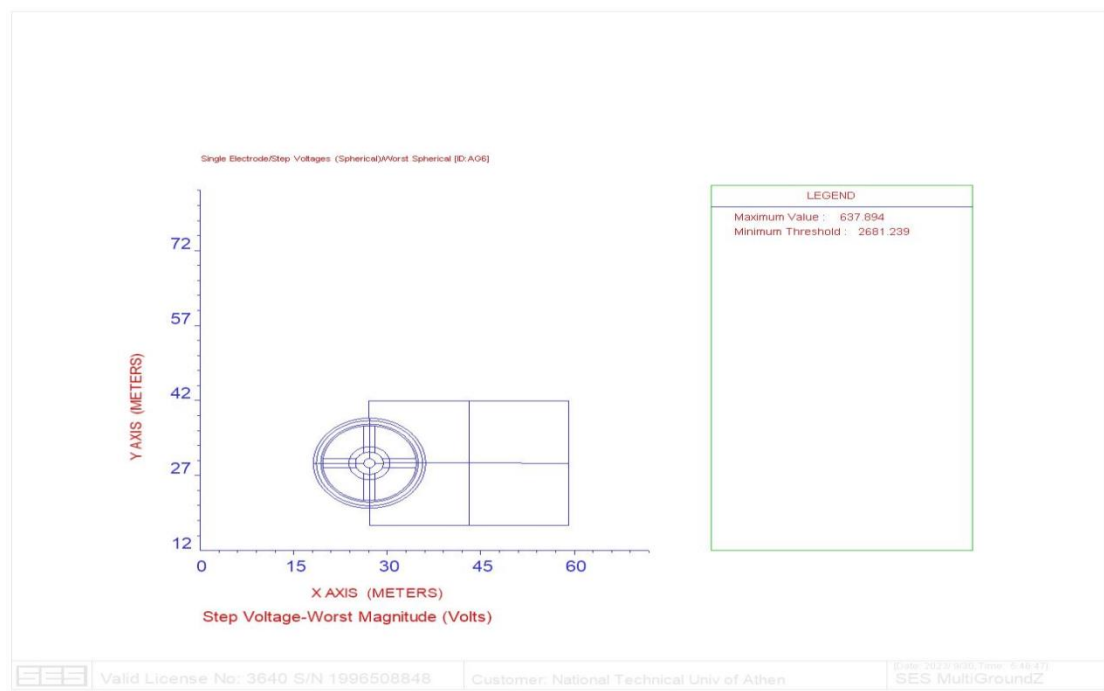
## ANSI



Σχήμα 6.25 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 6 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

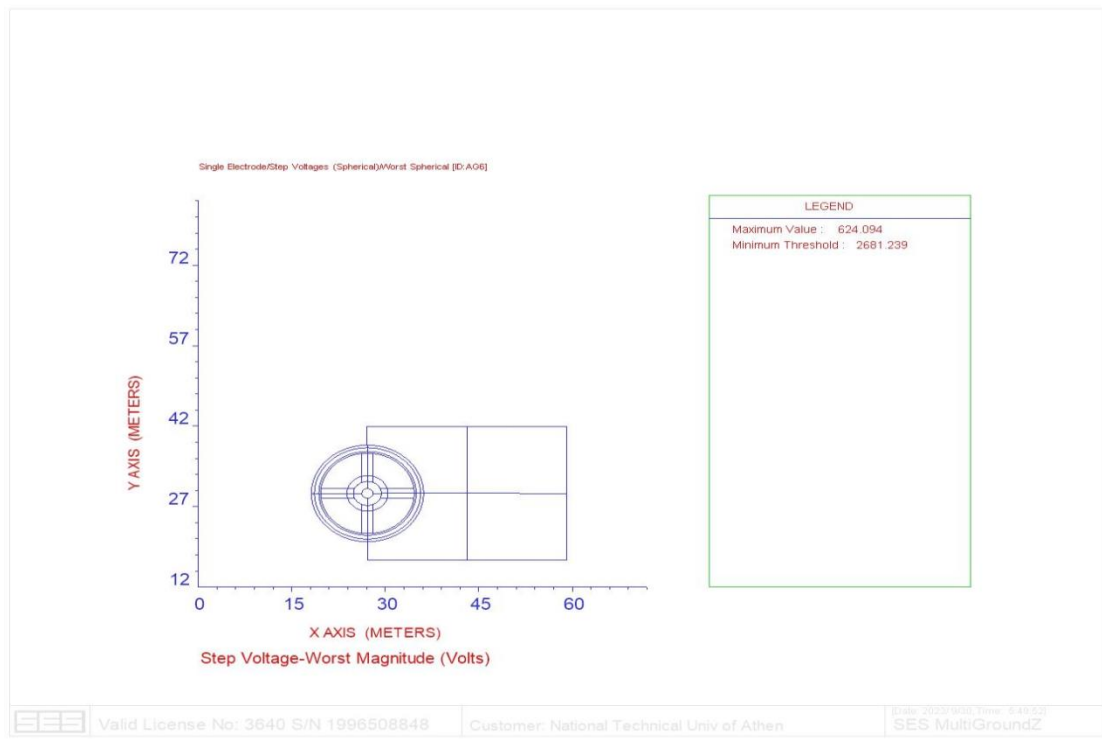
Και βηματικές τάσεις:

## IEC

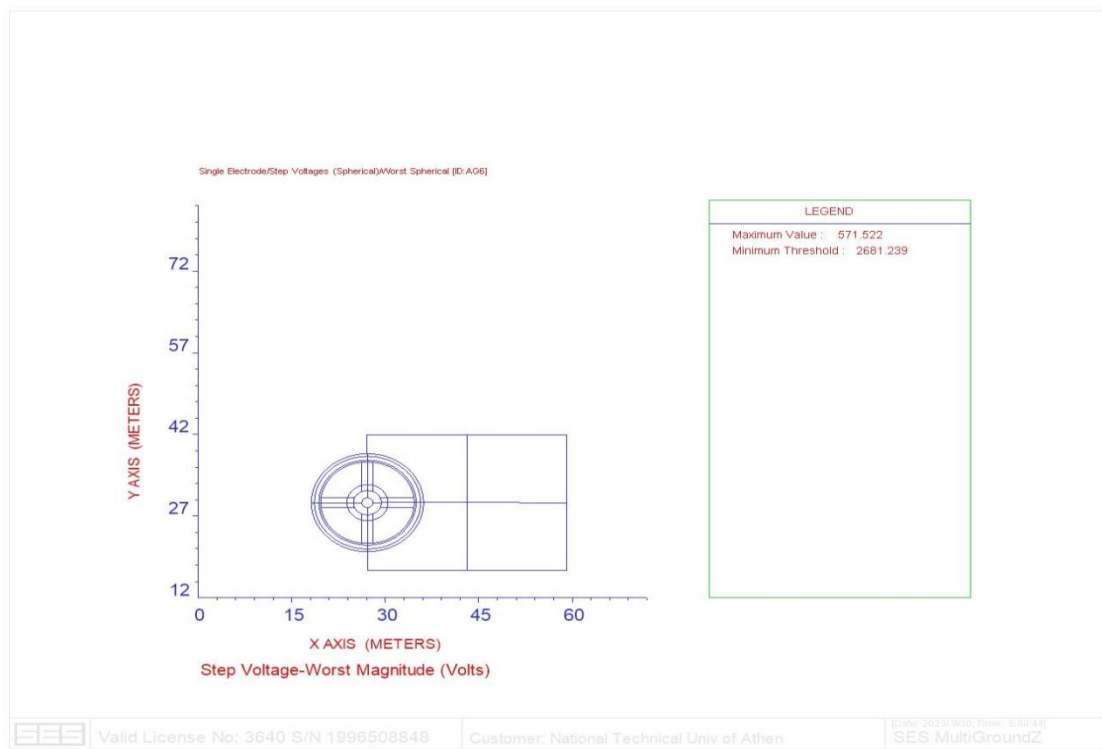




## Complete



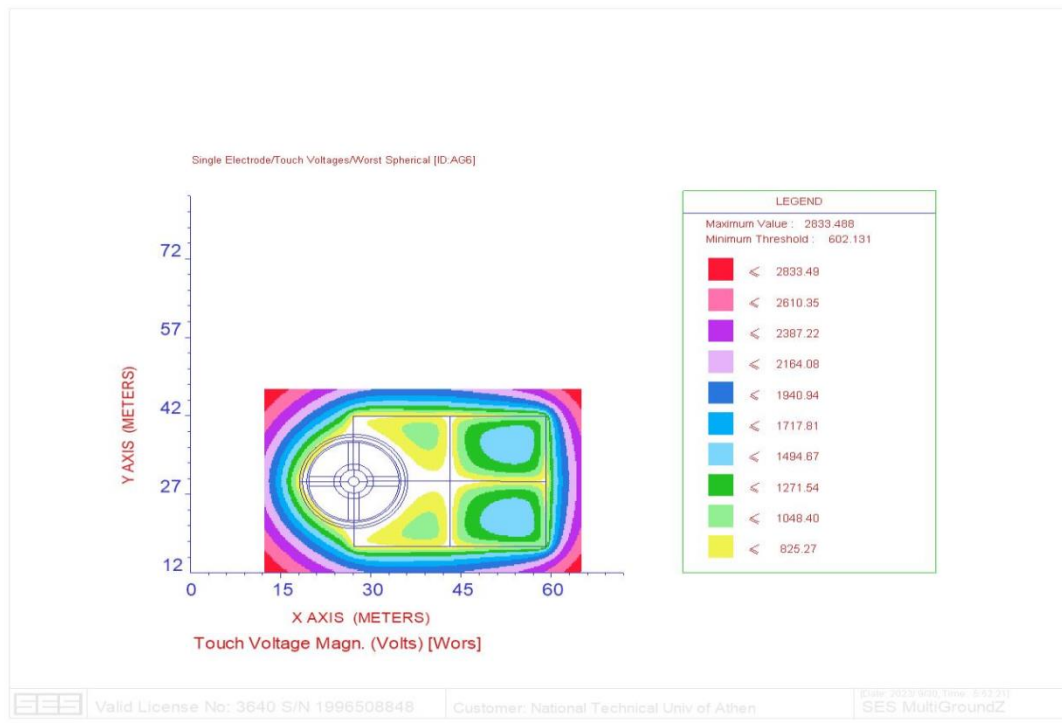
## ANSI



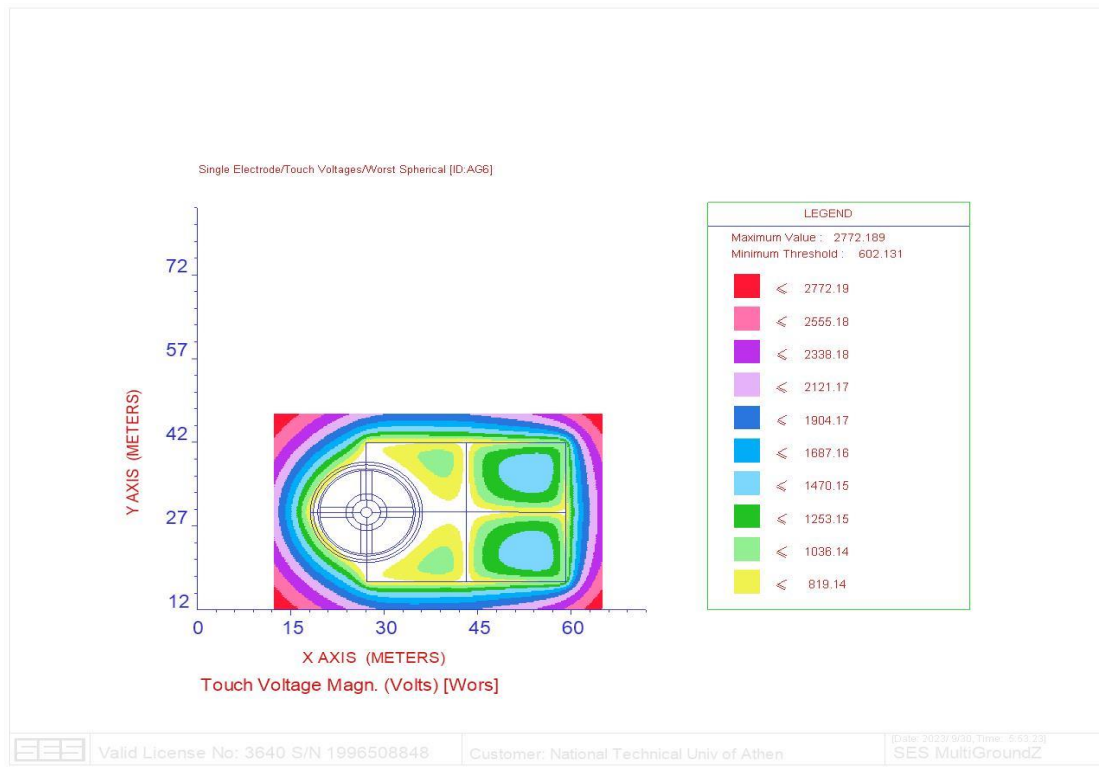
Σχήμα 6.26 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 6 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

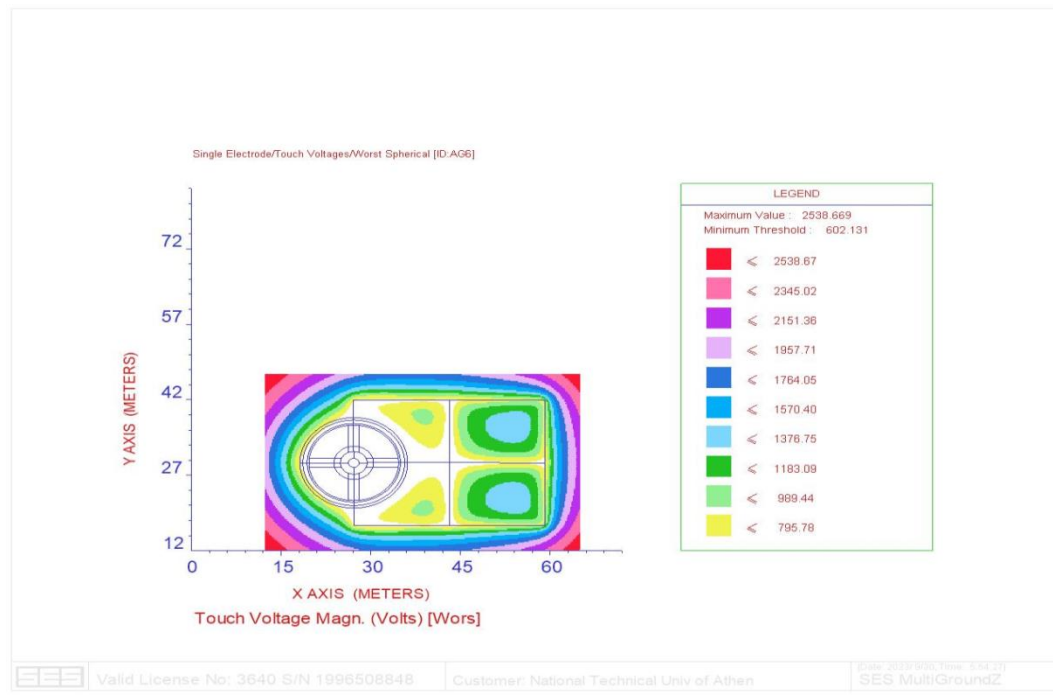
### IEC



### Complete



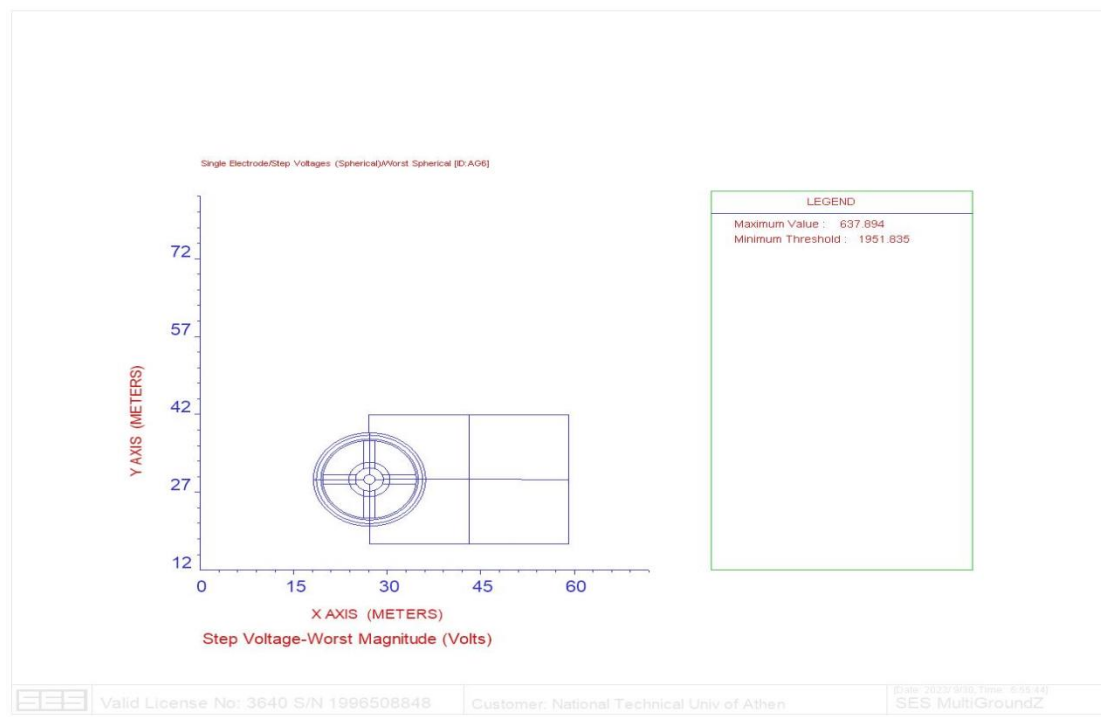
## ANSI



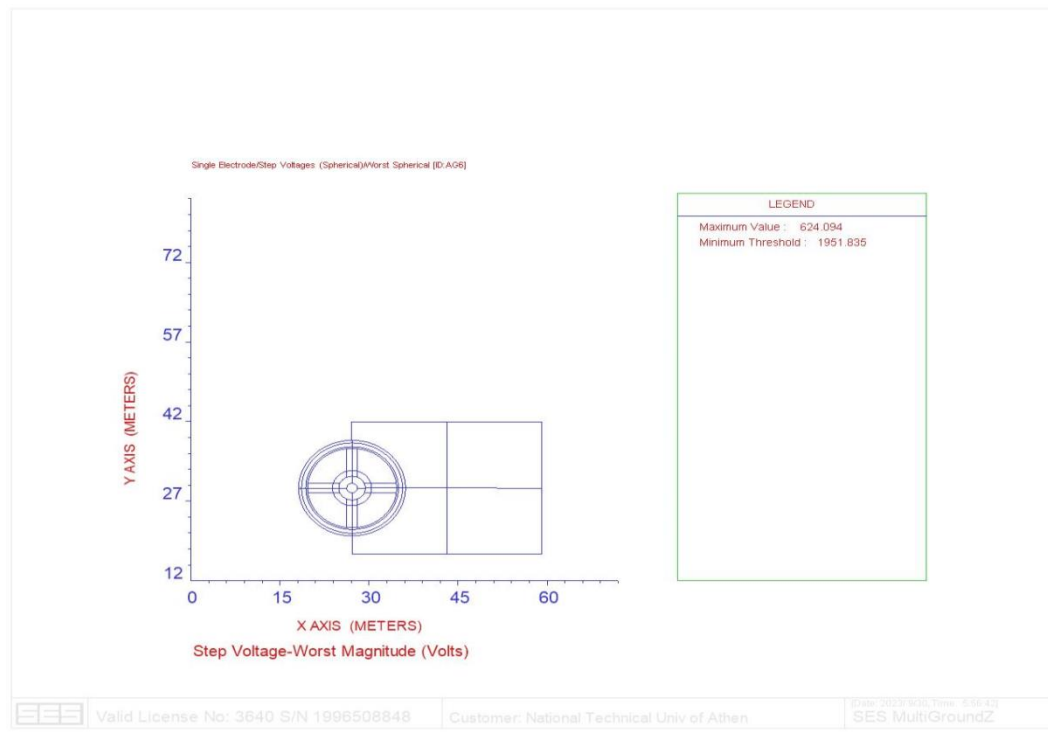
Σχήμα 6.27 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 6 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

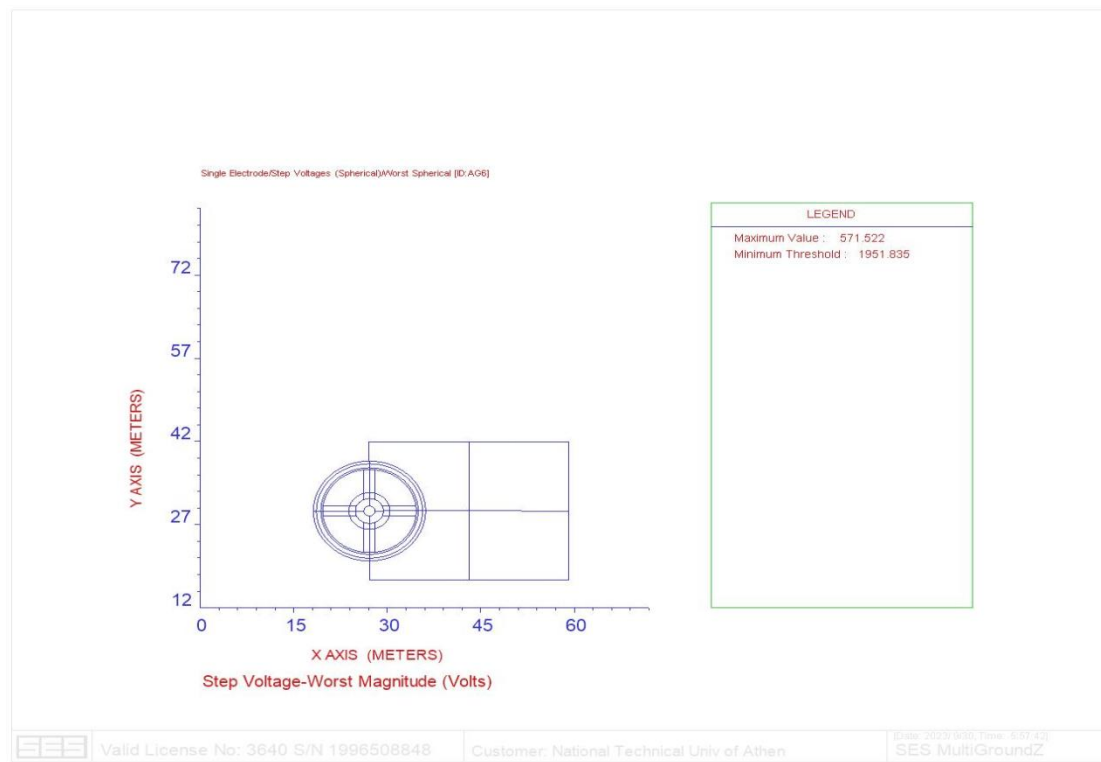
## IEC



## Complete



## ANSI



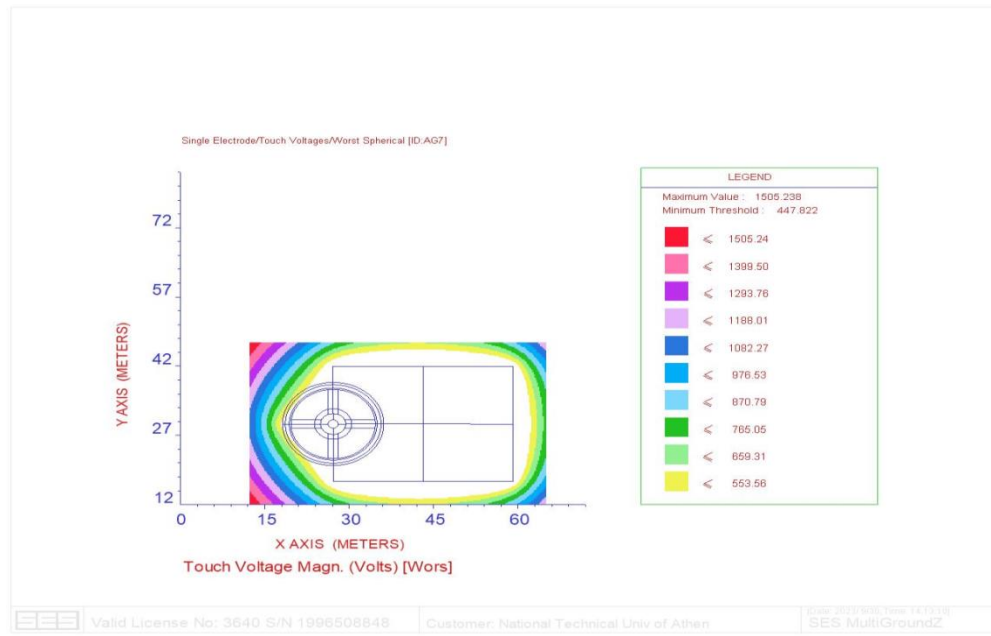
Σχήμα 6.28 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 6 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Οι τάσεις που υπολογίστηκαν είναι εντός ορίων, επομένως δεν χρειάζεται η προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας.

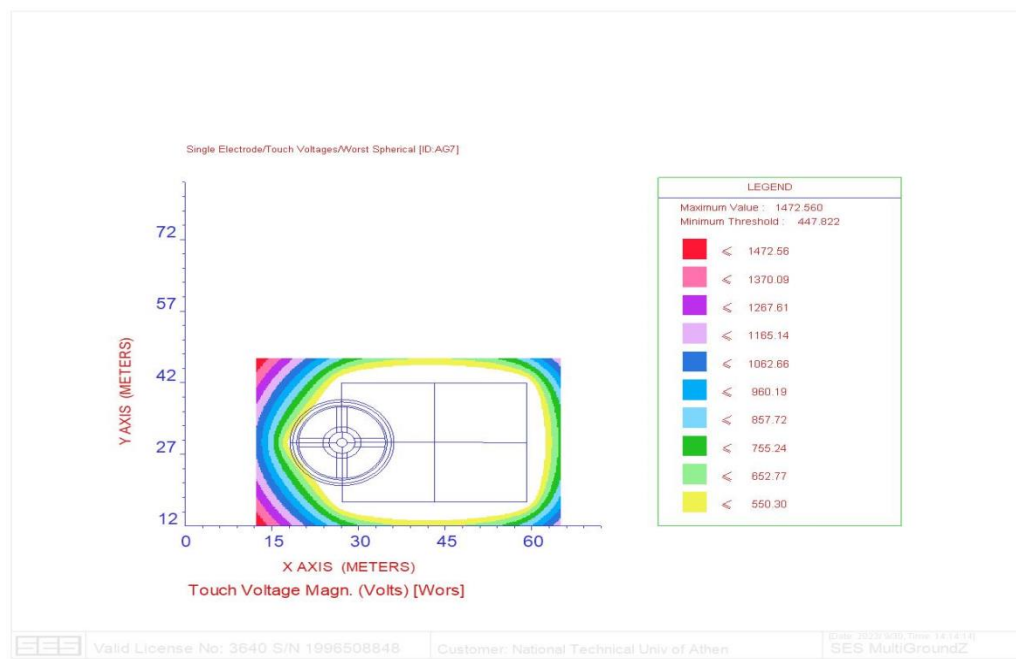
### 6.3.4.7 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 7

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

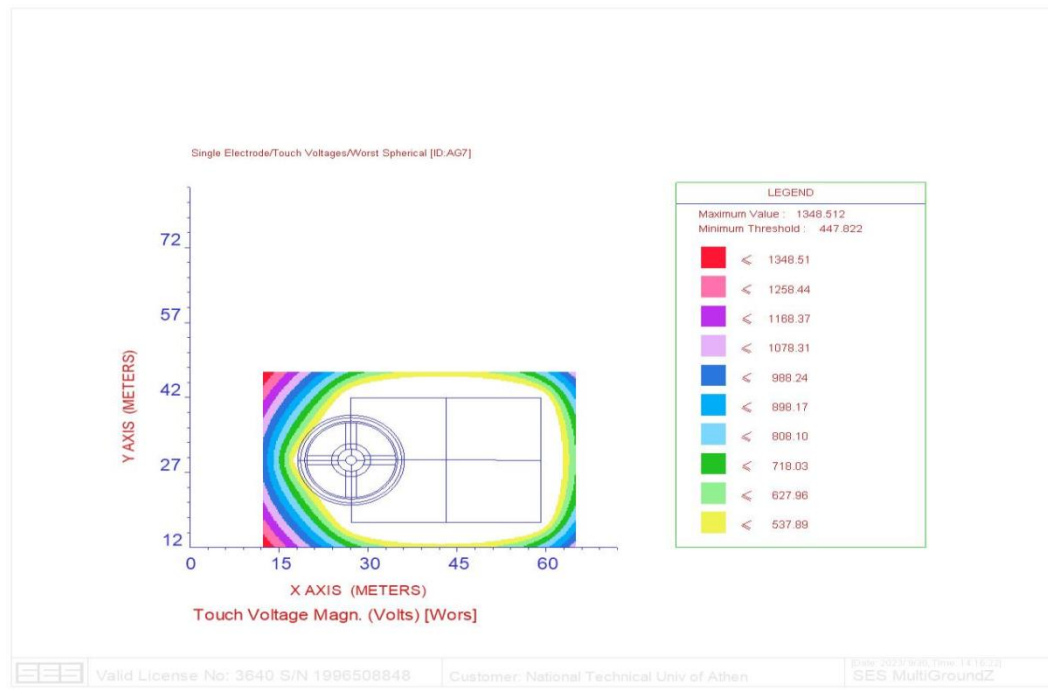
#### IEC



#### Complete



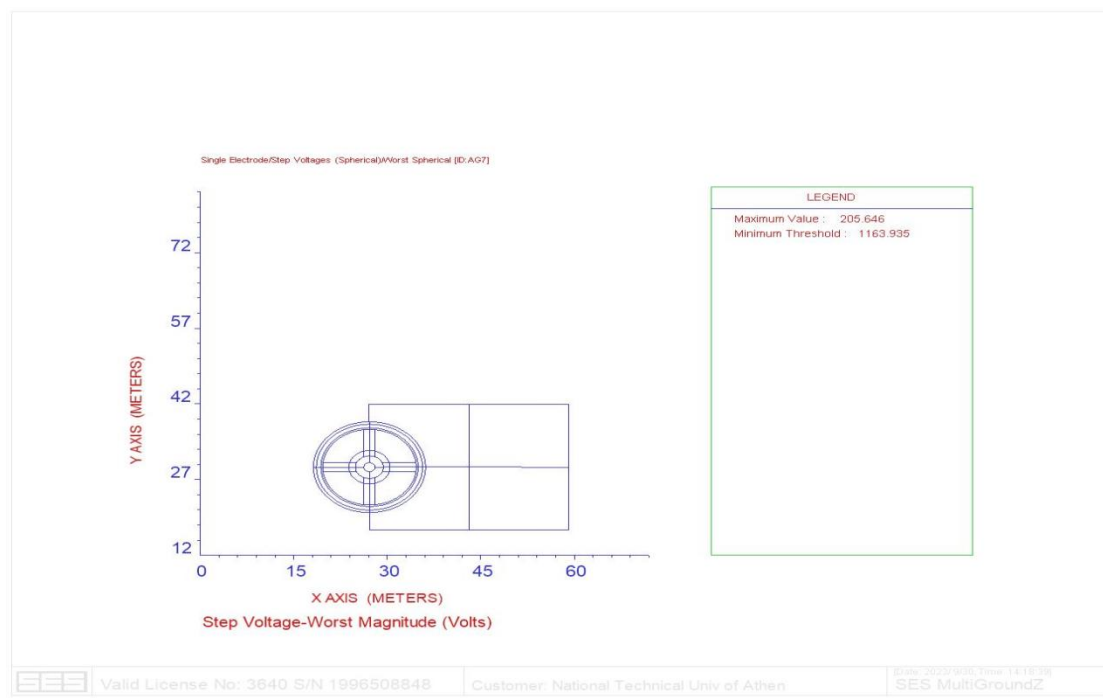
## ANSI



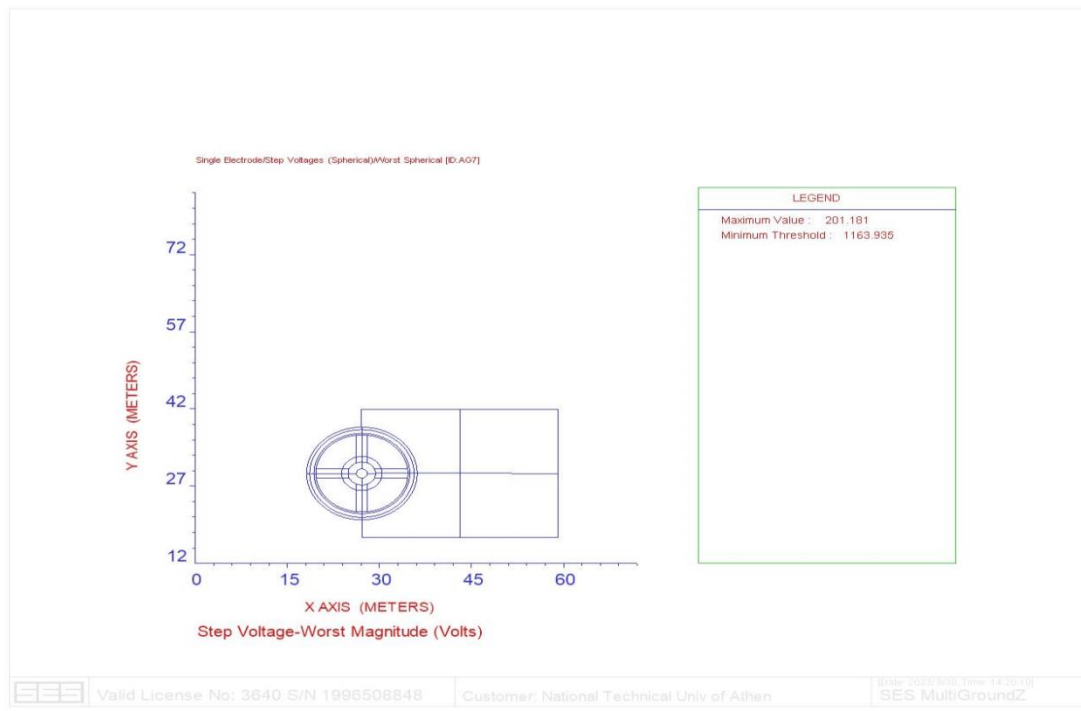
Σχήμα 6.29 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 7 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Και βηματικές τάσεις:

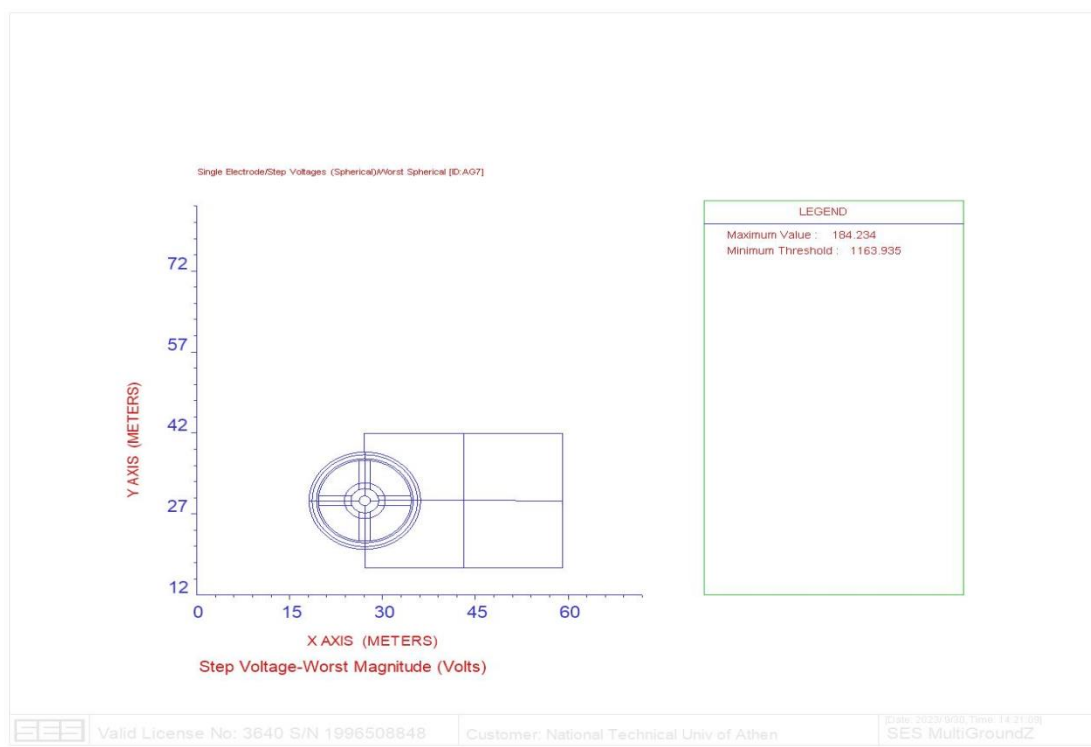
## IEC



## Complete



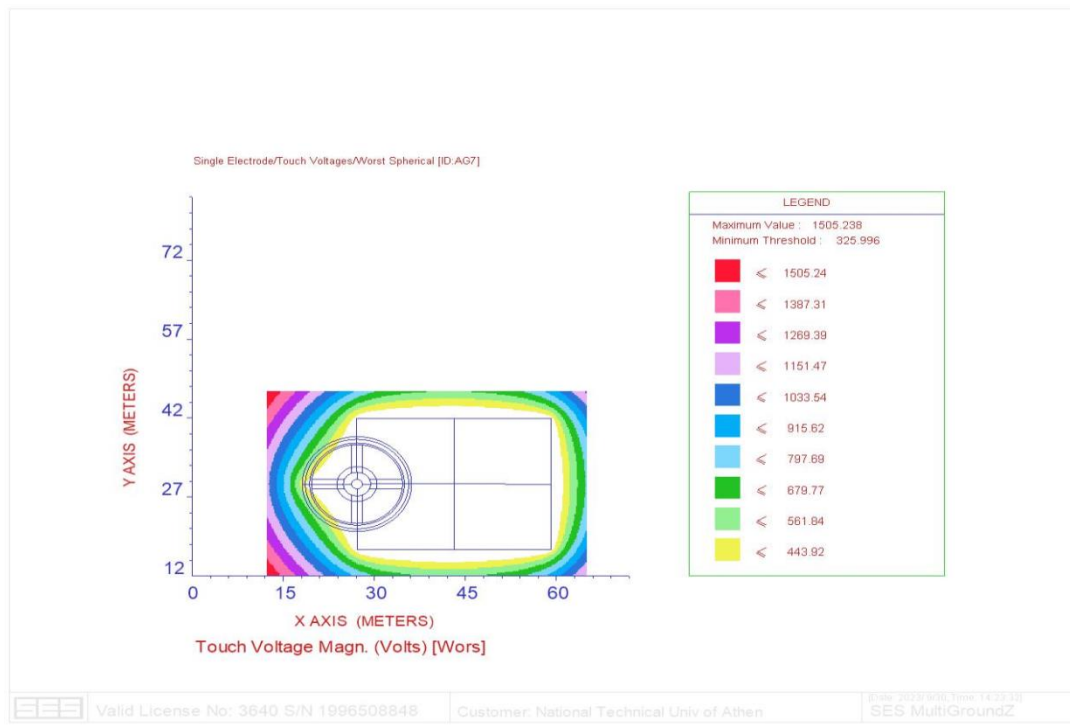
## ANSI



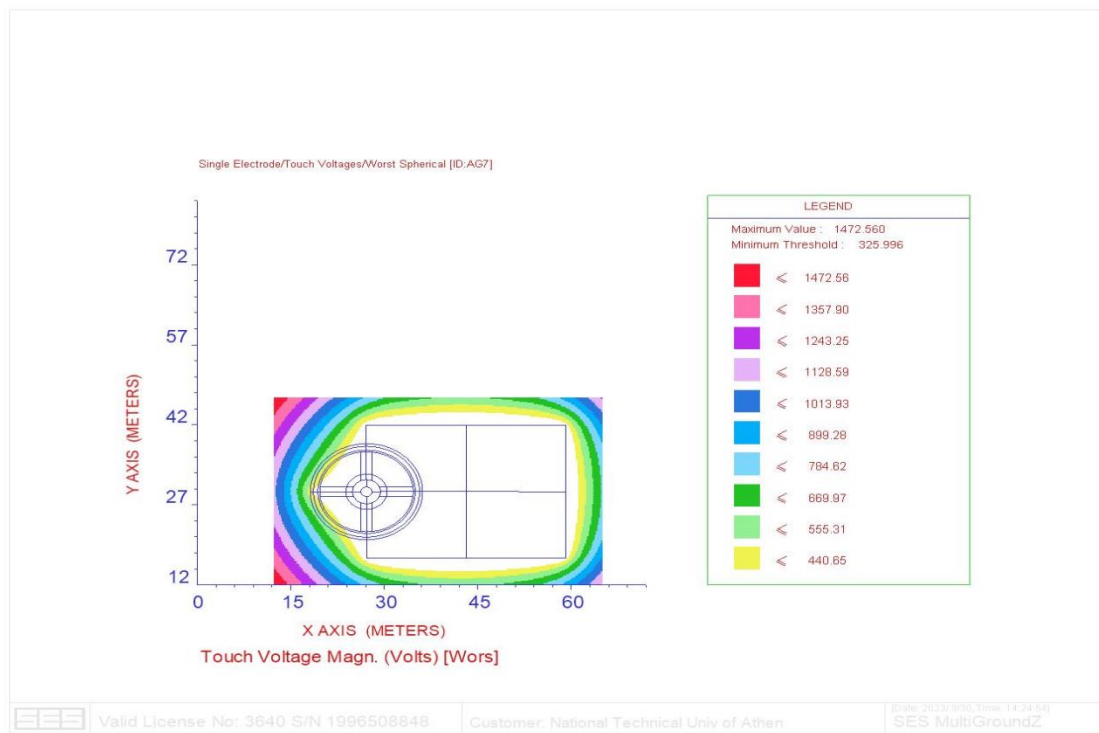
Σχήμα 6.30 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 7 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

**IEC**

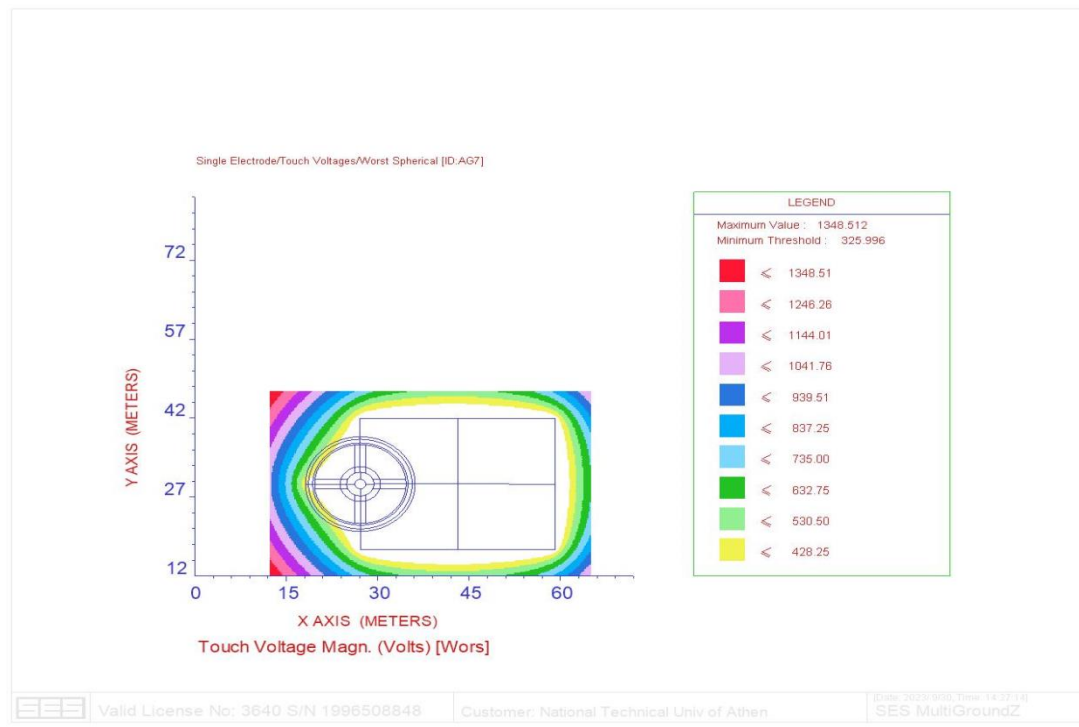


**Complete**





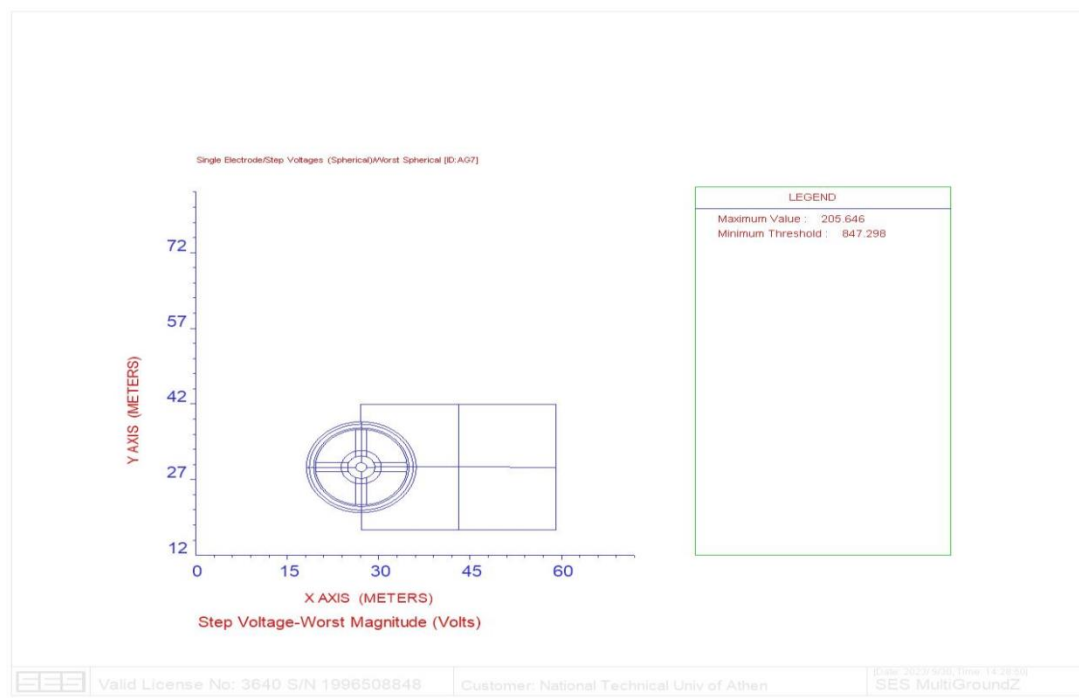
## ANSI



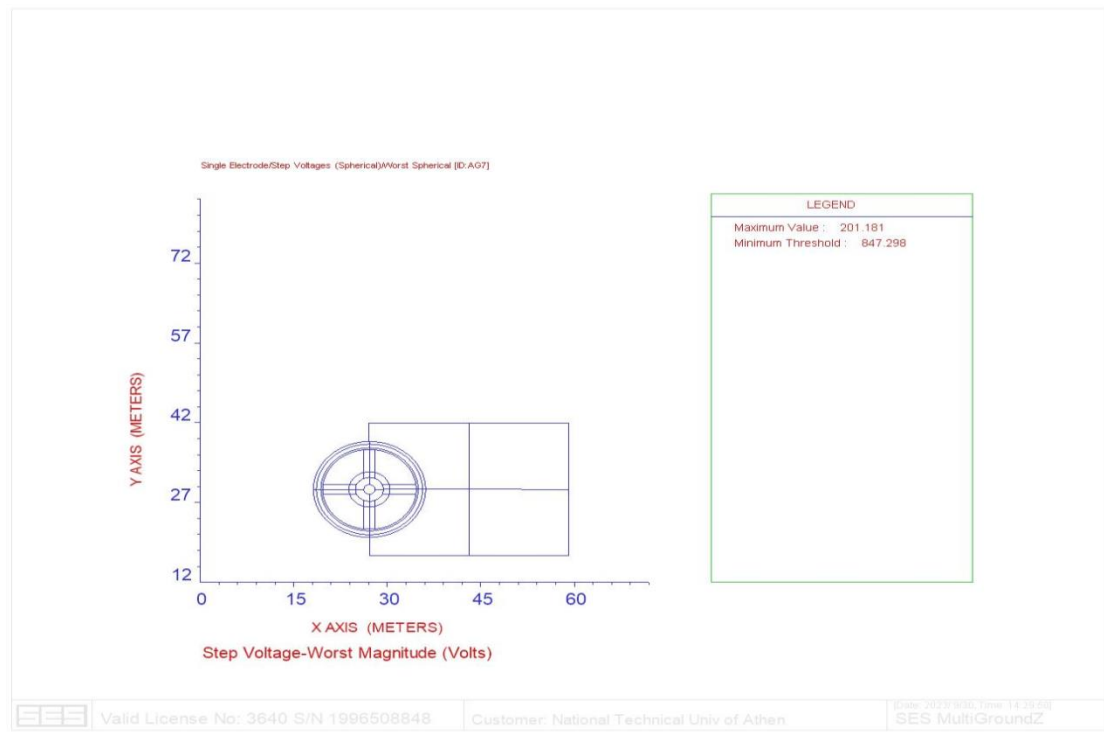
Σχήμα 6.31 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 7 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

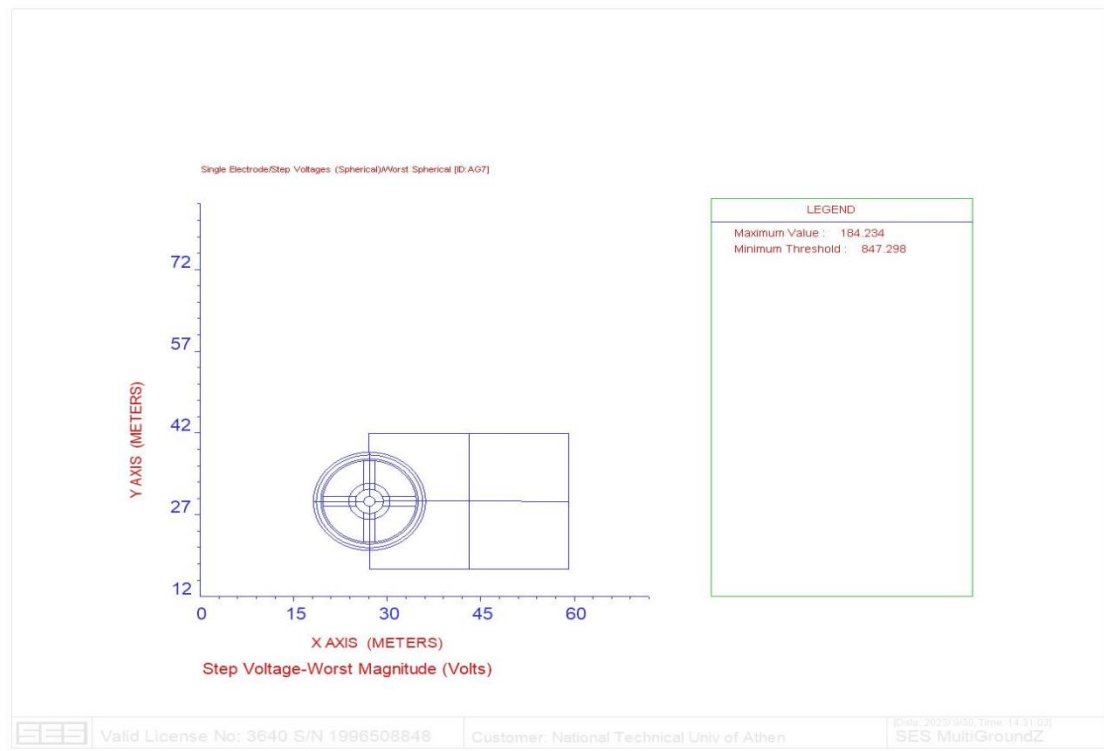
## IEC



## Complete



## ANSI



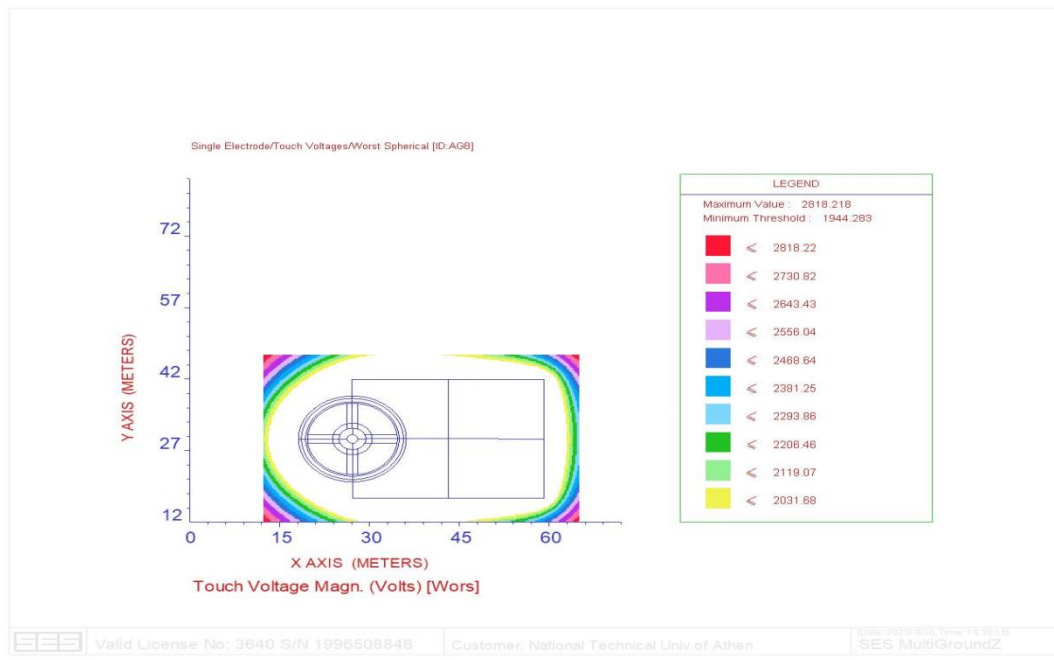
Σχήμα 6.32 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 7 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Στην Α/Γ 7, αναπτύσσονται κάποιες επικίνδυνες βηματικές τάσεις, σε απόσταση, όμως μεγαλύτερη από 2,5m από τον πυλώνα της, επομένως δεν απαιτείται η προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας.

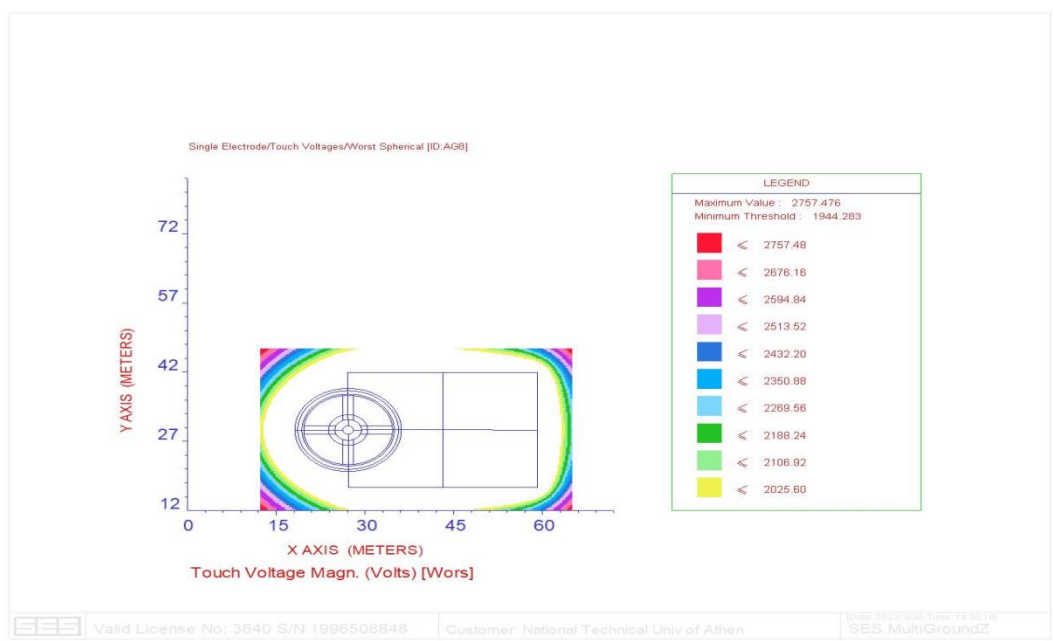
### 6.3.4.8 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 8

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec,έχουμε τάσεις επαφής:

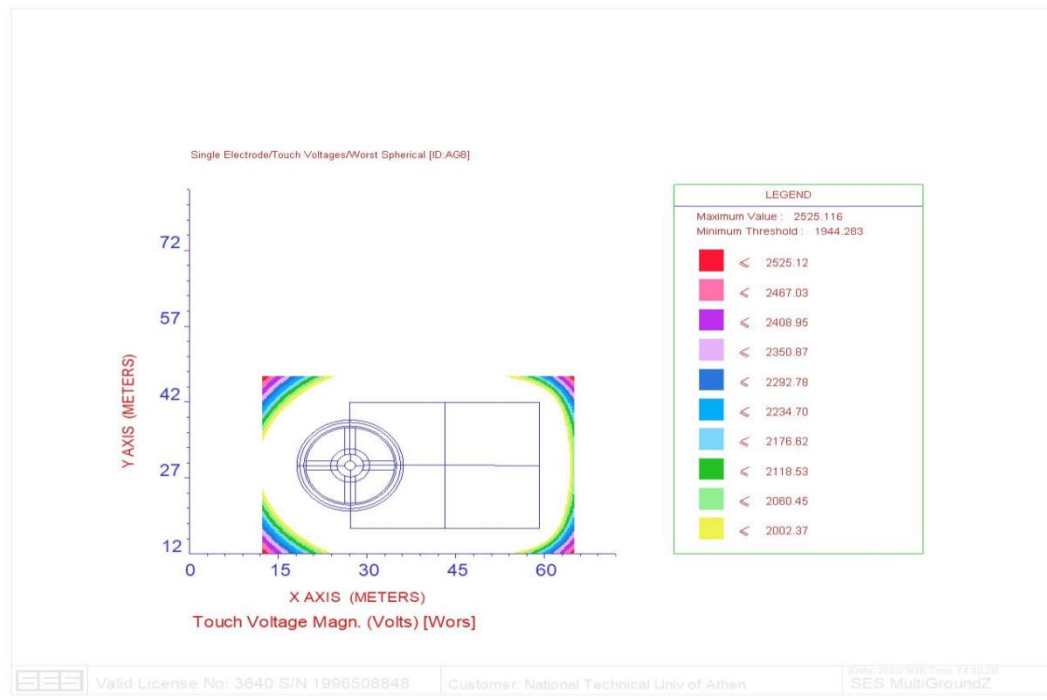
#### IEC



#### Complete



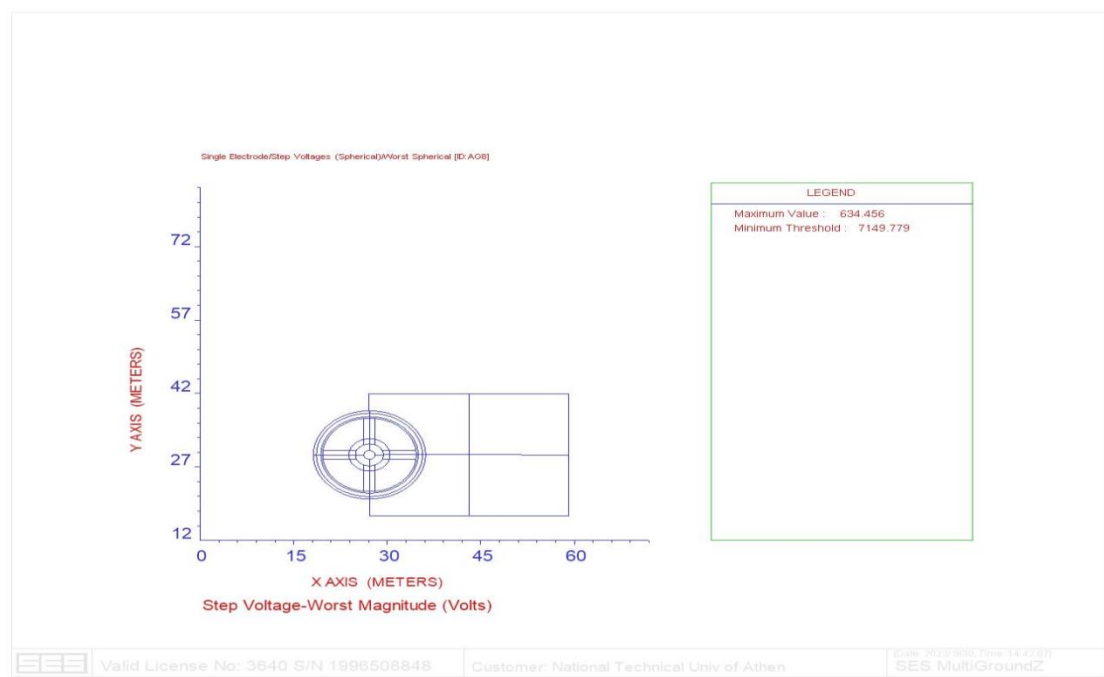
## ANSI



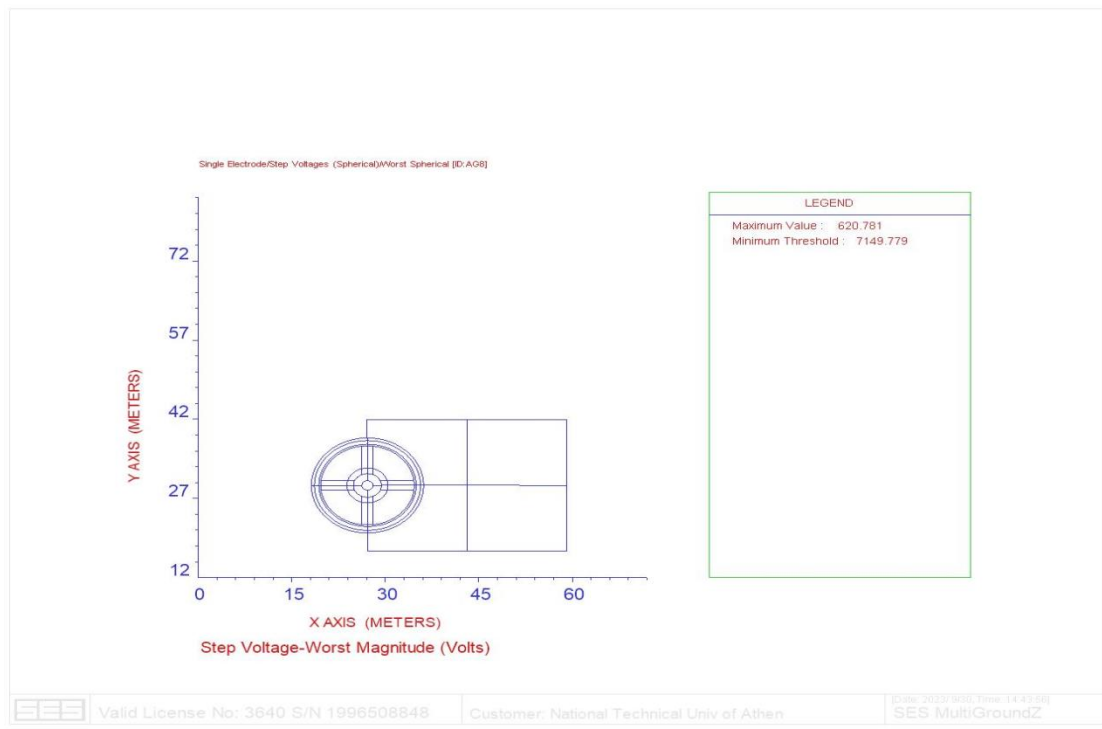
Σχήμα 6.33 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 8 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Και βηματικές τάσεις:

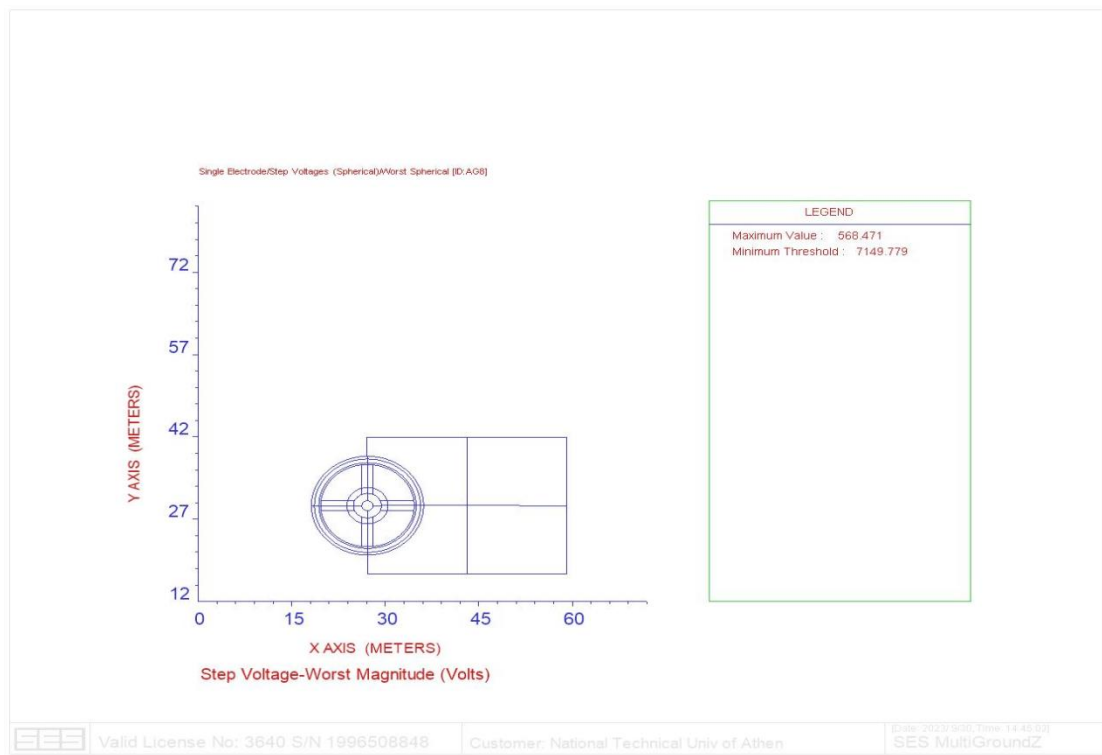
## IEC



## Complete



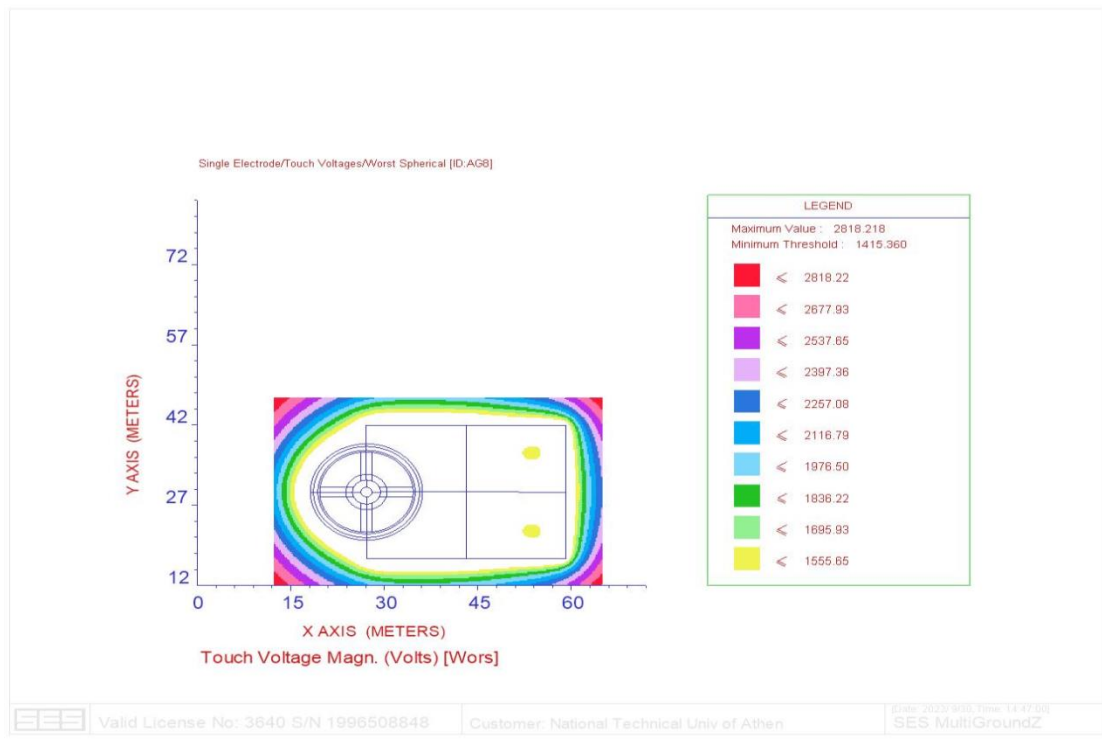
## ANSI



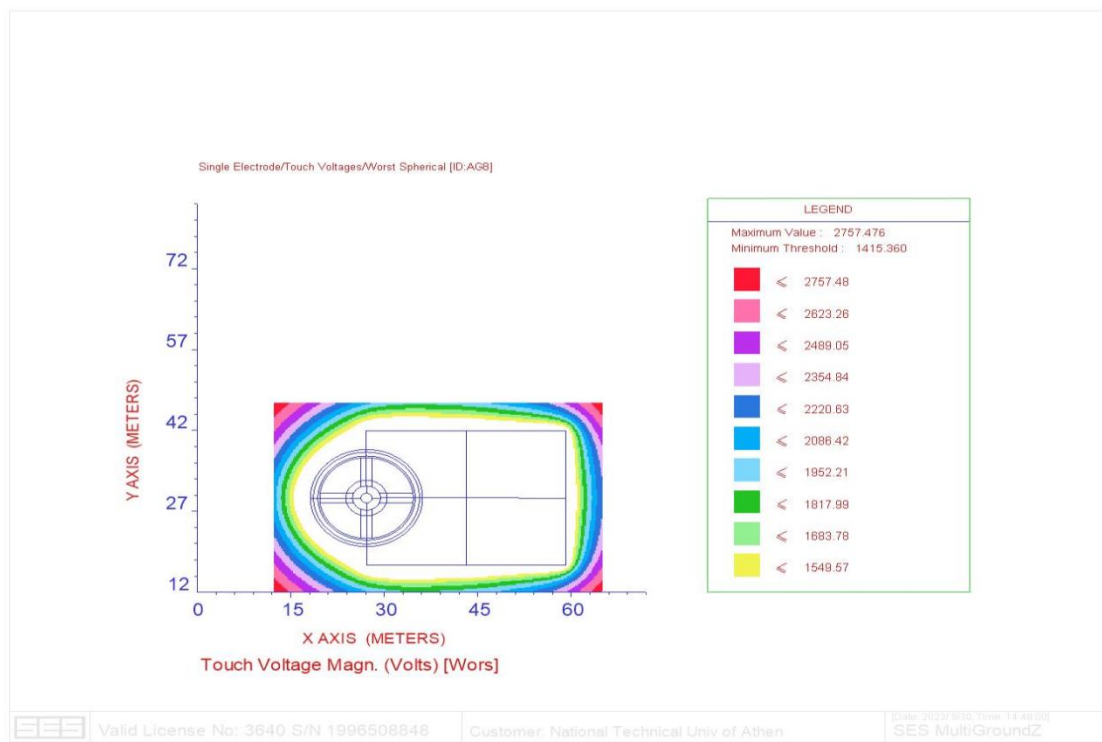
Σχήμα 6.34 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 8 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

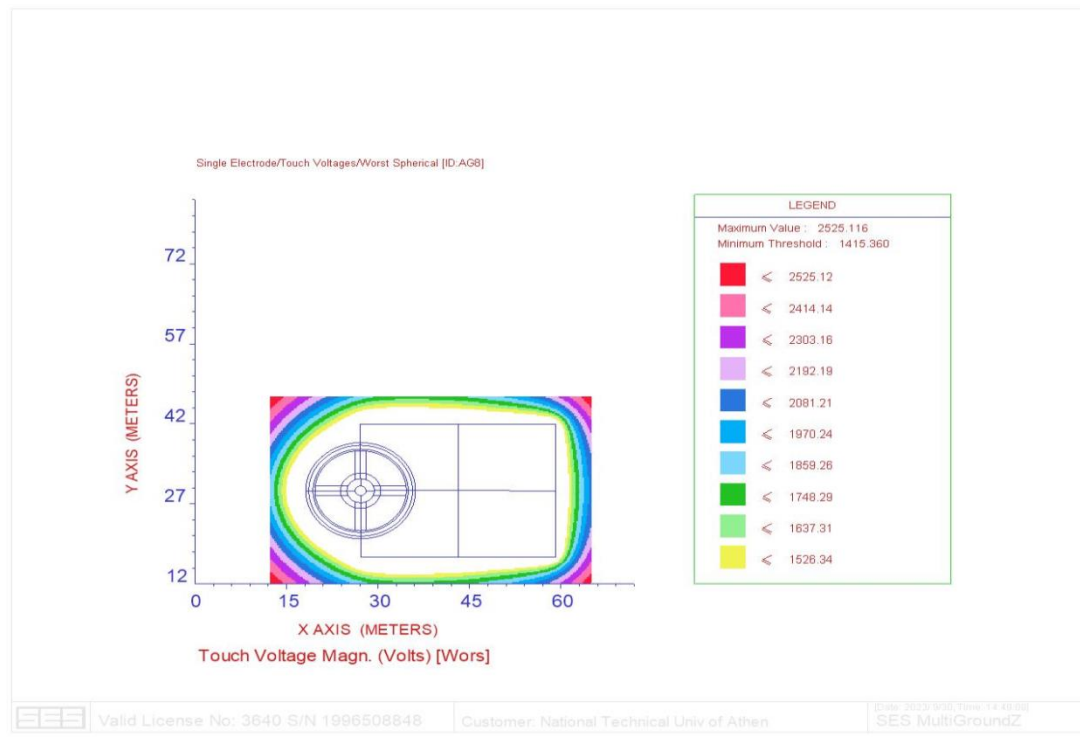
### IEC



### Complete



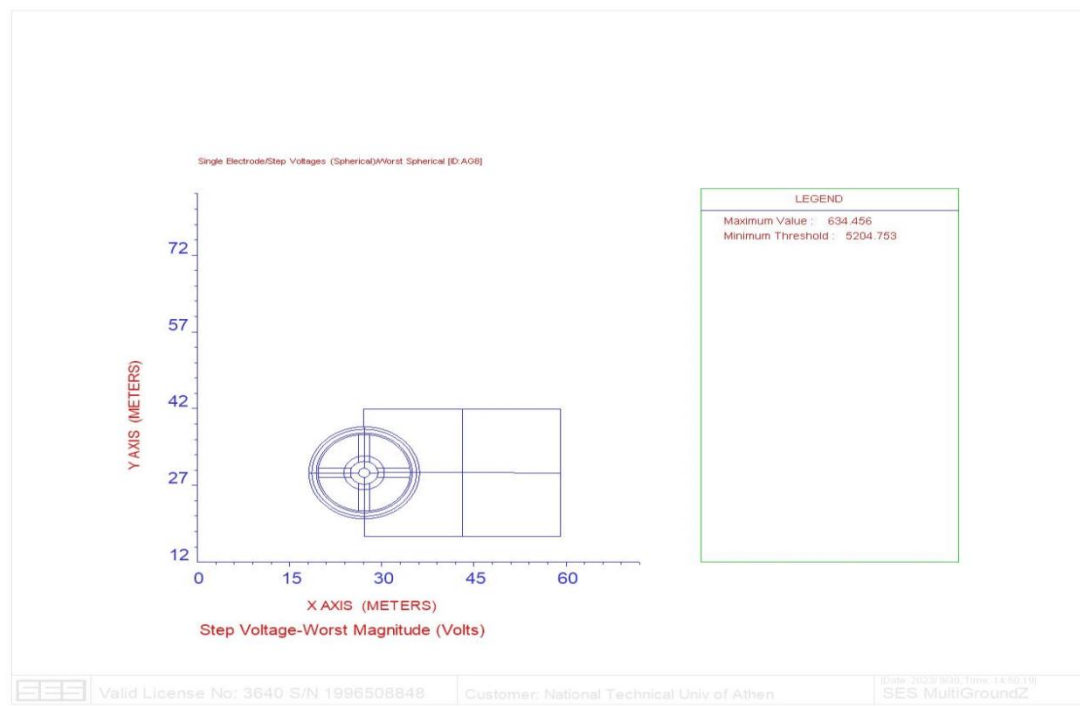
## ANSI



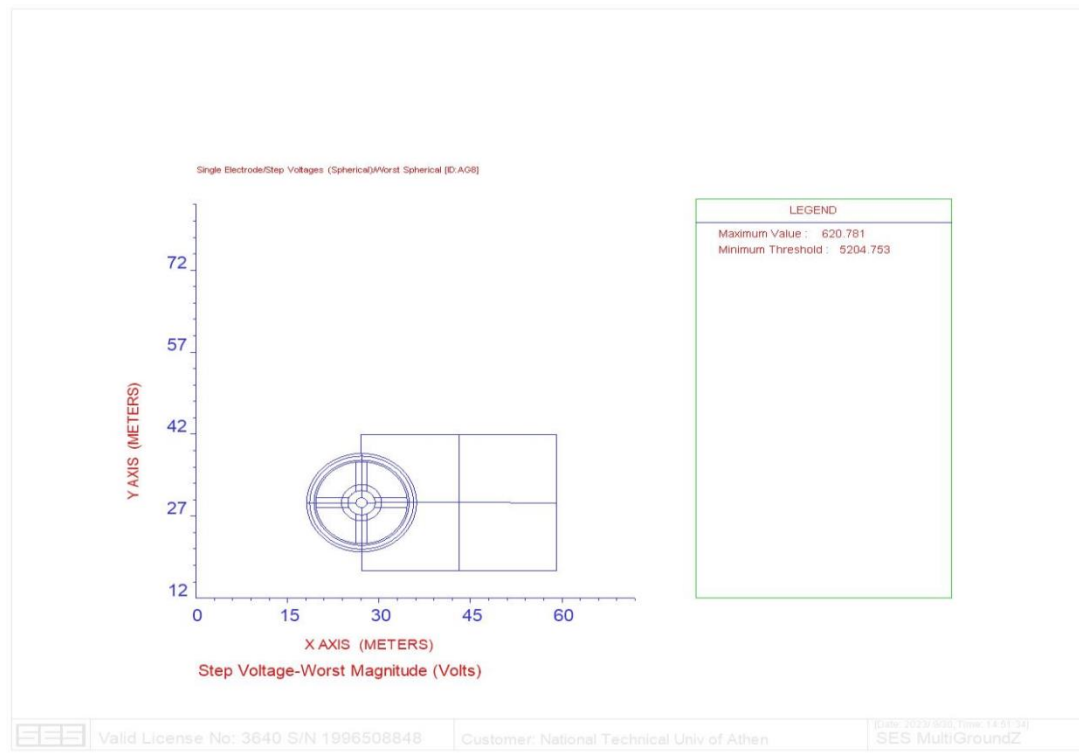
Σχήμα 6.35 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 8 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

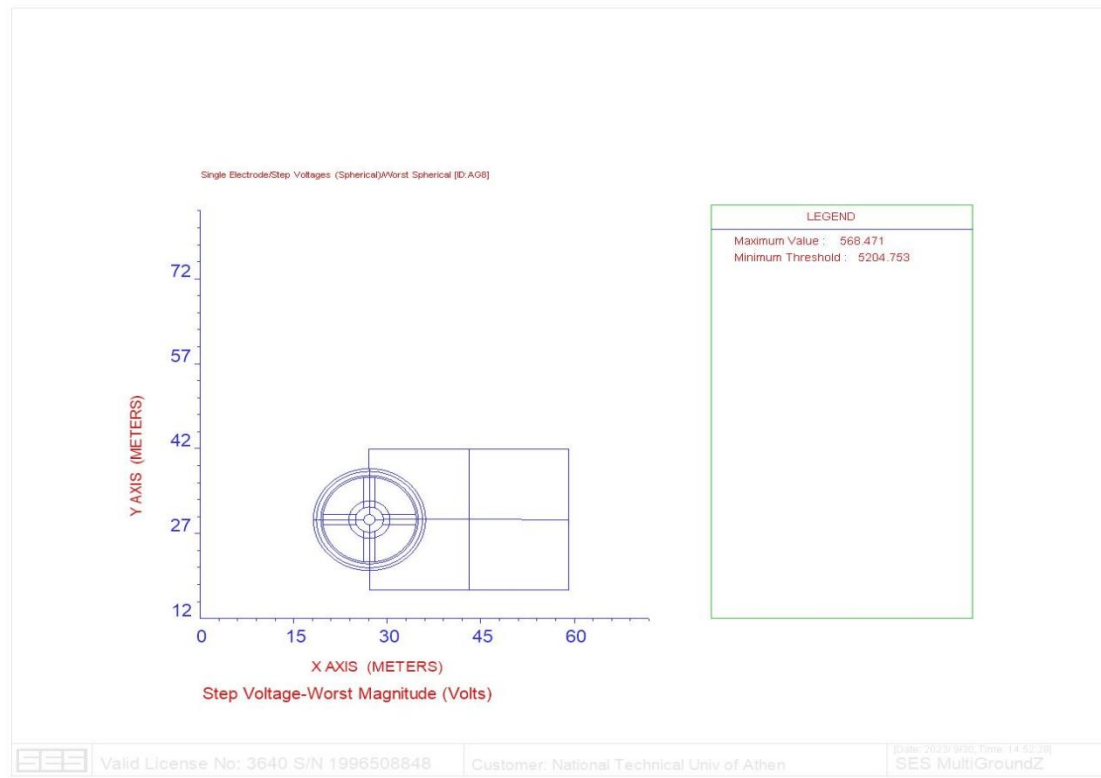
## IEC



## Complete



## ANSI



Σχήμα 6.36 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 8 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

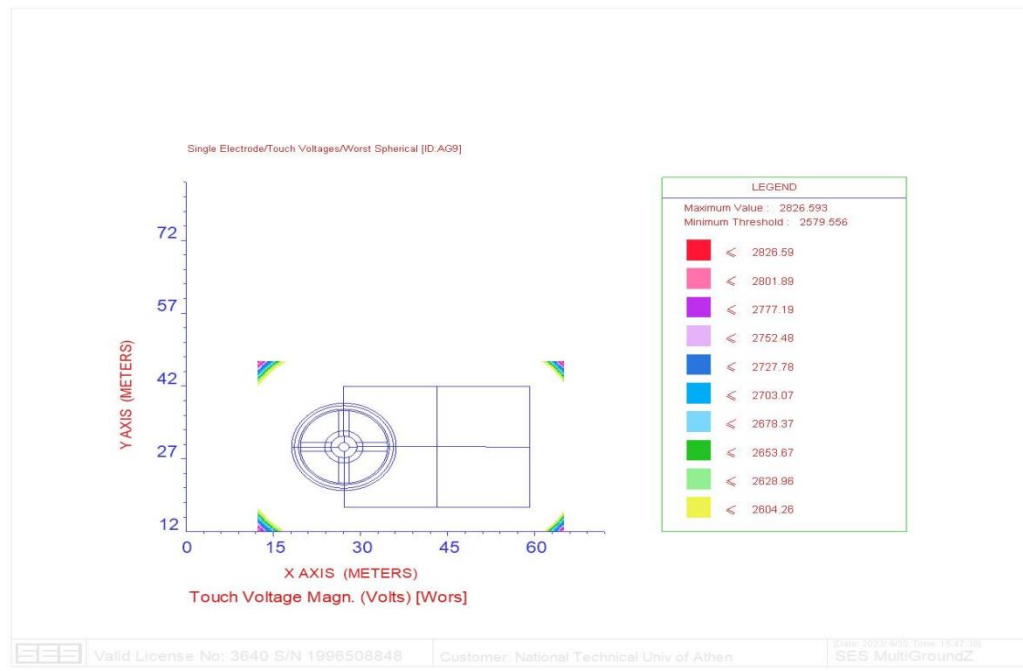


Οι τάσεις που υπολογίστηκαν είναι εντός ορίων, συνεπώς το σύστημα γείωσης της Α/Γ 8 μπορεί να κριθεί απόλυτα ασφαλές αναφορικά με τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής).

### 6.3.4.9 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για την Ανεμογεννήτρια 9

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

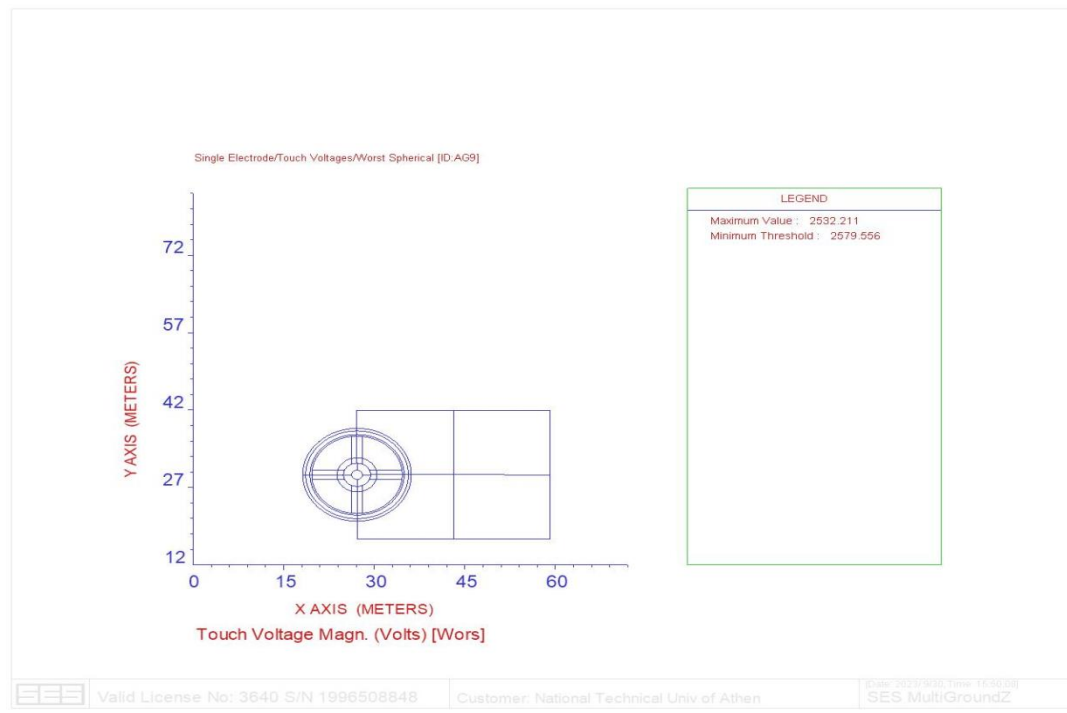
#### IEC



#### Complete



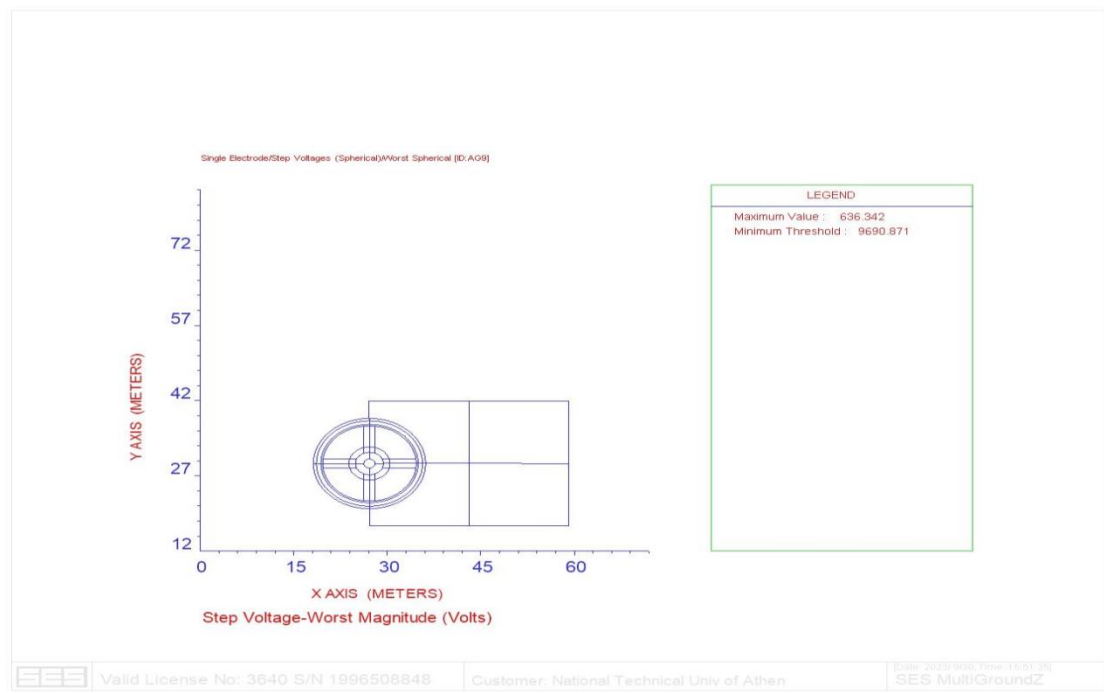
## ANSI



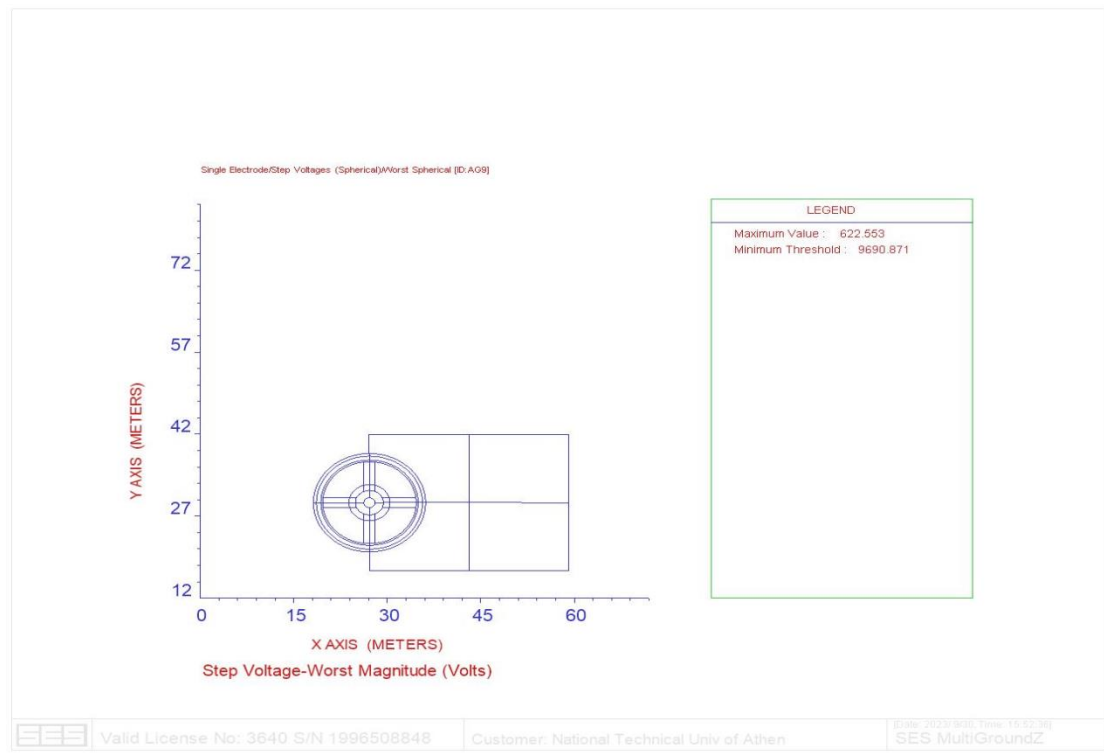
Σχήμα 6.37 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 9 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Και βηματικές τάσεις:

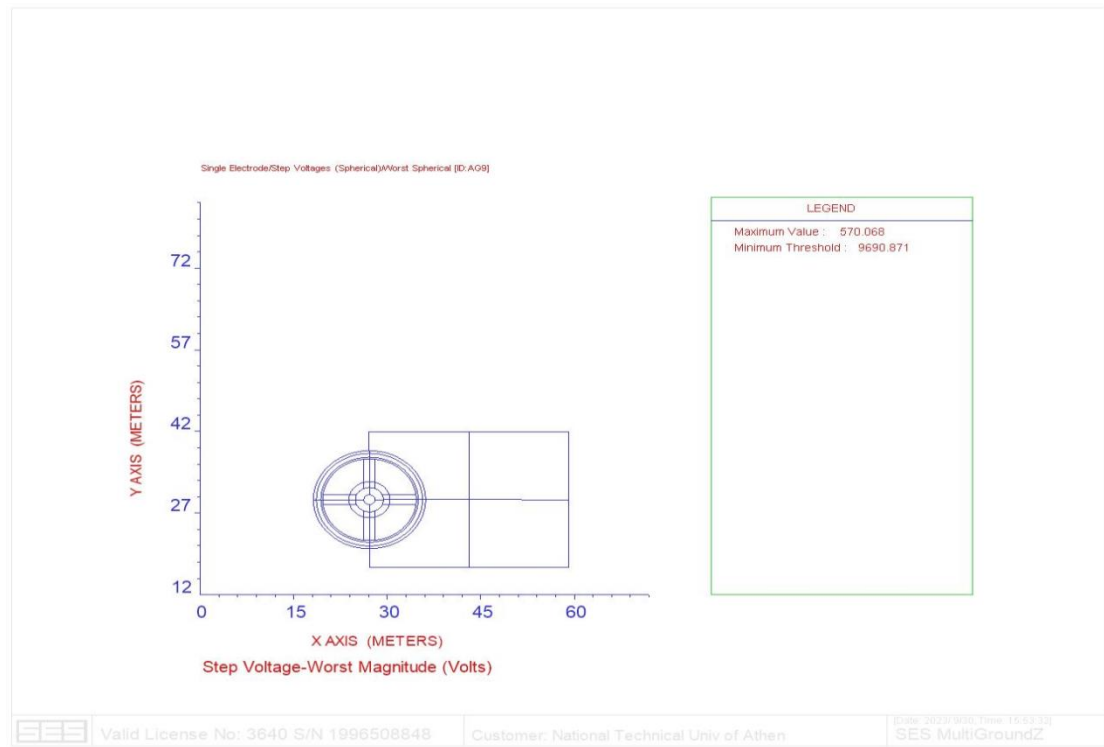
## IEC



## Complete



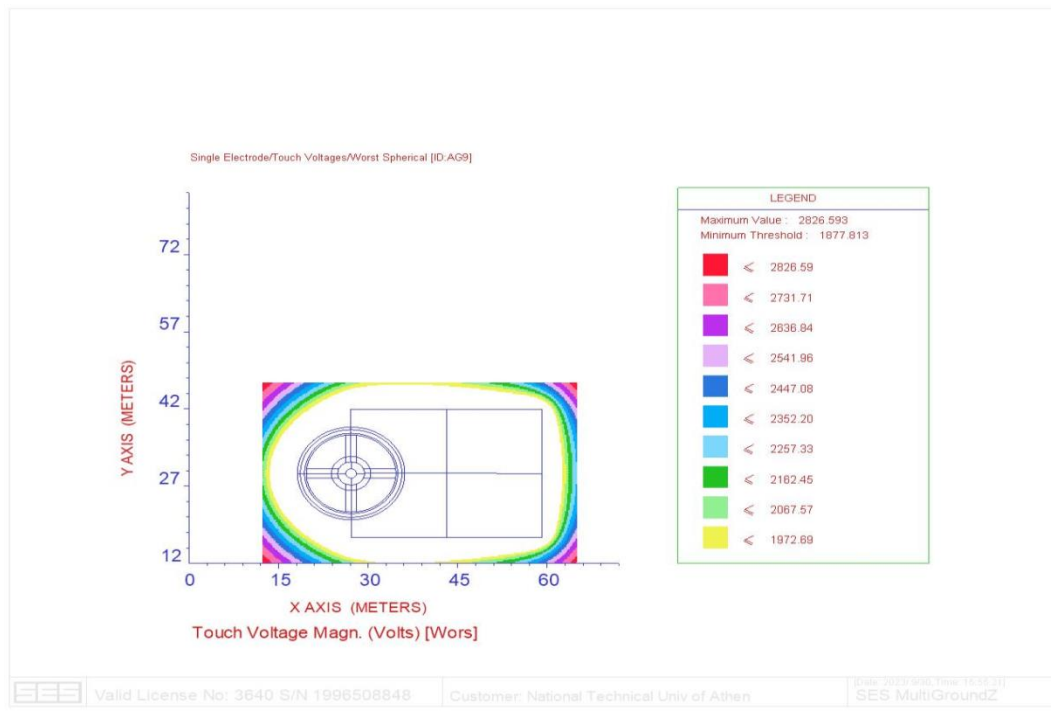
## ANSI



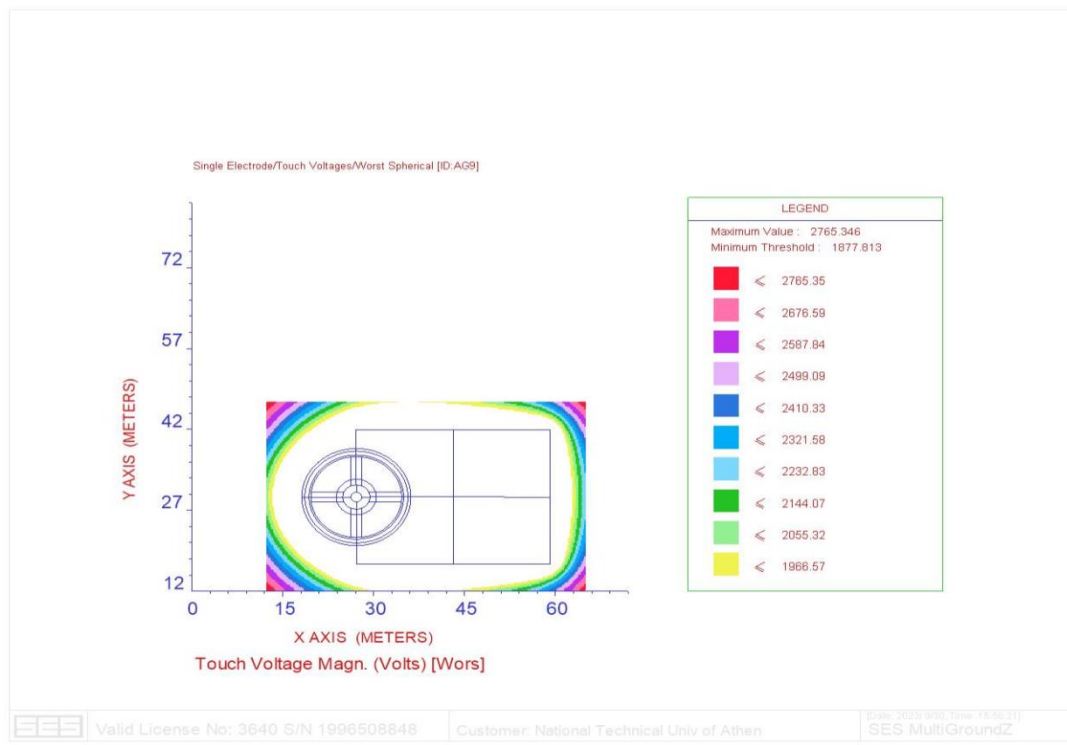
Σχήμα 6.38 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 9 για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

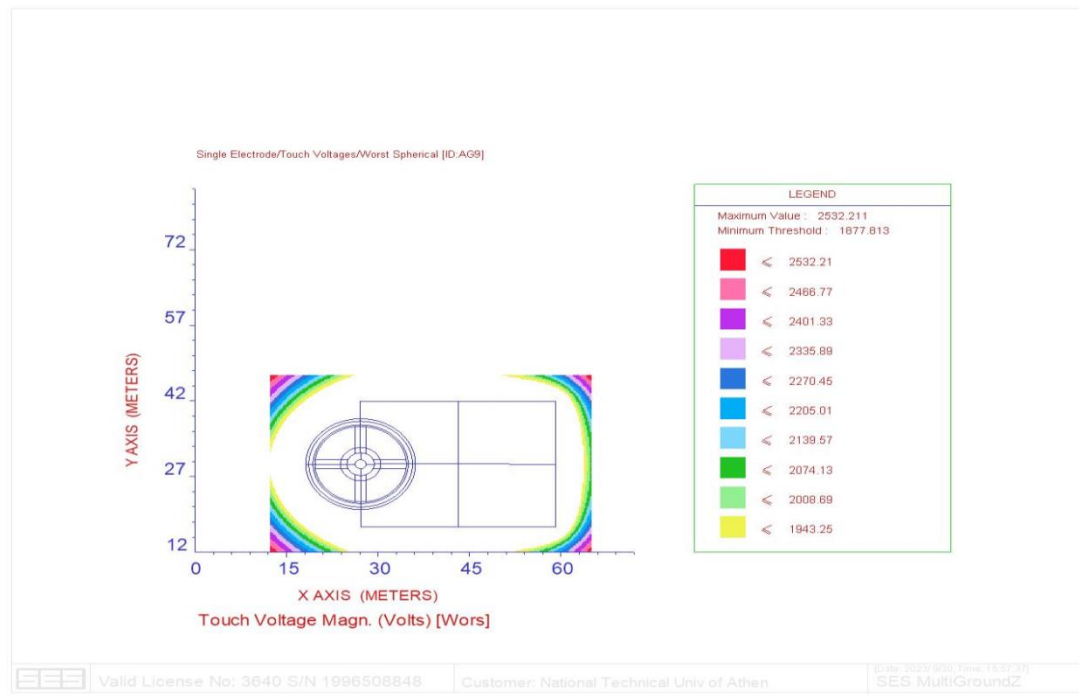
**IEC**



**Complete**



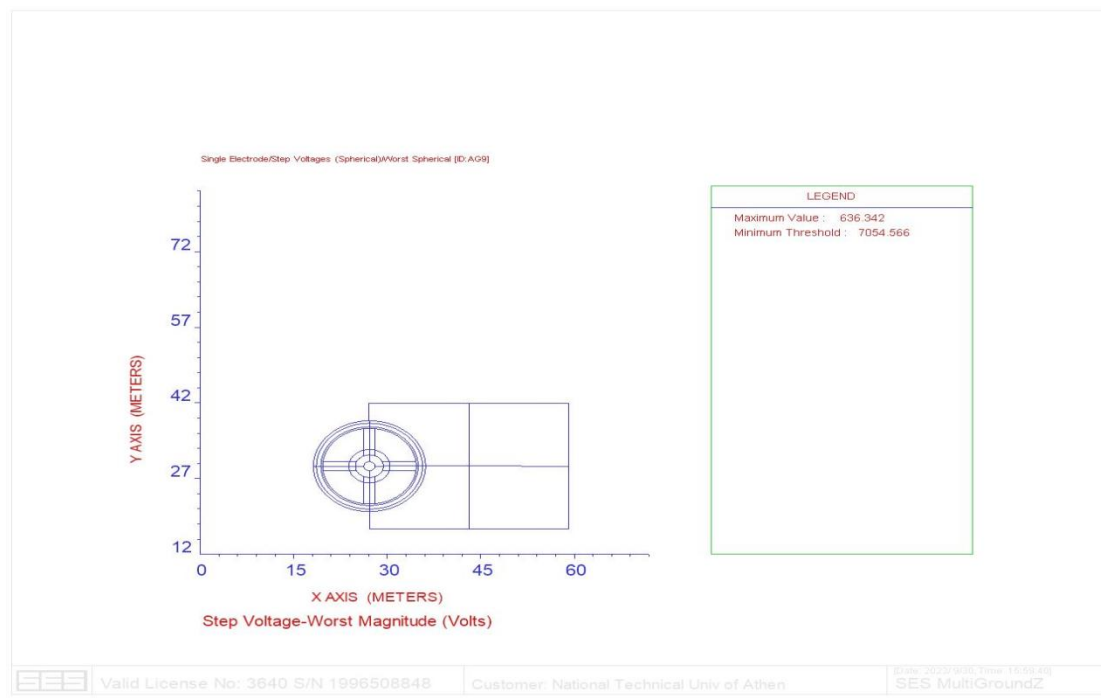
## ANSI



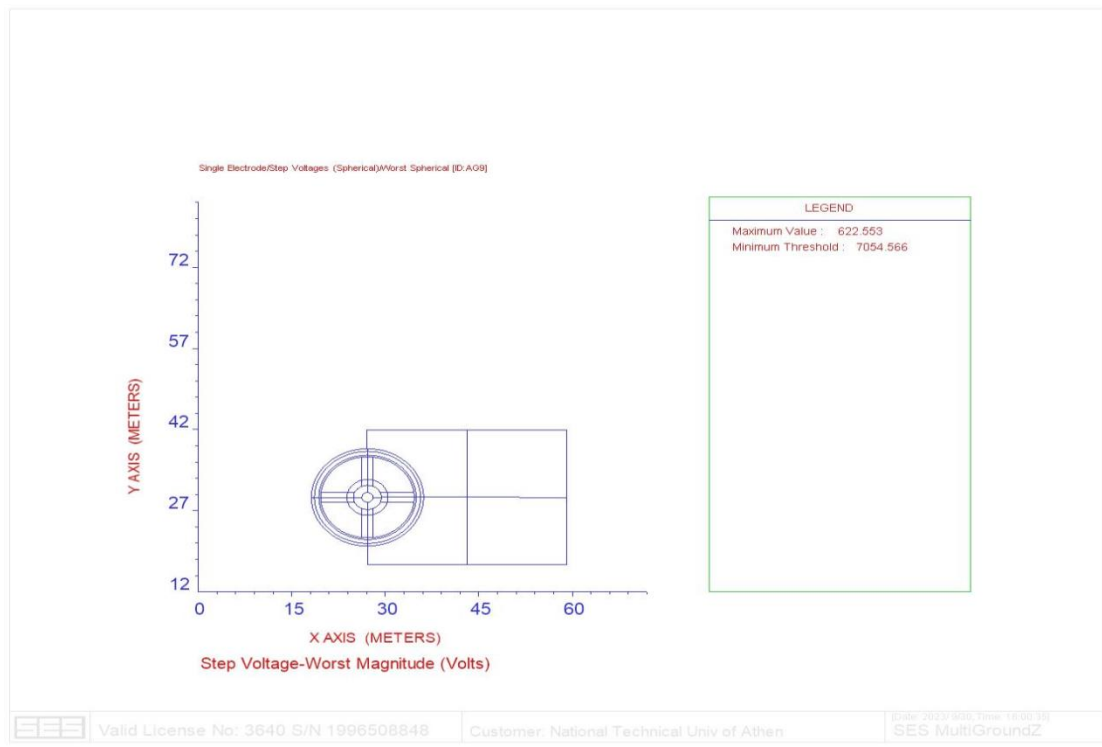
Σχήμα 6.39 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στην Α/Γ 9 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

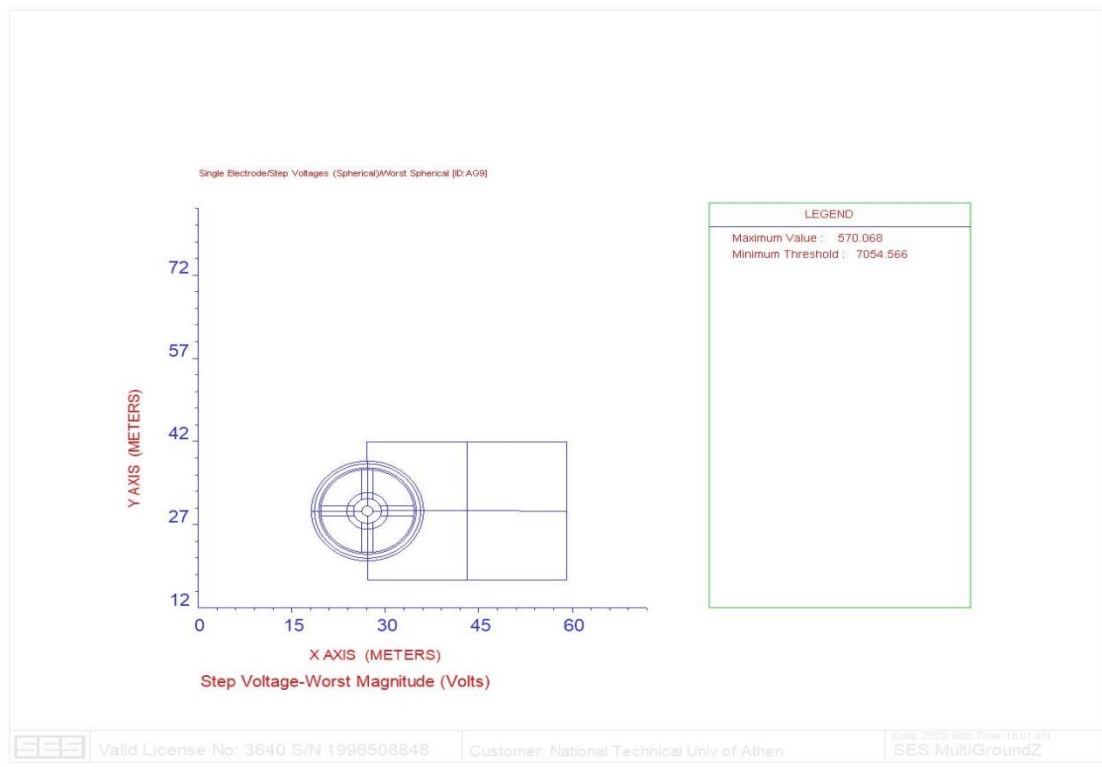
## IEC



## Complete



## ANSI



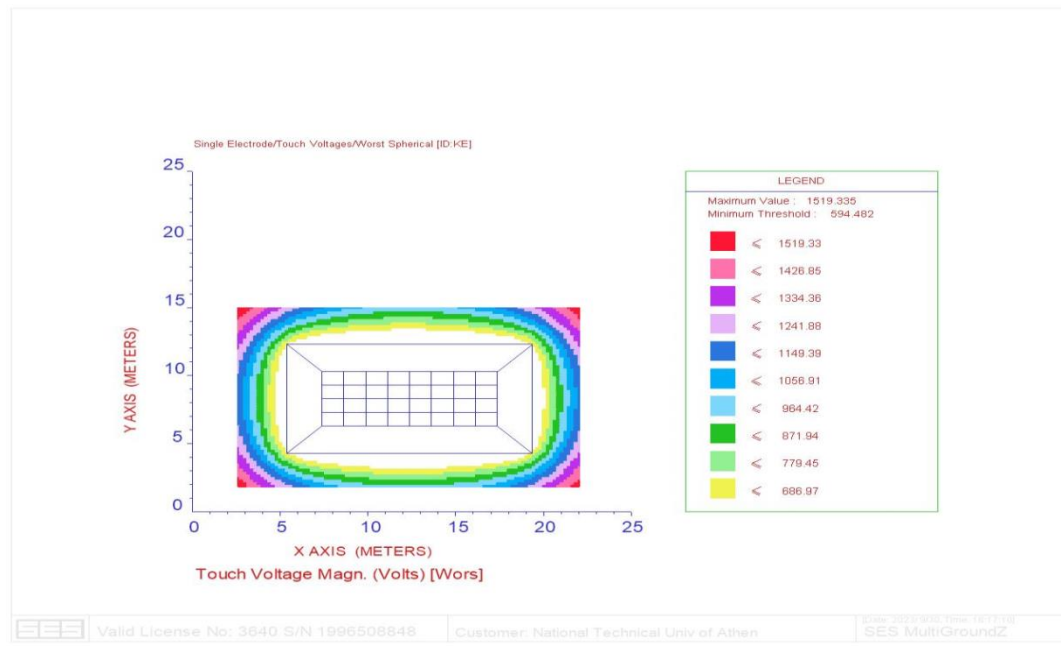
Σχήμα 6.40 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στην Α/Γ 9 για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Οι τάσεις που υπολογίστηκαν είναι εντός ορίων, συνεπώς το σύστημα γείωσης της Α/Γ 9 μπορεί να κριθεί απόλυτα ασφαλές αναφορικά με τις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής).

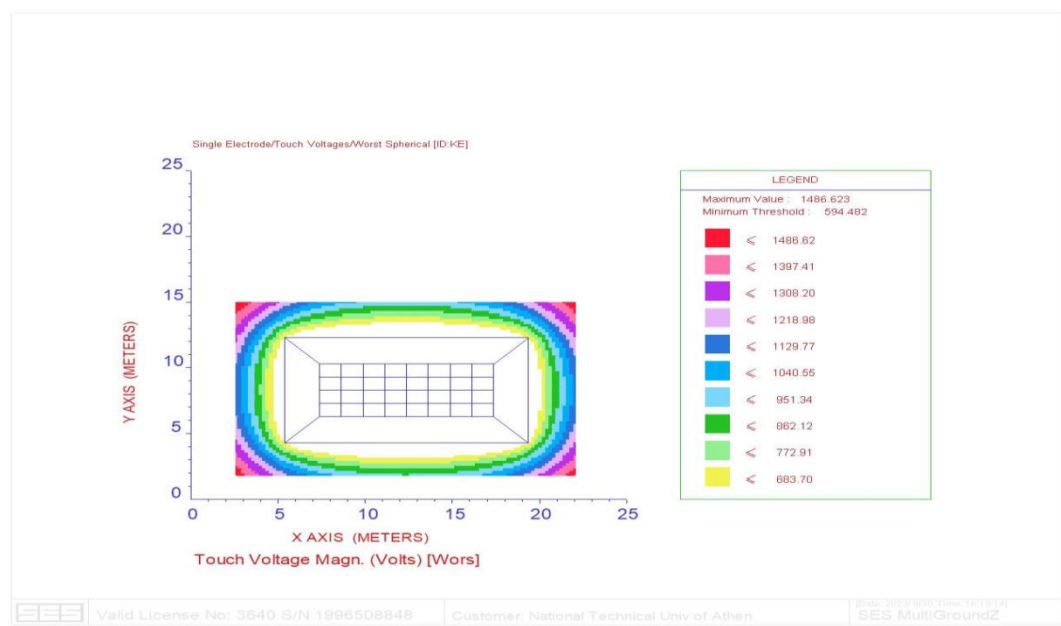
### 6.3.4.10 Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής για το Κτίριο Ελέγχου

Για σφάλμα διάρκειας 0,5sec, έχουμε τάσεις επαφής:

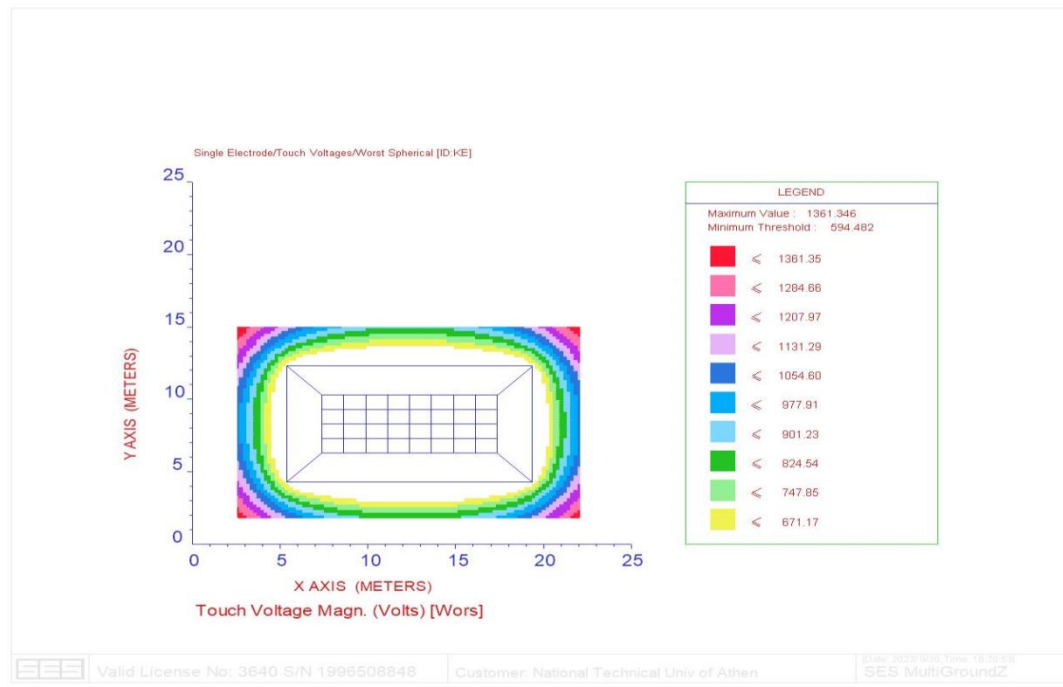
#### IEC



#### Complete



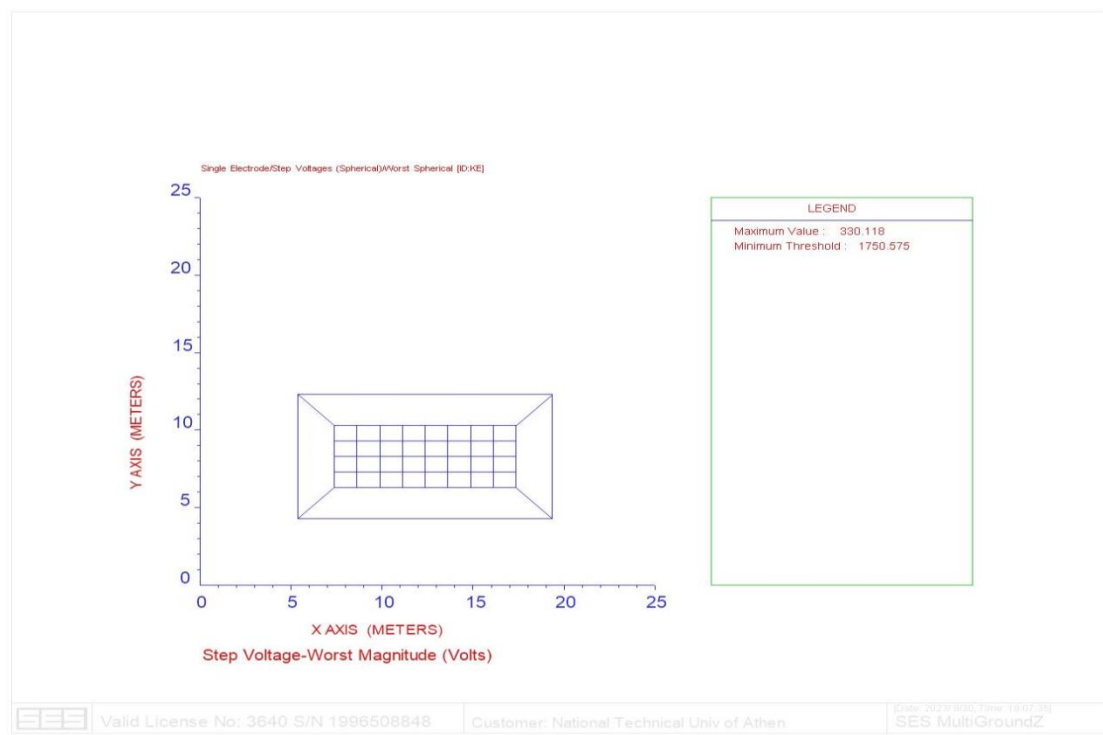
## ANSI



Σχήμα 6.41 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στο ΚΕ για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

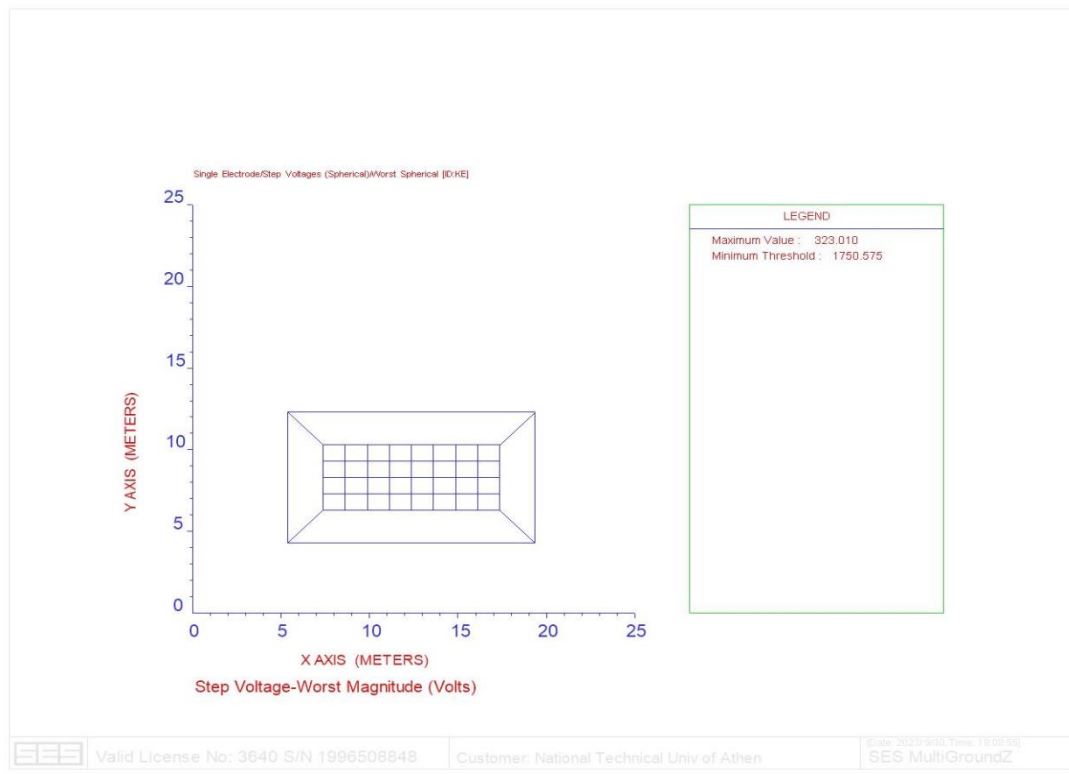
Και βηματικές τάσεις:

## IEC

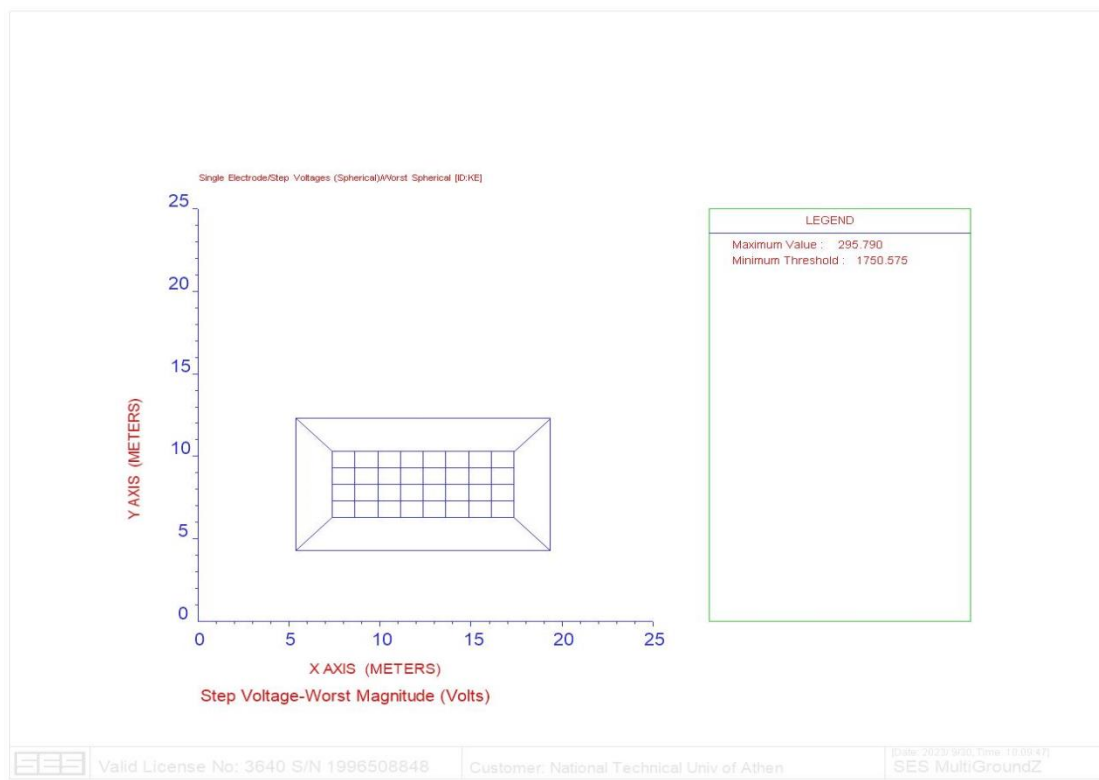




## Complete



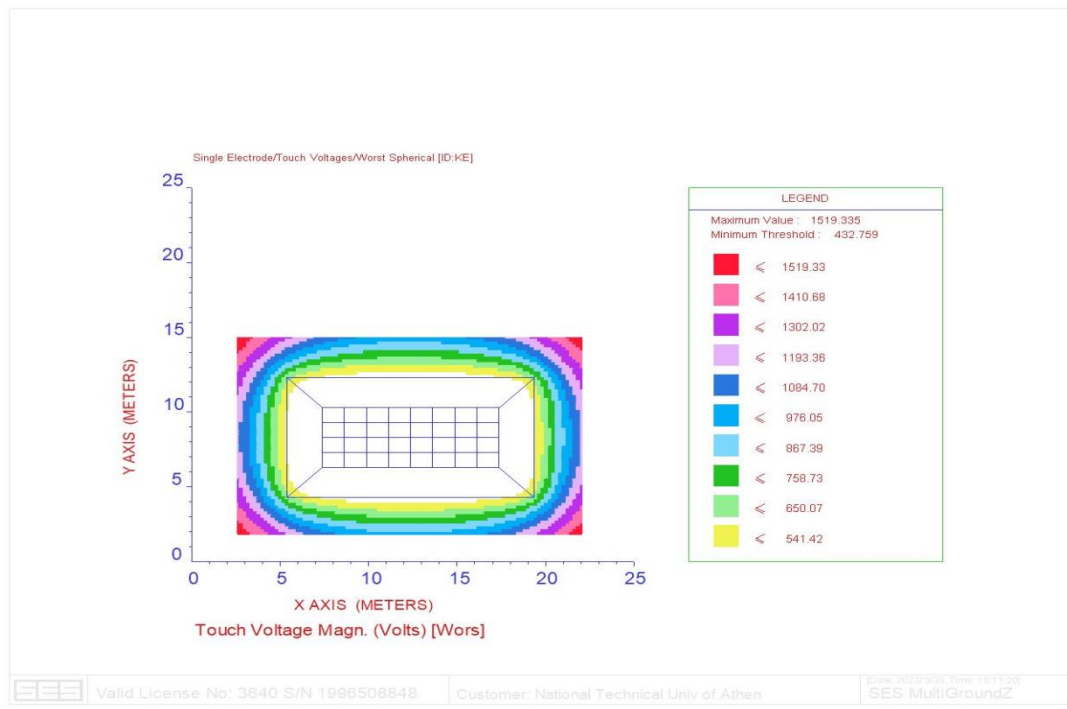
## ANSI



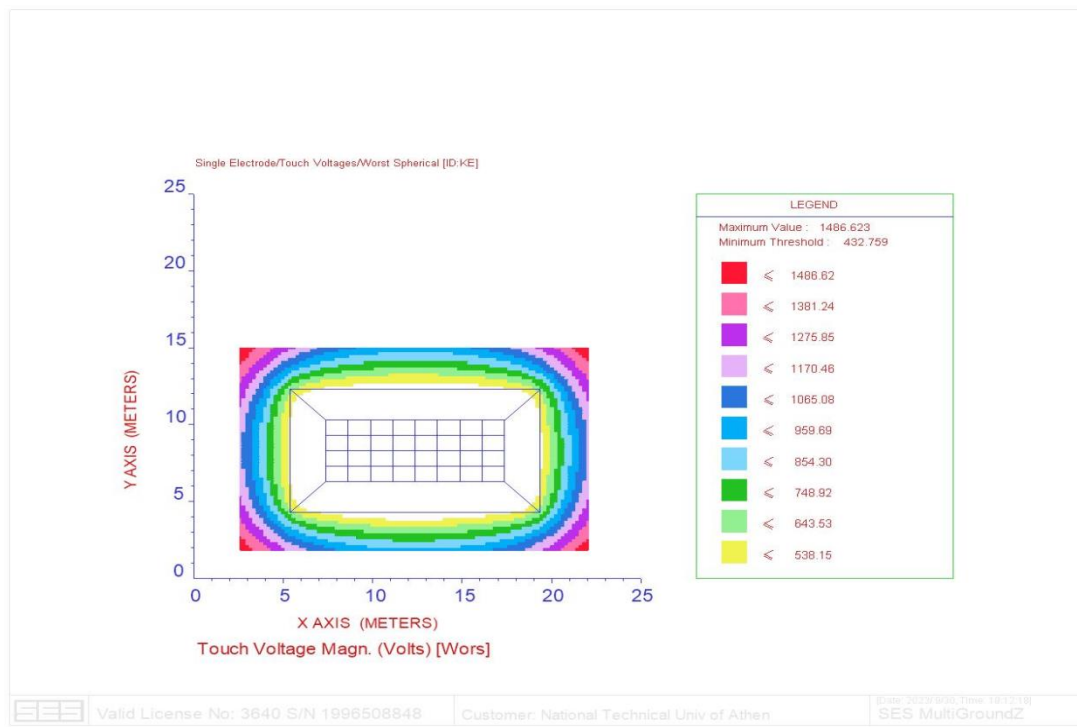
Σχήμα 6.42 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στο ΚΕ για σφάλμα διάρκειας 0,5 sec

Για σφάλμα διάρκειας 1sec, έχουμε τάσεις επαφής:

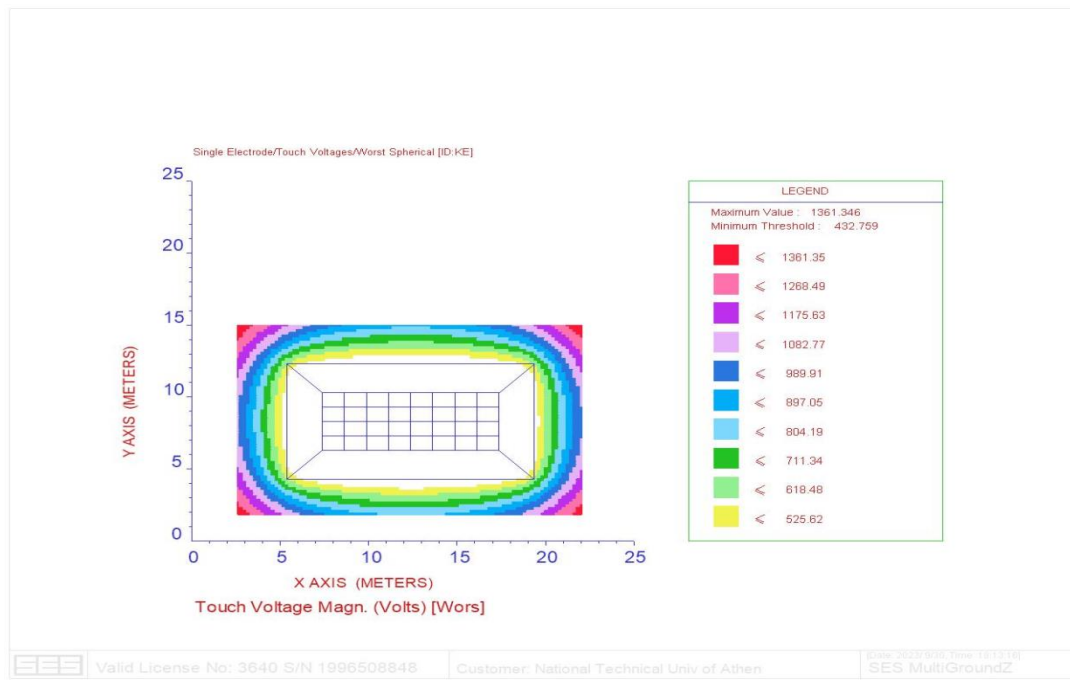
### IEC



### Complete



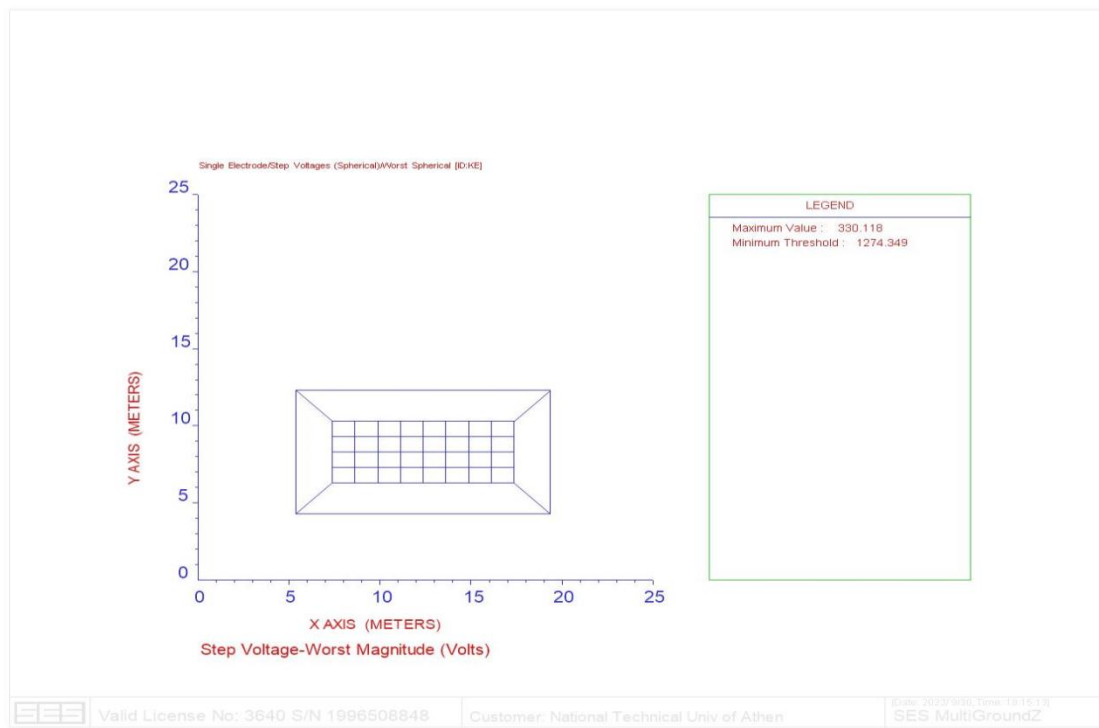
## ANSI



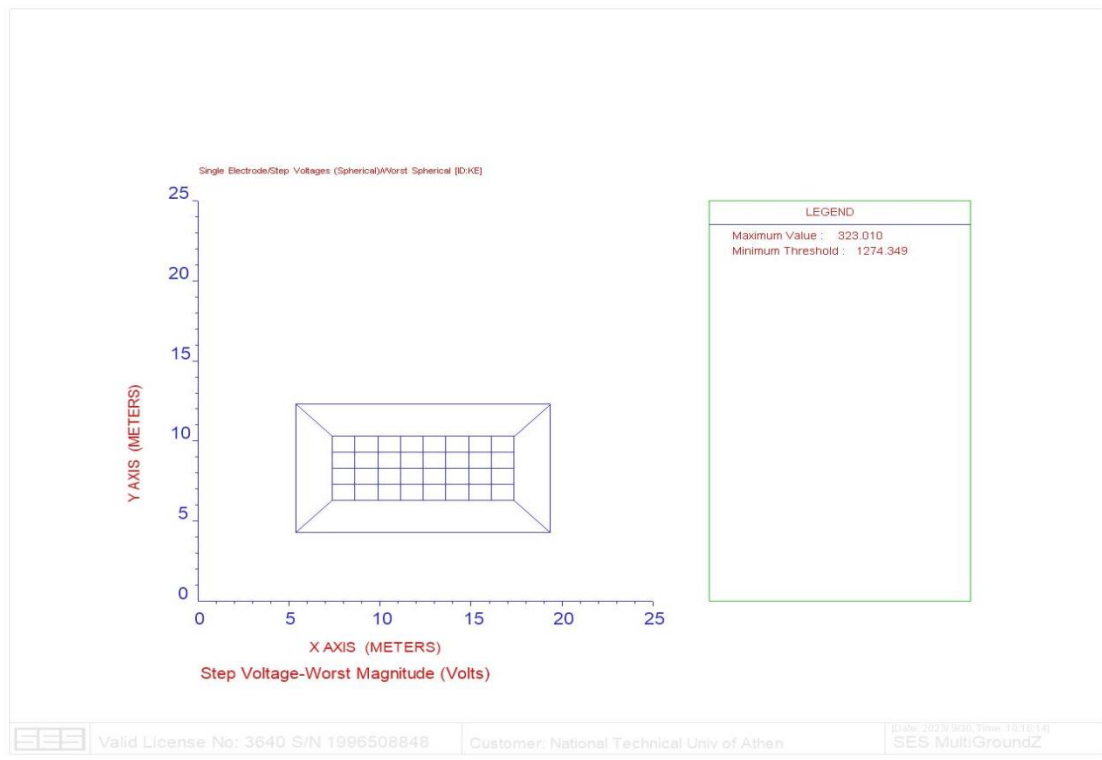
Σχήμα 6.43 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στο ΚΕ για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Και βηματικές τάσεις:

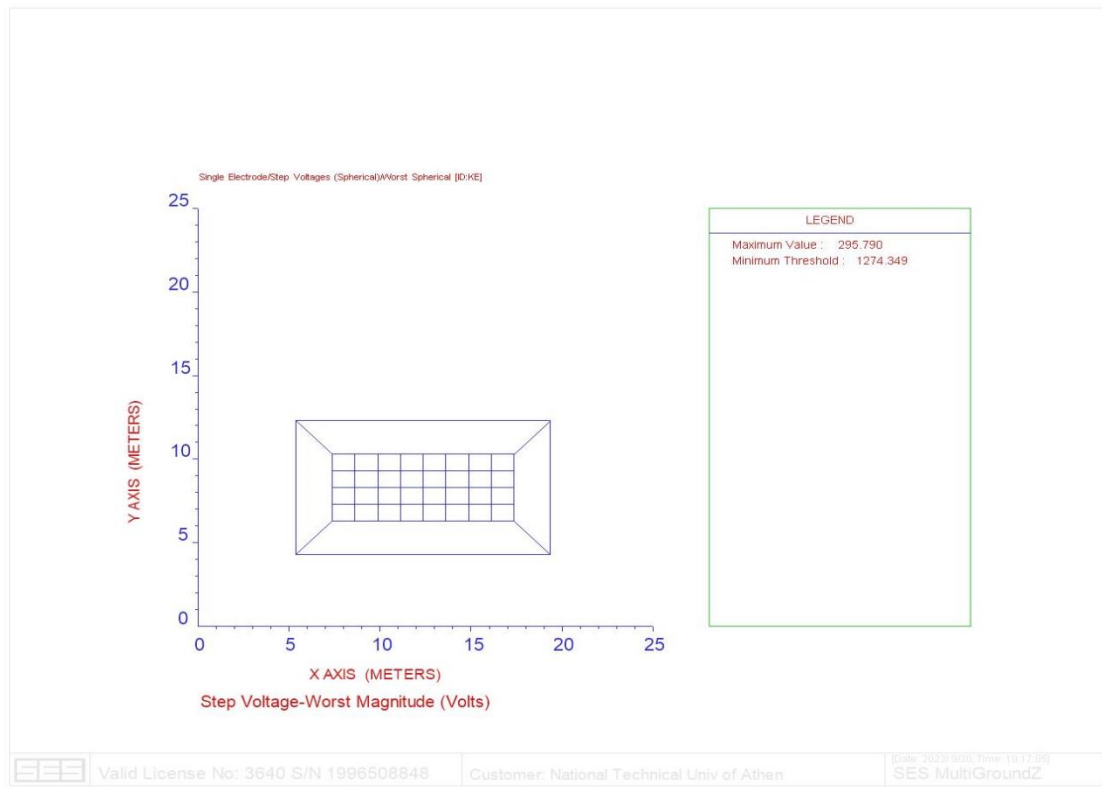
## IEC



## Complete



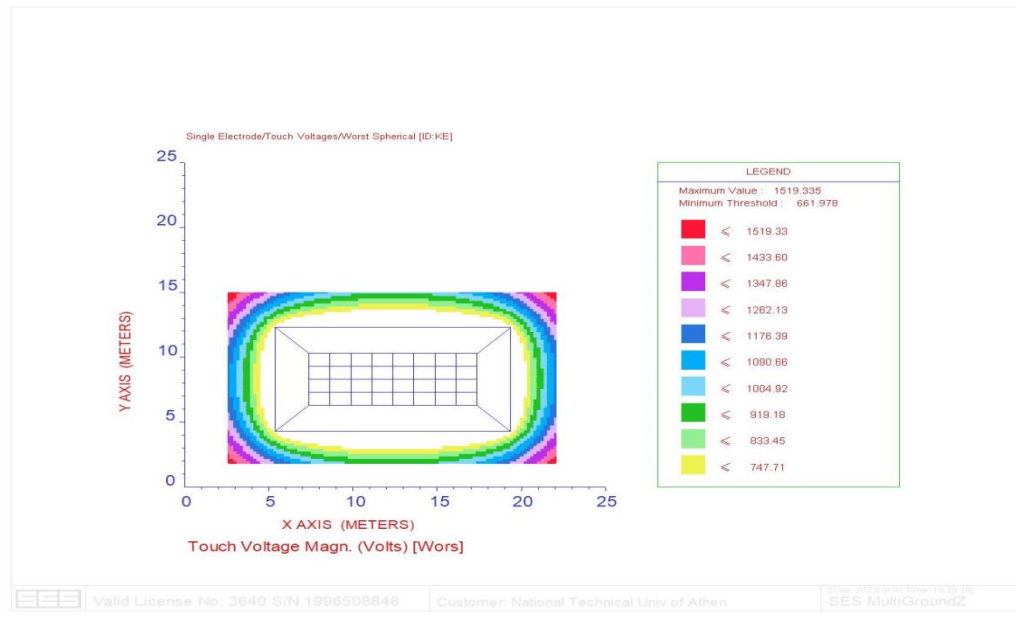
## ANSI



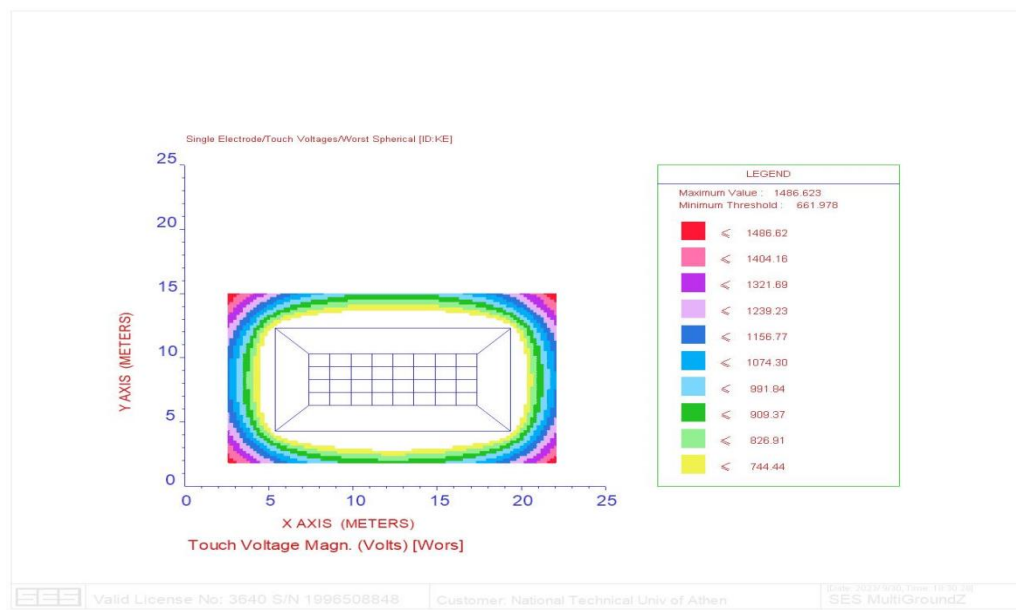
Σχήμα 6.44 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στο ΚΕ για σφάλμα διάρκειας 1 sec

Παρατηρούμε ότι, για σφάλμα διάρκειας ενός δευτερολέπτου, αναπτύσσονται ορισμένες επικίνδυνες τάσεις επαφής, στις άκρες της εξωτερικής περιμέτρου του πλέγματος του Κτιρίου Ελέγχου, και για τις τρεις μεθόδους(IEC,Complete,ANSI). Για να εξαλειφθούν αυτές οι τάσεις και να καταστεί το σύστημα απόλυτα ασφαλές, προστίθεται υλικό επιφάνειας, το οποίο αυξάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση επαφής. Συγκεκριμένα, προστέθηκε χαλίκι 10cm και λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

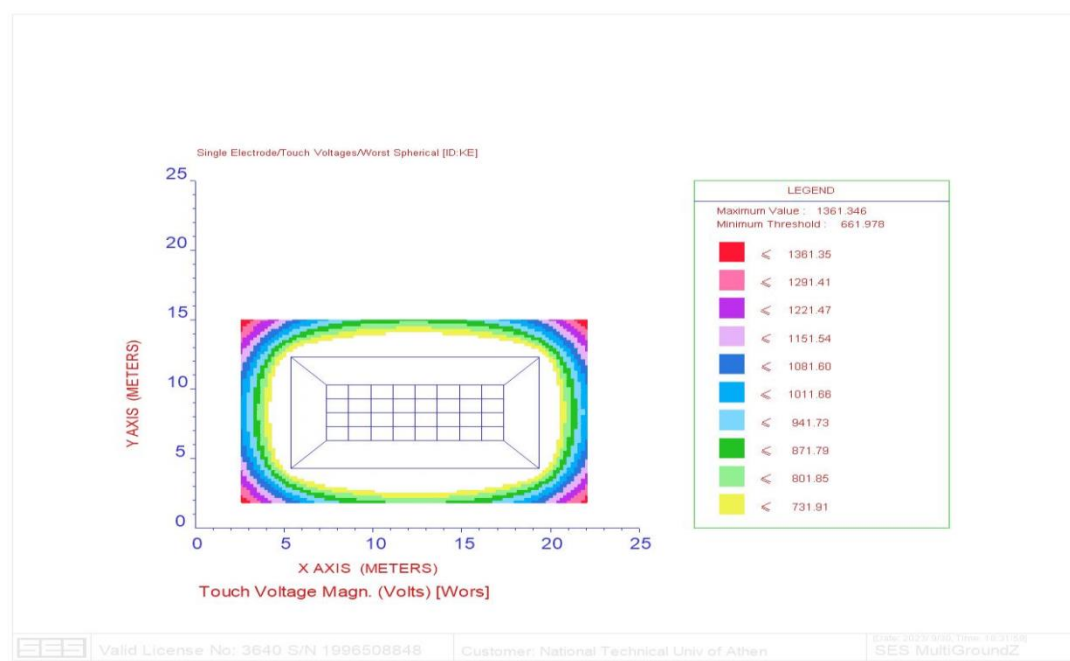
### IEC



### Complete



## ANSI



Σχήμα 6.45 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής στο ΚΕ για σφάλμα διάρκειας 1 sec, με προσθήκη υλικού επιφάνειας(χαλίκι 10cm)

### 6.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

#### 6.4.1 Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων

Για την μελέτη της επίδρασης του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, εξετάζουμε, ενδεικτικά, τα αποτελέσματα της απόκρισης του συστήματος γείωσης της Α/Γ 2 για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά ΜΤ της Α/Γ 1. Τα ρεύματα πλέγματος που υπολογίστηκαν για την Α/Γ 2, σύμφωνα και με τους τρεις τρόπους υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος, είναι τα παρακάτω:

A/Γ 2	IEC	Complete	ANSI
$I_g$	77,70A	76,02A	69,62A

Πίνακας 6.6 Ρεύματα πλέγματος της Α/Γ 2, σύμφωνα με τους τρεις τρόπους υπολογισμού τους

Συγκρίνουμε τα ρεύματα των τριών μεθόδων και εξετάζουμε τις ποσοστιαίες αποκλίσεις μεταξύ τους:

Ποσοστιαία απόκλιση IEC/Complete→2,21%

Ποσοστιαία απόκλιση IEC/ANSI→11,61%

Ποσοστιαία απόκλιση Complete/ANSI→9,19%

Οι μέγιστες αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, που υπολογίστηκαν για την Α/Γ 2, σύμφωνα με τα Πρότυπα IEC 60909, ANSI C 37.010 και τη μέθοδο Complete, φαίνονται παρακάτω(Η διάρκεια του σφάλματος επηρεάζει τα επιτρεπτά όρια των τάσεων, άλλα όχι την μέγιστη τιμή που αναπτύσσουν):

A/Γ 2	IEC	Complete	ANSI
E <sub>touch</sub>	2093,144V	2047,887V	1875,479V
E <sub>step</sub>	329,069V	321,954V	294,849V

*Πίνακας 6.7 Μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις στην Α/Γ 2, σύμφωνα με τους τρεις τρόπους υπολογισμού τους*

Συγκρίνουμε τις τάσεις επαφής, σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους, και εξετάζουμε τις ποσοστιαίες αποκλίσεις μεταξύ τους:

Ποσοστιαία απόκλιση IEC/Complete→2,21%

Ποσοστιαία απόκλιση IEC/ANSI→11,61%

Ποσοστιαία απόκλιση Complete/ANSI→9,19%

Συγκρίνουμε τις βηματικές τάσεις, σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους, και εξετάζουμε τις ποσοστιαίες αποκλίσεις μεταξύ τους:

Ποσοστιαία απόκλιση IEC/Complete->2,21%

Ποσοστιαία απόκλιση IEC/ANSI->11,61%

Ποσοστιαία απόκλιση Complete/ANSI->9,19%

Παρατηρούμε ότι η % απόκλιση, που παρουσιάζει το ρεύμα πλέγματος  $I_g$ , λόγω του διαφορετικού τρόπου που αυτό έχει υπολογιστεί, οδηγεί σε ισόποση % απόκλιση των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Κατ'επέκταση, από τη σχέση  $I_g = S_f I_f$ , καταλήγουμε ότι η % απόκλιση που παρουσιάζει το ρεύμα σφάλματος, λόγω του διαφορετικού τρόπου που αυτό έχει υπολογιστεί, οδηγεί σε ισόποση % απόκλιση των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Το παραπάνω, εντοπίστηκε σε κάθε σύστημα γείωσης του αιολικού πάρκου(Α/Γ και ΚΕ), δηλαδή σε κάθε σύστημα γείωσης ισχύει:

$$\Delta I_f(\%) = \Delta I_{gi}(\%) = \Delta E_{step}(\%) = \Delta E_{touch}(\%)$$

Το φαινόμενο αυτό, εξηγείται από την γραμμικότητα που παρουσιάζει η μοντελοποίηση του φαινομένου διάχυσης του ρεύματος σφάλματος στη γη.

#### **6.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τη διπλωματική εργασία «Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα» του Νικόλαου Κ. Γουβάλα**

Στην διπλωματική εργασία «Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα» η προσομοίωση της λειτουργίας, υπό συνθήκες σφάλματος, ενός αιολικού πάρκου εννέα ανεμογεννητριών, όμοιου με αυτό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε με χρήση των λογισμικών PSAF (Power System Analysis Framework) και Cyme Grounding (CYMGRD). Στη συγκεκριμένη ενότητα, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δυο εργασιών και θα διακριθούν οι ομοιότητες και διαφορές τους.

##### **6.4.2.1 Σύγκριση ρευμάτων σφάλματος**

Η ένταση των ρευμάτων σφάλματος υπολογίστηκε, στην διπλωματική εργασία του Νικόλαου Κ. Γουβάλα, με χρήση του λογισμικού PSAF, σύμφωνα με τα Πρότυπα IEC 60909, ANSI C 37.010 και με τη Συμβατική Μέθοδο σε συνδυασμό με Ανάλυση Ροής Φορτίου (Conventional Fault Analysis). Το μονογραμμικό διάγραμμα του αιολικού πάρκου που προσομοιώθηκε, οι αποστάσεις μεταξύ ανεμογεννητριών και Κέντρου Ελέγχου και οι τάσεις των επιμέρους ζυγών του δικτύου είναι σχεδόν ίδια με τα αντίστοιχα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα που μετρήθηκαν, συγκριτικά με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του λογισμικού Powerfactory, για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT:

Powerfactory:

A/Γ	IEC(kA)	ANSI(kA)	Complete(kA)
1	0,740	0,663	0,724
2	0,744	0,667	0,727
3	0,763	0,684	0,746
4	0,769	0,689	0,752
5	0,757	0,678	0,740
6	0,748	0,670	0,731
7	0,739	0,662	0,723
8	0,734	0,658	0,718
9	0,761	0,682	0,743



PSAF:

A/Γ	IEC(kA)	ANSI(kA)	CFA(kA)
1	0,8333	0,7113	0,7576
2	0,8272	0,7065	0,7528
3	0,8083	0,6914	0,7372
4	0,8041	0,6881	0,7338
5	0,8215	0,7019	0,7484
6	0,8123	0,6947	0,7410
7	0,8039	0,6879	0,7341
8	0,7955	0,6812	0,7270
9	0,8239	0,7038	0,7495

*Πίνακας 6.8 Ρεύματα σφάλματος σε όλες τις θέσεις ανεμογεννητριών, όπως μετρήθηκαν με χρήση των λογισμικών Powerfactory και PSAF*

Παρατηρούμε ότι το λογισμικό PSAF δίνει, στις περισσότερες περιπτώσεις, πιο απαισιόδοξες εκτιμήσεις για το ρεύμα σφάλματος, σε σχέση με το λογισμικό Powerfactory. Οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των δύο λογισμικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

A/Γ	IEC	ANSI	CFA/Complete
1	12,6%	7,3%	4,6%
2	11,2%	5,9%	3,5%
3	5,9%	1,1%	1,2%
4	4,6%	0,1%	2,5%
5	8,5%	3,5%	1,1%
6	8,6%	3,7%	1,4%
7	8,8%	3,9%	1,5%
8	8,4%	3,5%	1,3%
9	8,3%	3,2%	0,9%

*Πίνακας 6.9 Ποσοστιαίες αποκλίσεις ρευμάτων σφάλματος, όπως μετρήθηκαν με χρήση των λογισμικών Powerfactory και PSAF*

Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό PSAF μας δίνει μεγαλύτερη τιμή ρεύματος σφάλματος στις περισσότερες περιπτώσεις(24/27).Επίσης, με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι μόνο στα αποτελέσματα του Προτύπου IEC 60909 τα δυο λογισμικά παρουσιάζουν μια εμφανή απόκλιση(4,6-12,6%), καθώς, σε αυτή την περίπτωση, το λογισμικό PSAF δίνει μια σημαντικά πιο απαισιόδοξη εκτίμηση του ρεύματος σφάλματος. Οι αποκλίσεις αυτές, οφείλονται στο γεγονός πως στις δυο διπλωματικές εργασίες έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές εκδόσεις των

Προτύπων, και ειδικά το Πρότυπο IEC 60909, είναι ένα Πρότυπο που εισάγει διαρκώς νέες εκδόσεις.

#### 6.4.2.2 Σύγκριση αντιστάσεων γείωσης

Όπως προαναφέρθηκε(Ενότητα 6.3.2), οι παράμετροι του εδάφους για την προσομοίωση των συστημάτων γείωσης(πλήθος, ειδική αντίσταση, πάχος στρωμάτων) αντλήθηκαν από τη διπλωματική εργασία «**Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα**». Σε αυτή την εργασία οι αντιστάσεις γείωσης μετρήθηκαν με χρήση του λογισμικού CYMGRD, ενώ στην παρούσα εργασία με χρήση του λογισμικού CDEGS. Λόγω της προσομοίωσης με σχεδόν ίδιο μοντέλο εδάφους τα αποτελέσματα των δύο λογισμικών παρουσιάζουν πολύ μικρές αποκλίσεις:

A/Γ	R(CDEGS)	R(CYMGRD)	Απόκλιση
1	49,171Ω	50,600Ω	2,8%
2	58,987Ω	59,200Ω	0,4%
3	79,515Ω	79,200Ω	0,4%
4	50,124Ω	51,200Ω	2,1%
5	71,318Ω	72,400Ω	1,5%
6	27,769Ω	28,200Ω	1,5%
7	102,010Ω	101,500Ω	0,5%
8	77,962Ω	79,200Ω	1,5%
9	106,510Ω	108,200Ω	1,6%
KE	104,390Ω	105,600Ω	1,2%

*Πίνακας 6.10 Σύγκριση αντιστάσεων γείωσης σε όλες τις θέσεις ανεμογεννητριών, όπως μετρήθηκαν με χρήση των λογισμικών Powerfactory και PSAF*

Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες μετρήσεις(8/10), το λογισμικό CYMGRD μας δίνει μια ελάχιστα μεγαλύτερη τιμή αντίστασης γείωσης, ωστόσο οι διαφορές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Η τιμή της αντίστασης γείωσης εξαρτάται από την μορφή των πλεγμάτων γείωσης και από το μοντέλο του εδάφους, που στη συγκεκριμένη περίπτωση σχεδόν ταυτίζονται, επομένως οι μικρές διαφορές που εμφανίζονται οφείλονται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των λογισμικών CDEGS και CYMGRD.

#### 6.4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής

##### 6.4.2.3.1 Μέγιστες επιτρεπόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής

Αρχικά, παρατίθενται οι μέγιστες επιτρεπόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, για σωματικό βάρος 70kg και χωρίς υλικό επιφάνειας, όπως υπολογίστηκαν με τα λογισμικά CDEGS και CYMGRD:

#### CDEGS

A/Γ	$E_{touch}(t=0,5s)$	$E_{step}(t=0,5s)$	$E_{touch}(t=1s)$	$E_{step}(t=1s)$
1	1934,673V	7111,340V	1408,365V	5176,771V
2	505,898V	1396,238V	368,273V	1016,406V
3	410,092V	1013,017V	298,531V	737,436V
4	1757,080V	6400,968V	1279,084V	4659,649V
5	1796,411V	6558,290V	1307,715V	4774,173V
6	827,148V	2681,239V	602,131V	1951,835V
7	447,822V	1163,935V	325,996V	847,298V
8	1944,283V	7149,779V	1415,360V	5204,753V
9	2579,556V	9690,871V	1877,813V	7054,566V
KE	594,482V	1750,575V	432,759V	1274,349V

#### CYMGRD

A/Γ	$E_{touch}(t=0,5s)$	$E_{step}(t=0,5s)$	$E_{touch}(t=1s)$	$E_{step}(t=1s)$
1	1981,060V	7258,160V	1400,820V	5132,300V
2	524,540V	1432,050V	370,900V	1012,610V
3	426,880V	1041,430V	301,850V	736,410V
4	1799,850V	6533,290V	1272,680V	4619,730V
5	1839,940V	6693,650V	1301,030V	4733,120V
6	851,980V	2741,830V	602,440V	1938,760V
7	465,340V	1195,260V	329,040V	845,180V
8	1990,660V	7296,540V	1407,610V	5159,430V
9	2638,180V	9886,640V	1865,480V	6990,910V
KE	614,830V	1793,220V	434,750V	1267,990V

*Πίνακας 6.11 Μέγιστες επιτρεπόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, για σωματικό βάρος 70kg και χωρίς υλικό επιφάνειας, όπως μετρήθηκαν με τα λογισμικά CDEGS και CYMGRD*

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές τάσεων, σύμφωνα με τα δυο λογισμικά, έχουν μικρές αποκλίσεις, κάτι που είναι αναμενόμενο, καθώς ο υπολογισμός των ορίων προκύπτει από την τιμή ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος του εδάφους, η οποία έχει σχεδόν ίδια τιμή, και στις δύο περιπτώσεις.

Στον παρακάτω πίνακα περιέχονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των μετρήσεων των δυο λογισμικών:

A/Γ	E <sub>touch</sub> (t=0,5s)	E <sub>step</sub> (t=0,5s)	E <sub>touch</sub> (t=1s)	E <sub>step</sub> (t=1s)
1	2,4%	2,1%	0,5%	0,9%
2	3,7%	2,6%	0,7%	0,4%
3	4,1%	2,8%	1,1%	0,1%
4	1,7%	2,1%	0,5%	0,9%
5	2,4%	2,1%	0,5%	0,9%
6	3%	2,3%	0,1%	0,7%
7	3,9%	2,7%	0,9%	0,3%
8	2,4%	2,1%	0,6%	0,9%
9	2,3%	2%	0,7%	0,9%
KE	3,4%	2,4%	0,5%	0,5%

*Πίνακας 6.12 Ποσοστιαίες αποκλίσεις των μέγιστων επιτρεπόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής , όπως μετρήθηκαν με χρήση των λογισμικών Powerfactory και PSAF*

Για κάθε είδος τάσης και διάρκεια σφάλματος, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται ένα μοτίβο στις ποσοστιαίες αποκλίσεις που υπολογίστηκαν. Συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στα επιτρεπτά όρια των τάσεων επαφής και για σφάλμα διάρκειας 0,5 δευτερολέπτων(1,7-4,1%). Τα επιτρεπτά όρια βηματικών τάσεων για σφάλμα ίδιας διάρκειας εμφανίζουν κοντινές τιμές αποκλίσεων(2-2,8%), ενώ στις περιπτώσεις σφάλματος διάρκειας 1 δευτερολέπτου οι αποκλίσεις έχουν μικρότερες τιμές(0,1-1,1%). Επομένως, παρότι μπορούμε να αποφανθούμε ότι τα αποτελέσματα των δυο λογισμικών έχουν ικανοποιητικά κοντινές τιμές, παρατηρούμε ότι οι μικρές διαφορές τους δεν είναι τυχαίες. Ανάλογα με τον χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος, οι αποκλίσεις που υπολογίσαμε παρουσιάζουν συγκεκριμένο εύρος τιμών, ενώ οι διαφορές των τιμών τους στις διαφορετικές θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και του Κέντρου Ελέγχου είναι πολύ μικρές.

#### **6.4.2.3.2 Μέγιστες αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής**

Όσον αφορά τον υπολογισμό των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων στα επιμέρους συστήματα γείωσης του αιολικού πάρκου, στην διπλωματική εργασία «**Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα**» διαιρέθηκε το ρεύμα σφάλματος της Α/Γ 1 για μονοφασικό σφάλμα προς γη στη πλευρά ΜΤ, για τον υπολογισμό των ρευμάτων πλέγματος του κάθε επιμέρους συστήματος γείωσης. Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία η ίδια ανεμογεννήτρια, παρότι στις μετρήσεις λάβαμε τη μεγαλύτερη τιμή ρεύματος σφάλματος στην Α/Γ 4(Πίνακας 6.1). Αυτή η επιλογή έγινε, προκειμένου να επιτευχθεί η ακριβέστερη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων

των λογισμικών CDEGS και CYMGRD. Οι συντελεστές καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος( $S_f$ ) των δυο εργασιών σχεδόν ταυτίζονται, διότι υπολογίζονται με βάση τις υπολογισμένες αντιστάσεις γείωσης, οι οποίες παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές(Πίνακας 6.11). Τα ρεύματα πλέγματος  $I_g$ , όμως, των επιμέρους συστημάτων γείωσης θα είναι διαφορετικά και, δεδομένης της σχέσης  $I_{gi} = S_{fi} \cdot I_f$ , θα εμφανίζουν την ίδια απόκλιση που εμφανίζουν τα ρεύματα σφάλματος  $I_f$  που υπολογίστηκαν στην Α/Γ 1(Πίνακας 6.10). Επομένως, στο λογισμικό CDEGS, σε σχέση με το λογισμικό CYMGRD, τα ρεύματα πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν για τα επιμέρους συστήματα γείωσης έχουν 12,6% μικρότερη τιμή, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60909, 7,3% μικρότερη τιμή, σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI C37010 και 4,6% μικρότερη τιμή, σύμφωνα με την τρίτη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε (Complete/CFA).

Οι μέγιστες βηματικές τάσεις που υπολογίστηκαν, και με τις τρεις μεθόδους, τόσο με το λογισμικό CDEGS(Ενότητα 6.3.4), όσο και με το λογισμικό CYMGRD έχουν τιμές πολύ μικρότερες από τα επιτρεπτά όρια, επομένως, σύμφωνα και με τα δυο λογισμικά, τα συστήματα γείωσης των εννέα ανεμογεννητριών και του Κτιρίου Ελέγχου κρίθηκαν απόλυτα ασφαλή ως προς τις βηματικές τάσεις, χωρίς την προσθήκη κάποιου υλικού επιφάνειας.

Όσον αφορά τις τάσεις επαφής, στις προσομοιώσεις με το λογισμικό CDEGS, τα συστήματα γείωσης των εννέα ανεμογεννητριών κρίθηκαν ασφαλή και με τις τρεις μεθόδους, χωρίς την προσθήκη υλικού επιφάνειας. Ωστόσο, στις προσομοιώσεις με το λογισμικό CYMGRD, για σφάλμα διάρκειας 1 δευτερολέπτου, στις Α/Γ 3 και Α/Γ 7 αναπτύσσονταν τάσεις επαφής, που ξεπερνούσαν τα επιτρεπτά όρια ασφαλείας, και με τις τρεις μεθόδους, και κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη υλικού επιφάνειας (χαλίκι). Επιπλέον, στις προσομοιώσεις στο Κτίριο Ελέγχου, και στα δυο λογισμικά, αναπτύσσονταν επικίνδυνες τάσεις επαφής στην εξωτερική περίμετρο του πλέγματος γείωσης. Στο λογισμικό CDEGS, όμως, η προσθήκη χαλικοιού(2500Ω) μας επέφερε ένα ασφαλές σύστημα γείωσης, ενώ στο λογισμικό CYMGRD κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ασφάλτου(10000Ω), προκειμένου να εξαλειφθούν οι επικίνδυνες αναπτυσσόμενες τάσεις.

Οι παραπάνω διαφορές ανάμεσα στις προσομοιώσεις των δυο λογισμικών οφείλονται στο γεγονός πως τα ρεύματα πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό CDEGS ήταν, σε μη αμελητέο βαθμό, μικρότερα από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό CYMGRD(ειδικότερα σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60909), λόγω των διαφορετικών εκδόσεων των Προτύπων που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και των μικρών λειτουργικών διαφορών που παρουσιάζουν τα λογισμικά, που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις.

# Κεφάλαιο 7

## Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στη διερεύνηση της επίδρασης της μεθόδου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής σε συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της μεθοδολογίας, δια μέσου της οποίας, υπολογίζεται το ρεύμα σφάλματος και εξηγήθηκαν οι λόγοι επικράτησης των Προτύπων IEC 60909 και ANSI C 37.010 για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας. Οι μεθοδολογίες των δυο Προτύπων αναλύθηκαν εκτενώς. Στη συνέχεια, έπειτα από μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των αρχών που διέπουν τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης, προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου εννέα ανεμογεννητριών, υπό συνθήκες ασύμμετρων σφαλμάτων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Powerfactory, σύμφωνα με τις μεθόδους IEC, ANSI και Complete. Στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος IEC έδωσε την πιο απαισιόδοξη εκτίμηση για το ρεύμα σφάλματος  $I_f$ , ενώ η μέθοδος ANSI την πιο αισιόδοξη. Συγκεκριμένα, για μονοφασικό σφάλμα προς γη στην πλευρά MT, η μέση ποσοστιαία απόκλιση των μεθόδων IEC και ANSI είχε τιμή 11,3%. Από τα ρεύματα σφάλματος που υπολογίστηκαν, επιλέχθηκε αυτό της A/Γ 1 και διαμοιράστηκε στα επιμέρους συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών και του Κέντρου Ελέγχου, αντιστρόφως ανάλογα των τιμών της αντίστασης γείωσης τους. Με αυτόν τον τρόπο, έγινε προσομοίωση της απόκρισης του διασυνδεδεμένου συστήματος γείωσης για το αιολικό πάρκο σε κατάσταση λειτουργίας σφάλματος, με χρήση του λογισμικού CDEGS, εστιάζοντας στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα μέγιστα επιτρεπτά όρια και οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τιμές των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, χωρίς την προσθήκη υλικού επιφάνειας, σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους για τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος (IEC, ANSI, Complete) και για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος διάρκειας 0,5 και 1 δευτερολέπτου. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις, που υπολογίστηκαν, βρίσκονταν εντός ορίων, σύμφωνα και με τις τρεις μεθόδους, στις θέσεις εγκατάστασης των εννέα ανεμογεννητριών, ενώ στη θέση του Κέντρου Ελέγχου, για σφάλμα διάρκειας 1 δευτερολέπτου, αναπτύσσονταν επικίνδυνες τάσεις επαφής στις άκρες της εξωτερικής περιμέτρου του πλέγματος του. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη υλικού επιφάνειας (χαλίκι πάχους 10cm) για την εξάλειψη των επικίνδυνων τάσεων. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι % αποκλίσεις στον υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος μεταφέρονται στις αναπτυσσόμενες τάσεις που υπολογίζονται σε κάθε σύστημα γείωσης, εξαιτίας της

γραμμικότητας που παρουσιάζει το μοντέλο ανάλυσης του φαινομένου διάχυσης του ρεύματος σφάλματος στην γη, μέσω ενός πλέγματος γείωσης. Επομένως, η μέθοδος υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος επιδρά άμεσα στην ασφάλεια ενός συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου και καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη μιας ακριβούς μεθόδου, προκειμένου να εξασφαλιστεί η εξάλειψη των επικίνδυνων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, χωρίς την υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος γείωσης(μείωση αντίστασης γείωσης, χρήση υλικού επιφάνειας) που θα οδηγούσε σε περιττά αυξημένα έξοδα.

Στο τελευταίο κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση των αποτελεσμάτων με την διπλωματική εργασία **«Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις (βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα»** του Νικόλαου Κ. Γουβάλα. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση των λογισμικών PSAF και CYMGRD. Τα μοντέλα εδάφους και η μορφή των πλεγμάτων γείωσης που χρησιμοποιήθηκαν στις δυο εργασίες ήταν σχεδόν ίδια, επομένως οι αντιστάσεις γείωσης και τα επιτρεπτά όρια των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις παρουσίαζαν πολύ μικρές διαφορές. Ωστόσο, τα ρεύματα σφάλματος που μετρήθηκαν στο λογισμικό PSAF είχαν μεγαλύτερες τιμές, σε μη αμελητέο βαθμό, από αυτά που μετρήθηκαν στο Powerfactory(ειδικά σύμφωνα με τη μεθοδο IEC 60909), λόγω των διαφορετικών εκδόσεων των Προτύπων που χρησιμοποιήθηκαν, γεγονός που επιδρά στις μέγιστες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής που αναπτύσσονται. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικό τρόπο από αυτές της διπλωματικής εργασίας του Νικόλαου Κ. Γουβάλα, λόγω και της διαφορετικής φύσης των λογισμικών που επιλέχθηκαν. Συνεπώς, δεν ήταν εφικτή η ακριβής σύγκριση των τιμών των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων, για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,5 και 1 δευτερολέπτου, αφού στην διπλωματική εργασία του Νικόλαου Κ. Γουβάλα, τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν γραφικά, χωρίς την παράθεση ακριβών τιμών. Ωστόσο, η επίδραση των μεγαλύτερων τιμών ρεύματος σφάλματος, που υπολογίστηκαν στην διπλωματική εργασία του Νικόλαου Κ. Γουβάλα, εντοπίστηκε στο γεγονός πως, αντίθετα με την παρούσα διπλωματική εργασία, υπολογίστηκαν επικίνδυνες αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής, σε απόσταση μικρότερη από 2,5m από τον πυλώνα, στις Α/Γ 3 και Α/Γ 7. Επίσης, στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι επικίνδυνες αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις στο Κέντρο Ελέγχου εξαλείφθηκαν με χρήση χαλικιού 10cm(2500Ω), ενώ στην διπλωματική εργασία του Νικόλαου Κ. Γουβάλα, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ασφάλτου(10000Ω). Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι, η χρήση μιας διαφορετικής έκδοσης ενός Προτύπου για τον υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος ή, ακόμα, και η χρήση ενός διαφορετικού λογισμικού για την διαδικασία των προσομοιώσεων, μπορεί να επηρεάσει τις αναπτυσσόμενες τάσεις(βηματικές και επαφής) και,

κατ'επέκταση, την παρεχόμενη ασφάλεια στα συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών.

Για την παρούσα διπλωματική εργασία, υπάρχουν αρκετά πράγματα που μπορούν να γίνουν για τη συνέχιση και επέκταση της, καθώς είναι ευρέως γνωστό ότι ο σωστός σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης είναι καθοριστικός για την ασφάλεια των ανθρώπων και των εγκαταστάσεων και την αξιόπιστη και ευσταθή λειτουργία του εξοπλισμού. Αρχικά, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση των λογισμικών Powerfactory και CDEGS θα μπορούσαν να εκτελεστούν με χρήση άλλων λογισμικών, προκειμένου να γίνει σύγκριση των εξαγόμενων ρευμάτων σφάλματος και των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Επίσης, για τον υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποια διαφορετική μέθοδος, εκτός των IEC, ANSI και Complete, προκειμένου να εξεταστεί ο τρόπος που θα επηρεάζονταν οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Ακόμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό μοντέλο εδάφους για τις προσομοιώσεις ή διαφορετικές διαστάσεις στον σχεδιασμό των πλεγμάτων γείωσης. Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, οι % αποκλίσεις στον υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος μεταφέρονται στις αναπτυσσόμενες τάσεις που υπολογίζονται σε κάθε σύστημα γείωσης, εξαιτίας της γραμμικότητας που παρουσιάζει το μοντέλο ανάλυσης του φαινομένου διάχυσης του ρεύματος σφάλματος στην γη, μέσω ενός πλέγματος γείωσης. Στην περίπτωση αυτή, όμως, λόγω των χαμηλών τιμών των ρευμάτων σφάλματος (< 1kA), δεν έχει κάποια επίδραση ο ιονισμός του εδάφους. Συνεπώς, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μελέτη της επίδρασης του τρόπου που υπολογίζεται το ρεύμα σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις, έχοντας λάβει υπόψη το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους.



# Βιβλιογραφία

- [1] “Types of Short Circuit Faults in a Power System”, [www.electricityforum.com](http://www.electricityforum.com)
- [2] B. De Metz-Noblat, F. Dumas, G. homasset “Calculation of short-circuit currents”, Schneider Electric, Cahier Technique no. 158, 2002.
- [3] IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents, 2016.
- [4] John D. Grainger, William D. Stevenson Jr, “Power System Analysis”, 1994.
- [5] Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος II, “Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις” , Β. Κ. Παπαδιά, Αθήνα 1993.
- [6] Γρηγόρης Παπαγιάννης «Παρουσιάσεις 2011-12 στο μάθημα Υπολογιστικές Μέθοδοι στα Ενεργειακά Συστήματα».
- [7] ANSI/IEEE Std. C 37.010, IEEE Application Guide for AC High – Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, 1999.
- [8] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Βασικές αρχές των συστημάτων γειώσεως», ΕΜΠ, Αθήνα 2016.
- [9] Ιωάννης Φ. Γκόνος, Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Προστασία Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων από Υπερτάσεις», Εργαστηριακές Ασκήσεις, ΕΜΠ, Νοέμβριος 2021.
- [10] ANSI/IEEE Std 80-2013, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 2013.
- [11] Dalziel C.F.(1946) “Dangerous electric currents”, AIEE Transactions on Power Apparatur and Systems 62:579-585.
- [12] «Συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών», Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη, ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ, Μάιος 2021.
- [13] IEC 60909-1, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0, 2002.
- [14] IEC 60909-2, Electrical equipment - Data of electrical equipment for short-circuit current calculations, 2008.
- [15] IEC 60909-4, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4 : Examples for the calculation of short-circuit currents, 2021.

- [16] «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Βοβός, Γιαννακόπουλος, Εκδόσεις Ζήτη, 2008.
- [17] Ismail Kasikci, " Short Circuit in Power Systems – A practical Guide to IEC 60909", Εκδόσεις Wiley-VCH, 2002
- [18] ANSI/IEEE Std. C 37.13, IEEE Standard for Low–Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures, 2015.
- [19] ANSI/IEEE Std. 141, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book) , 1986.
- [20] Ι. Φ. Γκόνος, Β. Θ. Κονταργύρη, Γ. Π. Φώτης, Ι. Α. Σταθόπουλος, και Γ. Α. Μάνος, "Σχεδίαση, ανάλυση και μέτρηση συστημάτων γείωσης σε αιολικά πάρκα," Σύνοδος της Ελληνικής Επιτροπής CIGRE, σελ. 201-208, 2005.
- [21] M.I. Lorentzou, N.D. Hatziaργyριου, B.C.Papadias: "Analysis of wind turbine grounding systems".
- [22] Π. Ντοκόπουλος, "Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών," Εκδόσεις Ζήτη, 1η έκδοση, Θεσσαλονίκη, 2005.
- [23] Χ. Γ. Κουτρούλης, "Ηλεκτρική προστασία ανεμογεννητριών," Πρακτικά σεμιναρίου κατάρτισης στην αιολική ενέργεια, ΤΕΙ Κρήτης, Μάρτιος 2001.
- [24] Nasser Tleis, "Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice", Elsevier, 2008.
- [25] Th.Boutsika, S.Papathanassiou, N.Drossos, "Calculation of the Fault Level Contribution of Distributed Generation according to IEC Standard 60909".
- [26] H. Markiewicz and A. Klajn, "Earthing systems-Basic constructional aspects," Copper Development Association, Jul. 2004.
- [27] ΕΛΟΤ 60364:2020.

