



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

ΤΟΥ

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΗ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ**

**Επιβλέπων:** Ζαχαρίας Γ. Δάτσιος

Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

ΚΟΖΑΝΗ/ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



HELLENIC DEMOCRACY  
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA  
SCHOOL OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL  
& COMPUTER ENGINEERING

# SOFTWARE DEVELOPMENT FOR THE ASSESSMENT OF THE SAFETY PROVIDED BY TYPICAL GROUNDING CONFIGURATIONS OF HIGH-VOLTAGE INSTALLATIONS

**THESIS**

---

**CHARALAMPAKIS VASILEIOS**

**SUPERVISOR:** Zacharias G. Datsios

Adjunct Lecturer

KOZANI/OCTOBER/2023

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ**

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο "Ανάπτυξη λογισμικού εκτίμησης ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης" καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του έκτακτου εκπαιδευτικού προσωπικού του Τμήματος κ. Ζαχαρία Γ. Δάτσιου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 μόνο.

Copyright (C) Βασίλειος Χαραλαμπάκης & Ζαχαρίας Γ. Δάτσιος, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Β. Χαραλαμπάκης

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

# Περίληψη

---

Η διπλωματική εργασία «Ανάπτυξη λογισμικού εκτίμησης της ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης» αφορά την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού, ώστε να εκτιμάται η ασφάλεια έναντι πιθανής θανατηφόρου ηλεκτροπληξίας που παρέχεται από τα συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης σε άτομα που βρίσκονται στην περιοχή τους όταν συμβεί ένα σφάλμα γης. Ως στόχος έχει τεθεί να μπορεί να γίνει η εκτίμηση την ασφάλεια λεπτομερώς, με ακρίβεια και χωρίς την ανάγκη πραγματοποίησης υπολογισμών από τον χρήστη. Η εργασία απαρτίζεται από δύο σκέλη, με το πρώτο να αντιστοιχεί στο θεωρητικό υπόβαθρο και τις βασικές έννοιες, η γνώση των οποίων κρίνεται απαραίτητη. Σε αυτό το σκέλος παρουσιάζεται και η μεθοδολογία η οποία θα υλοποιηθεί στο λογισμικό. Το δεύτερο σκέλος, αντιστοιχεί στις τεχνικές προδιαγραφές της υλοποίησης, οι οποίες συνθέτουν τα βήματα που θα πρέπει να εκτελεστούν αλλά και το τελικό κομμάτι της υλοποίησης και ανάπτυξης του λογισμικού. Το εργαλείο αυτό, αποτελεί μια χρήσιμη προσθήκη στον κλάδο της ασφάλειας συστημάτων γείωσης, προβλέποντας τους κινδύνους και εκμηδενίζοντας τα περιστατικά θανατηφόρων ατυχημάτων από ηλεκτροπληξία τόσο για το προσωπικό όσο και για το ευρύ κοινό.

## Λέξεις κλειδιά

---

Ανύψωση δυναμικού γείωσης

Βηματική τάση

Επιτρεπτά όρια τάσης

Σύστημα γείωσης

Σφάλμα γης

Τάση επαφής

# Abstract

---

The diploma thesis "Software development for the assessment of the safety provided by typical grounding configurations of high-voltage installations" deals with the development of appropriate software to assess the safety of grounding in high voltage installations against the danger of critical electric shock during a ground fault. The goal is to be able to assess the safety of grounding systems in detail, with accuracy and without the requirement of calculations by the user. The thesis consists of two parts, with the first one corresponding to the theoretical background and the basic concepts, the knowledge of which is considered essential. This part presents the methodology which will be implemented during software development. The second part corresponds to the technical specifications of the implementation, which make up the steps that should be performed as well as the final part of the implementation and development of the software. This tool is a useful addition for grounding safety, predicting hazards and reducing electrocution fatalities for personnel and the general public.

# Keywords

---

Allowable voltage limit

Ground fault

Ground potential rise

Grounding system

Step voltage

Touch voltage



# Ευχαριστίες

---

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Ζαχαρία Γ. Δάτσιο, όπου με την αμέτρητη βοήθεια, συμβολή και σοβαρότητά του, βοήθησε στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέτρητη στήριξή τους σε οτιδήποτε και να χρειαζόμουν αλλά και την πίστη που έδειξαν στο πρόσωπό μου. Χωρίς αυτούς, τίποτα δεν θα ήταν εφικτό και η εμπιστοσύνη τους βοήθησε εξ ολοκλήρου στην επίτευξη της δύσκολης αυτής πορείας.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στους φίλους μου όπως και τους συμφοιτητές μου. Οι ατελείωτες ώρες βόλτας, γέλιου και συζητήσεων συνέβαλε σημαντικά στην ψυχολογική στήριξη και δημιούργησε το κίνητρο για την τελειοποίηση της διπλωματικής. Επίσης, έκαναν αυτά τα 5 χρόνια αξέχαστα και με γέμισαν εμπειρίες ζωής.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ μου, θα ήθελα να το εκφράσω στον αδερφό μου, Χάρη, ο οποίος βρισκόταν δίπλα μου τις δυσκολότερες αλλά και τις καλύτερες στιγμές. Βοήθησε σημαντικά τόσο ψυχολογικά όπως και κοινωνικά και τα λόγια του αρμόζανε πάντα στην εκάστοτε κατάσταση. Είσαι ένας αληθινός άνθρωπος.

Σε όλους εσάς εκφράζω την βαθιά μου ευγνωμοσύνη και σας ευχαριστώ από καρδιάς που με την αγάπη σας και στήριξή σας βοηθήσατε στην εκπλήρωση αυτού του απαιτητικού αλλά και συγχρόνως μαγικού ταξιδιού.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

# Περιεχόμενα

---

Περίληψη	7
Λέξεις κλειδιά	7
Abstract	8
Keywords	8
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος εικόνων	10
Κατάλογος πινάκων	12
Πρόλογος	14
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	16
1.1: Αντικείμενο διπλωματικής	16
1.2: Στόχοι	16
1.3: Οργάνωση τόμου	17
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο	18
2.1: Γενικά στοιχεία συστημάτων γείωσης	18
2.2: Ηλεκτρόδια γείωσης	19
2.3: Αντίσταση γείωσης	22
2.4: Σφάλμα γης σε εγκατάσταση υψηλής τάσης	23
2.4.1: GPR (Ground Potential Rise)	23
2.4.2: Τάση επαφής – Βηματική τάση [8]	24
2.5: Επιτρεπτά όρια τάσης επαφής και βηματικής τάσης και έλεγχος ασφάλειας σε συστήματα γείωσης	26
2.5.1: IEEE Std 80	26
2.5.2: CENELEC EN 50522	27
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία ελέγχου ασφαλείας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης [12]	30
3.1: Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2013	30
3.2: Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50522:2022	32
3.3: Σύνοψη	33
Κεφάλαιο 4: Τεχνικές προδιαγραφές του λογισμικού	36
4.1: MATLAB [13]	36
4.2: Είσοδος τιμών από τον χρήστη	37
4.2.1: Είσοδος τιμών για το πρότυπο IEEE	37
4.2.2: Είσοδος τιμών για το πρότυπο CENELEC	39

4.3: Έξοδος τιμών λογισμικού	41
4.3.1: Έξοδος τιμών λογισμικού για το πρότυπο IEEE	41
4.3.2: Έξοδος τιμών λογισμικού για το πρότυπο CENELEC	42
Κεφάλαιο 5: Λογισμικό εκτίμησης ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης	43
5.1: Σχεδίαση και κώδικας λογισμικού για το πρότυπο IEEE	43
5.2: Σχεδίαση και κώδικας λογισμικού για το πρότυπο CENELEC	63
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική βελτίωση	76
6.1: Συμπεράσματα	76
6.2: Προτάσεις για το μέλλον	77
Βιβλιογραφία	78

# Κατάλογος εικόνων

---

Εικόνα 1: Σύστημα γείωσης σε οικιακή εγκατάσταση [1].	19
Εικόνα 2: Γειωτές πλάκας εντός εδάφους [1].	20
Εικόνα 3: Γειωτής ράβδου εντός εδάφους με αντίστοιχο σύνδεσμο [1].	20
Εικόνα 4: Γειωτής ταινίας εντός εδάφους [1].	21
Εικόνα 5: Χοάνη δυναμικού που δείχνει την σχέση τάσης στο έδαφος-απόστασης [6].	22
Εικόνα 6: Τάση επαφής [6].	25
Εικόνα 7: Βηματική τάση [6].	25
Εικόνα 8: Διάγραμμα ροής.	34
Εικόνα 9: Αρχικό παράθυρο λογισμικού.	43
Εικόνα 10: Εισαγωγή τιμών από τον χρήστη και πάτημα πλήκτρου "Add Point".	44
Εικόνα 11: Πάτημα πλήκτρου "Plot Characteristics" μετά την εισαγωγή τιμών.	44
Εικόνα 12: Γράφημα αποτύπωσης τιμών χρόνου-ρεύματος με ένα σημείο ενδεικτικά. Το σημείο αντιστοιχεί στην επιλογή της Εικόνας 11.	45
Εικόνα 13: Πάτημα πλήκτρου "Clear Plot".	45
Εικόνα 14: Γράφημα μετά τη χρήση του πλήκτρου "Clear Plot".	45
Εικόνα 15: Πάτημα πλήκτρου "Import Data".	46
Εικόνα 16: Επιλογή .txt αρχείου για άνοιγμα και εισαγωγή των δεδομένων του.	46
Εικόνα 17: Αποτύπωση δεδομένων του αρχείου "Test1.txt".	47
Εικόνα 18: Μηνύματα λάθους για το "Import Data" και "Plot Characteristics".	47
Εικόνα 19: Εισαγωγή τιμών για τη δημιουργία της καμπύλης απόδοσης ασφάλειας.	48
Εικόνα 20: Επιλογή $\rho$ ή $R_g$ για την καμπύλη απόδοσης ασφάλειας.	48
Εικόνα 21: Εισαγωγή τιμών $k_g$ , $k_t$ , $k_s$ .	49
Εικόνα 22: Επιλογή χρήστη για την χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης.	49
Εικόνα 23: Τιμές εισόδου για $R_B$ , $k$ , Min grid cur, Max grid cur.	50
Εικόνα 24: Δημιουργία γραφήματος καμπύλης απόδοσης ασφάλειας.	51
Εικόνα 25: Εμφάνιση ορίων ανωτέρων τιμών τάσης επαφής και βηματικής τάσης.	52
Εικόνα 26: Έλεγχος ασφαλείας συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινο σημείο) χωρίς τη χρήση υπολογισμού $I_g$ .	53
Εικόνα 27: Έλεγχος συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινο σημείο) με τη χρήση υπολογισμού $I_g$ και χωρίς τη χρήση υπολογισμού $D_f$ .	54
Εικόνα 28: Έλεγχος συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινο σημείο) με τη χρήση υπολογισμού $I_g$ και τη χρήση υπολογισμού $D_f$ .	55

Εικόνα 29: Σύγκριση τιμών $\rho_{\text{touch}}-I_G$ και $\rho_{\text{touch}(\text{software})}-I_G$ χωρίς και με $\rho_s$ για καμπύλη IT.	62
Εικόνα 30: Σύγκριση τιμών $\rho_{\text{touch}}-I_G$ και $\rho_{\text{touch}(\text{software})}-I_G$ χωρίς και με $\rho_s$ για καμπύλη 3K.	62
Εικόνα 31: Επιλογή προτύπου CENELEC.	63
Εικόνα 32: Επιλογή χρήσης υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης.	64
Εικόνα 33: Είσοδος τιμών $R_{F1}$ , HF, BF.	64
Εικόνα 34: Δημιουργία καμπύλης απόδοσης ασφάλειας και τιμές επιτρεπτών ορίων τάσης.	65
Εικόνα 35: Έλεγχος συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινος κύκλος) στην ήδη υπάρχουσα καμπύλη απόδοσης ασφάλειας.	66
Εικόνα 36: Σύγκριση τιμών $\rho_{\text{touch}}-I_G$ και $\rho_{\text{touch}(\text{software})}-I_G$ χωρίς και με $\rho_s$ και $R_{F1}=1000 \Omega$ .	74
Εικόνα 37: Σύγκριση τιμών $\rho_{\text{touch}}-I_G$ και $\rho_{\text{touch}(\text{software})}-I_G$ χωρίς και με $\rho_s$ και $R_{F1}=0 \Omega$ .	75

# Κατάλογος πινάκων

---

Πίνακας 1: Σύγκριση τιμών $\rho_{touch}$ και $\rho_{touch(software)}$ για καμπύλη IT χωρίς $\rho_s$ .	56
Πίνακας 2: Σύγκριση τιμών $\rho_{touch}$ και $\rho_{touch(software)}$ για καμπύλη IT με $\rho_s$ .	58
Πίνακας 3: Σύγκριση τιμών $\rho_{touch}$ και $\rho_{touch(software)}$ για καμπύλη 3K χωρίς $\rho_s$ .	60
Πίνακας 4: Σύγκριση τιμών $\rho_{touch}$ και $\rho_{touch(software)}$ για καμπύλη 3K με $\rho_s$ .	61
Πίνακας 5: 6K χωρίς $\rho_s$ και $R_{F1}=1000 \Omega$ .	67
Πίνακας 6: 6K με χρήση $\rho_s$ και $R_{F1}=1000 \Omega$ .	69
Πίνακας 7: 6K χωρίς $\rho_s$ και $R_{F1}=0 \Omega$ .	71
Πίνακας 8: 6K με $\rho_s$ και $R_{F1}=0 \Omega$ .	72

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



# Πρόλογος

---

Οι εγκαταστάσεις υψηλής τάσης είναι αδιαμφισβήτητα ένα θεμέλιο για την ηλεκτρική ενέργεια. Στην σημερινή εποχή, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στο αντικείμενο της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η ασφάλεια. Πολλές είναι οι περιπτώσεις στις οποίες αναφέρονται και παρουσιάζονται ατυχήματα στο χώρο εγκαταστάσεων υψηλής τάσης. Οι περιπτώσεις αυτές, κατά κύριο λόγο απαρτίζονται από τραυματισμούς και θανάτους εργαζομένων από ηλεκτροπληξία, αλλά και από τη βλάβη ή καταστροφή του εξοπλισμού. Στις περιπτώσεις σφαλμάτων γης καίριο ρόλο παίζει η γείωση.

Περιστατικά ηλεκτροπληξίας σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης έχουν σοβαρό αντίκτυπο τόσο στην ίδια την επιχείρηση αλλά και στην κοινωνία γενικότερα. Επηρεάζονται οι οικογένειες των θυμάτων αλλά και ο περίγυρος, δηλαδή οι φίλοι και συγγενείς των ατόμων αυτών. Ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχουν επιζώντες δημιουργούνται μακροχρόνιες επιπτώσεις στην ψυχολογική τους υγεία. Επιπλέον της απώλειας έμπειρου ανθρώπινου δυναμικού, και η καταστροφή του υλικού εξοπλισμού επηρεάζει τις επιχειρήσεις στις οποίες ανήκουν οι εγκαταστάσεις υψηλής τάσης. Η καταστροφή του εξοπλισμού προκαλεί οικονομική επιβάρυνση λόγω της ανάγκης αντικατάστασής του. Επίσης μπορεί να σημάνει και την διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η ανάγκη της εκτίμησης της παρεχόμενης ασφάλειας ενός συστήματος γείωσης είναι ζωτικής σημασίας για μια εγκατάσταση υψηλής τάσης. Η διπλωματική εργασία αυτή επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός εργαλείου λογισμικού για την εκτίμηση της ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης, όπως αυτά που εγκαθίστανται σε υποσταθμούς μέσης τάσης και σε ανεμογεννήτριες. Το λογισμικό θα είναι σε θέση να αξιολογεί και να εκτιμά την ασφάλεια συστημάτων γείωσης με ακρίβεια και χωρίς την απαίτηση πραγματοποίησης υπολογισμών από τον χρήστη. Για την επίτευξη της υλοποίησης, θα γίνει αρχικά μια εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο και τη μεθοδολογία, πάνω στα οποία θα βασιστεί το θεωρητικό μέρος του λογισμικού αλλά και μια εκτενής ανάλυση των προδιαγραφών που θα ακολουθήσει η υλοποίησή του.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

---

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η αναφορά του θέματος της παρούσας διπλωματικής οι στόχοι που έχει θέσει και το πως οργανώνεται ο τόμος της.

## 1.1: Αντικείμενο διπλωματικής

Τα συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης έχουν ως στόχο, μεταξύ άλλων, την προστασία ατόμων από τον κίνδυνο της θανατηφόρου ηλεκτροπληξίας σε περίπτωση σφάλματος γης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα αναπτυχθεί λογισμικό για την εκτίμηση της ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης. Τυποποιημένα συστήματα γείωσης εφαρμόζονται συχνά σε όμοιες εγκαταστάσεις που κατασκευάζονται σε μεγάλους αριθμούς, όπως είναι οι υποσταθμοί μέσης/χαμηλής τάσης, οι πυλώνες γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι ανεμογεννήτριες. Το λογισμικό θα υλοποιήσει υπάρχουσα κατάλληλη μέθοδο με γραφικό περιβάλλον και δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων.

## 1.2: Στόχοι

Ως κύριο στόχο το λογισμικό έχει να μπορεί να αξιολογήσει τους κινδύνους που σχετίζονται με σφάλματα γης σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης και ο σχεδιασμός του αποσκοπεί στη βελτίωση της ασφάλειας. Αυτό θα επιτευχθεί με το να διαπιστώσει ο χρήστης το αν προσφέρεται ασφάλεια ή όχι και ως αποτέλεσμα θα προκύψει μείωση ατυχημάτων στις εγκαταστάσεις υψηλής τάσης. Έτσι, επιτυγχάνεται η ασφάλεια των εργαζομένων και του κοινού, όπως και του εξοπλισμού. Επιπροσθέτως, ακόμα ένας στόχος είναι η εφαρμογή του λογισμικού σε πραγματικά περιβάλλοντα υψηλής τάσης, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοσή του στην εκτίμηση της ασφάλειάς τους.

### 1.3: Οργάνωση τόμου

Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, οι στόχοι που έχουν τεθεί και η οργάνωσή της.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο των συστημάτων γείωσης, τον ορισμό τους και της χρησιμότητάς τους. Ακόμα, γίνεται ανάλυση για τα ηλεκτρόδια και την αντίσταση γείωσης, όπως και τα σφάλματα γης σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης και τις συνέπειες αυτών. Τέλος, παρουσιάζονται τα επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής, όσο και η μεθοδολογία ελέγχου ασφάλειας σε τυποποιημένα συστήματα γείωσης που θα υλοποιηθεί.

Στο Κεφάλαιο 3, αναφέρονται οι τεχνικές προδιαγραφές του λογισμικού και γίνεται αναφορά στο γραφικό περιβάλλον πάνω στο οποίο υλοποιήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 4, αναλύεται το λογισμικό εκτίμησης της ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης. Με άλλα λόγια, εξηγούνται σε βάθος τα σημαντικότερα σημεία του λογισμικού, όπως και τα βήματα που ακολουθεί ο χρήστης όταν το χρησιμοποιεί.

Στο Κεφάλαιο 5, προβάλλονται τα συμπεράσματα αλλά και προτάσεις βελτίωσης του λογισμικού στο μέλλον.

## Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

---

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο και παρουσιάζονται οι όροι που αποτελούν θεμέλια για την ανάπτυξη του λογισμικού.

### 2.1: Γενικά στοιχεία συστημάτων γείωσης

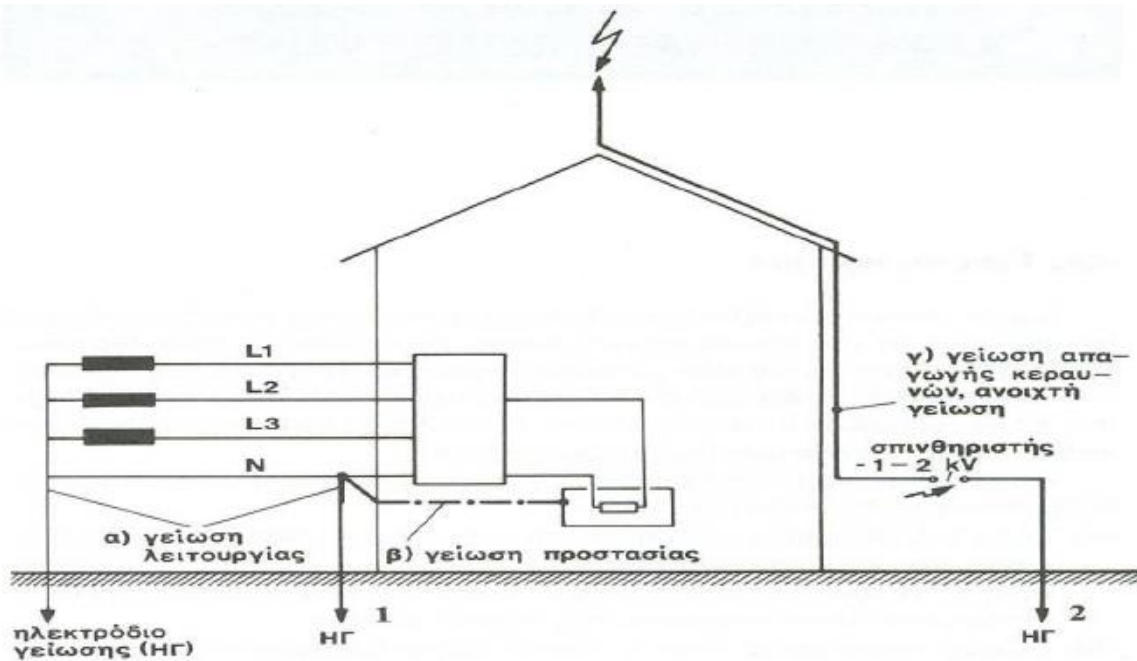
Ορισμός για τη λέξη «γείωση» είναι η αγώγιμη ένωση ενός στοιχείου ή συστήματος με τη γη ή σώματος ευρείας έκτασης στη θέση της γης [1]. Οι κατηγορίες στις οποίες μπορούν να διαχωριστούν οι γειώσεις είναι [2]:

- Γείωση προστασίας: είναι η γείωση ενός αντικειμένου, το οποίο είναι αγώγιμο και δεν παρουσιάζει τάση κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας.
- Γείωση λειτουργίας (ή γείωση συστήματος): είναι η γείωση κάποιου σημείου ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, το οποίο κρίνεται απαραίτητο για την ορθή λειτουργία του. Η γείωση λειτουργίας χωρίζεται σε υποκατηγορίες και μπορεί να είναι άμεση, αν δεν πραγματοποιείται μέσω αντίστασης (εκτός από αυτήν ίδιας της γείωσης) και έμμεση αν πραγματοποιείται με αντιστάσεις ωμικές ή άλλες κατάλληλες μεθόδους.
- Γείωση συστήματος αντικεραυνικής προστασίας: είναι η ένωση των αγωγών καθόδου του συστήματος αυτού με τη γη, το οποίο έχει σκοπό τη μεταφορά του ρεύματος κεραυνού στη γη με ασφάλεια για το προσωπικό, το κοινό και τον εξοπλισμό.

Η Εικόνα 1 απεικονίζει τα παραπάνω για την περίπτωση ενός κοινού κτιρίου με τριφασική παροχή.

Αναλόγως την κατηγορία η χρησιμότητα των γειώσεων ποικίλλει και έχει τις εξής λειτουργίες [3]:

- Υπάρχει προστασία του ανθρώπινου δυναμικού όπως και όλων των οργανισμών από τη θανατηφόρο ηλεκτροπληξία.
- Ελαττώνουν τη δημιουργία υπερτάσεων στις συσκευές ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- Δεν αναπτύσσονται διαφορές δυναμικού.



Εικόνα 1: Σύστημα γείωσης σε οικιακή εγκατάσταση [1].

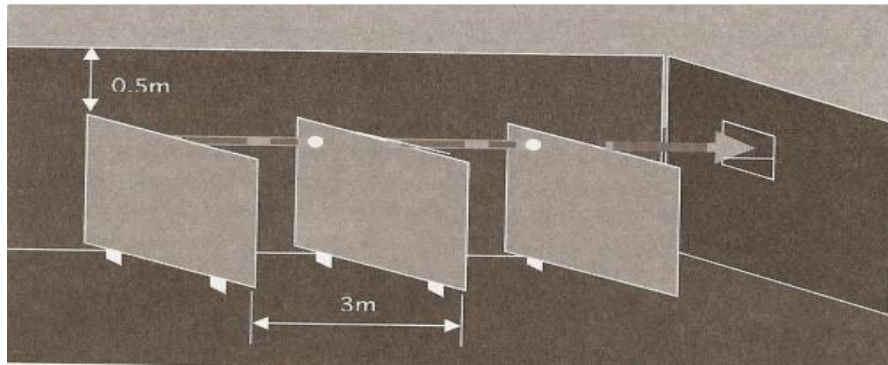
- Καθορίζεται συγκεκριμένη τάση κάτω από την οποία λειτουργεί όλο το σύστημα (παρέχεται δυναμικό αναφοράς).

Ως «σύστημα γείωσης» ορίζουμε τη σύνδεση των ηλεκτροδίων γείωσης ή γειωτών, όπως λέγονται αλλιώς, με τον αριθμό των στοιχείων του συστήματος που πρέπει να γειωθούν [4].

## 2.2: Ηλεκτρόδια γείωσης

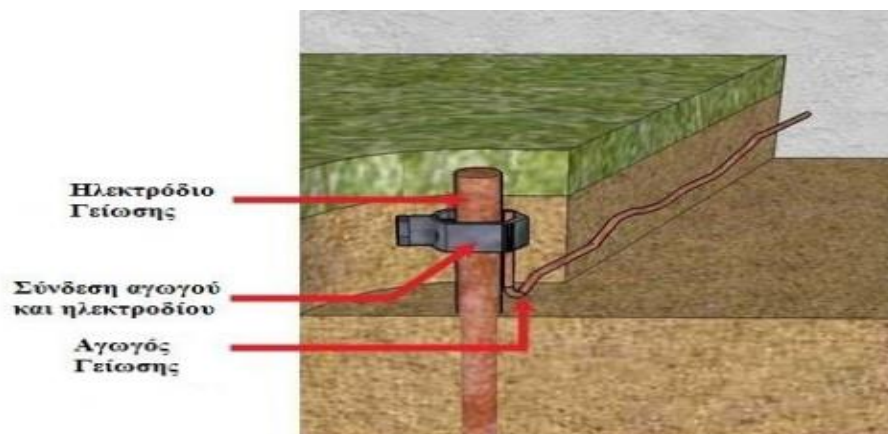
«Ηλεκτρόδια γείωσης» ονομάζονται τα αγωγά μέσα που τοποθετούνται κάτω από το έδαφος με στόχο τη βέλτιστη και ασφαλή διοχέτευση του ρεύματος εάν προκληθεί κάποιο σφάλμα προς τη γη. Τα ηλεκτρόδια γείωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη μορφή τους σε [5]:

- Γειωτής πλάκας (Εικόνα 2): πλάκα σε σχήμα παραλληλογράμμου που εγκαθίσταται κατακόρυφα εντός του εδάφους (λεπτή πλευρά προς τα κάτω). Η τιμή της αντίστασης γείωσης εξαρτάται από το μέγεθος της πλάκας και το πόσο βαθιά είναι στο έδαφος. Κατασκευάζεται από χαλκό είτε μόλυβδο (παλαιότερα) είτε χάλυβα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πάνω από ένας σε κατάλληλη συνδεσμολογία.

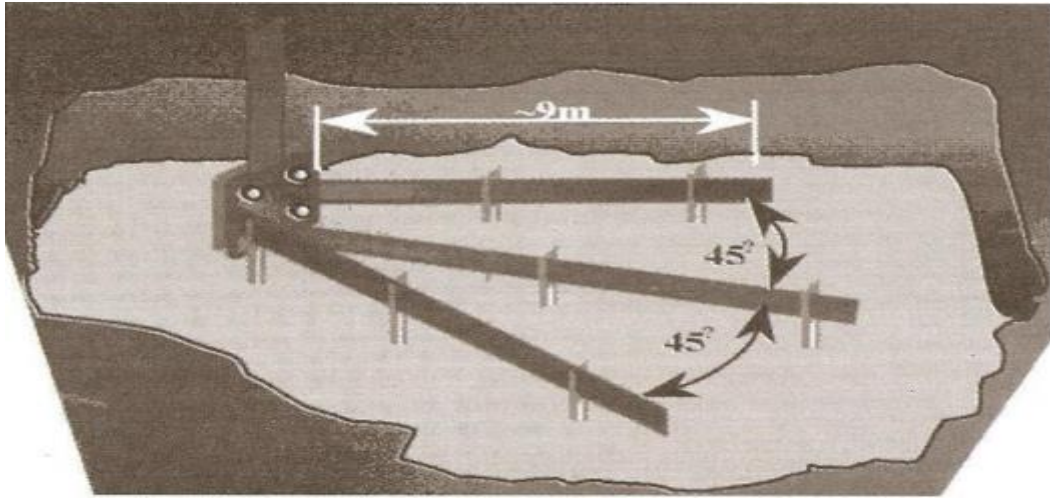


Εικόνα 2: Γειωτές πλάκας εντός εδάφους [1].

- Γειωτής ράβδου (Εικόνα 3): ράβδος που εισέρχεται στο έδαφος λοξά ή κατακόρυφα. Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο αυξάνεται το μήκος της ράβδου, ενώ δεν επηρεάζει σημαντικά η διάμετρός της, η οποία καθορίζεται για λόγους αντοχής σε μηχανικές καταπονήσεις και σε πιθανή διάβρωση.
- Γειωτής ταινίας (Εικόνα 4): ταινία που εγκαθίσταται σε σχετικά μικρό βάθος εντός εδάφους. Η τιμή αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο αυξάνεται το μήκος της ταινίας. Συνήθως πρόκειται για ταινία χαλκού και ταινία χαλύβδινη θερμά επιψευδαργυρωμένη.
- Αγωγός γείωσης: αγωγός πολύκλωνος ή μονόκλωνος που εγκαθίσταται σε σχετικά μικρό βάθος εντός εδάφους. Χρησιμοποιείται αντί της ταινίας γείωσης.



Εικόνα 3: Γειωτής ράβδου εντός εδάφους με αντίστοιχο σύνδεσμο [1].



Εικόνα 4: Γειωτής ταινίας εντός εδάφους [1].

Πέρα από τα παραπάνω που χαρακτηρίζονται ως βασικές κατηγορίες ηλεκτροδίων, υπάρχουν και τα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Τα συγκεκριμένα αποτελούν και ηλεκτρόδια γείωσης αλλά είναι κατασκευασμένα άλλη βασική λειτουργία, η οποία δεν είναι η ασφαλής μεταφορά του ρεύματος που προκλήθηκε από σφάλμα προς τη γη [6]. Τέτοια παραδείγματα βοηθητικών ηλεκτροδίων είναι τα εξής:

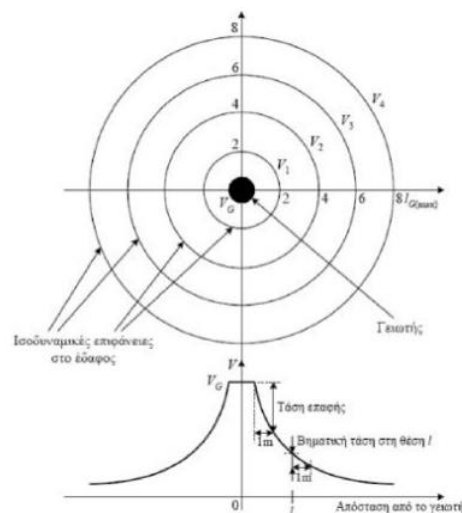
- Μεταλλικά θεμέλια.
- Μεταλλικά δίκτυα σωληνώσεων ύδρευσης (παλαιότερα).
- Μεταλλικός οπλισμός θεμελίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, συχνά σε συνδυασμό με ειδικά μεταλλικά ηλεκτρόδια και συνδέσμους μέσα στο σκυρόδεμα.

Η διάβρωση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στα ηλεκτρόδια. Έτσι αν χρησιμοποιηθεί κάποιο βοηθητικό ηλεκτρόδιο σε ένα σύστημα υψηλής τάσης, θα πρέπει να είναι σίγουρη η λειτουργία τους και η αντοχή τους ώστε να μην ελαττωθεί η διάρκεια ζωή τους όπως και να μην προκληθούν βλάβες. Δηλαδή, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η βασική λειτουργία των ηλεκτροδίων αυτών δεν θα επηρεαστεί από τη χρήση τους ως βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης.



## 2.3: Αντίσταση γείωσης

«Αντίσταση γείωσης» ορίζεται η αντίσταση που υπάρχει στο σύστημα γείωσης ως προς την άπειρη γη. Στον όρο «άπειρη γη» αντιστοιχεί ένα σημείο του εδάφους που βρίσκεται σε άπειρη (θεωρητικά) απόσταση από τον γειωτή. Η άπειρη γη, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς και κατέχει δυναμικό, το οποίο ισούται με το μηδέν (0) [7]. Στην Εικόνα 5, παρουσιάζεται η σχέση τάσης στο έδαφος και απόστασης μικρού σε διαστάσεις συστήματος γείωσης για ομοιογενές έδαφος. Φαίνεται ότι η μείωση της τάσης εξαρτάται έντονα από την απόσταση.



Εικόνα 5: Χοάνη δυναμικού που δείχνει την σχέση τάσης στο έδαφος-απόστασης [6].

Η αντίσταση γείωσης περιέχει:

- Την αντίσταση του συστήματος γείωσης, δηλαδή την αντίσταση των ηλεκτροδίων γείωσης με τις συνδέσεις αυτών.
- Την αντίσταση επαφής που υπάρχει ανάμεσα στο σύστημα γείωσης και στο έδαφος.
- Την αντίσταση του εδάφους που παρουσιάζεται ανάμεσα στο σύστημα της γείωσης και την άπειρη γη.

Σε ένα ορθώς κατασκευασμένο σύστημα γείωσης, δηλαδή όταν υπάρχει καλή επαφή με το έδαφος και οι συνδέσεις είναι αμελητέας αντίστασης, σημαντική θεωρείται μόνο η αντίσταση του εδάφους. Η αντίσταση αυτή, επηρεάζεται από το κοντινό στο σύστημα γείωσης

έδαφος και είναι εξαρτώμενη από τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του συστήματος γείωσης, καθώς και από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα ομοιογενές έδαφος με  $R_g$ , την αντίσταση του εδάφους ( $\Omega$ ) και  $\rho$ , την ειδική αντίσταση ( $\Omega m$ ) τότε ισχύει:

$$R_g = k_g * \rho \quad (1)$$

όπου  $k_g (m^{-1})$  ο γεωμετρικός συντελεστής αναλογίας και επηρεάζει το  $R_g$  σύμφωνα με τις διαστάσεις και γεωμετρία του συστήματος γείωσης όπως έχει προαναφερθεί. Μπορεί να υπολογιστεί είτε μέσω αναλυτικών σχέσεων για απλές γεωμετρίες είτε με τη χρήση λογισμικού ανάλυσης συστημάτων γείωσης. Σε εγκατεστημένα συστήματα γείωσης μπορούμε να μετρήσουμε το  $k_g$  με κατάλληλα όργανα. Σημαντικό είναι το γεγονός, ότι η επίτευξη χαμηλής αντίστασης επιβλέπεται, πάραυτα δεν εγγυάται την ορθή λειτουργία της γείωσης και δεν αποκλείεται κατά την εμφάνιση σφάλματος να υπάρξει θανατηφόρος ηλεκτροπληξίας. Αντιθέτως, μια αντίσταση γείωσης μεγάλη σε τιμή δεν έχει ως αποτέλεσμα την ακαταλληλότητα του συστήματος γείωσης. Για τη μείωση της αντίστασης γείωσης μπορούν να γίνουν τα εξής:

- Αύξηση έκτασης συστήματος γείωσης.
- Χρήση ράβδων μεγάλου μήκους εφόσον η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται με το βάθος από την επιφάνεια.
- Χρήση βελτιωτικών υλικών γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης.

## 2.4: Σφάλμα γης σε εγκατάσταση υψηλής τάσης

Οι βασικότερες έννοιες που πρέπει να αναλυθούν για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του συστήματος γείωσης παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες.

### 2.4.1: GPR (Ground Potential Rise)

Κάτω από κανονικές συνθήκες, ένα σύστημα γείωσης δεν παρουσιάζει ρεύμα ενώ το δυναμικό του είναι ίσο με το μηδέν (0), όσο δηλαδή

και το δυναμικό της άπειρης γης (αφού δεν ρέει ρεύμα). Σε περίπτωση σφάλματος της γης, τα συστήματα γείωσης παρουσιάζουν παροδικά ρεύμα. Το ίδιο και στην περίπτωση κεραυνού σε σύστημα αντικεραυνικής προστασίας είτε στην προστασία κατά των υπερτάσεων σε κάποιο ηλεκτρικό σύστημα μέσω κατάλληλων συσκευών. Στην περίπτωση που υπάρχει μεταφορά ρεύματος μεταξύ του συστήματος γείωσης και του εδάφους που είναι γύρω του, παρατηρούμε αύξηση του δυναμικού του συστήματος γείωσης προς την άπειρη γη. Η ανύψωση του δυναμικού που προαναφέρθηκε αφορά και όλα τα συνδεδεμένα μεταλλικά μέρη και έχει τη μέγιστη δυνατή τιμή δυναμικού που μπορεί να έχει το σύστημα γείωσης. Αυτό ονομάζεται ανύψωση δυναμικού συστήματος γείωσης, GPR (Ground Potential Rise):

$$GPR = R_g * I_g \quad (2)$$

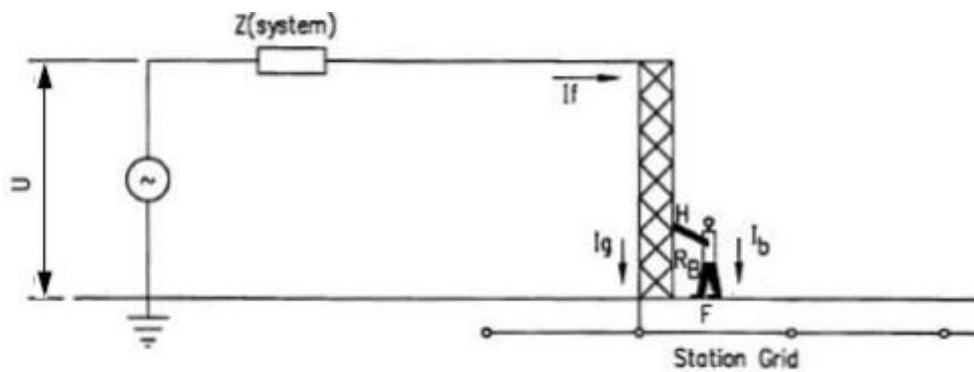
όπου

- $R_g$  ( $\Omega$ ), η αντίσταση γείωσης.
- $I_g$  (A), το ρεύμα που διοχετεύεται από το σύστημα γείωσης στο έδαφος ή το αντίστροφο αν το ρεύμα επιστρέφει στο σύστημα μέσω γης λόγω σφάλματος σε άλλη εγκατάσταση.

Εάν το σύστημα γείωσης παρουσιάζει δυναμικό τότε το ίδιο δυναμικό θα παρουσιάζουν και όλα τα στοιχεία που το απαρτίζουν. Επιπλέον, το έδαφος αναπτύσσει και αυτό δυναμικό και στην επιφάνειά του (δυναμικό επιφάνειας) αλλά και στο εσωτερικό του. Τα δυναμικά αυτά διαρκούν για τον χρόνο σφάλματος, δηλαδή μέχρι την εκκαθάριση του σφάλματός από τα μέσα προστασίας. Επομένως, διαρκούν συνήθως πολύ λίγο αλλά και πάλι μπορεί να είναι επικίνδυνα.

## 2.4.2: Τάση επαφής – Βηματική τάση [8]

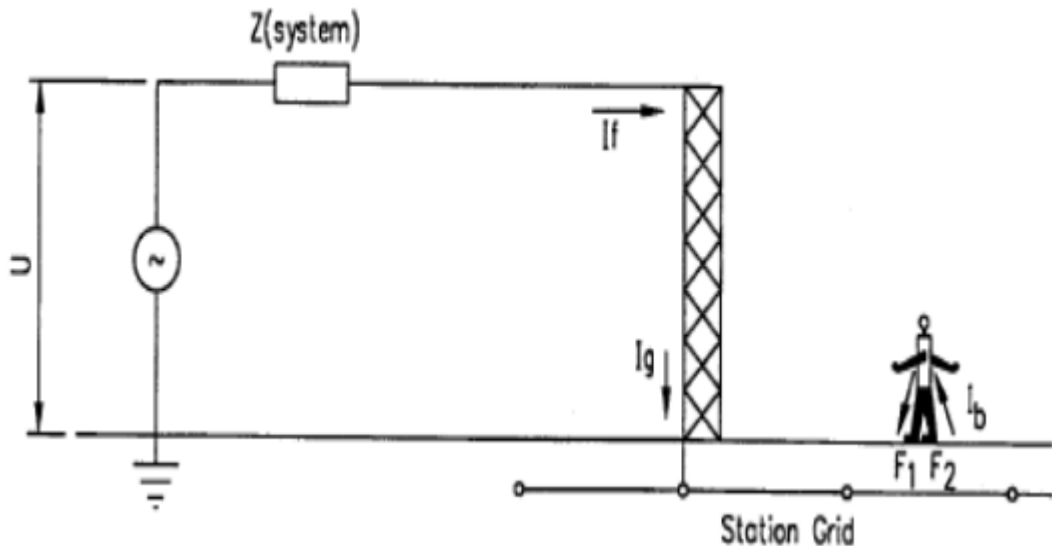
«Τάση επαφής» ονομάζεται η διαφορά δυναμικού που παρουσιάζεται κατά την επαφή ενός ανθρώπου με ένα γειωμένο αντικείμενο, ενώ στέκεται σε κάποιο σημείο του εδάφους ή και εντός κτιρίου. Με άλλα λόγια, υπάρχει διαφορά δυναμικού στο χέρι του ατόμου ενώ ακουμπά το αντικείμενο και των ποδιών όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Τάση επαφής [6].

«Βηματική τάση» ονομάζεται η διαφορά δυναμικού που παρουσιάζεται ανάμεσα στα πόδια ενός ατόμου στην επιφάνεια του εδάφους όταν το άτομο δεν ακουμπά κάποιο γειωμένο αντικείμενο (Εικόνα 7).

Οι διαφορές δυναμικού που υπάρχουν στις εγκαταστάσεις υψηλής τάσης, εγκυμονούν τον κίνδυνο τόσο για τον εξοπλισμό όσο και για τα άτομα. Οπότε κρίνεται ζωτικής σημασίας η εκτίμηση της απόκρισης των συστημάτων γείωσης και τα αποτελέσματα των υπερτάσεων που αναπτύσσονται στις εγκαταστάσεις να είναι πλήρως ακριβή.



Εικόνα 7: Βηματική τάση [6].

## 2.5: Επιτρεπτά όρια τάσης επαφής και βηματικής τάσης και έλεγχος ασφάλειας σε συστήματα γείωσης

Η αποφυγή απορρόφησης της σημαντικής ποσότητας ρεύματος ηλεκτροπληξίας έως ότου διορθωθεί η βλάβη ή απενεργοποιηθεί αυτόματα το σύστημα, επηρεάζει κρίσιμα την ασφάλεια ενός ανθρώπου. Ο άνθρωπος αυτός βρίσκεται υπό μία διαφορά δυναμικού όταν συμβεί σφάλμα φάσης ή φάσεων με τη γη.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα επιτρεπτά όρια τάσης επαφής και βηματικής τάσης βάσει των διεθνών προτύπων IEEE Std 80-2013 [9] και CENELEC EN 50522:2022 [10].

### 2.5.1: IEEE Std 80

Τα μέγιστα επιτρεπτά όρια τάσης επαφής  $E_{touch}$  (V) και βηματικής τάσης  $E_{step}$  (V), τα οποία δεν πρέπει να ξεπεραστούν ώστε να είναι ασφαλείς το προσωπικό είναι σύμφωνα με το πιο διαδεδομένο πρότυπο [9]:

$$E_{touch} = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * (k/\sqrt{t_s}) \quad (3)$$

$$E_{step} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * (k/\sqrt{t_s}) \quad (4)$$

όπου:

- $R_B$  ή 1000 ( $\Omega$ ): αντίσταση ανθρωπίνου σώματος.
- $C_s$ : ο παράγοντας μείωσης του στρώματος επιφάνειας.
- $\rho_s$  ( $\Omega m$ ): ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας.
- $k$  ( $As^{0.5}$ ): παράγοντας που σχετίζεται με τις επιτρεπτές τιμές ρεύματος ηλεκτροπληξίας και παίρνει τιμές από 0.116 ή 0.157 για άτομα 50 kg και 70 kg αντιστοίχως.
- $t_s$  (s): ο χρόνος διάρκειας της ηλεκτροπληξίας.

Το στρώμα επιφάνειας αποτελείται από κάποιο υλικό με μεγάλη ειδική αντίσταση που έχει ως στόχο την αύξηση της αντίστασης των ποδιών του ατόμου προς γη για τη μείωση του ρεύματος μέσα από

το σώμα του ατόμου. Έτσι όταν υπάρχει υλικό επιφανείας τα όρια των σχέσεων (3) και (4) είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά του φυσικού εδάφους.

Το  $C_s$ , δηλαδή ο παράγοντας μείωσης του στρώματος επιφανείας δίνεται από τον τύπο:

$$C_s = 1 - 0.09 * \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} \quad (5)$$

όπου εδώ:

- $\rho$  ( $\Omega m$ ): η ειδική αντίσταση εδάφους.
- $h_s$  (m): πάχος στρώσης υλικού επιφανείας.

Αν δεν χρησιμοποιείται κάποιο υλικό επιφάνειας στις (3) και (4), τότε έχουμε  $\rho_s = \rho$  και οπότε  $C_s = 1$ .

## 2.5.2: CENELEC EN 50522

Σύμφωνα με το πρότυπο [10], τα επιτρεπτά όρια βηματικής τάσης δεν εφαρμόζονται όταν καλύπτονται τα επιτρεπτά όρια της τάσης επαφής. Το επιτρεπτό αυτό όριο τάσης επαφής  $U_{Tp}$  (V) δίνεται από τον τύπο:

$$U_{Tp} = \frac{I_B(t_f) * Z_T(U_T) * BF}{HF} \quad (6)$$

όπου:

- $I_B$  (A): το όριο ρεύματος του σώματος.
- $t_f$  (s): η διάρκεια του σφάλματος.
- $Z_T$  ( $\Omega$ ): η σύνθετη αντίσταση του σώματος.
- $U_T$  (V): η τάση επαφής.
- $BF$  (p.u.): ο συντελεστής του σώματος.
- $HF$  (p.u.): ο συντελεστής του ρεύματος της καρδιάς.

Ως μεταβλητές για τον (6), χρησιμοποιούνται τιμές από το πρότυπο [11].

Στην (6) η προσθήκη της μεταβλητής  $R_F$  ( $\Omega$ ), δηλαδή μίας αντίστασης σε σειρά με την αντίσταση του ανθρωπίνου σώματος δημιουργεί την εξής σχέση:

$$U_{VTp} = U_{Tp} + R_F \frac{U_{Tp}}{Z_T(U_{Tp})} \quad (7)$$

όπου το  $R_F$  δίνεται από:

$$R_F = R_{F1} + 1.5 * \rho. \quad (8)$$

Ο όρος  $R_{F1}$  είναι η αντίσταση των παπουτσιών ή γαντιών. Η αντίσταση για παράδειγμα ενός ζευγαριού παλιών βρεγμένων παπουτσιών είναι περίπου 1000  $\Omega$ . Ο όρος  $\rho$  ( $\Omega m$ ) είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους στην επιφάνειά του.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η διαδικασία υπολογισμού των επιτρεπτών ορίων διαφέρει ιδιαίτερα ανάμεσα στα δύο πρότυπα.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



# Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία ελέγχου ασφαλείας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης [12]

---

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά βήμα προς βήμα η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον έλεγχο της ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης και η οποία θα υλοποιηθεί με την ανάπτυξη του λογισμικού.

## 3.1: Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2013

Στο χειρότερο σενάριο που μπορεί να εμφανιστεί σε ένα σύστημα γείωσης, ισχύει:

$$V_t(max) = V_t(lim) \quad (9\alpha)$$

$$V_s(max) = V_s(lim) \quad (9\beta)$$

δηλαδή οι μέγιστες τιμές τάσης επαφής και βηματικής τάσης να είναι ίδιες με τα επιτρεπτά όρια. Όμως το  $V_t(max)$  όπως και το  $V_s(max)$  μπορούν να γραφτούν συναρτήσει του GPR (Ground Potential Rise) (V) και θα είναι:

$$V_t(max) = k_t * GPR \quad (10\alpha)$$

$$V_s(max) = k_s * GPR \quad (10\beta)$$

όπου στα παραπάνω  $k_t$  (p.u.) ο συντελεστής αναλογίας τάσης επαφής, ενώ  $k_s$  (p.u.) ο συντελεστής αναλογίας βηματικής τάσης.

Το GPR όμως ανάλογα με τη γεωμετρία του συστήματος γείωσης παίρνει τη μορφή όπως αναφέρθηκε και στο 2.4.1:

$$GPR = R_g * I_g$$

το οποίο ισούται με:

$$GPR = k_g * \rho * I_g \quad (11)$$

Για το  $I_g$  (A) ισχύει ότι:

$$I_g = D_f * S_f * I_f \quad (12)$$

όπου:

- $D_f$  (p.u.): ο παράγοντας μείωσης για να ληφθεί υπόψη η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος σφάλματος γης.
- $S_f$  (p.u.): ο παράγοντας διαίρεσης ρεύματος. Τιμές: 0 έως 1. Το 1 υποδηλώνει ότι όλο το ρεύμα ρέει προς το έδαφος. Αν είναι μικρότερο από 1, μέρος του ρεύματος ρέει μέσω άλλων οδών.
- $I_f$  (A): το ρεύμα σφάλματος γης.

Σαν αποτέλεσμα των (11) και (12) τα  $V_t(max)$ ,  $V_s(max)$  μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$V_t(max) = k_t * k_g * \rho * I_g \quad (13\alpha)$$

$$V_s(max) = k_s * k_g * \rho * I_g \quad (13\beta)$$

Αν τώρα χρησιμοποιηθούν οι (3) έως (5) και το (13) προκύπτουν οι ανώτατες τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι τιμές που είναι κάτω από αυτές παρέχουν την ασφάλεια, ενώ οι τιμές που τις υπερβαίνουν δείχνουν ότι θα παρουσιαστεί κίνδυνος για το σύστημα γείωσης. Αν έχουμε υλικό επιφάνειας υψηλής αντίστασης οι τιμές θα δίνονται από την μαθηματική συνάρτηση:

$$\rho_{touch} = \frac{k * (1000 + 1.5 * \rho_s) * (2 * h_s + 0.09) - 1.5 * 0.09 * k * \rho_s}{k_t * k_g * I_g * \sqrt{t_s} * (2 * h_s + 0.09) - 1.5 * 0.09 * k} \quad (14\alpha)$$

$$\rho_{step} = \frac{k * (1000 + 6 * \rho_s) * (2 * h_s + 0.09) - 6 * 0.09 * k * \rho_s}{k_s * k_g * I_g * \sqrt{t_s} * (2 * h_s + 0.09) - 6 * 0.09 * k} \quad (14\beta)$$

Αν δε χρησιμοποιείται υλικό επιφάνειας υψηλής αντίστασης οι τιμές θα δίνονται από τη μαθηματική συνάρτηση:

$$\rho_{touch} = \frac{1000 * k}{k_t * k_g * I_g * \sqrt{t_s} - 1.5 * k} \quad (15\alpha)$$

$$\rho_{step} = \frac{1000 * k}{k_s * k_g * I_g * \sqrt{t_s} - 6 * k} \quad (15\beta)$$

Με τις παραπάνω εκφράσεις είτε (12) είτε (13) μπορούμε να σχεδιάσουμε τις καμπύλες ασφάλειας,  $I_g=f(\rho)$  ή  $f(R_g)$ . Οι καμπύλες αυτές λαμβάνουν υπόψη την καμπύλη ρεύματος-χρόνου της συσκευής που θα διακόψει το σφάλμα γης (ασφάλεια, ρελέ διακόπτη ισχύος) και ισχύουν για όλες τις τυποποιημένες εγκαταστάσεις.

Κατόπιν για την κάθε συγκεκριμένη εγκατάσταση ελέγχεται η τιμή  $\rho$  ή  $R_g$  της εγκατάστασης σε σχέση με την καμπύλη. Αν δεν παρέχεται ασφάλεια πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλο σύστημα γείωσης ή να ληφθούν επιπλέον μέτρα, όπως η αύξηση του πάχους του υλικού επιφανείας ή η χρήση εμποδίων πρόσβασης σε συγκεκριμένα σημεία της εγκατάστασης.

### 3.2: Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50522:2022

Χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία με την Ενότητα 3.1 με τιμές για την επιτρεπτή τάση από τις (6) έως (8) οι αντίστοιχες ανώτατες τιμές ειδικής αντίστασης που εξασφαλίζουν την παρεχόμενη ασφάλεια διαμορφώνονται όπως παρακάτω. Με τη χρήση υψηλής αντίστασης υλικού επιφάνειας:

$$\rho_{touch} = \frac{U_{Tp}(t_f) * [Z_T(U_{Tp}) + R_{F1} + 1.5 * \rho_s]}{k_t * k_g * I_g * Z_T(U_{Tp})} \quad (16)$$

Χωρίς τη χρήση υλικού επιφάνειας υψηλής ειδικής αντίστασης:

$$\rho_{touch} = \frac{U_{Tp}(t_f) * [Z_T(U_{Tp}) + R_{F1}]}{k_t * k_g * I_g * Z_T(U_{Tp}) - 1.5 * U_{Tp}(t_f)} \quad (17)$$

Η διαδικασία κατασκευής των καμπυλών ασφαλείας και ελέγχου της παρεχόμενης ασφάλειας είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης

ενότητας, με τη μόνη διαφορά ότι δεν ορίζεται καμπύλη για τη βηματική τάση.

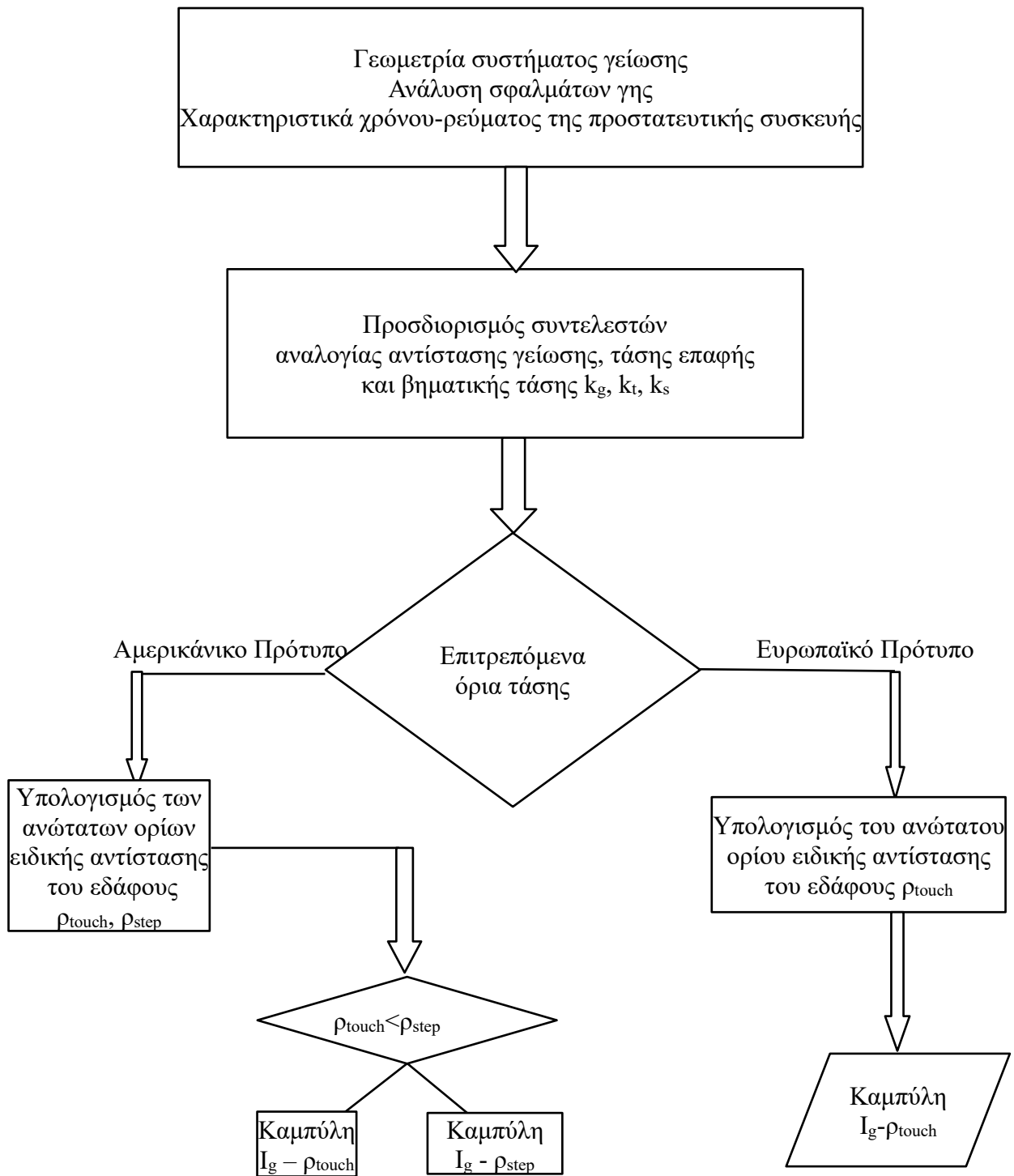
### 3.3: Σύνοψη

Σύμφωνα με την Εικόνα 8, είναι φανερό ότι η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για να κατασκευαστεί η καμπύλη ασφάλειας, στην οποία στηρίζεται και το λογισμικό, είναι:

- Αρχικά, προσδιορίζονται οι συντελεστές  $k_g$ ,  $k_t$ , και  $k_s$  δηλαδή τους γεωμετρικοί συντελεστές αναλογίας της αντίστασης γείωσης, της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης αντίστοιχα.
- Έπειτα, επιλέγονται τα επιτρεπτά όρια τάσης αναλόγως με το πρότυπο που θα εφαρμοστεί δηλαδή είτε το αμερικάνικο [9] είτε το ευρωπαϊκό [10] που χρησιμοποιείται συνήθως λιγότερο.
- Τέλος, κατασκευάζονται οι καμπύλες ασφαλείας αναλόγως το πρότυπο που επιλέχθηκε και ακολουθούν τις εκφράσεις είτε (14) και (15) για το αμερικάνικο πρότυπο είτε (16) και (17) για το ευρωπαϊκό. Σημαντικό εδώ να αναφερθεί, πως τα χαρακτηριστικά χρόνου και ρεύματος της προστατευτικής συσκευής που απαιτούνται, αναφέρονται στη συσκευή που θα διακόψει το σφάλμα γης, δηλαδή είναι εγκατεστημένα στην ανάντι της θέσης σφάλματος.

Εφαρμόζοντας της παραπάνω διαδικασία έχουμε σαν αποτέλεσμα την καμπύλη ασφάλειας, η οποία είναι ικανή να αξιολογεί το σύστημα γείωσης αλλά και τις προστατευτικές συσκευές.

Εάν είναι επιθυμητό να αξιολογηθεί η συμπεριφορά μίας συγκεκριμένης εγκατάστασης, συγκρίνουμε απλώς τις τιμές  $\rho$  ή  $R_g$  με την ήδη υπάρχουσα καμπύλη και έτσι είμαστε σε θέση να κρίνουμε αν είναι ασφαλής ή όχι. Αν δηλαδή οι τιμές είναι μεγαλύτερες από τις ανώτατες τιμές το σύστημα γείωσης είναι επικίνδυνο και έτσι απαιτείται διαφορετική σχεδίαση ή επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας, αν όμως είναι χαμηλότερες παρέχεται η απαιτούμενη σύμφωνα με το πρότυπο ασφάλεια.



Εικόνα 8: Διάγραμμα ροής.

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

# Κεφάλαιο 4: Τεχνικές προδιαγραφές του λογισμικού

---

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν το πρόγραμμα και το γραφικό περιβάλλον πάνω στο οποίο θα αναπτυχθεί το λογισμικό αλλά και τα βήματα που θα ακολουθηθούν. Με άλλα λόγια, θα αναφερθούν οι τιμές εισόδου που θα δίνει ο χρήστης και οι τιμές εξόδου που θα παράγονται από το λογισμικό.

## 4.1: MATLAB [13]

Matrix Laboratory ή εν συντομία και πιο διαδεδομένο ως MATLAB, είναι μια φιλική προς τον χρήστη τεχνική υπολογιστική γλώσσα υψηλού επιπέδου. Μερικές από τις σημαντικότερες ικανότητές της είναι να επιτρέπει την αποτελεσματική υλοποίηση μαθηματικών υπολογισμών, οπτικοποίησης και προγραμματισμού. Επικεντρώνεται κυρίως στην επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με πίνακες και διανύσματα. Το MATLAB χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς όπως είναι τα μαθηματικά και η υπολογιστική. Αποδεικνύεται πολύτιμο στην ανάπτυξη αλγορίθμων, τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση δημιουργίας πρωτοτύπων. Επιπλέον, τα γραφήματά της θεωρούνται από τα καλύτερα σε σύγκριση με άλλων γραφικών περιβαλλόντων. Ένα ακόμη κύριο της χαρακτηριστικό, είναι η δυνατότητα που δίνει στον χρήστη να δημιουργεί εφαρμογές σε ένα φιλικό και εύχρηστο περιβάλλον (GUI). Το εργαλείο αυτό, αναπτύχθηκε αρχικά ως εργαλείο διαχείρισης βιβλιοθηκών σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Μερικές τέτοιες βιβλιοθήκες είναι για τη γραμμική άλγεβρα (LINPACK) αλλά και για ιδιοτιμές και ιδιοδανύσματα (EISPACK). Με την πάροδο του χρόνου, έχει μετατραπεί σε ένα χρηστικό εργαλείο χρησιμοποιώντας γλώσσες προγραμματισμού C και C++, ενώ συνεχίζει να δέχεται περαιτέρω προσθήκες. Τέλος, το MATLAB έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών χρηστών από όλο τον κόσμο και αναγνωρίζεται ως ένα πολύτιμο επιστημονικό εργαλείο της μαθηματικής κοινότητας αλλά και της μηχανικής γενικότερα. Το MATLAB επιλέχθηκε για την υλοποίηση της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την εκτίμηση της παρεχόμενης ασφάλειας από τυποποιημένα συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης.

## 4.2: Είσοδος τιμών από τον χρήστη

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι τιμές εισόδων που δίνει ο χρήστης αναλόγως το πρότυπο που έχει επιλέξει.

### 4.2.1: Είσοδος τιμών για το πρότυπο IEEE

Για την ανάπτυξη του λογισμικού πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός των εισόδων που δίνει ο χρήστης και οι επιλογές που πρέπει να κάνει. Στην επιλογή του προτύπου IEEE, ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία η οποία αναλύεται παρακάτω:

- 1) (Είσοδος από τον χρήστη.) Χαρακτηριστικά χρόνου-ρεύματος της προστατευτικής συσκευής ή συσκευών (Time-current characteristic(s)). Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ένα αρχείο στο οποίο έχει αποθηκεύσει ήδη υπάρχουσες τιμές και θέλει να τις εισάγει.
- 2) (Είσοδος από τον χρήστη.) Συντελεστής αναλογίας αντίστασης γείωσης,  $k_g$ .
- 3) (Είσοδος από τον χρήστη.) Συντελεστής αναλογίας τάσης επαφής,  $k_t$ .
- 4) (Είσοδος από τον χρήστη.) Συντελεστής αναλογίας βηματικής τάσης,  $k_s$ .
- 5) (Επιλογή από τον χρήστη, Yes or No.) Υπολογισμός των μέγιστων επιτρεπτών ορίων τάσης σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80; Χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης; (Use of high resistivity surface material?).
- 6) Αν επιλέξει Ναι (Yes): (Είσοδος από τον χρήστη.) Ειδική αντίσταση,  $\rho_s$ , όπως και το πάχος στρώματος του υλικού επιφάνειας,  $h_s$ .
- 7) (Είσοδος από τον χρήστη.) Αντίσταση του ανθρώπινου σώματος (τυπική τιμή: 1000  $\Omega$ ) (Resistance of human body).



- 8) (Είσοδος από τον χρήστη.)  $k$  παράγοντας που σχετίζεται με την ανεκτή ενέργεια ηλεκτροπληξίας (τυπικές τιμές 0.116 και 0.157  $As^{0.5}$  για άνθρωπο 50 kg και 70 kg αντίστοιχα).
- 9) (Είσοδος από τον χρήστη.) Μέγιστη πιθανή τιμή του μέγιστου ρεύματος δικτύου (maximum grid current) για την κατασκευή των σχημάτων που δείχνουν τις καμπύλες απόδοσης ασφάλειας. Επίσης, γίνεται εισαγωγή και της ελάχιστης τιμής. Αυτές αποτελούν τα όρια του άξονα των  $y$  του γραφήματος.

Μέχρι αυτό το σημείο οι καμπύλες απόδοσης της ασφάλειας μπορούν να σχεδιαστούν. Ακολουθούν τα δεδομένα εισόδου για την αξιολόγηση μίας συγκεκριμένης εγκατάστασης όπου έχει εγκατασταθεί το τυποποιημένο σύστημα γείωσης.

- 10) Επιλογή από τον χρήστη της περίπτωσης που θα αξιολογηθεί: ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho$  ή αντίστασης γείωσης  $R_g$ .
- 11) Επιλογή από τον χρήστη Ναι ή Όχι (Yes or No): Υπολογισμός του μέγιστου ρεύματος δικτύου  $I_g$  σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80;
- 12) Αν Όχι (No): (Είσοδος από τον χρήστη.) Μέγιστο ρεύμα δικτύου,  $I_g$ .
- 13) Αν Ναι (Yes): (Είσοδος από τον χρήστη.) Συμμετρικό ρεύμα γείωσης,  $I_f$ , παράγοντας διαίρεσης ρεύματος σφάλματος,  $S_f$ , και παράγοντας μείωσης,  $D_f$ .
- 14) Επιλογή από τον χρήστη Ναι ή Όχι (Yes or No): Υπολογισμός του παράγοντα μείωσης  $D_f$  σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80;
- 15) Αν Όχι (No): (Είσοδος από τον χρήστη.) Παράγοντας μείωσης,  $D_f$ .

- 16) Αν Ναι (Yes): (Είσοδος από τον χρήστη.) X/R και διάρκεια σφάλματος,  $t_f$ .

Τα παραπάνω αναφέρονται σε συγκεκριμένες εγκαταστάσεις του τυπικού συστήματος γείωσης. Μπορεί να υπάρχουν πολλά από αυτά σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης να σημειωθεί πως η απόφαση για Yes or No (Ναι ή Όχι) γίνεται με τη χρήση κουτί ελέγχου (checkbox). Ανάλογα με το αν είναι επιλεγμένο αντιστοιχεί στην απόφαση Ναι (Yes), ενώ αν δεν είναι επιλεγμένο αντιστοιχεί στην απόφαση του Όχι (No).

#### **4.2.2: Είσοδος τιμών για το πρότυπο CENELEC**

Στην επιλογή του προτύπου CENELEC, ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία, η οποία αναλύεται παρακάτω:

- 1) (Είσοδος από τον χρήστη.) Χαρακτηριστικά χρόνου-ρεύματος της προστατευτικής συσκευής ή συσκευών (Time-current characteristic(s)). Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ένα αρχείο στο οποίο έχει αποθηκεύσει ήδη υπάρχουσες τιμές και θέλει να τις εισάγει.
- 2) (Είσοδος από τον χρήστη.) Συντελεστής αναλογίας αντίστασης γείωσης,  $k_g$ .
- 3) (Είσοδος από τον χρήστη.) Συντελεστής αναλογίας τάσης επαφής,  $k_t$ .
- 4) (Είσοδος από τον χρήστη.) Συντελεστής αναλογίας βηματικής τάσης,  $k_s$ .
- 5) Υπολογισμός των μέγιστων επιτρεπτών ορίων τάσης σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC EN 50522. Επιλογή από τον χρήστη, Yes or No: Χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης; (Use of high resistivity surface material?).

- 6) Αν επιλέξει Ναι (Yes): (Είσοδος από τον χρήστη.) Ειδική αντίσταση,  $\rho_s$ .
- 7) (Είσοδος από τον χρήστη.) Αντίσταση των παπουτσιών,  $R_{F1}$  (τυπική τιμή 1000  $\Omega$ ) (Resistance of footwear).
- 8) Καμπύλες από το πρότυπο IEC: (I)  $I_B(t_f)$ , (II)  $Z_T(U_T)$
- 9) (Είσοδος από τον χρήστη.) Συντελεστής του ρεύματος της καρδιάς, HF και συντελεστής του σώματος, BF.
- 10) (Είσοδος από τον χρήστη.) Μέγιστη τιμή του μέγιστου ρεύματος δικτύου (max grid current) για την κατασκευή των σχημάτων που δείχνουν τις καμπύλες απόδοσης ασφάλειας. Επίσης, γίνεται εισαγωγή και της ελάχιστης τιμής. Αυτές αποτελούν τα όρια του άξονα των  $\gamma$  του γραφήματος.

Μέχρι αυτό το σημείο οι καμπύλες απόδοσης της ασφάλειας μπορούν να σχεδιαστούν. Ακολουθούν τα δεδομένα εισόδου για την αξιολόγηση μίας συγκεκριμένης εγκατάστασης όπου έχει εγκατασταθεί το τυποποιημένο σύστημα γείωσης.

- 11) Επιλογή από τον χρήστη της περίπτωσης που θα αξιολογηθεί: ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho$  ή αντίστασης γείωσης  $R_g$ .
- 12) Επιλογή από τον χρήστη, Ναι ή Όχι (Yes or No): Υπολογισμός του μέγιστου ρεύματος δικτύου  $I_g$  σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80;
- 13) Αν Όχι (No): (Είσοδος από τον χρήστη.) Μέγιστο ρεύμα δικτύου,  $I_g$ .
- 14) Αν Ναι (Yes): (Είσοδος από τον χρήστη.) Συμμετρικό ρεύμα γείωσης,  $I_f$ , παράγοντας διαίρεσης ρεύματος σφάλματος,  $S_f$  και παράγοντας μείωσης,  $D_f$ .

- 15) Επιλογή από τον χρήστη, Ναι ή Όχι (Yes or No): Υπολογισμός του παράγοντα μείωσης  $D_f$  σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80;
- 16) Αν Όχι (No): (Είσοδος από τον χρήστη.) Παράγοντας μείωσης,  $D_f$ .
- 17) Αν Ναι (Yes): (Είσοδος από τον χρήστη.) X/R, διάρκεια σφάλματος,  $t_f$ .

Τα παραπάνω αναφέρονται σε συγκεκριμένες εγκαταστάσεις του τυπικού συστήματος γείωσης. Μπορεί να υπάρχουν πολλά από αυτά σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης να σημειωθεί εκ νέου πως η απόφαση για Yes or No (Ναι ή Όχι) γίνεται με τη χρήση κουτί ελέγχου (checkbox). Ανάλογα με το αν είναι επιλεγμένο αντιστοιχεί στην απόφαση Ναι (Yes), ενώ αν δεν είναι επιλεγμένο αντιστοιχεί στην απόφαση του Όχι (No).

### **4.3: Έξοδος τιμών λογισμικού**

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι τιμές των εξόδων που δίνει το λογισμικό αναλόγως το πρότυπο που έχει επιλεγθεί.

#### **4.3.1: Έξοδος τιμών λογισμικού για το πρότυπο IEEE**

Αφού έχουν εισαχθεί οι απαραίτητες τιμές εισόδων το λογισμικό μέσω υπολογισμών εξάγει τα εξής αποτελέσματα:

- Σχεδίαση των βασικών καμπυλών απόδοσης ασφάλειας, δηλαδή καμπύλες  $I_g-\rho_{touch}$  και  $I_g-\rho_{step}$  ή  $I_g-R_{gtouch}$  και  $I_g-R_{gstep}$ . Παρουσιάζονται και οι σχετικές καμπύλες που αντιστοιχούν στις προστατευτικές διατάξεις του συστήματος.
- Προσθήκη σημείου ή σημείων στο γράφημα των καμπυλών απόδοσης ασφαλείας που δείχνει ή δείχνουν τις αντίστοιχες περιπτώσεις συγκεκριμένων εγκαταστάσεων που εξετάστηκαν. Για κάθε περίπτωση περιλαμβάνονται μόνο οι σχετικές

καμπύλες που αντιστοιχούν στις προστατευτικές διατάξεις της εκάστοτε περίπτωσης.

Τα παραπάνω θα αποτυπωθούν σε γραφήματα και θα υπάρχει και ειδικό μέρος όπου θα φαίνονται τα ανώτερα επιτρεπτά όρια τάσης.

#### **4.3.2: Έξοδος τιμών λογισμικού για το πρότυπο CENELEC**

Αφού έχουν εισαχθεί οι απαραίτητες τιμές εισόδων το λογισμικό μέσω υπολογισμών εξάγει τα εξής αποτελέσματα:

- Σχεδίαση των βασικών καμπυλών απόδοσης ασφάλειας, δηλαδή καμπύλες  $I_g-R_{touch}$  ή  $I_g-R_{gtouch}$ . Παρουσιάζονται και οι σχετικές καμπύλες που αντιστοιχούν στις προστατευτικές διατάξεις του συστήματος.
- Προσθήκη σημείου ή σημείων στο γράφημα των καμπυλών απόδοσης ασφαλείας που δείχνει ή δείχνουν τις αντίστοιχες περιπτώσεις συγκεκριμένων εγκαταστάσεων που εξετάστηκαν. Για κάθε περίπτωση περιλαμβάνονται μόνο οι σχετικές καμπύλες που αντιστοιχούν στις προστατευτικές διατάξεις της εκάστοτε περίπτωσης.

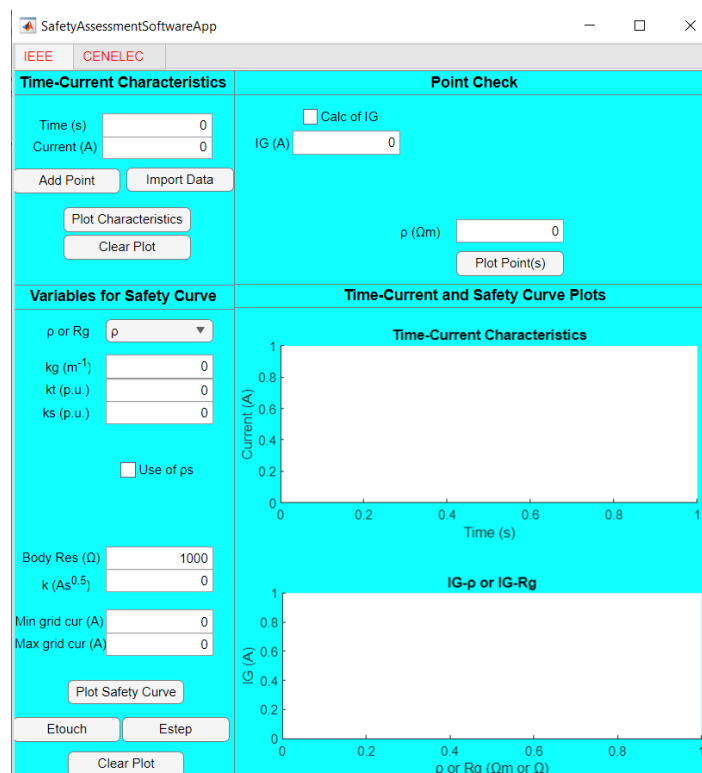
Τα παραπάνω θα αποτυπωθούν σε γραφήματα και θα υπάρχει και ειδικό μέρος όπου θα φαίνονται τα ανώτερα επιτρεπτά όρια τάσης.

# Κεφάλαιο 5: Λογισμικό εκτίμησης ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί αναλυτικά το λογισμικό που αναπτύχθηκε δηλαδή θα προβληθούν η σχεδίασή του και θα περιγραφεί ο κώδικας πάνω στον οποίο βασίστηκε. Για την καλύτερη κατανόηση θα υπάρχουν στιγμιότυπα οθόνης και περιγραφή τους. Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό αναπτύχθηκε στο γραφικό περιβάλλον MATLAB.

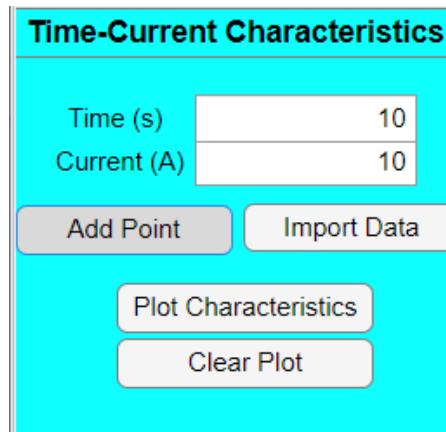
## 5.1: Σχεδίαση και κώδικας λογισμικού για το πρότυπο IEEE

Αρχικά ο χρήστης, μόλις ανοίξει το λογισμικό αντικρίζει την Εικόνα 9 παρακάτω.



Εικόνα 9: Αρχικό παράθυρο λογισμικού.

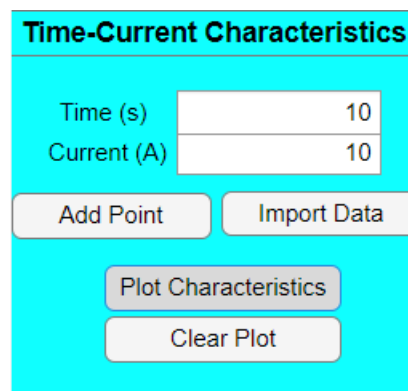
Έπειτα συνεχίζει με το προεπιλεγμένο πρότυπο IEEE που αντιστοιχεί στην πρώτη καρτέλα του παραθύρου επάνω. Στη συνέχεια, πρέπει να εισάγει τιμές για τη χαρακτηριστική χρόνου-ρεύματος της προστατευτικής συσκευής (Time-Current characteristic). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εισάγοντας δικές του τιμές στα numeric edit fields του χρόνου και του ρεύματος και πατώντας το πλήκτρο "Add Point" (Εικόνα 10).



Time-Current Characteristics	
Time (s)	10
Current (A)	10
Add Point	
Import Data	
Plot Characteristics	
Clear Plot	

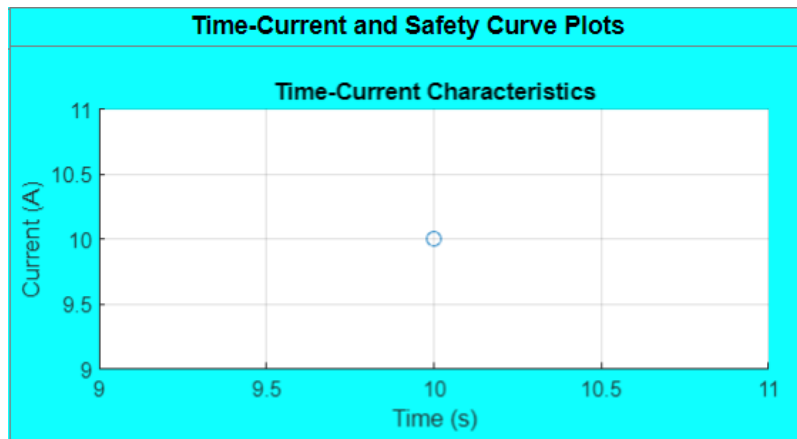
Εικόνα 10: Εισαγωγή τιμών από τον χρήστη και πάτημα πλήκτρου "Add Point".

Το πλήκτρο "Plot Characteristics", αποτυπώνει στην περιοχή (Time-Current and Safety Curve Plots) γράφημα με τα σημεία χρόνου και ρεύματος με x άξονα τον χρόνο και y άξονα το ρεύμα (Εικόνες 11 και 12).



Time-Current Characteristics	
Time (s)	10
Current (A)	10
Add Point	
Import Data	
Plot Characteristics	
Clear Plot	

Εικόνα 11: Πάτημα πλήκτρου "Plot Characteristics" μετά την εισαγωγή τιμών.

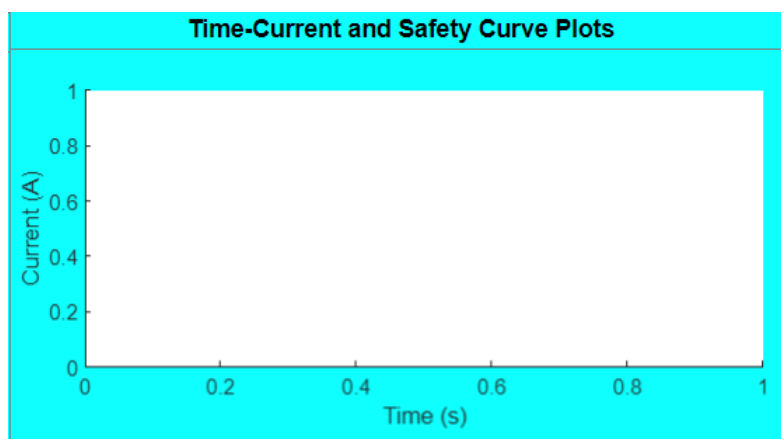


Εικόνα 12: Γράφημα αποτύπωσης τιμών χρόνου-ρεύματος με ένα σημείο ενδεικτικά. Το σημείο αντιστοιχεί στην επιλογή της Εικόνας 11.

Το πλήκτρο "Clear Plot" είναι υπεύθυνο για τον καθαρισμό του γραφήματος (Εικόνες 13 και 14).

The figure shows a control panel titled "Time-Current Characteristics". It contains two input fields: "Time (s)" with the value "10" and "Current (A)" with the value "10". Below the input fields are four buttons: "Add Point", "Import Data", "Plot Characteristics", and "Clear Plot".

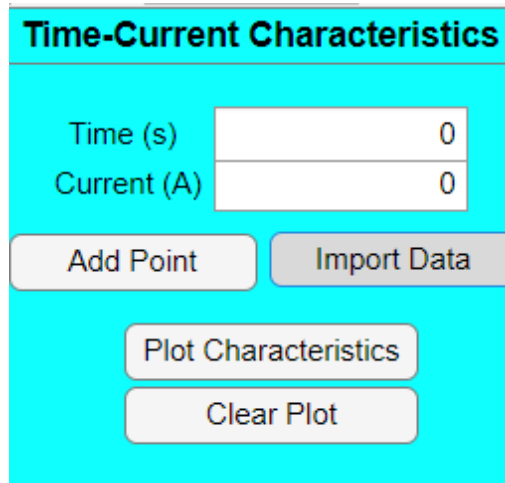
Εικόνα 13: Πάτημα πλήκτρου "Clear Plot".



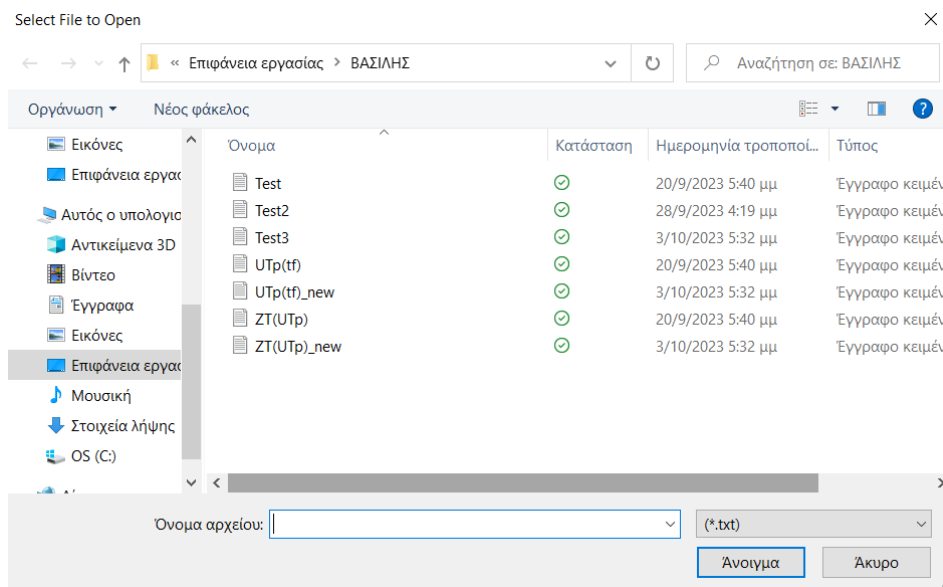
Εικόνα 14: Γράφημα μετά τη χρήση του πλήκτρου "Clear Plot".



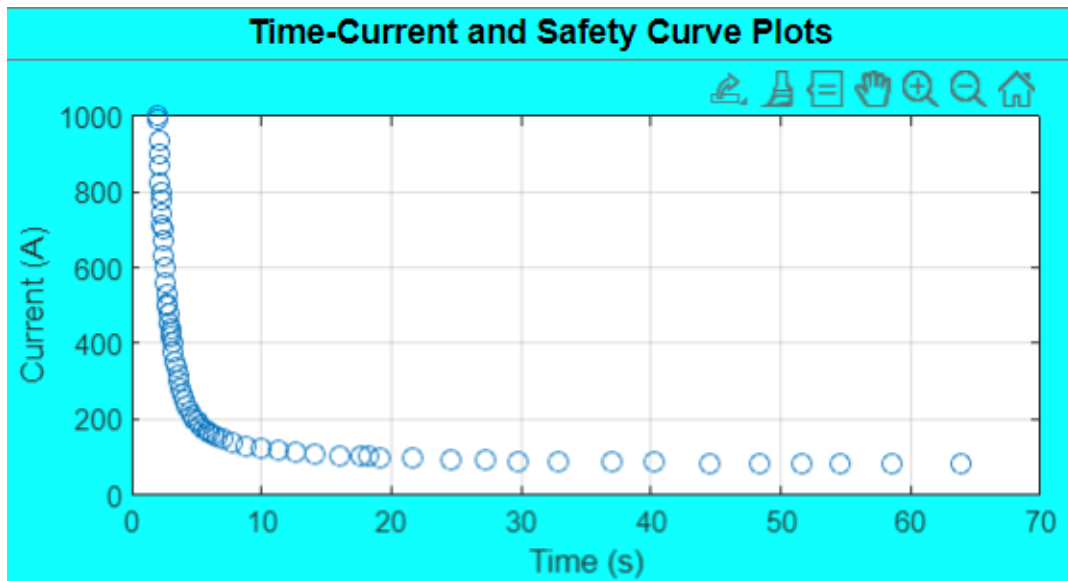
Ο χρήστης μπορεί επίσης να δώσει τιμές επιλέγοντας το πλήκτρο "Import Data". Το συγκεκριμένο πλήκτρο δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ένα .txt αρχείο, στο οποίο ή να έχει εγγράψει ο ίδιος πολλές τιμές για τον χρόνο και το ρεύμα ή να χρησιμοποιήσει μετρημένες υπάρχουσες τιμές (Εικόνες 15-17).



Εικόνα 15: Πάτημα πλήκτρου "Import Data".

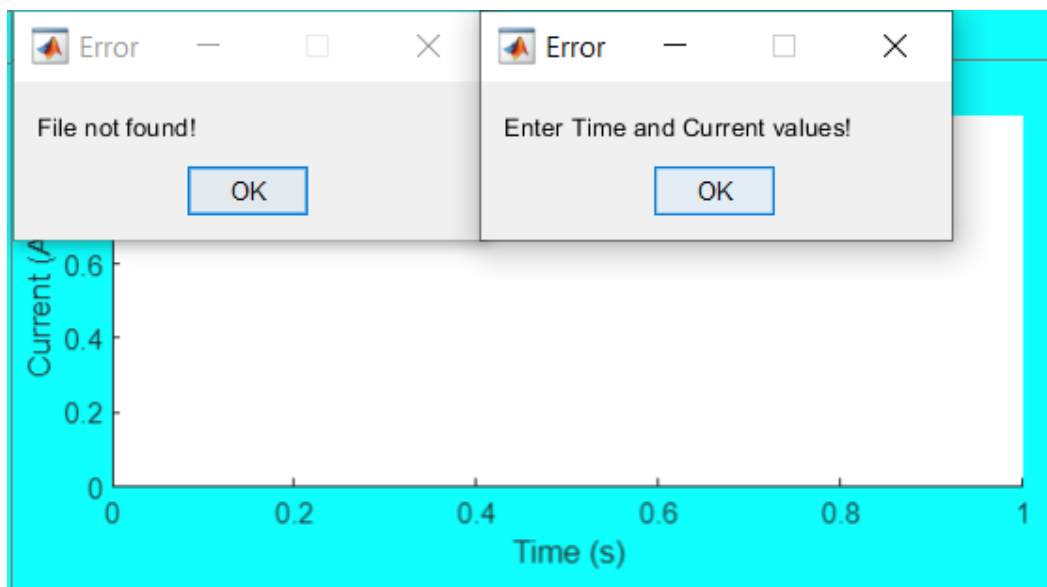


Εικόνα 16: Επιλογή .txt αρχείου για άνοιγμα και εισαγωγή των δεδομένων του.



Εικόνα 17: Αποτύπωση δεδομένων του αρχείου "Test1.txt".

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, πως αν ο χρήστης επιλέξει λανθασμένο .txt αρχείο ή αρχείο χωρίς τιμές δηλαδή κενό, εμφανίζεται μήνυμα λάθους το οποίο αναγράφει "File not found!". Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση όπου ο χρήστης προσπαθήσει να πατήσει το πλήκτρο "Plot Characteristics" δίχως να έχει εισάγει τιμές για τον χρόνο και το ρεύμα. Το μήνυμα λάθους για την συγκεκριμένη περίπτωση αναγράφει "Enter Time and Current values!" (Εικόνα 18).



Εικόνα 18: Μηνύματα λάθους για το "Import Data" και "Plot Characteristics".

Μόλις ολοκληρώσει την διαδικασία εισαγωγής τιμών για τον χρόνο και το ρεύμα και την αποτύπωσή τους στο πρώτο γράφημα, ο χρήστης πρέπει να δώσει τις απαιτούμενες τιμές για τη δημιουργία της καμπύλης απόδοσης ασφάλειας (Εικόνα 19).

Εικόνα 19: Εισαγωγή τιμών για τη δημιουργία της καμπύλης απόδοσης ασφάλειας.

Πρώτα, παρέχεται η επιλογή στον χρήστη να επιλέξει αν επιθυμεί ο x άξονας του γραφήματος θα είναι  $\rho$ , δηλαδή ειδική αντίσταση του εδάφους ή  $R_g$ , αντίσταση γείωσης (Εικόνα 20).

Εικόνα 20: Επιλογή  $\rho$  ή  $R_g$  για την καμπύλη απόδοσης ασφαλείας.

Επειτα, προσθέτει τιμές για το  $k_g$ ,  $k_t$ ,  $k_s$ , τους συντελεστές δηλαδή αναλογίας της αντίστασης γείωσης, της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης αντίστοιχα (Εικόνα 21).

$k_g$ ( $m^{-1}$ )	<input type="text" value="0"/>
$k_t$ (p.u.)	<input type="text" value="0"/>
$k_s$ (p.u.)	<input type="text" value="0"/>

Εικόνα 21: Εισαγωγή τιμών  $k_g$ ,  $k_t$ ,  $k_s$ .

Στη συνέχεια, μέσω ενός checkbox γίνεται η ερώτηση στον χρήστη αν επιθυμεί να υπάρχει υλικό επιφάνειας υψηλής ειδικής αντίστασης. Αν το checkbox επιλεγεί η απάντηση αντιστοιχεί στο Ναι και εμφανίζονται δύο πεδία όπου θα πρέπει να γίνει είσοδος τιμών. Αυτές είναι η  $\rho_s$  και η  $h_s$ , δηλαδή η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας και το πάχος στρώσης του (Εικόνα 22).

<input checked="" type="checkbox"/> Use of $\rho_s$	
$\rho_s$ ( $\Omega m$ )	<input type="text" value="0"/>
$h_s$ (m)	<input type="text" value="0"/>

Εικόνα 22: Επιλογή χρήστη για την χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης.

Αφού αποφασίσει αν θα γίνει χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης ή όχι, ο χρήστης εισάγει τιμή για την αντίσταση σώματος. Στο πεδίο αυτό υπάρχει προσυμπληρωμένη η τυπική τιμή της στα 1000  $\Omega$ . Επίσης ο χρήστης εισάγει τιμές για το  $k$  που είναι συντελεστής που σχετίζεται με τις επιτρεπτές τιμές ρεύματος ηλεκτροπληξίας, την ελάχιστη τιμή ρεύματος δικτύου όπως και τη μέγιστη τιμή ρεύματος δικτύου. Οι δύο τελευταίες χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του γραφήματος και συγκεκριμένα για την οριοθέτηση του  $y$  άξονα (Εικόνα 23).

Body Res ( $\Omega$ )	1000
$k$ ( $As^{0.5}$ )	0
Min grid cur (A)	0
Max grid cur (A)	0

Plot Safety Curve

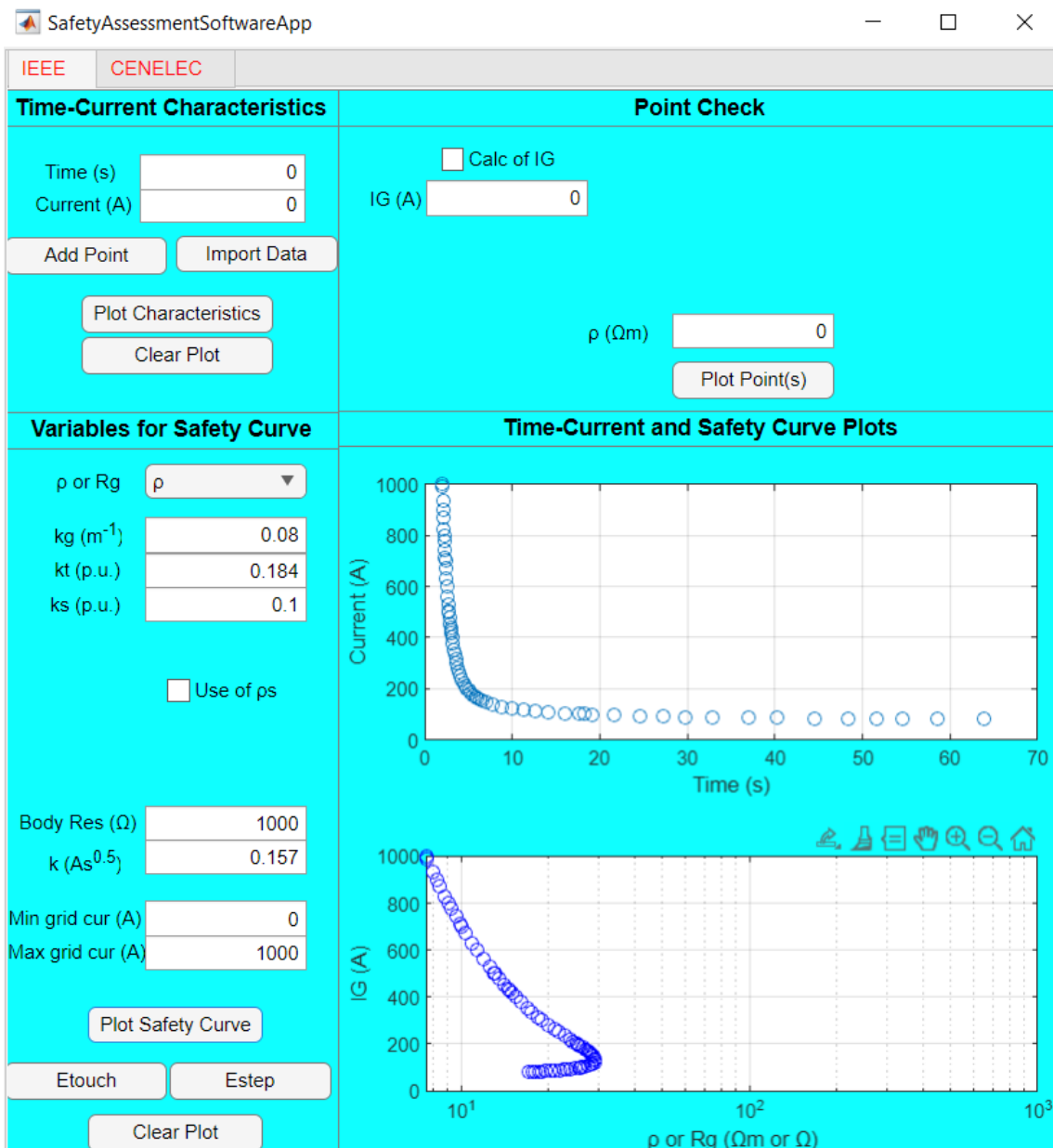
Etouch      Estep

Clear Plot

Εικόνα 23: Τιμές εισόδου για  $R_B$ ,  $k$ , Min grid cur, Max grid cur.

Παρακάτω υπάρχει το πλήκτρο "Plot Safety Curve". Στην περίπτωση πάλι που ο χρήστης αποφασίσει να πατήσει το πλήκτρο χωρίς να έχει εισάγει τιμές εμφανίζεται το μήνυμα λάθους "Enter values for safety curve!". Αν το γράφημα εμφανίσει μπλε κύκλους στην θέση των αντίστοιχων σημείων σημαίνει πως οι τιμές του  $\rho_{touch}$  είναι μικρότερες από αυτές του  $\rho_{step}$ , ενώ αν το γράφημα δείξει κόκκινους κύκλους σημαίνει πως οι τιμές του  $\rho_{step}$  είναι οι μικρότερες. Δηλαδή, γίνεται φανερό από το χρώμα των σημείων ποιο είδος τάσης είναι πιο επικίνδυνο. Δίνοντας για παράδειγμα τιμές εισόδου Dropdown:  $\rho$ ,  $k_g = 0.08 \text{ m}^{-1}$ ,  $k_t = 0.184 \text{ p.u.}$ ,  $k_s = 0.1 \text{ p.u.}$ , Useofrs = No, Body Res = 1000  $\Omega$ ,  $k = 0.157 \text{ As}^{0.5}$  (για άτομο 70 kg), min grid cur = 0 A και max grid cur = 1000 A έχουμε ως αποτέλεσμα το γράφημα που φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 24.

Αυτή η καμπύλη αναφέρεται σε τυποποιημένο σύστημα γείωσης υποσταθμού μέσης τάσης από την αναφορά [12]. Όσο το ρεύμα μειώνεται από τα 1000 A (μέγιστη τιμή του συγκεκριμένου συστήματος 20 kV) η επιτρεπτή ειδική αντίσταση αυξάνεται. Όμως από κάποιο ρεύμα και κάτω παρατηρούμε ότι οι τιμές της επιτρεπτής ειδικής αντίστασης του εδάφους μειώνονται. Αυτό έχει να κάνει με την αύξηση του χρόνου σφάλματος. Επομένως, είναι φανερό ότι ένα σφάλμα με μικρό ρεύμα και μεγάλη διάρκεια θα μπορούσε να είναι πιο επικίνδυνο από ένα σφάλμα μεγάλου ρεύματος και μικρής διάρκειας.

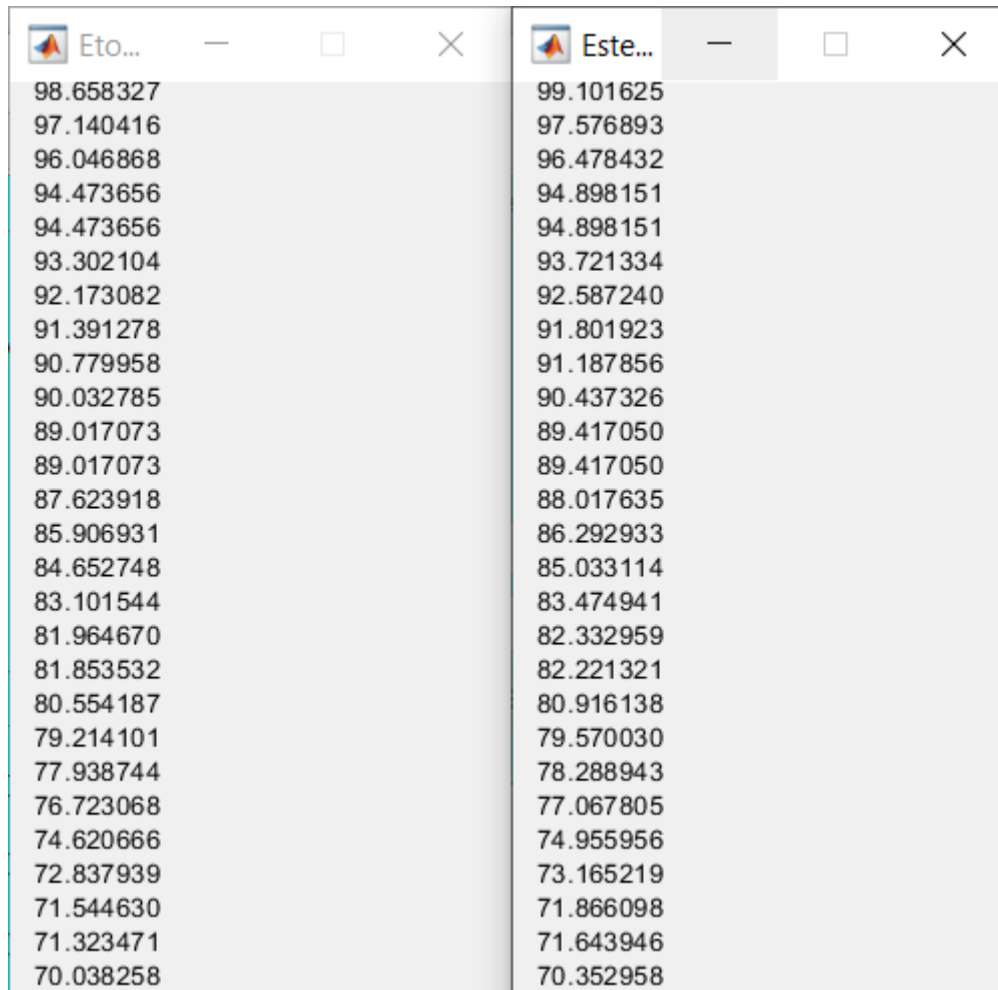


Εικόνα 24: Δημιουργία γραφήματος καμπύλης απόδοσης ασφάλειας.

Το πλήκτρο "Clear Plot" είναι ίδιο με αυτό που χρησιμοποιείται στο "Time-Current Characteristics" και χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του γραφήματος όπως και την επαναφορά όλων των τιμών στο 0, εκτός της αντίστασης σώματος που προκαθορίζεται στο 1000.

Τα κουμπιά "Etouch", "Estep" εμφανίζουν με την χρήση της εντολής `msgbox()` της MATLAB, τα επιτρεπτά όρια τάσης για την τάση επαφής

και τη βηματική τάση αντίστοιχα, σύμφωνα με τις τιμές που έχει δώσει ο χρήστης (Εικόνα 25).

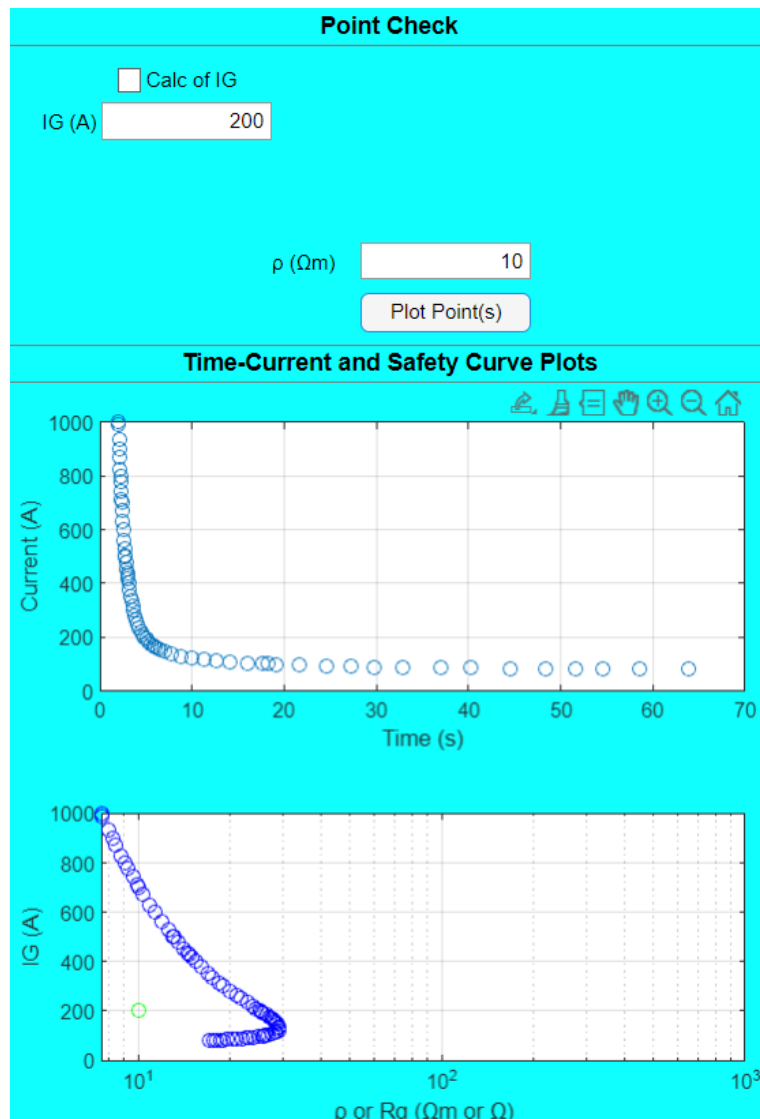


Eto...	Este...
98.658327	99.101625
97.140416	97.576893
96.046868	96.478432
94.473656	94.898151
94.473656	94.898151
93.302104	93.721334
92.173082	92.587240
91.391278	91.801923
90.779958	91.187856
90.032785	90.437326
89.017073	89.417050
89.017073	89.417050
87.623918	88.017635
85.906931	86.292933
84.652748	85.033114
83.101544	83.474941
81.964670	82.332959
81.853532	82.221321
80.554187	80.916138
79.214101	79.570030
77.938744	78.288943
76.723068	77.067805
74.620666	74.955956
72.837939	73.165219
71.544630	71.866098
71.323471	71.643946
70.038258	70.352958

Εικόνα 25: Εμφάνιση ορίων ανωτέρων τιμών τάσης επαφής και βηματικής τάσης.

Αφότου δημιουργηθεί το γράφημα με την καμπύλη απόδοσης ασφάλειας ο χρήστης οδηγείται στο τελευταίο βήμα που είναι η εισαγωγή των στοιχείων που αφορούν μία συγκεκριμένη εγκατάσταση που χρησιμοποιεί το τυποποιημένο σύστημα γείωσης. Εισάγονται η τιμή ρεύματος και η ειδική αντίσταση του εδάφους γίνεται ο έλεγχος αν η εγκατάσταση είναι επικίνδυνη ή όχι ("Point Check"). Αυτό θα φανεί στο γράφημα της καμπύλης απόδοσης ασφαλείας και αν η τιμή είναι πάνω από την καμπύλη η εγκατάσταση παρουσιάζει κίνδυνο, διαφορετικά όχι. Η εισαγωγή της τιμής ρεύματος γίνεται

με δύο τρόπους και μέσω χρήσης checkbox που ρωτάει το χρήστη αν θέλει να γίνει υπολογισμός του  $I_g$ . Αν δεν προτιμηθεί να γίνει υπολογισμός, τότε ο χρήστης δίνει κατευθείαν μια τιμή στο  $I_g$  και το αντίστοιχο  $\rho$  και να αποτυπωθεί στο γράφημα το σημείο αλλά και να γίνει ο έλεγχος. Για παράδειγμα μπορούμε να εισάγουμε για  $I_g = 200 \text{ A}$  και  $\rho = 10 \text{ }\Omega\text{m}$  (εξαιρετικά χαμηλή τιμή πολύ αγώγιμων εδαφών). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 26 παρακάτω.

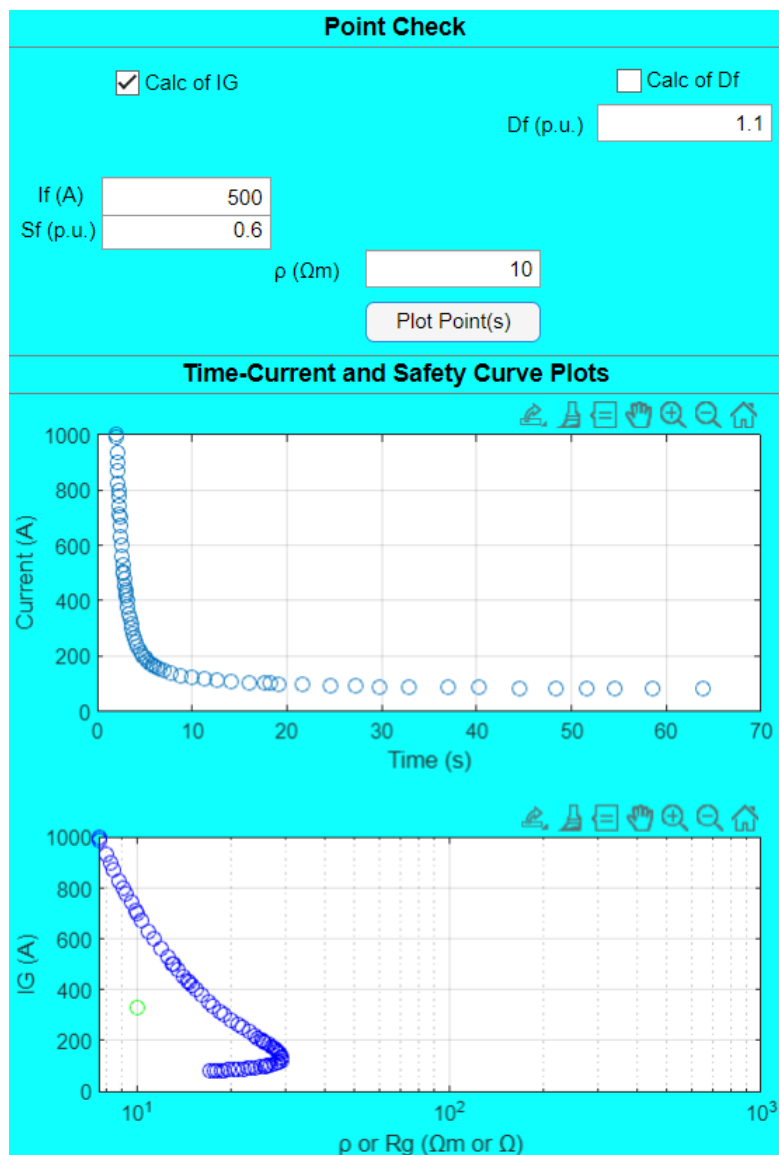


Εικόνα 26: Έλεγχος ασφαλείας συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινο σημείο) χωρίς τη χρήση υπολογισμού  $I_g$ .



Όπως διακρίνουμε ο πράσινος κύκλος που αντιστοιχεί στις τιμές του χρήστη είναι κάτω από την καμπύλη άρα το σύστημα γείωσης είναι ασφαλές.

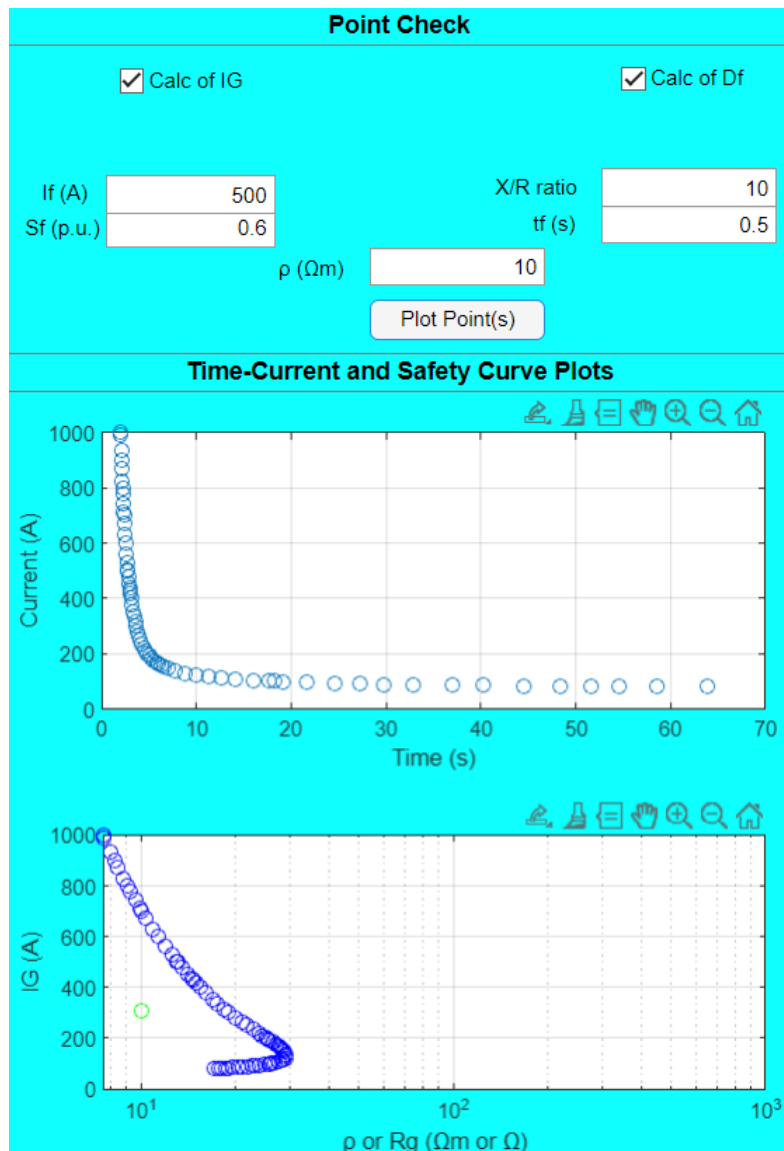
Αν ο χρήστης επιλέξει ότι θέλει να γίνει υπολογισμός του  $I_g$ , τότε εμφανίζονται τα  $I_f$ ,  $S_f$  και  $D_f$  με μια επιλογή να γίνει υπολογισμός του τελευταίου ή όχι. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού σημείου  $I_g$  με τιμές  $I_f = 500$  A,  $S_f = 0.6$  p.u. και δεν είναι επιθυμητό να γίνει υπολογισμός του  $D_f$  δίνοντάς του τιμή κατευθείαν  $D_f = 1.1$  p.u., τότε έχουμε το αποτέλεσμα που φαίνεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27: Έλεγχος συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινο σημείο) με τη χρήση υπολογισμού  $I_g$  και χωρίς τη χρήση υπολογισμού  $D_f$ .

Παρατηρούμε πως το σημείο που προέκυψε είναι μικρότερο από την τιμή ασφάλειας οπότε το συγκεκριμένο σύστημα γείωσης είναι ασφαλές.

Τέλος αν ο χρήστης επιλέξει ότι θέλει να γίνει και υπολογισμός του  $D_f$  εμφανίζονται ακόμα δύο πεδία τιμών για τον λόγο  $X/R$  και το  $t_f$ . Μέσω μαθηματικής συνάρτησης υπολογίζεται το  $D_f$  και παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα με τον υπολογισμό  $D_f$  δίνοντας τιμές  $X/R = 10$  και  $t_f = 0.5$  s (Εικόνα 28).



Εικόνα 28: Έλεγχος συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινο σημείο) με τη χρήση υπολογισμού  $I_g$  και τη χρήση υπολογισμού  $D_f$ .

Παρατηρούμε πως το σημείο που προκύπτει από τους υπολογισμούς είναι και πάλι ασφαλές.

Για την επαλήθευση της ορθότητας της υλοποίησης της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 3 παρουσιάζονται παρακάτω 4 πίνακες. Οι πρώτοι δύο είναι για την καμπύλη ρεύματος-χρόνου IT (Inverse Time) χωρίς τη χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης (Πίνακας 1) και μετά με τη χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης (Πίνακας 2). Έπειτα οι επόμενοι 2 πίνακες αφορούν την καμπύλη 3K χωρίς αρχικά (Πίνακας 3) και έπειτα με τη χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης (Πίνακας 4). Ο κάθε πίνακας αποτελείται από την πρώτη στήλη όπου φαίνονται οι τιμές του ρεύματος, στη δεύτερη στήλη οι τιμές ειδικής αντίστασης όπως έχουν υπολογιστεί με βάση τη μεθοδολογία με χρήση του MS Excel, στην τρίτη οι τιμές ειδικής αντίστασης που προέκυψαν από το λογισμικό και τέλος στη τέταρτη η διαφορά της τρίτης με τη δεύτερη στήλη σε ποσοστό.

Είναι φανερό ότι η διαφορά ανάμεσα στους υπολογισμούς και στα αποτελέσματα του λογισμικού είναι ασήμαντη. Οφείλεται σε στρογγυλοποιήσεις των τιμών.

Πίνακας 1: Σύγκριση τιμών  $\rho_{\text{touch}}$  και  $\rho_{\text{touch}(\text{software})}$  για καμπύλη IT χωρίς  $\rho_s$ .

$I_g$ (A)	$\rho_{\text{preference}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_{\text{software}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	Difference
1000	7,5	7,5521	0,69%
990,872	7,6	7,6225	0,30%
935,664	7,9	7,9601	0,76%
900	8,2	8,2202	0,25%
871,48	8,4	8,4525	0,63%
825,32	8,8	8,8079	0,09%
800	9	9,0286	0,32%
778,7864	9,2	9,2156	0,17%
742,9216	9,6	9,5816	-0,19%
712,3112	9,9	9,9128	0,13%
700	10	10,047	0,47%
670,6736	10,3	10,36	0,58%
631,044	10,9	10,908	0,07%
601,0944	11,3	11,323	0,20%
600	11,3	11,344	0,39%
561,4672	11,9	11,946	0,39%
529,0416	12,5	12,547	0,38%
501,7416	13	13,022	0,17%

500	13	13,068	0,52%
476,888	13,5	13,541	0,30%
454,2616	14	14,054	0,39%
437,1248	14,4	14,49	0,62%
429,1	14,6	14,666	0,45%
417,5808	14,9	14,953	0,36%
400,0824	15,4	15,442	0,27%
400	15,4	15,445	0,29%
377,7888	16,1	16,113	0,08%
352,6152	16,9	16,946	0,27%
335,1488	17,5	17,585	0,49%
315,3232	18,3	18,37	0,38%
301,0088	18,9	18,997	0,51%
300	19	19,036	0,19%
282,1768	19,9	19,944	0,22%
263,1952	21	21,061	0,29%
250,3352	21,7	21,81	0,51%
235,3616	22,8	22,871	0,31%
219,8264	23,8	23,85	0,21%
209,528	24,3	24,445	0,60%
200	25,1	25,182	0,33%
198,4192	25,2	25,309	0,43%
191,3368	25,7	25,791	0,35%
183,8408	26,3	26,399	0,38%
174,8488	27	27,118	0,44%
167,624	27,5	27,585	0,31%
163,0536	27,8	27,892	0,33%
157,9136	28,1	28,205	0,37%
151,936	28,4	28,515	0,40%
145,6512	28,7	28,812	0,39%
136,9024	29	29,094	0,32%
129,8944	28,9	29,017	0,40%
122,2592	28,8	28,93	0,45%
115,9904	28,4	28,486	0,30%
111,4984	28	28,096	0,34%
107,5672	27,4	27,515	0,42%
103,7672	26,6	26,683	0,31%
100,916	26,1	26,174	0,28%
100	25,8	25,916	0,45%
98,9336	25,5	25,644	0,56%
95,6472	24,7	24,836	0,55%
92,936	23,9	23,996	0,40%
91,0416	23,2	23,246	0,20%

89,2496	22,6	22,662	0,27%
87,616	21,8	21,931	0,60%
86,1952	20,9	21,006	0,51%
85,0528	20,3	20,383	0,41%
83,7984	19,6	19,633	0,17%
82,988	18,9	18,998	0,52%
82,1312	18,5	18,582	0,44%
81,6992	18,1	18,15	0,28%
80,972	17,6	17,674	0,42%
80	17	17,112	0,66%

Πίνακας 2: Σύγκριση τιμών  $\rho_{touch}$  και  $\rho_{touch}(software)$  για καμπύλη IT με  $\rho_s$ .

$I_g$ (A)	$\rho_{reference}$ ( $\Omega m$ )	$\rho_{software}$ ( $\Omega m$ )	Difference
1000	66,58659	66,78	0,28%
990,872	67,15473	67,394	0,36%
935,664	70,08278	70,361	0,40%
900	72,39386	72,645	0,35%
871,48	74,38579	74,685	0,40%
825,32	77,55305	77,803	0,32%
800	79,45519	79,739	0,36%
778,7864	81,15394	81,378	0,28%
742,9216	84,3159	84,586	0,32%
712,3112	87,15065	87,487	0,39%
700	88,27273	88,658	0,44%
670,6736	91,13708	91,405	0,29%
631,044	95,83188	96,198	0,38%
601,0944	99,53422	99,819	0,29%
600	99,67288	100	0,33%
561,4672	104,9407	105,27	0,31%
529,0416	109,9871	110,51	0,48%
501,7416	114,2916	114,65	0,31%
500	114,5784	115,05	0,41%
476,888	118,6183	119,17	0,47%
454,2616	123,1965	123,63	0,35%
437,1248	126,8816	127,43	0,43%
429,1	128,4691	128,96	0,38%
417,5808	130,8819	131,45	0,43%
400,0824	135,2674	135,7	0,32%
400	135,2874	135,73	0,33%
377,7888	141,0608	141,52	0,33%
352,6152	148,1359	148,74	0,41%

335,1488	153,7593	154,28	0,34%
315,3232	160,4797	161,06	0,36%
301,0088	165,838	166,48	0,39%
300	166,2502	166,82	0,34%
282,1768	174,0937	174,65	0,32%
263,1952	183,5057	184,27	0,42%
250,3352	189,9788	190,71	0,38%
235,3616	199,0381	199,82	0,39%
219,8264	207,4858	208,22	0,35%
209,528	212,4559	213,32	0,41%
200	218,7491	219,62	0,40%
198,4192	219,8728	220,71	0,38%
191,3368	224,0086	224,82	0,36%
183,8408	229,0757	230,01	0,41%
174,8488	235,3297	236,15	0,35%
167,624	239,3103	240,13	0,34%
163,0536	241,8804	242,74	0,36%
157,9136	244,3743	245,41	0,42%
151,936	247,0977	248,05	0,39%
145,6512	249,5572	250,58	0,41%
136,9024	251,9224	252,97	0,42%
129,8944	251,3573	252,31	0,38%
122,2592	250,6362	251,57	0,37%
115,9904	246,8986	247,8	0,37%
111,4984	243,5338	244,48	0,39%
107,5672	238,6168	239,54	0,39%
103,7672	231,5166	232,44	0,40%
100,916	227,2125	228,1	0,39%
100	225,0115	225,89	0,39%
98,9336	222,6917	223,57	0,39%
95,6472	215,8019	216,66	0,40%
92,936	208,6672	209,47	0,38%
91,0416	202,2708	203,04	0,38%
89,2496	197,2863	198,03	0,38%
87,616	191,016	191,75	0,38%
86,1952	183,0964	183,8	0,38%
85,0528	177,7474	178,43	0,38%
83,7984	171,3011	171,96	0,38%
82,988	165,8477	166,49	0,39%
82,1312	162,2669	162,89	0,38%
81,6992	158,5589	159,16	0,38%
80,972	154,4532	155,04	0,38%
80	149,607	150,18	0,38%

Πίνακας 3: Σύγκριση τιμών  $\rho_{\text{touch}}$  και  $\rho_{\text{touch}(\text{software})}$  για καμπύλη 3K χωρίς  $\rho_s$ .

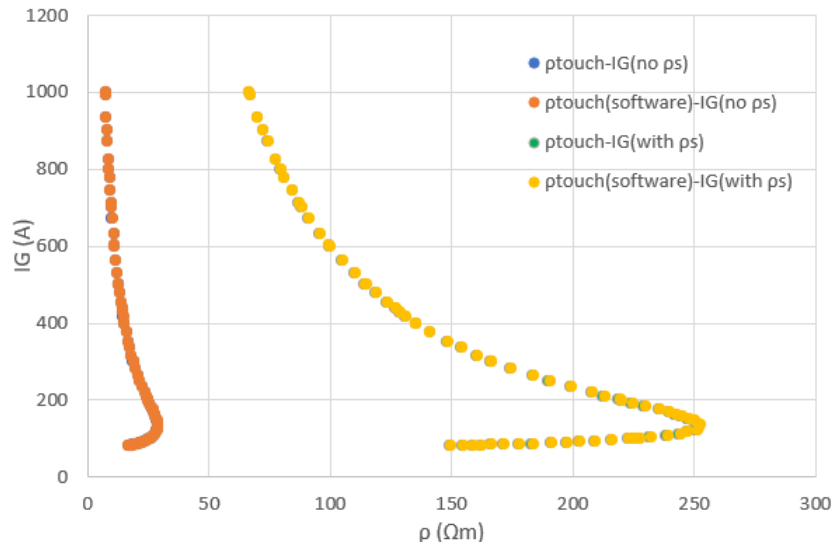
$I_g$ (A)	$\rho_{\text{reference}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_{\text{software}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	Difference
1000	70,1	70,478	0,54%
944,024	74	73,677	-0,44%
900	77,4	77,701	0,39%
816,26	84,9	85,066	0,20%
800	86,4	87,021	0,72%
700	98	97,653	-0,35%
641,768	106,8	107,95	1,08%
600	113,8	114,69	0,78%
554,788	122,9	123,59	0,56%
500	135,2	135,23	0,02%
468,959	143,7	143,73	0,02%
422,081	158,7	158,35	-0,22%
400	167	166,65	-0,21%
351,249	190,2	190,51	0,16%
300,942	223,2	222,94	-0,12%
300	223,9	223,88	-0,01%
266,509	251,6	251,61	0,00%
231,586	292,6	293,82	0,42%
200	342,1	345,11	0,88%
193,712	354,9	357,41	0,71%
172,739	402	405,33	0,83%
146,157	486,8	488,51	0,35%
128,529	565,4	569,51	0,73%
111,952	675,5	680,82	0,79%
100	779,6	790,22	1,36%
96,141	825,3	830,43	0,62%
83,9586	996	1010,8	1,49%
80	1058	1074,7	1,58%
73,8998	1189,8	1206,1	1,37%
66,7688	1397,7	1419,6	1,57%
57,2084	1785,2	1819,9	1,94%
52,6236	2076,7	2111,7	1,69%
50	2257,8	2310,2	2,32%

Πίνακας 4: Σύγκριση τιμών  $\rho_{touch}$  και  $\rho_{touch}(\text{software})$  για καμπύλη 3K με  $\rho_s$ .

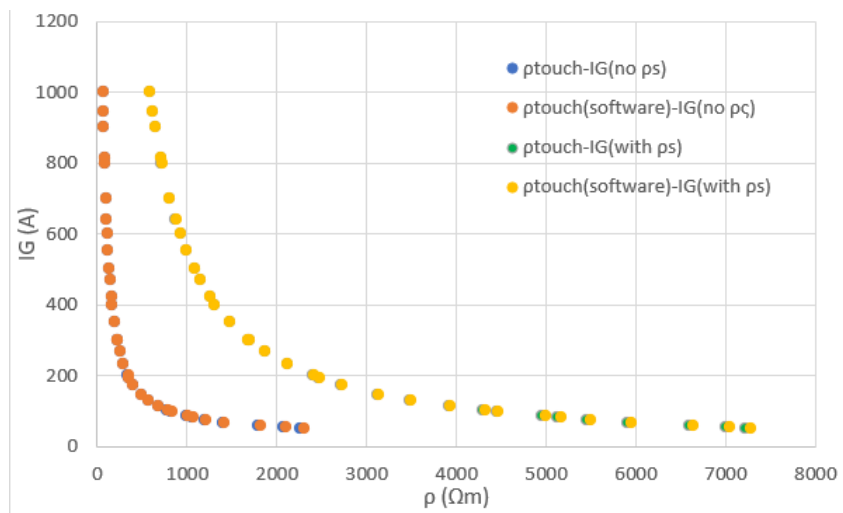
$I_g$ (A)	$\rho_{\text{reference}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_{\text{software}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	Difference
1000	590,6	593,85	0,55%
944,024	622,1	619,32	-0,45%
900	648,5	651,19	0,41%
816,26	707,5	709,03	0,22%
800	719,8	724,27	0,62%
700	809,3	806,43	-0,35%
641,768	875,7	884,77	1,04%
600	928,8	935,44	0,71%
554,788	996,4	1001,6	0,52%
500	1086,3	1086,8	0,05%
468,959	1148,3	1148,2	-0,01%
422,081	1254,3	1252	-0,18%
400	1312,2	1310	-0,17%
351,249	1471	1473	0,14%
300,942	1688	1686,2	-0,11%
300	1692,2	1692,2	0,00%
266,509	1867,2	1867,1	-0,01%
231,586	2114	2121,3	0,35%
200	2395,7	2412,4	0,70%
193,712	2466	2479,4	0,54%
172,739	2714,4	2731,3	0,62%
146,157	3127,8	3135,8	0,26%
128,529	3476,9	3494,5	0,51%
111,952	3918,6	3938,7	0,51%
100	4292,4	4328,5	0,84%
96,141	4444,8	4461,5	0,38%
83,9586	4959,6	5000,6	0,83%
80	5127,8	5171,5	0,85%
73,8998	5457	5495,4	0,70%
66,7688	5910,4	5954,1	0,74%
57,2084	6590,4	6643	0,80%
52,6236	6998,2	7042,4	0,63%
50	7217,5	7276,8	0,82%

Παρακάτω παρατίθεται η Εικόνα 29 όπου απεικονίζει σε ένα γράφημα τις τιμές των δύο πρώτων πινάκων και βλέπουμε τη σύγκριση τιμών  $\rho_{touch}$  και  $\rho_{touch}(\text{software})$  με το ρεύμα ( $I_G$ ) για την καμπύλη IT, χωρίς και με τη χρήση  $\rho_s$ . Έπειτα, στην Εικόνα 30 το γράφημα δείχνει πάλι τη σύγκριση  $\rho_{touch} - \rho_{touch}(\text{software})$  με  $I_G$  για την καμπύλη 3K χωρίς και με  $\rho_s$ . Από τις εικόνες αυτές φαίνεται ότι οι καμπύλες των υπολογισμών ταυτίζονται με αυτές του λογισμικού.





Εικόνα 29: Σύγκριση τιμών  $\rho_{\text{touch-IG}}$  και  $\rho_{\text{touch(software)-IG}}$  χωρίς και με  $\rho_s$  για καμπύλη IT.



Εικόνα 30: Σύγκριση τιμών  $\rho_{\text{touch-IG}}$  και  $\rho_{\text{touch(software)-IG}}$  χωρίς και με  $\rho_s$  για καμπύλη 3K.

## 5.2: Σχεδίαση και κώδικας λογισμικού για το πρότυπο CENELEC

Με την επιλογή της καρτέλας του προτύπου CENELEC εμφανίζεται στον χρήστη το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 31.

The screenshot shows the 'SafetyAssessmentSoftwareApp' window with the 'CENELEC' standard selected. The interface is divided into several sections:

- Time-Current Characteristics:** Includes input fields for 'Time (s)' and 'Current (A)', both set to 0. Buttons for 'Add Point', 'Import Data', 'Plot Characteristics', and 'Clear Plot' are present.
- Point Check:** Features a checkbox for 'Calc of IG', an 'IG (A)' input field (0), a 'ρ (Ωm)' input field (0), and a 'Plot Point(s)' button.
- Variables for Safety Curve:** Contains a dropdown for 'ρ or Rg' (set to 'ρ'), input fields for 'kg (m<sup>-1</sup>)', 'kt (p.u.)', and 'ks (p.u.)' (all 0), a 'Use of ps' checkbox, and input fields for 'RF1 (Ω)', 'HF (p.u.)', and 'BF (p.u.)' (all 0). It also has 'Min grid cur (A)' and 'Max grid cur (A)' input fields (both 0), and buttons for 'Plot Safety Curve', 'UVTp', and 'Clear Plot'.
- Time-Current and Safety Curve Plots:** Contains two empty plots:
  - Time-Current Characteristics:** A plot with 'Time (s)' on the y-axis and 'Current (A)' on the x-axis, both ranging from 0 to 1.
  - IG-ρtouch or IG-Rgtouch:** A plot with 'IG (A)' on the y-axis and 'ρ or Rg (Ωm or Ω)' on the x-axis, both ranging from 0 to 1.

Εικόνα 31: Επιλογή προτύπου CENELEC.

Το πρώτο μέρος "Time-Current Characteristics" είναι ακριβώς το ίδιο με του πρότυπου IEEE. Με άλλα λόγια, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει μόνος του τιμές για τον χρόνο και το ρεύμα οι οποίες προστίθενται με το πάτημα του πλήκτρου "Add Point". Μόλις προσθέσει τα σημεία που θέλει με το πάτημα του πλήκτρου "Plot Characteristics" αποτυπώνονται στο πρώτο γράφημα του "Time-Current and Safety Curve Plots" οι τιμές που εισήγαγε. Με την επιλογή "Import Data", του παρέχεται η δυνατότητα να επιλέξει .txt αρχείο και να εισάγει τις τιμές κατευθείαν από εκεί. Τελευταίο το πλήκτρο "Clear Plot" το οποίο καθαρίζει ολοκληρωτικά τον γράφημα. Να σημειωθεί ξανά, πως σε περίπτωση κενού ή λανθασμένου αρχείου εμφανίζεται μήνυμα λάθους, όπως και αν ο χρήστης πατήσει το "Plot Characteristics" χωρίς να έχει εισάγει τιμές.

Το δεύτερο μέρος του "Variables for Safety Curve", διαφοροποιείται λίγο από αυτό του άλλου προτύπου. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή για τον άξονα x του γραφήματος σε  $\rho$  ή  $R_g$  παραμένει ίδια όπως και η εισαγωγή των τιμών  $k_g$ ,  $k_t$  και  $k_s$ . Η πρώτη αλλαγή, φαίνεται στην επιλογή χρήσης υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης, όπου αν η απάντηση του χρήστη είναι Ναι εμφανίζεται μόνο ένα πεδίο για τιμή το  $\rho_s$ . Αυτό συμβαίνει γιατί το CENELEC EN 50522 δεν λαμβάνει υπόψη το πάχος της στρώσης του υλικού επιφανείας στους υπολογισμούς.

A screenshot of a software interface showing a yellow background. At the top, there is a checkbox labeled "Use of ps" which is checked. Below it, the text " $\rho_s$  ( $\Omega\text{m}$ )" is followed by a text input field containing the number "0".

Εικόνα 32: Επιλογή χρήσης υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης.

Επειτα, στη θέση της αντίστασης σώματος του προτύπου IEEE Std 80, υπάρχει η αντίσταση των παπουτσιών, η οποία έχει τυπική τιμή 1000  $\Omega$ . Ακόμα, υπάρχουν οι τιμές των συντελεστών HF και BF, (Εικόνα 33).

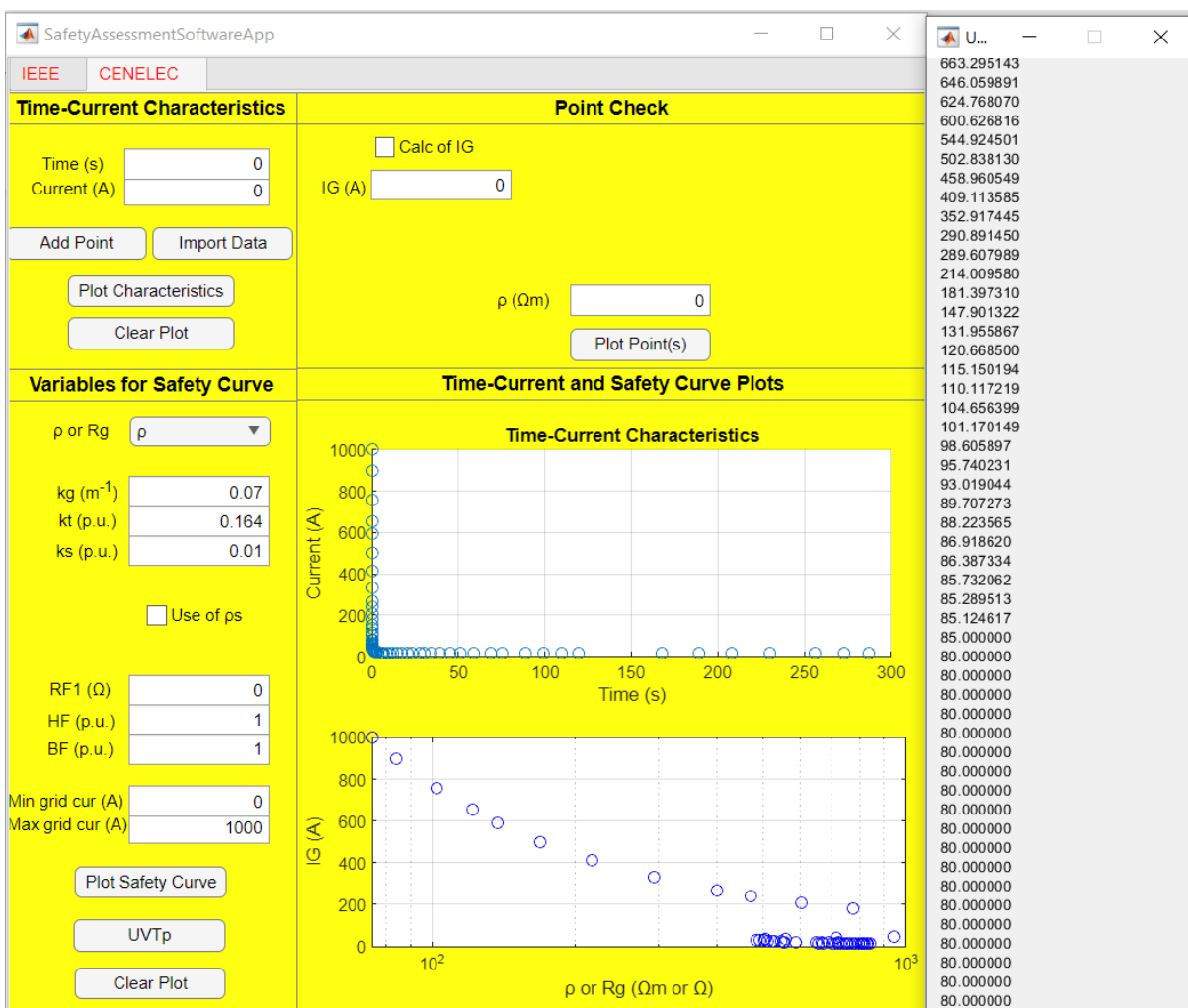
A screenshot of a software interface showing a yellow background with a table of input fields. The fields and their values are: RF1 ( $\Omega$ ) = 1000, HF (p.u.) = 0, BF (p.u.) = 0, Min grid cur (A) = 0, and Max grid cur (A) = 0.

RF1 ( $\Omega$ )	1000
HF (p.u.)	0
BF (p.u.)	0
Min grid cur (A)	0
Max grid cur (A)	0

Εικόνα 33: Είσοδος τιμών  $R_{F1}$ , HF, BF.

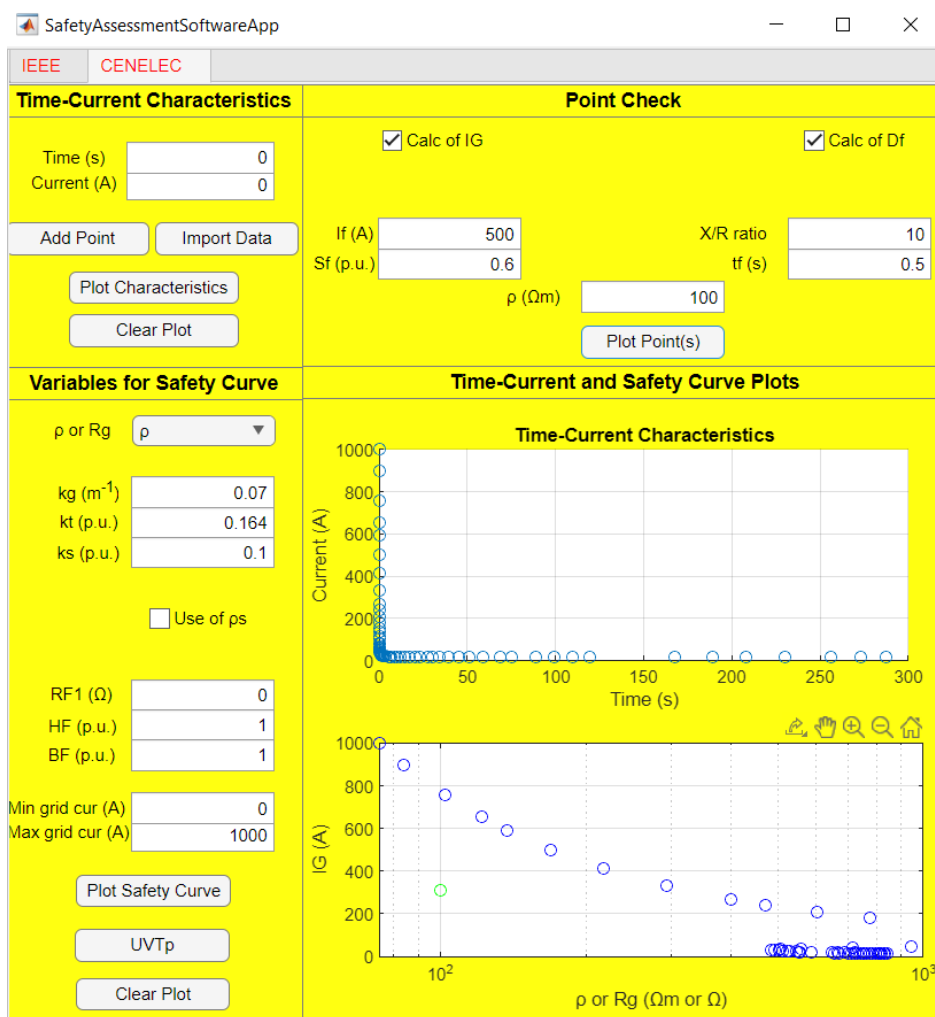
Στην τελευταία αλλαγή, μπορεί να παρατηρηθεί το πλήκτρο  $U_{VTp}$  το οποίο εμφανίζει τις τιμές επιτρεπτής τάσης. Στην περίπτωση που ο χρήστης δεν έχει συμπληρώσει όλες τις τιμές και πατήσει το πλήκτρο Plot, θα εμφανιστεί μήνυμα λάθους και προτροπής να εισάγει τιμές.

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα χρήσης του λογισμικού με τιμές χρόνου και ρεύματος να διαβάζονται από το "Test3.txt" το οποίο είναι η καμπύλη  $\delta K$ , Dropdown =  $\rho$ ,  $k_g = 0.07 \text{ m}^{-1}$ ,  $k_t = 0.164 \text{ p.u.}$ ,  $k_s = 0.1 \text{ p.u.}$ , Χρήση υλικού επιφανείας υψηλής αντίστασης Όχι,  $R_{F1} = 0 \text{ } \Omega$ ,  $H_F = 1 \text{ p.u.}$ ,  $B_F = 1 \text{ p.u.}$ , min grid cur = 0 A, max grid cur = 1000 A. Στην Εικόνα 34, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως και οι τιμές των επιτρεπτών ορίων τάσης.



Εικόνα 34: Δημιουργία καμπύλης απόδοσης ασφάλειας και τιμές επιτρεπτών ορίων τάσης.

Το τρίτο και τελευταίο μέρος του προτύπου είναι ο έλεγχος συγκεκριμένης εγκατάστασης που χρησιμοποιεί το τυποποιημένο σύστημα γείωσης και είναι ίδιος με αυτόν του προτύπου IEEE. Στην αρχή, υπάρχει την επιλογή υπολογισμού του  $I_G$ , αν η απάντηση είναι όχι εισάγεται η τιμή του  $I_G$  και το  $\rho$  και με το πάτημα του πλήκτρου "plot point(s)" αποτυπώνεται το σημείο στην ήδη υπάρχουσα καμπύλη απόδοσης ασφάλειας και γίνεται έλεγχος αν είναι επικίνδυνο ή όχι. Αν ο χρήστης επιλέξει να γίνει υπολογισμός του  $I_G$ , εμφανίζονται τα  $I_f$ ,  $S_f$  και  $D_f$  μαζί με την επιλογή να γίνει υπολογισμός του  $D_f$ . Αν ο χρήστης επιλέξει να μη γίνει υπολογισμός του  $D_f$  τότε εισάγει μια τιμή κατευθείαν για το  $D_f$ , διαφορετικά πρέπει να δώσει τιμές για τα πεδία που εμφανίζονται που είναι ο λόγος X/R και το  $t_f$ . Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα με υπολογισμό του  $I_G$  και υπολογισμό του  $D_f$  και τιμές  $I_f = 500$  A,  $S_f = 0.6$  p.u.,  $X/R = 10$ ,  $t_f = 0.5$  s και  $\rho = 100$   $\Omega$ m (Εικόνα 35).



Εικόνα 35: Έλεγχος συγκεκριμένης εγκατάστασης (πράσινος κύκλος) στην ήδη υπάρχουσα καμπύλη απόδοσης ασφάλειας.

Από το δεύτερο γράφημα φαίνεται ότι το σημείο που προκύπτει από τις τιμές που δόθηκαν είναι ασφαλές, αφού η τιμή του είναι χαμηλότερη από αυτήν του επιτρεπτού ορίου.

Παρακάτω, με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του λογισμικού, παρουσιάζονται 4 πίνακες όπου οι πρώτοι δύο είναι για την καμπύλη 6K, χωρίς τη χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης και  $R_{F1} = 1000 \Omega$  (Πίνακας 5) και με τη χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης και  $R_{F1} = 1000 \Omega$  (Πίνακας 6). Έπειτα οι επόμενοι δύο πίνακες αφορούν την ίδια καμπύλη χωρίς αρχικά (Πίνακας 7) και έπειτα με τη χρήση υλικού επιφανείας υψηλής ειδικής αντίστασης (Πίνακας 8), με  $R_{F1} = 0 \Omega$  και στις δύο περιπτώσεις. Ο κάθε πίνακας αποτελείται από την πρώτη στήλη όπου φαίνονται οι τιμές του ρεύματος, στη δεύτερη στήλη οι τιμές ειδικής αντίστασης όπως έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του MS Excel, στην τρίτη οι τιμές ειδικής αντίστασης που προέκυψαν από το λογισμικό και τέλος στη τέταρτη η διαφορά της τρίτης με τη δεύτερη στήλη σε ποσοστό. Από τους πίνακες αυτούς φαίνεται ότι δεν υπάρχει καμία διαφορά στα αποτελέσματα των υπολογισμών με αυτά του λογισμικού.

Πίνακας 5: 6K χωρίς  $\rho_s$  και  $R_{F1}=1000 \Omega$ .

$I_g$ (A)	$\rho_{\text{reference}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_{\text{software}}$ ( $\Omega\text{m}$ )	Difference
1000	166,3	166,33	0,02%
899,98	187,1	187,05	-0,03%
757,668	227,1	227,07	-0,01%
653,216	269,2	269,15	-0,02%
591,501	302,1	302,12	0,01%
500,304	369,1	369,06	-0,01%
412,107	471,9	471,89	0,00%
330,534	630,3	630,31	0,00%
268,832	843,9	843,9	0,00%
241,854	985,1	985,09	0,00%
208,4	1238	1238	0,00%
181,054	1567,7	1567,7	0,00%
155,042	2089,1	2089,1	0,00%
133,891	2875,2	2875,2	0,00%
115,386	4401,4	4401,4	0,00%
101,512	6905	6905	0,00%
82,0585	19126,1	19126	0,00%
74,3759	17090,8	17091	0,00%
67,5299	12687,5	12688	0,00%

61,3352	8169,8	8169,8	0,00%
55,3807	5148,4	5148,4	0,00%
50,0947	3124	3124	0,00%
50	3091,5	3091,5	0,00%
44,6709	1655,6	1655,6	0,00%
41,2887	1213	1213	0,00%
37,4089	916,1	916,06	0,00%
34,9854	819	818,98	0,00%
32,6013	776,5	776,52	0,00%
30,6111	783,4	783,37	0,00%
28,6072	794,9	794,87	0,00%
26,6836	800,6	800,65	0,01%
25,3351	811,8	811,77	0,00%
24,4198	817,6	817,63	0,00%
23,5642	816,6	816,56	0,00%
22,2996	838,4	838,36	0,00%
21,2601	840,1	840,09	0,00%
20,8561	837,7	837,7	0,00%
20,3821	842,9	842,91	0,00%
19,5636	885,6	885,57	0,00%
18,1829	974,7	974,69	0,00%
17,7575	999,7	999,73	0,00%
17,3458	1032,7	1032,7	0,00%
16,7899	1083,9	1083,9	0,00%
16,5741	969,8	969,81	0,00%
16,3355	991,6	991,58	0,00%
15,9027	1033,7	1033,7	0,00%
15,7259	1051,9	1051,9	0,00%
15,5844	1067	1067	0,00%
15,4709	1079,4	1079,4	0,00%
15,3248	1095,8	1095,8	0,00%
15,2155	1108,4	1108,4	0,00%
15,131	1118,3	1118,3	0,00%
15,0301	1130,4	1130,4	0,00%
14,898	1146,7	1146,7	0,00%
14,8862	1148,2	1148,2	0,00%
14,8219	1156,3	1156,3	0,00%
14,7804	1161,6	1161,6	0,00%
14,6727	1175,5	1175,5	0,00%
14,6667	1176,3	1176,3	0,00%
14,5583	1190,7	1190,7	0,00%
14,5573	1190,9	1190,9	0,00%
14,5015	1198,4	1198,4	0,00%

14,4555	1204,7	1204,7	0,00%
14,4076	1211,3	1211,3	0,00%
14,3425	1220,5	1220,5	0,00%
14,3205	1223,6	1223,6	0,00%
14,3096	1225,1	1225,1	0,00%
14,2936	1227,4	1227,4	0,00%
14,2089	1239,7	1239,7	0,00%

Πίνακας 6: 6K με χρήση  $\rho_s$  και  $R_{F1}=1000 \Omega$ .

$I_g$ (A)	$\rho_{\text{preference}}$ ( $\Omega m$ )	$\rho_{\text{software}}$ ( $\Omega m$ )	Difference
1000	1388,5	1388,5	0,00%
899,98	1536,5	1536,5	0,00%
757,668	1809,1	1809,1	0,00%
653,216	2078,5	2078,5	0,00%
591,501	2278,3	2278,3	0,00%
500,304	2657,1	2657,1	0,00%
412,107	3179,8	3179,8	0,00%
330,534	3864,4	3864,4	0,00%
268,832	4616,9	4616,9	0,00%
241,854	5031,2	5031,2	0,00%
208,4	5652,8	5652,8	0,00%
181,054	6295,3	6295,3	0,00%
155,042	7052,8	7052,8	0,00%
133,891	7842,3	7842,3	0,00%
115,386	8760,3	8760,3	0,00%
101,512	9524	9524	0,00%
82,0585	10565	10565	0,00%
74,3759	10493,4	10493	0,00%
67,5299	10249,3	10249	0,00%
61,3352	9745,7	9745,7	0,00%
55,3807	8996,5	8996,5	0,00%
50,0947	7904,4	7904,4	0,00%
50	7878,6	7878,6	0,00%
44,6709	6156,1	6156,1	0,00%
41,2887	5155,5	5155,5	0,00%
37,4089	4264,4	4264,4	0,00%
34,9854	3918,9	3918,9	0,00%
32,6013	3748,9	3748,9	0,00%
30,6111	3750,8	3750,8	0,00%
28,6072	3761,3	3761,3	0,00%
26,6836	3751,3	3751,3	0,00%



25,3351	3768,6	3768,6	0,00%
24,4198	3773,9	3773,9	0,00%
23,5642	3755,7	3755,7	0,00%
22,2996	3805,2	3805,2	0,00%
21,2601	3788,8	3788,8	0,00%
20,85612	3771,9	3771,9	0,00%
20,3821	3779,5	3779,5	0,00%
19,5636	3903,9	3903,9	0,00%
18,1829	4152,8	4152,8	0,00%
17,7575	4216,6	4216,6	0,00%
17,3458	4303,1	4303,1	0,00%
16,7899	4435,1	4435,1	0,00%
16,5741	4080,2	4080,2	0,00%
16,3355	4139,8	4139,8	0,00%
15,9027	4252,5	4252,5	0,00%
15,7259	4300,3	4300,3	0,00%
15,5844	4339,3	4339,3	0,00%
15,4709	4371,2	4371,2	0,00%
15,3248	4412,8	4412,8	0,00%
15,2155	4444,5	4444,5	0,00%
15,131	4469,4	4469,4	0,00%
15,0301	4499,4	4499,4	0,00%
14,898	4539,3	4539,3	0,00%
14,8862	4542,9	4542,9	0,00%
14,8219	4562,6	4562,6	0,00%
14,7804	4575,4	4575,4	0,00%
14,6727	4609	4609	0,00%
14,6667	4610,8	4610,8	0,00%
14,5583	4645,2	4645,2	0,00%
14,5573	4645,5	4645,5	0,00%
14,5015	4663,4	4663,4	0,00%
14,4555	4678,2	4678,2	0,00%
14,4076	4693,8	4693,8	0,00%
14,3425	4715,1	4715,1	0,00%
14,3205	4722,3	4722,3	0,00%
14,3096	4725,9	4725,9	0,00%
14,2936	4731,2	4731,2	0,00%
14,2089	4759,4	4759,4	0,00%

Πίνακας 7: 6K χωρίς  $\rho_s$  και  $R_{F1}=0 \Omega$ .

$I_g$ (A)	$\rho_{\text{reference}}$ ( $\Omega m$ )	$\rho_{\text{software}}$ ( $\Omega m$ )	Difference
1000	71,7	71,715	0,02%
899,98	80,8	80,759	-0,05%
757,668	98,3	98,313	0,01%
653,216	116,9	116,88	-0,02%
591,501	131,5	131,51	0,01%
500,304	161,3	161,33	0,02%
412,107	207,2	207,19	0,00%
330,534	278,9	278,91	0,00%
268,832	376,6	376,64	0,01%
241,854	442,2	442,21	0,00%
208,4	560,9	560,92	0,00%
181,054	716,9	716,93	0,00%
155,042	966,2	966,24	0,00%
133,891	1340,6	1340,6	0,00%
115,386	2057,4	2057,4	0,00%
101,512	3237	3237	0,00%
82,0585	9024,9	9024,9	0,00%
74,3759	8175,8	8175,8	0,00%
67,5299	6165,9	6165,9	0,00%
61,3352	4038,8	4038,8	0,00%
55,3807	2592,2	2592,2	0,00%
50,0947	1603,2	1603,2	0,00%
50	1587,1	1587,1	0,00%
44,6709	875,1	875,06	0,00%
41,2887	670,5	670,49	0,00%
37,4089	526,9	526,87	-0,01%
34,9854	479,1	479,13	0,01%
32,6013	459,5	459,52	0,00%
30,6111	466,8	466,81	0,00%
28,6072	477,9	477,88	0,00%
26,6836	485,8	485,84	0,01%
25,3351	495,4	495,43	0,01%
24,4198	501,1	501,08	0,00%
23,5642	502,8	502,77	-0,01%
22,2996	519,1	519,07	-0,01%
21,2601	523,6	523,58	0,00%
20,85612	523,6	523,61	0,00%
20,3821	528,2	528,2	0,00%
19,5636	555,5	555,5	0,00%
18,1829	612,3	612,35	0,01%

17,7575	628,9	628,92	0,00%
17,3458	650	649,97	0,00%
16,7899	682,5	682,48	0,00%
16,5741	619,5	619,52	0,00%
16,3355	633,4	633,43	0,00%
15,9027	660,3	660,33	0,00%
15,7259	672	671,98	0,00%
15,5844	681,6	681,61	0,00%
15,4709	689,5	689,53	0,00%
15,3248	700	700,01	0,00%
15,2155	708,1	708,06	-0,01%
15,131	714,4	714,41	0,00%
15,0301	722,1	722,14	0,01%
14,898	732,5	732,52	0,00%
14,8862	733,5	733,47	0,00%
14,8219	738,6	738,64	0,01%
14,7804	742	742,02	0,00%
14,6727	750,9	750,94	0,01%
14,6667	751,4	751,44	0,01%
14,5583	760,6	760,64	0,01%
14,5573	760,7	760,73	0,00%
14,5015	765,6	765,56	-0,01%
14,4555	769,6	769,58	0,00%
14,4076	773,8	773,82	0,00%
14,3425	779,7	779,66	-0,01%
14,3205	781,6	781,65	0,01%
14,3096	782,6	782,64	0,01%
14,2936	784,1	784,1	0,00%
14,2089	791,9	791,91	0,00%

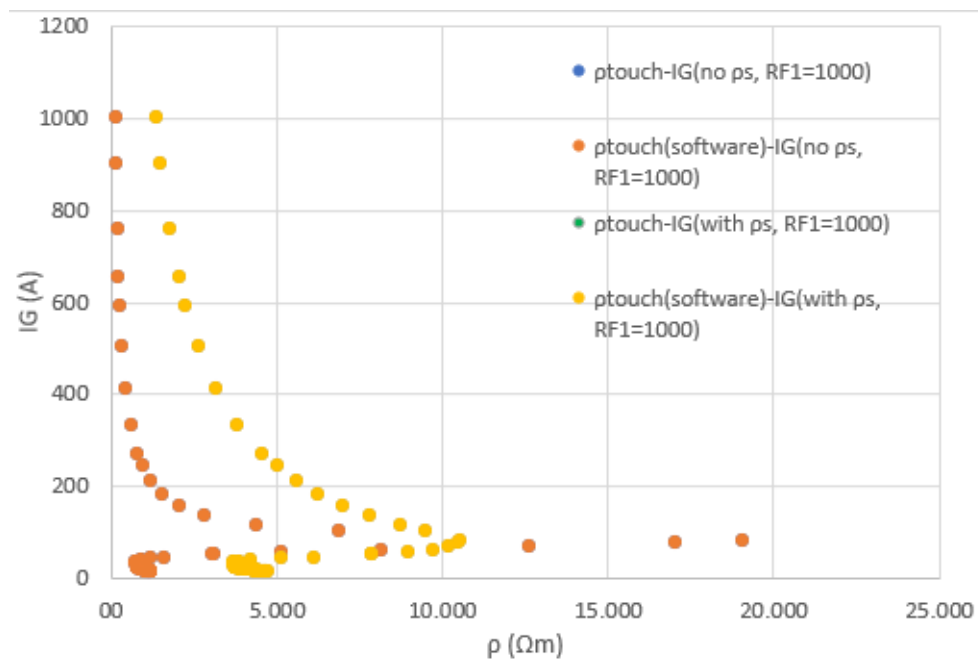
Πίνακας 8: 6K με  $\rho_s$  και  $R_{F1}=0 \Omega$ .

$I_g$ (A)	$\rho_{\text{reference}}$ ( $\Omega m$ )	$\rho_{\text{software}}$ ( $\Omega m$ )	Difference
1000	1305,6	1305,6	0,00%
899,98	1444,8	1444,8	0,00%
757,668	1701,2	1701,2	0,00%
653,216	1954,5	1954,5	0,00%
591,501	2142,4	2142,4	0,00%
500,304	2498,7	2498,7	0,00%
412,107	2990,3	2990,3	0,00%
330,534	3634,3	3634,3	0,00%
268,832	4342,2	4342,2	0,00%

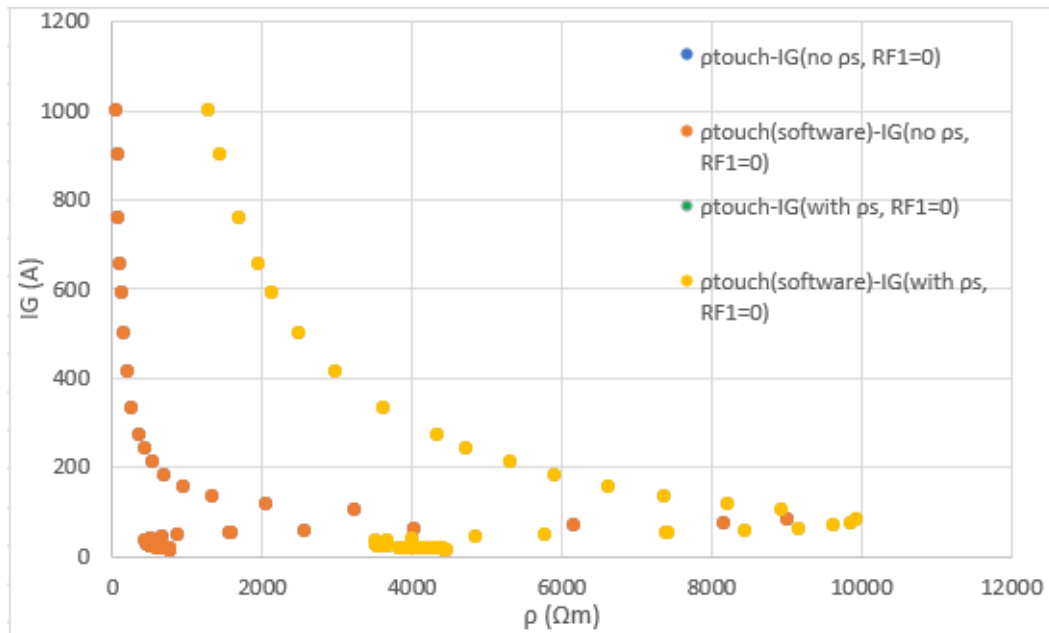
241,854	4732	4732	0,00%
208,4	5316,9	5316,9	0,00%
181,054	5921,5	5921,5	0,00%
155,042	6634,5	6634,5	0,00%
133,891	7377,5	7377,5	0,00%
115,386	8241,2	8241,2	0,00%
101,512	8959,9	8959,9	0,00%
82,0585	9939,6	9939,6	0,00%
74,3759	9873,1	9873,1	0,00%
67,5299	9644,4	9644,4	0,00%
61,3352	9171,7	9171,7	0,00%
55,3807	8467,7	8467,7	0,00%
50,0947	7440,9	7440,9	0,00%
50	7416,7	7416,7	0,00%
44,6709	5796,6	5796,6	0,00%
41,2887	4856,4	4856,4	0,00%
37,4089	4018,7	4018,7	0,00%
34,9854	3693,8	3693,8	0,00%
32,6013	3534,1	3534,1	0,00%
30,6111	3536,1	3536,1	0,00%
28,6072	3546,4	3546,4	0,00%
26,6836	3537,5	3537,5	0,00%
25,3351	3554,1	3554,1	0,00%
24,4198	3559,3	3559,3	0,00%
23,5642	3542,3	3542,3	0,00%
22,2996	3589,4	3589,4	0,00%
21,2601	3574,2	3574,2	0,00%
20,8561	3558,4	3558,4	0,00%
20,3821	3565,7	3565,7	0,00%
19,5636	3683,1	3683,1	0,00%
18,1829	3918	3918	0,00%
17,7575	3978,3	3978,3	0,00%
17,3458	4060	4060	0,00%
16,7899	4184,5	4184,5	0,00%
16,5741	3850,6	3850,6	0,00%
16,3355	3906,8	3906,8	0,00%
15,9027	4013,2	4013,2	0,00%
15,7259	4058,3	4058,3	0,00%
15,5844	4095,1	4095,1	0,00%
15,4709	4125,2	4125,2	0,00%
15,3248	4164,5	4164,5	0,00%
15,2155	4194,4	4194,4	0,00%
15,131	4217,8	4217,8	0,00%

15,0301	4246,1	4246,1	0,00%
14,898	4283,8	4283,8	0,00%
14,8862	4287,2	4287,2	0,00%
14,8219	4305,8	4305,8	0,00%
14,7804	4317,9	4317,9	0,00%
14,6727	4349,6	4349,6	0,00%
14,6667	4351,4	4351,4	0,00%
14,5583	4383,8	4383,8	0,00%
14,5573	4384,1	4384,1	0,00%
14,5015	4400,9	4400,9	0,00%
14,4555	4414,9	4414,9	0,00%
14,4076	4429,6	4429,6	0,00%
14,3425	4449,7	4449,7	0,00%
14,3205	4456,6	4456,6	0,00%
14,3096	4459,9	4459,9	0,00%
14,2936	4464,9	4464,9	0,00%
14,2089	4491,6	4491,6	0,00%

Παρακάτω στην Εικόνα 36, φαίνεται η σύγκριση των Πινάκων 5 και 6 για την καμπύλη 6Κ. Γίνεται η σύγκριση του  $\rho_{\text{touch}}-I_G$  και  $\rho_{\text{touch}(\text{software})}-I_G$  χωρίς και με  $\rho_s$  και για  $R_{F1} = 1000 \Omega$ . Στην Εικόνα 37, παρουσιάζονται πάλι οι συγκρίσεις καμπύλης απόδοσης ασφάλειας για την καμπύλη 6Κ χωρίς και με  $\rho_s$  και για  $R_{F1} = 0 \Omega$ .



Εικόνα 36: Σύγκριση τιμών  $\rho_{\text{touch}}-I_G$  και  $\rho_{\text{touch}(\text{software})}-I_G$  χωρίς και με  $\rho_s$  και  $R_{F1}=1000 \Omega$ .



Εικόνα 37: Σύγκριση τιμών  $\rho_{\text{touch}}-I_G$  και  $\rho_{\text{touch(software)}}-I_G$  χωρίς και με  $\rho_s$  και  $R_{F1}=0 \Omega$ .

Από τις Εικόνες 36 και 37 είναι ξεκάθαρο ότι οι καμπύλες ταυτίζονται με συνέπεια να επαληθεύεται η ορθή λειτουργία του λογισμικού και για το πρότυπο CENELEC EN 50522.

# Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική βελτίωση

---

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μια συμπερασματική σύνοψη όλων των προηγούμενων κεφαλαίων και παρουσιάζονται προτάσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μελλοντική βελτίωση του λογισμικού που αναπτύχθηκε.

## 6.1: Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, είναι σημαντικό το γεγονός ότι η ασφάλεια είναι κρίσιμη στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και επομένως στα συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης. Αν η παρεχόμενη ασφάλεια έναντι κινδύνου θανατηφόρου ηλεκτροπληξίας σε περίπτωση σφάλματος γης σε εγκατάσταση υψηλής τάσης δεν είναι επαρκής, ενδέχεται να κινδυνεύσει η ζωή ατόμων που βρίσκονται σε δυσμενή θέση όταν συμβεί ένα σφάλμα γης. Επιπλέον, μπορεί να παρουσιαστεί βλάβη ή και καταστροφή εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στο σύστημα. Έτσι, συνάγεται ότι πρέπει να γίνεται έλεγχος της παρεχόμενης ασφάλειας όλων των συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων υψηλής τάσης. Σε περιπτώσεις χρήσης τυποποιημένων συστημάτων γείωσης, όπως γίνεται σε ομοειδείς εγκαταστάσεις (π.χ. υποσταθμοί μέσης τάσης, πυλώνες, ανεμογεννήτριες) συχνά δεν ελέγχεται η ασφάλειά τους, με πιθανή την έκθεση ατόμων σε κίνδυνο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε με τη χρήση του MATLAB λογισμικό, το οποίο υλοποιεί μεθοδολογία εκτίμησης της ασφάλειας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης. Το λογισμικό διαθέτει γραφικό περιβάλλον και εφαρμόζει τα πρότυπα IEEE Std 80-2013 και CENELEC EN 50522:2022. Η λειτουργία του λογισμικού επαληθεύτηκε μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με αυτά που προέκυψαν από εφαρμογή της μεθοδολογίας με τη χρήση λογιστικού φύλλου. Με το λογισμικό αυτό καθίσταται εύκολη η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής με απλή εισαγωγή τιμών από τον χρήστη και χωρίς να χρειάζονται κοπιαστικοί αναλυτικοί υπολογισμοί ή η χρονοβόρα εκτέλεση πράξεων με λογιστικά φύλλα. Αυτό το εργαλείο μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό βοήθημα για την εύκολη και γρήγορη εκτίμηση ασφαλείας τυποποιημένων συστημάτων γείωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη χαρακτηριστική ρεύματος-χρόνου των μέσων προστασίας κάτι που συχνά δεν συμβαίνει στην πράξη και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά ζητήματα ασφαλείας.

## 6.2: Προτάσεις για το μέλλον

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται μερικές προσθήκες που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν, με στόχο την μελλοντική βελτίωση του λογισμικού που αναπτύχθηκε. Αρχικά, θα μπορούσε η έξοδος του λογισμικού να εμφανίζει επιπλέον και την απαιτούμενη απόσταση διαχωρισμού μεταξύ τυποποιημένων συστημάτων γείωσης υποσταθμών μέσης τάσης και της γείωσης του ουδέτερου χαμηλής τάσης μέσω της αντίστοιχης μεθοδολογίας της αναφοράς [12]. Έτσι, ο χρήστης θα είχε μια πλήρη εικόνα για την εκτίμηση της ασφάλειας του συστήματος γείωσης ενός υποσταθμού μέσης τάσης. Μια άλλη προσθήκη είναι να δίνεται δυνατότητα εισαγωγής καρτέλας Project για την εισαγωγή γενικών πληροφοριών, όπως για παράδειγμα λίστα με τα υπάρχοντα συστήματα γείωσης και τη θέση τους, φωτογραφιών των εγκαταστάσεων, αποθήκευση μετρήσεων ειδικής αντίστασης του εδάφους που έγιναν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές αλλά και μετρήσεων της αντίστασης γείωσης. Επίσης, θα μπορούσε να δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης της κάθε γενικής περίπτωσης συστήματος γείωσης σε ένα Project, το οποίο θα διευκόλυνε περαιτέρω τη χρήση του λογισμικού. Τέλος, θα μπορούσε να δοθεί η δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων σε pdf ή σε άλλη μορφή αρχείου, σε όπως και η δυνατότητα εκτύπωσης των τιμών.



# Βιβλιογραφία

---

- [1] Α. Αλεξοπούλου, «Συμβολή στη Μελέτη Συστημάτων Γείωσης», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2016 .
- [2] Δ. Τόκα, «Μελέτη Διατάξεων Γείωσης με Χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων», Διπλωματική Εργασία, Π.Δ.Μ., Κοζάνη, 2012.
- [3] Α. Β. Σακελλαρίου, «Επίδραση του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2014.
- [4] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 2, no. 4 pp. 1073-1081, Oct. 1987.
- [5] Ε. Βενετίου, «Προσομοίωση μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης», Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2012.
- [6] Χ. Λέτσιου, «Μετρήσεις αντιστάσεων γείωσης ηλεκτροδίων τύπου ράβδου», Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2017.
- [7] Β. Π. Ανδροβιτσανέα, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2011.
- [8] Ε. Καραγιάννη και Κ. Κυπαρισσία, «Μελέτη συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης τυπικών υποσταθμών διανομής υπό συνθήκες κεραυνικού πλήγματος», Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2017.
- [9] IEEE Std 80-2013, Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2015.
- [10] CENELEC EN 50522:2022, Earthing of Power Installations Exceeding 1 kV AC, 2022.
- [11] IEC TS 60479-1:2018, Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 1: General Aspects, 2018.
- [12] Z.G. Datsios and P.N. Mikropoulos, "Safety performance evaluation of typical grounding configurations of MV/LV distribution substations", Electric Power Systems Research, vol. 150, pp. 36-44, 2017.

[13] Α. Αδαμόπουλου, «MATLAB – Χρήση και Εφαρμογές σε Οικονομικά Μοντέλα», Διπλωματική Εργασία, ΠΑ.ΜΑΚ, Θεσσαλονίκη, 2006.