



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη Συστήματος Γείωσης για Στύλους Εξοπλισμένου Σκυροδέματος Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Λιανός

**Επιβλέπων :** Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου  
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη Συστήματος Γείωσης για Στύλους Εξοπλισμένου Σκυροδέματος Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Λιανός

**Επιβλέπων :** Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Επίκουρος Καθηγητής

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

.....  
Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου  
Επικ. Καθηγητής

.....  
Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Καθηγητής

.....  
Αντώνιος Αντωνόπουλος  
Επικ. Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....  
Λιανός Π. Γεώργιος

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

Copyright © Γεώργιος Π. Λιανός  
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 συνεχής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, η συνεχής επέκταση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων έχει φέρει στο προσκήνιο την επιτακτική ανάγκη υπογειοποίησης μεγάλου μέρους του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πιο συνηθισμένη σύνδεση ενός εναερίου συστήματος με ένα υπόγειο είναι με τη χρήση στύλων εξοπλισμένου σκυροδέματος όπου η σύνδεση μεταξύ τους γίνεται με τη χρήση διακόπτη αέρος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η συμπεριφορά συστημάτων γείωσης, τα οποία τοποθετούνται στις παραπάνω διακλαδώσεις του δικτύου συστήματος μεταφοράς, από εναέριο σε υπόγειο.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρέχεται μια γενική επισκόπηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση της δομής του δικτύου διανομής. Επίσης, γίνεται διάκριση μεταξύ εναέριων, υπογείων και υποβρύχιων δικτύων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κύριος εξοπλισμός προστασίας των δικτύων μέσης τάσης και αναλύεται ο ρόλος του στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, παρέχονται βασικοί ορισμοί και τεχνικές προστασίας για τα δίκτυα διανομής.

Το τρίτο κεφάλαιο εξετάζει τις βασικές έννοιες γείωσης και ασφάλειας στο δίκτυο διανομής. Συζητούνται οι συνηθέστερες μέθοδοι γείωσης, ο τρόπος μέτρησης της αντίστασης γείωσης, τα χαρακτηριστικά και η δομή του συστήματος γείωσης, καθώς και το μοντέλο του εδάφους στο οποίο εγκαθίσταται το σύστημα γείωσης. Επιπλέον, αναλύεται ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων.

Τέλος, στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις, τα μοντέλα προσομοίωσης και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση της επάρκειας τριών πλεγμάτων γείωσης που προσομοιώθηκαν. Τα αποτελέσματα της μελέτης αναλύονται και παρουσιάζονται με τη μορφή γραφημάτων και διαγραμμάτων από τα οποία έχουν διεξαχθεί κρίσιμα συμπεράσματα και προτάσεις βελτιστοποίησης των υπαρχόντων συστημάτων γείωσης.

**Λέξεις Κλειδιά:** σύστημα γείωσης, δίκτυο διανομής, ανάλυση βραχυκυκλώματος

## Abstract

The continuous increase in global electricity demand, the ongoing expansion of renewable energy generation systems, and the increasing occurrence of extreme weather events have brought to the forefront the urgent need for the undergrounding of a significant portion of the electricity transmission system. The most common connection between an overhead (aerial) system and an underground system is achieved using concrete poles with a disconnect switch.

In this thesis, we study the behavior of grounding systems that are installed in these branching points of the transmission network, transitioning from overhead to underground systems.

In the first chapter, we provide a general overview of the electrical energy system and conduct a detailed analysis of the distribution network's structure. Additionally, we differentiate between overhead, underground, and submarine networks.

In the second chapter, we present the main protection equipment for medium-voltage (MV) networks and analyze its role in electricity distribution. Moreover, we provide fundamental definitions and protection techniques for distribution networks.

The third chapter examines the basic concepts of grounding and safety in the distribution network. We discuss the most common grounding methods, methods for measuring ground resistance, characteristics, and the structure of the grounding system. We also address the soil model in which the grounding system is installed and discuss the design of these systems.

Finally, in the fourth and fifth chapter, we present the software used for simulations, simulation models, and the methodology followed for evaluating the adequacy of three grounding grids that were simulated. The results of the study are analyzed and presented in the form of graphs and diagrams, from which critical conclusions and optimization proposals for existing grounding systems have been derived.

Keywords: grounding system, distribution network, short-circuit analysis

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο, θέλω να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τον Επίκουρο Καθηγητή Χρήστο Χριστοδούλου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, παρέχοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με τη διπλωματική μου εργασία σε ένα θέμα που είχε μεγάλο ενδιαφέρον. Επίσης, θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον υποψήφιο διδάκτορα, Μανώλη Έλληνα, για την συνεργασία μας κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς την οικογένειά μου και όλα τα κοντινά μου πρόσωπα που με στήριξαν και συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ).

# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1. Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας .....</b>	<b>10</b>
1.1 Εισαγωγή .....	10
1.2 Δίκτυα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	10
1.3 Δίκτυα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	11
1.4 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	12
1.5 Αρχιτεκτονικές Δικτύου Διανομής ΜΤ .....	13
1.5.1 Ακτινικό Δίκτυο.....	13
1.5.2 Βροχοειδές Δίκτυο.....	13
1.5.3 Αραχνοειδές Δίκτυο .....	14
1.5.4 Ατρακτοειδές Σύστημα Διανομής.....	15
1.5.5 Δίκτυο Μικρών Βρόχων.....	16
1.6 Μορφή Δικτύου Διανομής ΧΤ.....	17
1.7 Βασικός Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής .....	17
1.7.1 Υποσταθμοί Υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και Ανύψωσης ΜΤ/ΥΤ.....	17
1.7.2 Εναέριας Γραμμής .....	18
1.7.3 Υπόγεια Καλώδια.....	20
1.7.4 Υποθαλάσσια Καλώδια.....	21
1.7.5 Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ.....	22
<b>Κεφάλαιο 2.Βραχυκυκλώματα και Λειτουργία Προστασίας Δικτύου Διανομής...23</b>	<b>23</b>
2.1 Εισαγωγή .....	23
2.2 Ανάλυση Σφαλμάτων Δικτύου.....	23
2.2.1 Είδη Σφαλμάτων.....	23
2.2.2 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης.....	24
2.3 Προστασία Δικτύου Διανομής.....	26
2.4 Βασικός Εξοπλισμός Προστασίας Δικτύου Διανομής .....	26
2.4.1 Ηλεκτρονόμοι Προστασίας(Η/Ν).....	26
2.4.1.1 Στιγμιαίοι Ηλεκτρονόμοι Προστασίας.....	27
2.4.1.2 Ηλεκτρονόμοι Σταθερού Χρόνου.....	27
2.4.1.3 Ηλεκτρονόμοι Αντίστροφου Χρόνου.....	27
2.4.2 Διακόπτες Ισχύος ( $\Delta/I$ ) .....	28
2.4.3 Διακόπτες Αυτόματης Επαναφοράς( $\Delta/AE,reclosers$ ) .....	31
2.4.4 Ασφάλειες - Ασφαλειοαποζεύκτες (A/Z) .....	31
2.4.5 Διακόπτες Απομόνωσης ( $\Delta/A$ ).....	32
2.5 Κανόνες Εφαρμογής Προστασίας Δικτύων Διανομής.....	33
<b>Κεφάλαιο 3. Περιγραφή Βασικών Εννοιών Γειώσεων στο Δίκτυο Διανομής.....35</b>	<b>35</b>
3.1 Εισαγωγή .....	35
3.2 Γείωση και Αντίσταση Γείωσης.....	35
3.3 Η Ηλεκτροπληξία και οι Επιπτώσεις της στον Άνθρωπο .....	38
3.4 Συστήματα Γείωσης ΜΤ/ΧΤ .....	41
3.5 Συστήματα Ηλεκτροδίων Γείωσης .....	45
3.5.1 Γειωτής Ράβδος .....	45
3.5.2 Γειωτής Πλάκας .....	45
3.5.3 Μεταλλικός Αγωγός Νερού .....	46
3.5.4 Μεταλλική Δομή Υποστήριξης στο Έδαφος.....	46
3.5.5 Ηλεκτρόδιο Καλυπτόμενο από Σκυρόδεμα.....	46
3.5.6 Περιμετρικός Γειωτής.....	47
3.5.7 Γειωτής Πλέγματος .....	47
3.5.8 Συνδυαστικές Μέθοδοι Γείωσης.....	48
<b>Κεφάλαιο 4.Παρουσίαση Λογισμικού Προσομοιώσεων .....</b>	<b>49</b>
4.1 Εισαγωγή .....	49



4.2 Παρουσίαση Λογισμικού PowerFactory .....	49
4.2.1 Δημιουργία Νέου Project.....	49
4.2.2 Χώρος Σχεδιασμού Νέου Project .....	51
4.2.3 Επεξεργασία Study Case.....	52
4.2.4 Εισαγωγή Βασικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	53
4.2.5 Υπολογισμός Ροής Φορτίου.....	55
4.2.6 Εκτέλεση Υπολογισμών Βραχυκυκλώματος.....	57
4.3 Παρουσίαση Λογισμικού SAS AutogridPro.....	58
4.3.1 Δημιουργία Νέας Μελέτης .....	59
4.3.2 Ρυθμίσεις χαρακτηριστικών Εδάφους.....	60
4.3.3 Ρυθμίσεις Συστήματος Γείωσης.....	61
4.3.4 Ρυθμίσεις και Επιλογές Ασφαλείας.....	62
4.3.5 Σχεδιασμός Συστήματος Γείωσης.....	64
<b>Κεφάλαιο 5-Ανάλυση &amp; Μελέτη Συστήματος Γείωσης σε τυπικό Δίκτυο Διανομής</b> .....	<b>67</b>
5.1 Προσομοίωση Συστήματος Γείωσης σε Τυπικό Δίκτυο Διανομής.....	67
5.2 Μελέτη Μοντέλου Συστημάτων Γείωσης.....	69
5.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	70
5.3.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Μοντέλου Γείωσης 1.....	70
5.3.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Μοντέλου Γείωσης 2.....	80
5.3.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Μοντέλου Γείωσης 3.....	86
5.4 Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	92
Βιβλιογραφία.....	95

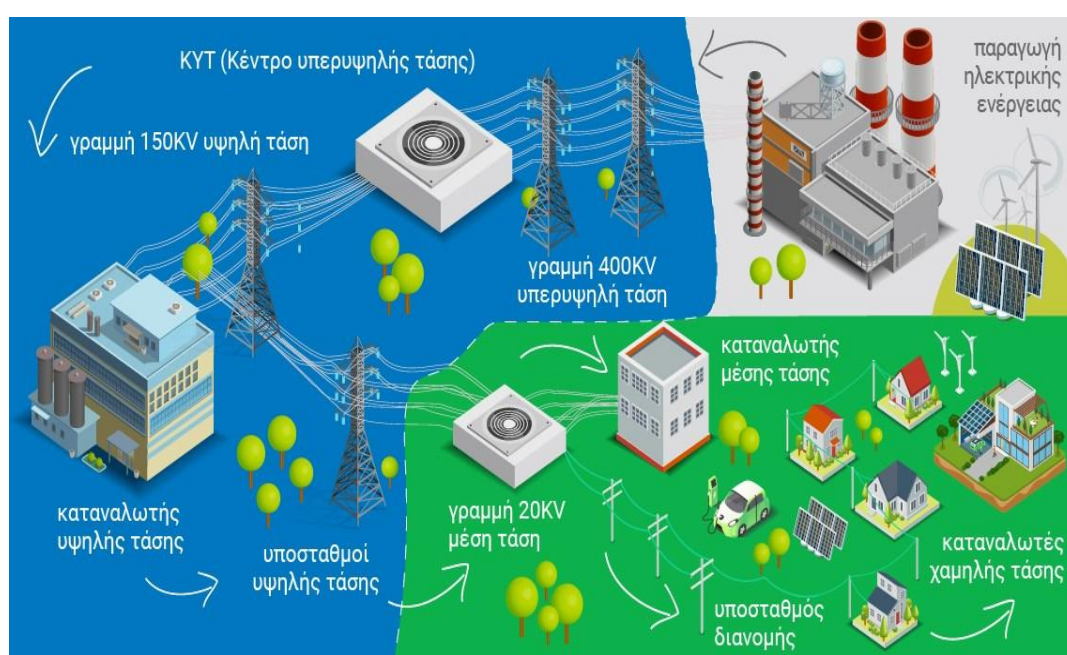
# Κεφάλαιο 1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

## 1.1 Εισαγωγή

Ο όρος Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αναφέρεται σε ένα σύνολο εξοπλισμού (Εικόνα 1) που αποτελείται από σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης, εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σκοπός του συστήματος είναι να εφοδιάζει αξιόπιστα τους καταναλωτές με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια, με υψηλή ποιότητα και χαμηλό κόστος. [1]

Γενικά τα ΣΗΕ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 3 υποσυστήματα.

- Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 1 Το Δίκτυο Ηλεκτρισμού. Παράγωγή (Άσπρο), Μεταφορά (Μπλε), Διανομή (Πράσινο). [6]

## 1.2 Δίκτυα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

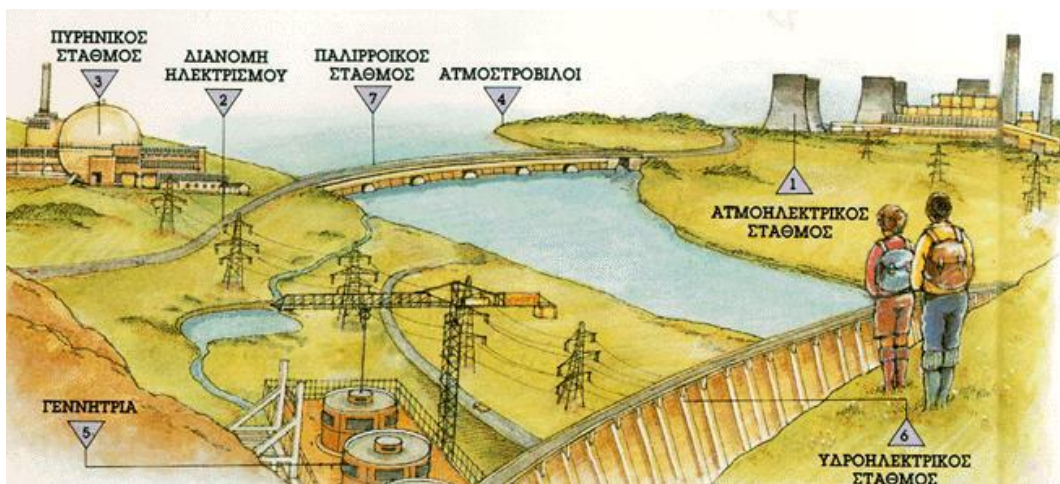
Τα δίκτυα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρονται στον συνολικό εξοπλισμό και τις υποδομές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα δίκτυα ουσιαστικά περιλαμβάνουν τους σταθμούς παραγωγής και τα συστήματα μεταφοράς ή αποθήκευσης της ενέργειας προς το δίκτυο μεταφοράς.

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να είναι διαφόρων τύπων, όπως:

1. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικά καύσιμα (Εικόνα 2): Αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν καύσιμα όπως άνθρακα, πετρέλαιο, πυρηνικά καύσιμα ή φυσικό αέριο για την παραγωγή ατμού, ο οποίος κινεί τους τουρμπίνες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Υδροηλεκτρικοί (Υ/Η) σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 2): Αυτοί οι σταθμοί εκμεταλλεύονται τη ροή νερού για την κίνηση των τουρμπινών και την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να είναι φράγματα, καταρράκτες ή παλιρροϊκοί σταθμοί.

3. Αιολικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 3): Αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν αιολικούς ανεμογεννήτριες για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του αέρα σε ηλεκτρική ενέργεια.
4. Ηλιακοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 3): Αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν ηλιακούς πίνακες ή συλλέκτες για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 2 Γενική Δομή Υ/Η και Σταθμών Θερμικών Καυσίμων. [2]



Εικόνα 3 Αιολικό και Φωτοβολταϊκό Πάρκο. [3]

### 1.3 Δίκτυα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν το σύνολο των υποδομών και των εξοπλισμών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς διανομής ή άλλους σταθμούς μεταβίβασης, προτού φθάσει στους τελικούς καταναλωτές.

Τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται από τα εξής στοιχεία:

1. Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ): Τα Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης στο Σύστημα Μεταφοράς λειτουργούν ως ενεργειακοί κόμβοι διασυνδέοντας το Σύστημα Μεταφοράς των 400kV με το Σύστημα των 150kV και εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την

ευστάθεια του Συστήματος. Παραλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο μεταφοράς 400kV και υποβιβάζουν την τάση σε 150kV, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω από τους Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ και να διανεμηθεί μέσω του δικτύου διανομής προς κατανάλωση.

2. Γραμμές Μεταφοράς: Οι γραμμές μεταφοράς είναι εναέριες, υπόγειες ή υποβρύχιες γραμμές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των υποσταθμών μεταβίβασης. Συνήθως λειτουργούν σε υψηλές τάσεις, όπως 66 kV, 150 kV, ή 400 kV, για να μειωθούν οι απώλειες ενέργειας κατά τη μεταφορά.
3. Υποσταθμοί Διανομής (150/20kV): Οι υποσταθμοί διανομής λαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια από τις γραμμές μεταφοράς και τη μετατρέπουν σε χαμηλότερη τάση, ώστε να είναι κατάλληλη για την παροχή στους τελικούς καταναλωτές.

Τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική και αξιόπιστη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτά τα δίκτυα συνεισφέρουν στην επίτευξη ενός σταθερού, αξιόπιστου και οικονομικού εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές. [4]

#### 1.4 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν το τελικό στάδιο της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους υποσταθμούς μεταβίβασης στους τελικούς καταναλωτές. Η λειτουργία, συντήρηση και ανάπτυξη υπό οικονομικούς όρους του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας και παράλληλα η διαχείριση των ηλεκτρικών συστημάτων αυτού είναι αρμοδιότητα του ΔΕΔΔΗΕ. Αυτά τα δίκτυα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Υποσταθμοί Διανομής: Οι υποσταθμοί διανομής αποτελούν το ενδιάμεσο σημείο μεταξύ των γραμμών μεταφοράς και των τελικών καταναλωτών. Σε αυτούς τους υποσταθμούς η τάση μειώνεται στα επίπεδα που είναι κατάλληλα για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.
2. Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (ΧΤ): Το δίκτυο χαμηλής τάσης είναι αυτό που συνδέει απευθείας τους τελικούς καταναλωτές με το δίκτυο διανομής. Η τάση σε αυτό το δίκτυο είναι συνήθως 230 V ή 400 V για οικιακούς καταναλωτές και μικρές επιχειρήσεις.
3. Δίκτυο Μέσης Τάσης (ΜΤ): Το δίκτυο μέσης τάσης συνδέει τους υποσταθμούς διανομής με τους υποσταθμούς μεταβίβασης και τους μεγαλύτερους καταναλωτές. Η τάση σε αυτό το δίκτυο κυμαίνεται συνήθως στα 20 kV.
4. Συνδέσεις Καταναλωτών: Οι καταναλωτές συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσω διάφορων συνδέσεων, όπως απλές συνδέσεις, τριφασικές συνδέσεις ή συνδέσεις υψηλής τάσης.
5. Συστήματα Εποπτείας Διαχείρισης και Τηλεχειρισμού Δικτύου: Τα δίκτυα διανομής είναι εξοπλισμένα με συστήματα προστασίας και ελέγχου που παρακολουθούν την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου. Αυτά τα συστήματα ανιχνεύουν και απομονώνουν τυχόν βλάβες όπως βραχυκυκλώματα ή υπερφόρτιση, προστατεύοντας το δίκτυο και τους καταναλωτές από πιθανούς κινδύνους.
6. Μετρητικά συστήματα: Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης στις συνδέσεις με τους καταναλωτές.

Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπουν την αποτελεσματική και ασφαλή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές σε οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς χώρους. Τα δίκτυα διανομής σχεδιάζονται με γνώμονα την αξιοπιστία, την απόδοση και την οικονομικότητα, προκειμένου να καλύπτουν τις ανάγκες της ηλεκτρικής ενέργειας σε μια περιοχή. [5]

## 1.5 Αρχιτεκτονικές Δικτύου Διανομής ΜΤ

Η διανομή και η ποιότητα ισχύος παραμένουν οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κλάδος των ηλεκτρικών επιχειρήσεων κοινής ωφελείας. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού και αρχιτεκτονικής για μια δεδομένη εφαρμογή σημαίνει τη διαφορά μεταξύ επιτυχίας και αποτυχίας. [8]

### 1.5.1 Ακτινικό Δίκτυο Διανομής

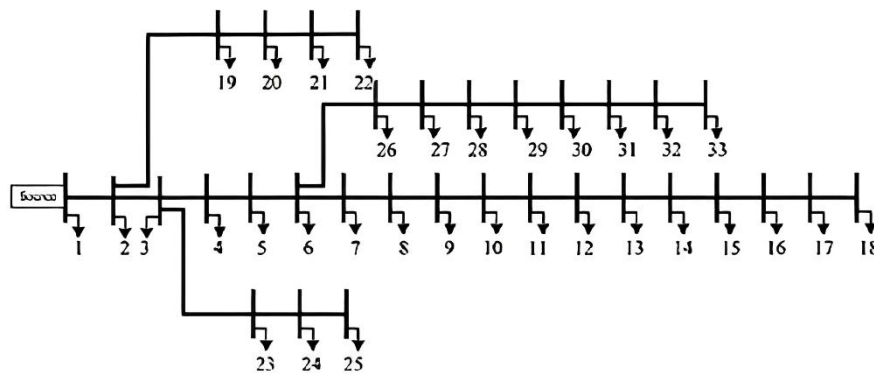
Η ακτινική αρχιτεκτονική για ένα δίκτυο διανομής αναφέρεται σε ένα τύπο δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι γραμμές διανομής ξεκινούν ακτινωτά από έναν κεντρικό υποσταθμό (Εικόνα 4). Αυτό το σύστημα διανομής είναι η πιο κοινή μορφή δικτύου που χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κατοικίες, επιχειρήσεις και βιομηχανίες.

Στο ακτινικό σύστημα διανομής, ο υποσταθμός λειτουργεί ως κεντρικό σημείο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Από τον υποσταθμό, ένα ή περισσότερα δίκτυα απλώνονται σε διάφορες κατευθύνσεις, με τις γραμμές διανομής να διακλαδίζονται από αυτά τα δίκτυα.

Στα παρακλάδια των γραμμών διανομής, το σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μετασχηματιστές για τη μείωση της τάσης σε χαμηλότερα επίπεδα προκειμένου να τροφοδοτηθούν κατοικίες και επιχειρήσεις.

Η δομή του ακτινικού συστήματος διανομής επιτρέπει τη σχετικά απλή σχεδίαση και λειτουργία. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι οι διακοπές ρεύματος σε ένα σημείο του δικτύου μπορεί να επηρεάσουν ολόκληρο το αντίστοιχο παρακλάδι. Επίσης, με την αύξηση του φορτίου και την απόσταση από τον υποσταθμό, μπορεί να παρουσιαστούν απώλειες ισχύος και πτώση τάσης.

Γενικά, τα ακτινικά συστήματα διανομής αποτελούν μια συνηθισμένη και αξιόπιστη μορφή δικτύου για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε καταναλωτές σε μεγάλη κλίμακα. [6]



Εικόνα 4 Μορφή ακτινικού δικτύου διανομής. [6]

### 1.5.2 Βροχοειδές Δίκτυο Διανομής

Ένα σύστημα διανομής βροχοειδούς αρχιτεκτονικής είναι ένας τύπος δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι γραμμές διανομής σχηματίζουν έναν κλειστό βρόχο ή δακτύλιο, συνδέοντας τον υποσταθμό με τους καταναλωτές (Εικόνα 5). Αυτό το σύστημα επιτρέπει τη δυνατότητα για πολλαπλές διαδρομές μεταξύ των σημείων παραγωγής και κατανάλωσης.

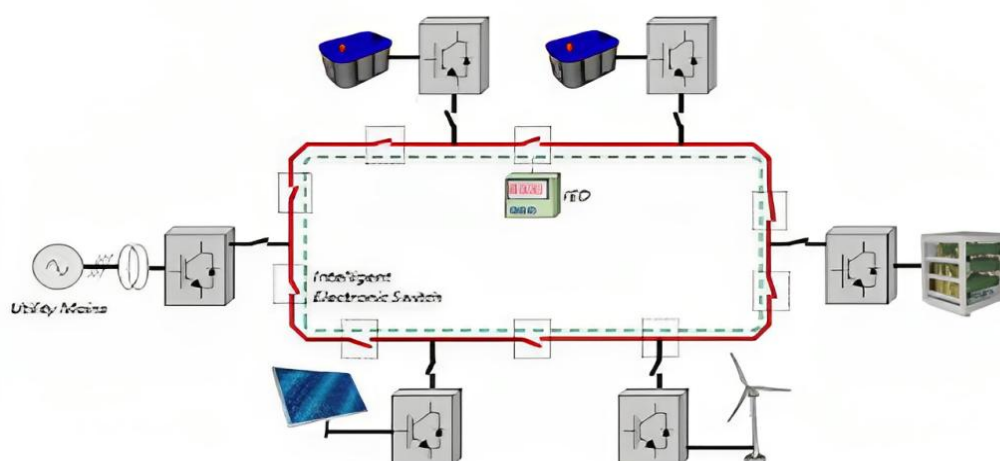
Στο βροχοειδές σύστημα διανομής, η ηλεκτρική ενέργεια ρέει από τον υποσταθμό κατά μήκος των γραμμών διανομής και επιστρέφει πίσω στον υποσταθμό μέσω άλλων διαδρομών. Αυτό δημιουργεί έναν κλειστό βρόχο ροής ενέργειας.

Τα βροχοειδή συστήματα διανομής παρέχουν ορισμένα πλεονεκτήματα. Καθώς υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές για την ενέργεια, υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ευελιξία στο δίκτυο. Αν εμφανιστεί διακοπή σε μία γραμμή διανομής, η ενέργεια μπορεί να ρέει μέσω άλλων διαδρομών για να εξασφαλιστεί η συνεχής τροφοδοσία των καταναλωτών.

Επιπλέον, τα βροχοειδή συστήματα διανομής επιτρέπουν την ευκολότερη παρακολούθηση και έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς κάθε γραμμή διανομής μπορεί να παρακολουθείται ξεχωριστά.

Ωστόσο, τα βροχοειδή συστήματα διανομής μπορεί να είναι πιο δαπανηρά στην κατασκευή και τη συντήρηση σε σύγκριση με τα ακτινικά συστήματα. Επίσης, οι διακοπές ρεύματος μπορεί να επηρεάσουν έναν μεγαλύτερο αριθμό καταναλωτών, καθώς μια διακοπή σε μία γραμμή διανομής μπορεί να διακόψει την παροχή ενέργειας σε ολόκληρο τον βρόχο.

Συνολικά, τα βροχοειδή συστήματα διανομής χρησιμοποιούνται ευρέως για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε πόλεις και μεγάλες κατοικημένες περιοχές, προσφέροντας υψηλή αξιοπιστία και ευελιξία στο δίκτυο. [6]



Εικόνα 5 Μορφή βροχοειδούς δικτύου διανομής. [6]

### 1.5.3 Αραχνοειδές Δίκτυο Διανομής

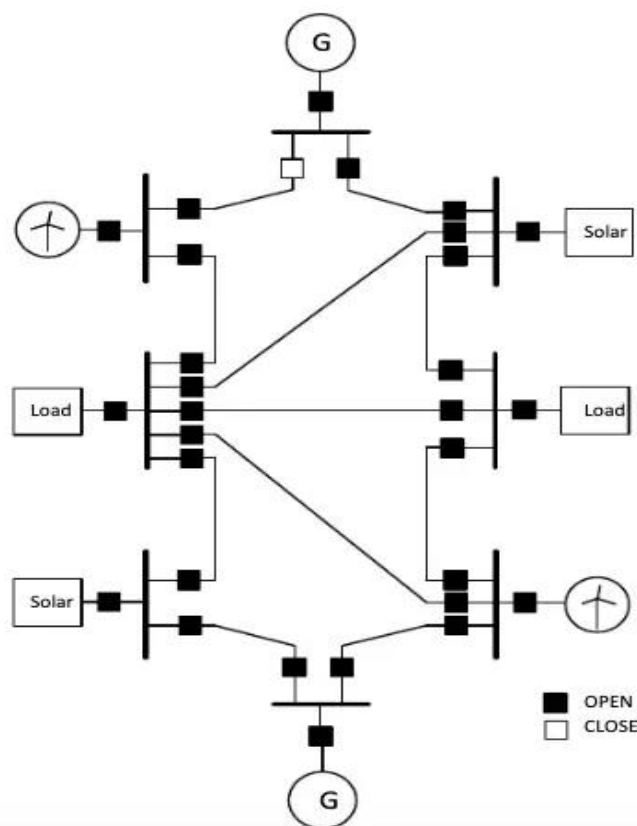
Το αραχνοειδές δίκτυο διανομής αναφέρεται σε ένα σύστημα δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι γραμμές διανομής συνδέονται μεταξύ τους σε ένα περίπλοκο μοτίβο που μοιάζει με τον ιστό μίας αράχνης (Εικόνα 6). Αυτό το σύστημα είναι σχεδιασμένο για να παρέχει αξιόπιστη και αποδοτική διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολυσύχναστες περιοχές.

Τα χαρακτηριστικά του αραχνοειδούς δικτύου διανομής περιλαμβάνουν:

- **Συνδεσιμότητα:** Οι γραμμές διανομής συνδέονται μεταξύ τους σε πολλά σημεία, δημιουργώντας έναν πλούσιο αραχνοειδή ιστό. Αυτό επιτρέπει πολλαπλές διαδρομές για την κυκλοφορία της ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας την ευελιξία και την αντοχή σε περίπτωση διακοπών ή βλαβών.

- **Αξιοπιστία:** Η συνδεσιμότητα και η πολλαπλή διαδρομή του αραχνοειδούς δικτύου μειώνουν τον κίνδυνο διακοπών ρεύματος. Αν μία γραμμή διανομής αποτύχει, η ενέργεια μπορεί να ρέει μέσω άλλων διαδρομών για να διασφαλιστεί η συνεχής τροφοδοσία των καταναλωτών.
- **Ευκολία συντήρησης:** Η δομή του αραχνοειδούς δικτύου διευκολύνει την παρακολούθηση, τη συντήρηση και την αποκατάσταση βλαβών. Οι τεχνικοί μπορούν να απομονώσουν τμήματα του δικτύου για επισκευές ή συντήρηση χωρίς να διακόπτεται η παροχή ρεύματος σε όλη την περιοχή.

Τα αραχνοειδή συστήματα διανομής χρησιμοποιούνται συχνά σε πόλεις και πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία του δικτύου και αποδοτική διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας. [30]



Εικόνα 6 Μορφή αραχνοειδούς δικτύου διανομής. [30]

#### 1.5.4 Ατρακτοειδές Σύστημα Διανομής

Το ατρακτοειδές σύστημα διανομής αναφέρεται σε έναν τύπο δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι γραμμές διανομής συνδέονται με ένα κεντρικό σημείο, σχηματίζοντας έναν άτρακτο σχηματισμό (Εικόνα 7). Σε αυτό το σύστημα, η ενέργεια ρέει από τον κεντρικό υποσταθμό προς τους καταναλωτές μέσω των γραμμών διανομής.

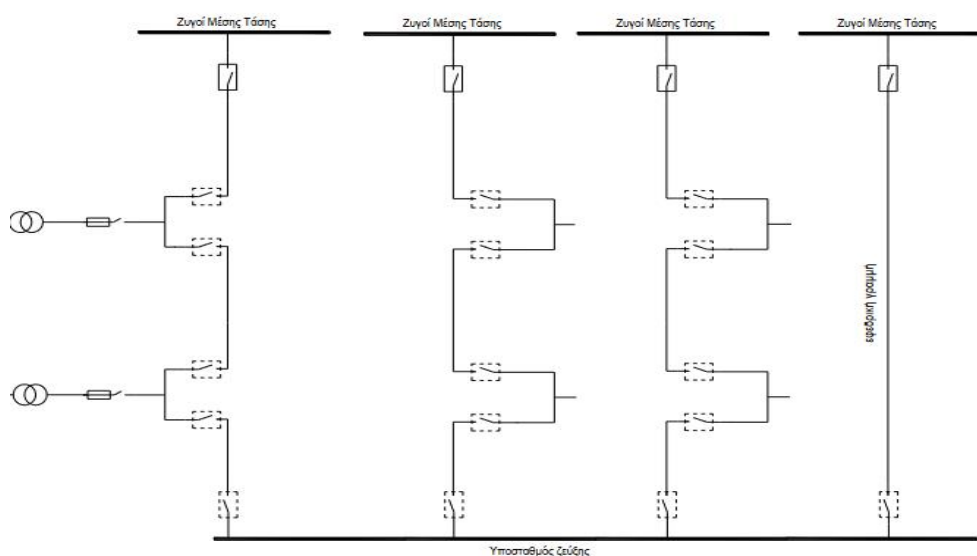
Οι βασικές χαρακτηριστικές του ατρακτοειδούς συστήματος διανομής περιλαμβάνουν:

1. Ένα κεντρικό σημείο διανομής: Υπάρχει ένας κεντρικός υποσταθμός από όπου προέρχεται η ηλεκτρική ενέργεια για τους καταναλωτές. Αυτό το σημείο μπορεί να είναι ένας μεγάλος υποσταθμός που συνδέεται με το δίκτυο υψηλής τάσης.

2. Γραμμές διανομής από τον κεντρικό υποσταθμό προς τους καταναλωτές: Οι γραμμές διανομής σχηματίζουν μία άτρακτο γύρω από τον κεντρικό υποσταθμό και συνδέονται με τους καταναλωτές. Αυτές οι γραμμές μπορούν να είναι χαμηλής, μεσαίας ή υψηλής τάσης, ανάλογα με τις απαιτήσεις της περιοχής.

3. Απλή δομή: Το ατρακτοειδές σύστημα διανομής έχει μια απλή δομή, με τις γραμμές να συνδέονται απευθείας με τον κεντρικό υποσταθμό. Αυτό διευκολύνει την εγκατάσταση, τη συντήρηση και την αποκατάσταση βλαβών στο δίκτυο.

Τα ατρακτοειδή συστήματα διανομής χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιοχές με λιγότερη πυκνότητα κατοίκων και μικρότερη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό το σύστημα είναι πιο απλό και οικονομικό σε σύγκριση με τα βροχοειδή ή ακτινικά συστήματα διανομής, αλλά μπορεί να παρουσιάζει περιορισμένη ευελιξία και αξιοπιστία σε περίπτωση βλαβών ή διακοπών. [7]



Εικόνα 7 Μορφή ατρακτοειδούς συστήματος διανομής. [7]

### 1.5.5 Δίκτυο Μικρών Βρόχων

Ένα δίκτυο διανομής MT (Μέσης Τάσης) μικρών βρόχων (Εικόνα 8) αναφέρεται σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι γραμμές διανομής σχηματίζουν μικρούς ανεξάρτητους βρόχους. Κάθε βρόχος αποτελεί έναν κλειστό κύκλωμα που περιλαμβάνει γραμμές διανομής, μετασχηματιστές διανομής και καταναλωτές.

Οι βασικές χαρακτηριστικές ενός δικτύου διανομής MT μικρών βρόχων περιλαμβάνουν:

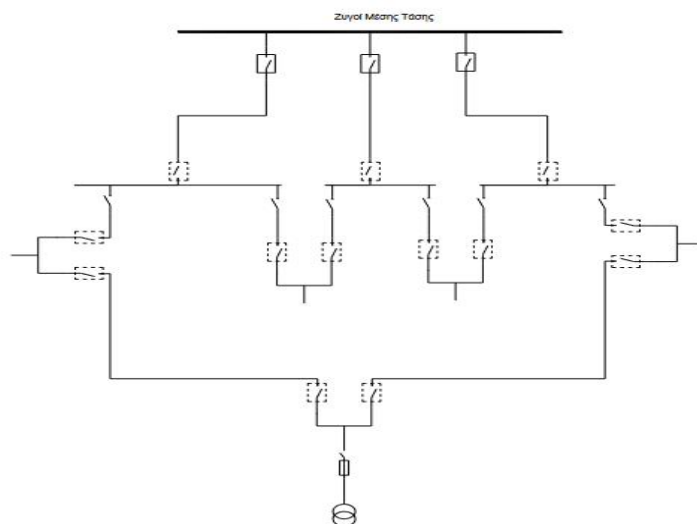
1. Μικροί ανεξάρτητοι βρόχοι: Οι γραμμές διανομής σχηματίζουν μικρούς ανεξάρτητους βρόχους, όπου ο κάθε βρόχος εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη περιοχή ή γειτονιά. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει την ευελιξία και την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς η διακοπή ή βλάβη σε έναν βρόχο δεν επηρεάζει τους υπόλοιπους.

2. Μετασχηματιστές διανομής: Σε κάθε βρόχο υπάρχουν μετασχηματιστές διανομής που υποβιβάζουν τη μέση τάση σε χαμηλή τάση για την τροφοδοσία των καταναλωτών. Οι μετασχηματιστές διανομής είναι τοποθετημένοι σε σταθμούς διανομής και διασφαλίζουν την αποτελεσματική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλή τάση προς τους καταναλωτές.



3. Καταναλωτές: Οι καταναλωτές συνδέονται στο δίκτυο διανομής MT μικρών βρόχων και λαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χαμηλή τάση για τις ανάγκες τους. Οι καταναλωτές μπορεί να είναι κατοικίες, επιχειρήσεις, βιομηχανίες ή δημόσιες υποδομές.

Τα δίκτυα διανομής MT μικρών βρόχων είναι κατάλληλα για περιοχές μεσαίου μεγέθους όπου οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά μικρές. Αυτά τα δίκτυα παρέχουν αξιόπιστη και αποτελεσματική διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές σε μικρή κλίμακα. [7]



Εικόνα 8 Μορφή δικτύου μικρών βρόχων. [7]

## 1.6 Μορφή Δικτύου Διανομής XT

Η μορφή του δικτύου διανομής XT περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες:

- Ακτινικό σύστημα: Σε αυτό το σύστημα, υπάρχει μία κεντρική γραμμή που εξέρχεται από τους ζυγούς του μετασχηματιστή MT/XT. Από την κεντρική γραμμή διακλαδίζονται άλλες γραμμές με μικρότερη διατομή που συνδέονται με τους καταναλωτές, είτε απευθείας είτε μέσω καλωδίων παροχής.
- Βροχοειδές σύστημα: Σε αυτό το σύστημα, η κεντρική γραμμή ξεκινά και τερματίζει από τους ζυγούς XT ενός άλλου μετασχηματιστή MT/XT δημιουργώντας έναν βρόχο. Έτσι επιτυγχάνεται ένα αμφίδρομο δίκτυο διανομής που πάνω μπορούν να συνδέονται και μικροί παραγωγοί αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του αλλά ταυτόχρονα και το κόστος κατασκευαστής του.
- Αραχνοειδές σύστημα: Σε αυτό το σύστημα, κάθε αναχώρηση έχει δυνατότητα διασύνδεσης με 2-3 άλλες αναχωρήσεις, σχηματίζοντας ένα είδος ιστού αράχνης. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται κυρίως σε υπόγεια δίκτυα σε αστικά κέντρα.

## 1.7 Βασικός Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής

### 1.7.1 Υποσταθμοί Υποβιβασμού YT/MT και Ανύψωσης MT/YT

Οι υποσταθμοί υποβιβασμού και ανύψωσης υψηλής τάσης ή YT/MT, MT/YT είναι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούν σημαντικό μέρος του ηλεκτρικού δικτύου και συνδέονται με τους υψηλότερης

τάσης υποσταθμούς που λειτουργούν στο επίπεδο τάσης του εθνικού ή περιφερειακού δικτύου.

Οι υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ διαθέτουν μετασχηματιστές που μειώνουν την τάση από υψηλή σε μεσαία ενώ οι ΜΤ/ΥΤ το ακριβώς αντίθετο. Οι υποσταθμοί υποβιβασμού χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους υψηλότερης τάσης υποσταθμούς στους μέσης τάσης υποσταθμούς, προκειμένου να διανεμηθεί στους τελικούς καταναλωτές, όπως βιομηχανίες, επιχειρήσεις, οικιακούς καταναλωτές κ.λπ.

Αντίθετα, οι υποσταθμοί ΜΤ/ΥΤ βρίσκονται κατά κύριο λόγο μετά από παραγωγικές μονάδες για να ανυψώνουν την τάση μεταφοράς της παραγωγής που αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών μεταφοράς.

Γενικά οι υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ ή ΜΤ/ΥΤ πέραν των κεντρικών μετασχηματιστών ανύψωσης ή υποβιβασμού συνήθως είναι εξοπλισμένοι με δευτερεύοντες μετασχηματιστές ΧΤ για κάλυψη εσωτερικών αναγκών σε ενέργεια των υποσταθμών (π.χ. φωτισμός). Άλλος εξοπλισμός που διαθέτουν είναι, ασφαλειοδιακόπτες, διακόπτες αποσύνδεσης, προστασία από υπερτάσεις και μετρητές. Επίσης, μπορεί να περιλαμβάνουν συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού για την πιο ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία τους.

Οι υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ και ΜΤ/ΥΤ είναι κρίσιμοι για τη σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες περιοχές και απαιτούν τη συνεχή συντήρηση και παρακολούθηση για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία τους.

### 1.7.2 Εναέριες Γραμμές

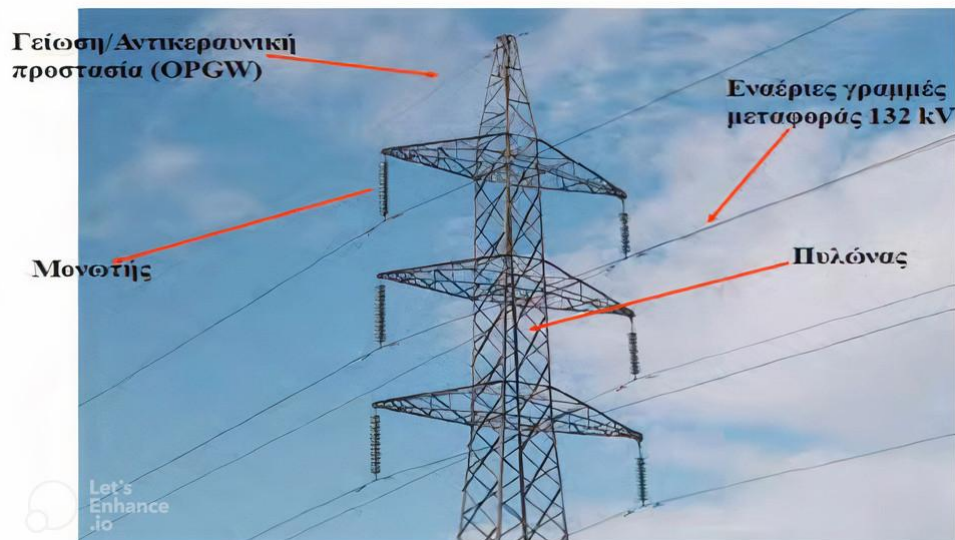
Οι εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 9) είναι γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που εγκαθίστανται επάνω στο έδαφος, συνήθως υποστηριζόμενες από ψηλούς στύλους ή πύργους. Αυτές οι γραμμές μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς και στη συνέχεια τη διανέμουν σε σπίτια, επιχειρήσεις και άλλες εγκαταστάσεις.[29]

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά βασικά χαρακτηριστικά και εξαρτήματα αυτών:

- **Αγωγοί:** Οι αγωγοί είναι οι καλωδιώσεις που μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Συνήθως είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο ή χαλκό και σχεδιάζονται με χαμηλή αντίσταση και υψηλή αντοχή για να υποστηρίξουν το βάρος της γραμμής.
- **Μονωτήρες:** Οι μονωτήρες (Εικόνα 10) χρησιμοποιούνται για να υποστηρίξουν τους αγωγούς και να τους μονώνουν από τις υποστηρικτικές δομές. Αποτρέπουν τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τον αγωγό προς το έδαφος ή άλλα αντικείμενα, εξασφαλίζοντας ασφαλή και αποτελεσματική μετάδοση.
- **Πύργου/Στύλοι Μετάδοσης:** Αυτές οι δομές (Εικόνα 11) παρέχουν υποστήριξη και υψομετρική τοποθέτηση για τις εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα ή σκυρόδεμα και σχεδιάζονται για να αντέχουν το βάρος των αγωγών και να αντέχουν σε κλιματικές συνθήκες όπως οι ισχυροί άνεμοι και ο πάγος.
- **Διασταυρούμενοι Βραχίονες και Εξαρτήματα:** Οι διασταυρούμενοι βραχίονες είναι οριζόντιες δομές που συνδέονται με τους πύργους ή τους στύλους και κρατούν τους μονωτήρες και τους αγωγούς στη θέση τους. Εξαρτήματα όπως βίδες, σφιγκτήρες και στηρίγματα συγκρατούν τα στοιχεία με ασφάλεια μεταξύ τους.

- **Γείωση:** Η γείωση αποτελεί ένα απαραίτητο χαρακτηριστικό ασφαλείας των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας. Παρέχει ένα δρόμο για το ρεύμα σφάλματος να ρέει ασφαλώς προς τη γη, προστατεύοντας τον εξοπλισμό και τους ανθρώπους από ηλεκτρικούς κινδύνους.
- **Προστασία από Κεραυνούς:** Οι εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι ευάλωτες σε κεραυνούς. Για να ελαχιστοποιηθεί η ζημιά από κεραυνούς, εγκαθίστανται ειδικοί προστατευτικοί αποστολείς κεραυνού και συσκευές προστασίας για να ανακατευθύνουν την υπερβολική ηλεκτρική ενέργεια προς τη γη.

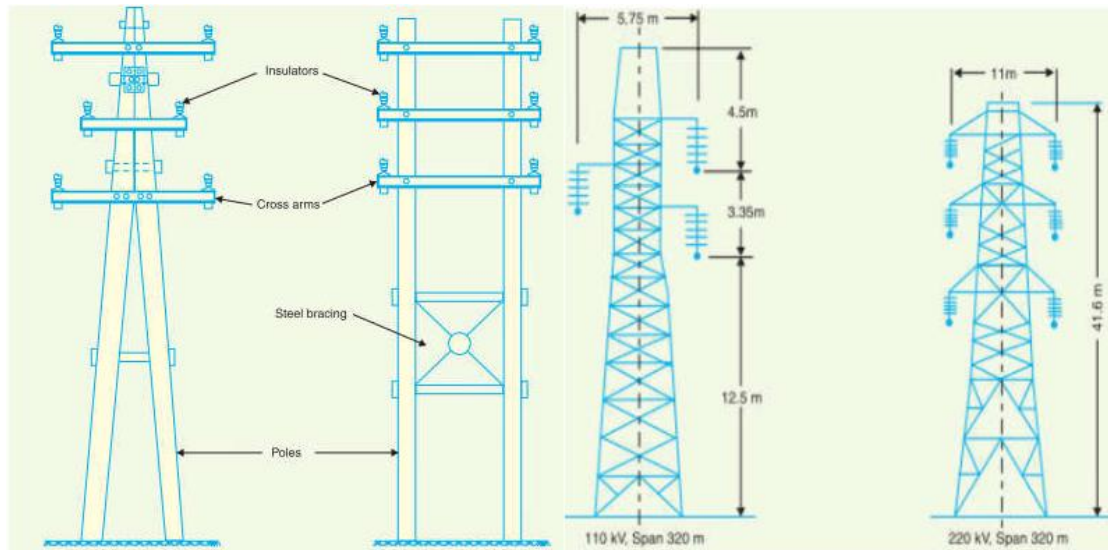
Οι εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας εγκατάστασης και συντήρησης. Ωστόσο, μπορούν να επηρεαστούν από καιρικές συνθήκες, όπως ισχυροί άνεμοι, καταιγίδες και συσσωρευμένος πάγος, που μπορεί να προκαλέσουν διακοπές ρεύματος και διαταραχές .



Εικόνα 9 Εναέρια Γραμμή Μεταφοράς. [12]



Εικόνα 10 Μονωτήρες Ξύλινου(αριστερά), Μεταλλικού (δεξιά) πυλώνα. [11]

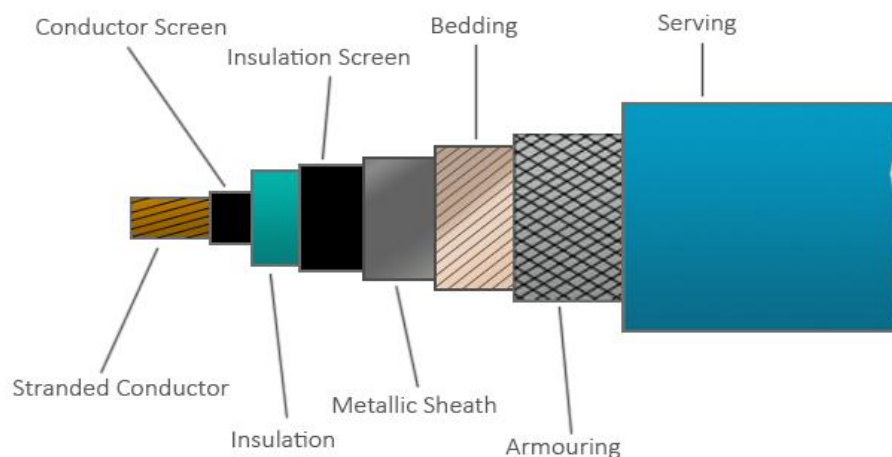


Εικόνα 11 Πυλώνας εναέριων γραμμών υψηλής τάσης ξύλινοι μέσης/χαμηλής τάσης (αριστερά) , μεταλλικοί υψηλής τάσης(δεξιά). [11]

### 1.7.3 Υπόγεια Καλώδια

Εκτός από τις εναέριες γραμμές που συναντούμε καθημερινά, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί επίσης να μεταφέρεται και να διανέμεται χρησιμοποιώντας υπόγεια καλώδια. Αυτά τα υπόγεια καλώδια φυσικά έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Εκτός από την καλύτερη γενική εμφάνιση και τον μικρότερο παρεμβολή με άλλες υποδομές, τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν μικρότερες απώλειες τάσης και μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης βλαβών. Από την άλλη πλευρά, έχουν υψηλότερο κόστος παραγωγής και εγκατάστασης και χρησιμοποιούνται, συνεπώς, όπου οι αέριες γραμμές δεν είναι εφικτές λόγω πρακτικών περιορισμών ή των συνδεδεμένων κινδύνων. Επομένως, τα χρησιμοποιούμε σε συγκεκριμένα μέρη, όπως αστικές περιοχές με υψηλές πυκνότητες πληθυσμού και πάνω από υδάτινες επιφάνειες (όπως υποθαλάσσια καλώδια).

Ένα τυπικό υπόγειο καλώδιο (Εικόνα 12) αποτελείται από έναν αγωγό/ους που καλύπτονται από έναν αριθμό μονωτικών και προστατευτικών στρωμάτων που είναι απαραίτητα για την ικανοποιητική λειτουργία του. [9]



Εικόνα 12 Μορφή υπόγειου καλωδίου. [9]

- Αγωγός: Συνήθως χρησιμοποιείται 1 ή 3 αγωγοί (ανάλογα με την εφαρμογή). Οι αγωγοί αυτοί είναι συρματοποιημένοι για να μειωθούν τα επιδερμικά και πεδιακά φαινόμενα

καθώς και για να παραμείνουν εύκαμπτοι. Οι αγωγοί είναι φτιαγμένοι από χαλκό ή αλουμίνιο.

- Προστασία αγωγού: Είναι μια ημιαγώγιμη ταινία ή μια στρώση ενός ημιαγώγιμου υλικού. Η προστασία του αγωγού χρησιμοποιείται συνήθως σε καλώδια μεσαίας και υψηλής τάσης για τη διατήρηση ομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου και την ελαχιστοποίηση των ηλεκτροστατικών επιβαρύνσεων.
- Μόνωση: Παρέχεται για την αντοχή στο ηλεκτροστατικό φορτίο. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι (και πάχη) μονωτικών όπως VIR (θερμοελαστομερές καουτσούκ), εμποτισμένο χαρτί, PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο) και XLPE (Υψηλής πυκνότητας διασυνδεδεμένο πολυαιθυλένιο) ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τάση.
- Προστασία μόνωσης: Μια στρώση ημιαγώγιμου υλικού που χρησιμοποιείται συνήθως σε γραμμές μέσης και υψηλής τάσης. Λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με την προστασία του αγωγού.
- Μεταλλικό περίβλημα: Παρέχει προστασία στο καλώδιο από υγρασία και άλλα χημικά (οξέα ή αλκάλια) που υπάρχουν στο περιβάλλον ή το έδαφος. Συνήθως είναι φτιαγμένη από αλουμίνιο ή μόλυβδο. Παρέχει επίσης διέξοδο για τα βραχυκυκλώματα και τις διαρροές ρευμάτων καθώς το περίβλημά συνδέεται με τη γη στη μία άκρη του καλωδίου.
- Σκέπασμα: Είναι ένα χαμηλής ποιότητας μονωτικό υλικό το οποίο προστατεύει το μεταλλικό περίβλημά από διάβρωση και μηχανικές βλάβες λόγω της θωράκισης.
- Θωράκιση: Παρέχει μηχανική προστασία από διάφορες πιέσεις στις οποίες μπορεί να εκτεθεί το καλώδιο κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και της λειτουργικής του ζωής. Συνήθως είναι μια χαλύβδινη ταινία που τυλίγεται γύρω από το στρώμα παραμόρφωσης.
- Εξωτερικός μανδύας: Μια ακόμα στρώση χαμηλής ποιότητας μονωτικού υλικού όπως μια περιτύλιξη θερμοπλαστικού υλικού όπως το PVC, παρέχεται για να προστατεύσει την θωράκιση από ατμοσφαιρικούς ρύπους και παράγοντες. [9]

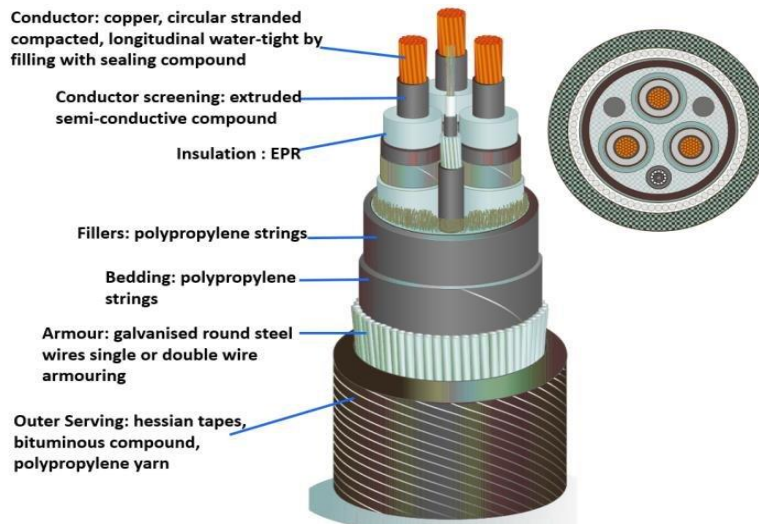
#### 1.7.4 Υποθαλάσσια Καλώδια

Στην Ελλάδα τα υποθαλάσσια καλώδια ισχύος αποτελούν μια κρίσιμη υποδομή για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από την θάλασσα. Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση νησιωτικών δικτύων με το κύριο ηπειρωτικό δίκτυο, τη μεταφορά ανανεώσιμης ενέργειας και την εξυπηρέτηση της ηλεκτρικής ζήτησης σε μεγάλες αποστάσεις.

Τα υποθαλάσσια καλώδια ισχύος κατασκευάζονται με ειδικά υλικά που είναι ανθεκτικά στο υποβρύχιο περιβάλλον. Τα καλώδια συνήθως αποτελούνται από οπλισμένους ηλεκτρικούς αγωγούς, μόνωση, αντίσταση εξωτερικής επιβράδυνσης και προστασία από την είσοδο νερού.

Γενικά, η εγκατάσταση των υποθαλάσσιων καλωδίων ισχύος είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και πλοία. Συνήθως, τα καλώδια τοποθετούνται στον θαλάσσιο πυθμένα με τη χρήση ειδικών εργαλείων και τεχνικών, όπως π.χ. η προσωρινή επικάλυψη του πυθμένα με blocks από τσιμέντο.

Το ίδιο σύνθετη διαδικασία είναι η συντήρηση και η επισκευή βλαβών καθώς και σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό και εξοπλισμό, συχνά με τη χρήση υποβρυχίων ρομπότ. [10]



Εικόνα 13 Μορφή υποθαλάσσιου καλωδίου. [10]

### 1.7.5 Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ

Οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ (Μέσης Τάσης/Χαμηλής Τάσης συνήθως από 20 kV/15kV σε 400V/230V) αναφέρονται σε εναέριες ,επίγειες η υπόγειες εγκαταστάσεις (Εικόνα 14) που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας για τη μετάβαση από τη μεσαία τάση στην χαμηλή τάση ή αντίστροφα(ΧΤ/ΜΤ). Αυτοί οι υποσταθμοί αποτελούν σημαντικά κομμάτια της υποδομής διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και επιτρέπουν τη μεταφορά και την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα επίπεδα τάσης.[31]

Οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ διαθέτουν τα εξής στοιχεία:

1. Μετασχηματιστές: Ο κύριος εξοπλισμός σε έναν υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ . Οι μετασχηματιστές αυξάνουν η μειώνουν την τάση από την ΜΤ στην ΧΤ ή αντίστροφα. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το ένα επίπεδο τάσης στο άλλο.
2. Διακόπτες και ασφάλειες: Οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ περιλαμβάνουν διακόπτες και ασφάλειες για τον έλεγχο και την προστασία του δικτύου. Οι διακόπτες χρησιμοποιούνται για τη διακοπή ή τη σύνδεση της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι ασφάλειες προστατεύουν το δίκτυο από υπερφόρτωση και βραχυκυκλώματα.

Οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ είναι κρίσιμοι για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας από τα κέντρα παραγωγής στους καταναλωτές. Αυτοί οι υποσταθμοί επιτρέπουν τον έλεγχο, τη μετάβαση και την ασφαλή λειτουργία της ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα επίπεδα τάσης για την ικανοποίηση των αναγκών των καταναλωτών.



Εικόνα 14 Υποσταθμοί ΜΣ/ΧΤ (α) επίγειος (β) εναέριος (γ) υπόγειος.[31]

## Κεφάλαιο 2 Βραχυκυκλώματα και Λειτουργία Προστασίας Δικτύου Διανομής

### 2.1 Εισαγωγή

Στον σύγχρονο κόσμο, τα δίκτυα διανομής ενέργειας αποτελούν ένα ζωτικής σημασίας σύστημα για την αποτελεσματική μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, τα δίκτυα διανομής μπορεί να αντιμετωπίσουν διάφορα σφάλματα και προβλήματα που επηρεάζουν την αξιοπιστία και την απόδοσή τους. Για να περιοριστούν οι επιπτώσεις αυτών των σφαλμάτων απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός των συστημάτων προστασίας. [13]

### 2.2 Ανάλυση Σφαλμάτων Δικτύου Διανομής

Τα σφάλματα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ανεπιθύμητες καταστάσεις ή γεγονότα που προκαλούν διακοπή ή ανεπάρκεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε πολλούς παράγοντες, όπως τεχνικές ανωμαλίες, βραχυκυκλώματα, υπερφορτώσεις, υπερτάσεις, απώλειες φάσης, διακοπές ρεύματος και άλλα προβλήματα. Γενικά σε αυτήν την διπλωματική θα ασχοληθούμε με τα βραχυκυκλώματα τα οποία αναφέρονται σε μια ανεπιθύμητη κατάσταση όπου συμβαίνει μια σύνδεση με χαμηλή αντίσταση μεταξύ δύο ηλεκτρικών αγωγών, προκαλώντας μια υψηλή ροή ρεύματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως θερμότητα, αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, φθορά εξοπλισμού ακόμη και σε πυρκαγιά και κίνδυνο της ανθρώπινης ζωής από ηλεκτροπληξία. [14]

#### 2.2.1 Είδη Σφαλμάτων

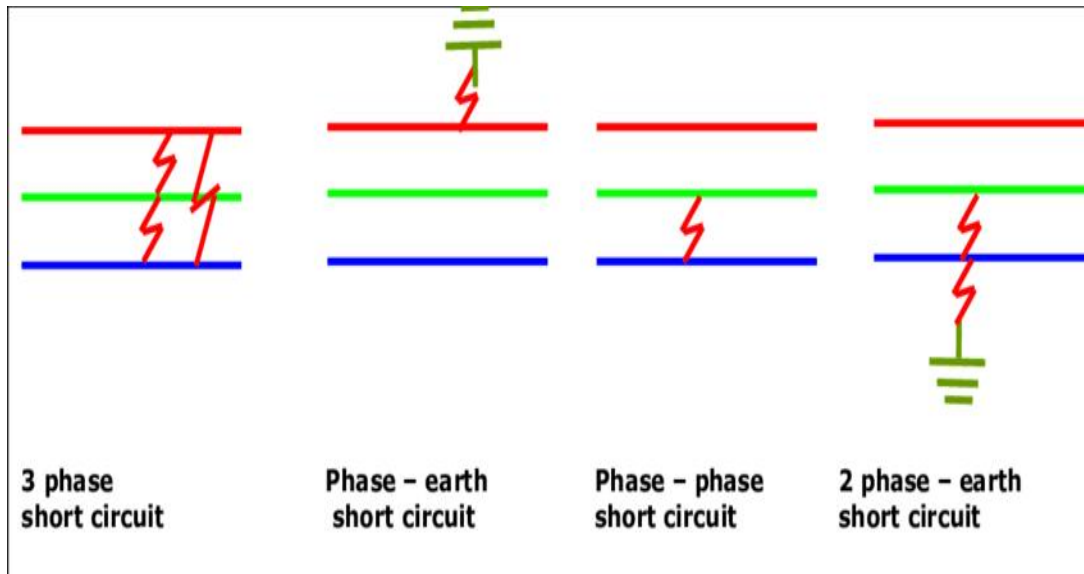
Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα σφάλματα βάσει του χρόνου παραμονής τους στο σύστημα σε δύο βασικά είδη: τα παροδικά και τα μόνιμα σφάλματα. [14]

- Παροδικά σφάλματα (Transient Faults): Αυτά τα σφάλματα είναι προσωρινής φύσης και δημιουργούνται από παροδικές διαταραχές στο σύστημα. Μπορεί να δημιουργηθούν από παροδικές αλλαγές στην τάση ή το φορτίο ή αστάθειες στο δίκτυο. Αυτά τα σφάλματα διαρκούν για πολύ μικρό χρονικό διάστημα και συνήθως επανέρχονται οι συνθήκες λειτουργίας στην κανονικότητα μετά από αυτά χωρίς να χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση.
- Μόνιμα σφάλματα (Permanent Faults): Αυτά τα σφάλματα παραμένουν στο σύστημα για απεριόριστο χρονικό διάστημα. Συνήθως προκαλούνται από βλάβες στο εξοπλισμό. Αυτά τα σφάλματα απαιτούν επισκευές ή αντικατάσταση του ελαττωματικού εξοπλισμού για την επαναφορά της κανονικής λειτουργίας του συστήματος.

Επιπλέον, τα σφάλματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο εκδήλωσής τους και τις εμπλεκόμενες φάσεις στις εξής κατηγορίες [14]:

- Σφάλματα φάσεων: Αυτά τα σφάλματα συνήθως αποτελούν περίπου το 70% των συνολικών σφαλμάτων. Εκδηλώνονται λόγω της εμφάνισης μειωμένης αντίστασης μόνωσης μεταξύ των φάσεων. Ανάλογα με τον αριθμό των εμπλεκόμενων φάσεων, διακρίνονται σε:
  1. Διφασικά (2Φ,L-L)
  2. Τριφασικά (3Φ,L-L-L)
- Σφάλματα γης: Αυτά τα σφάλματα αποτελούν περίπου το 20% του συνόλου των σφαλμάτων. Εμφανίζονται εξαιτίας της μειωμένης αντίστασης μόνωσης του αγωγού ή των αγωγών φάσεων και της γης. Ανάλογα με τον αριθμό των εμπλεκόμενων φάσεων και της γης, διακρίνονται σε:
  1. Μονοφασικά ως προς γη (L-G)

2. Διφασικά ως προς γη (L-L-G)
  3. Τριφασικά ως προς γη (L-L-L-G)
- Εξελισσόμενα σφάλματα: Αυτά τα σφάλματα έχουν μια αλλαγή φύσης κατά τη διάρκεια της εκδήλωσής τους. [14]



Εικόνα 15 Διάφορα είδη Βραχυκυκλωμάτων. [15]

### 2.2.2 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει μια γραμμή του δικτύου όταν συμβαίνει ένα σφάλμα. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των εξής [16]:

- Είδος του σφάλματος: Το είδος του σφάλματος αναφέρεται στον τρόπο που συμβαίνει το σφάλμα, όπως σφάλματα φάσεων, σφάλματα γείωσης κλπ.
- Ισχύς βραχυκύκλωσης της πηγής: Η ισχύς βραχυκύκλωσης της πηγής αναφέρεται στην ικανότητα της πηγής να παρέχει ρεύμα κατά την περίοδο βραχυκυκλώματος.
- Αντίσταση της γραμμής από το σημείο της πηγής μέχρι το σφάλμα
- Αντίσταση του σφάλματος: Η αντίσταση του σφάλματος αναφέρεται στην αντίσταση που υπάρχει στο σημείο όπου συμβαίνει το σφάλμα.
- Τάση του δικτύου πριν το σφάλμα.
- Τρόπος γείωσης του δικτύου ως προς γη: Ο τρόπος γείωσης του δικτύου σε περίπτωση σφάλματος ως προς τη γη επηρεάζει επίσης το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Για να επιλεγεί ο κατάλληλος εξοπλισμός προστασίας και να ρυθμιστεί αναλόγως, απαιτείται η γνώση του μέγιστου και ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης που αναμένεται να εκδηλωθεί στο τμήμα του δικτύου που εξετάζεται.

Ο προσδιορισμός του εύρους του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε ένα τμήμα του δικτύου γίνεται με βάση τα βασικά χαρακτηριστικά του, όπως η αντίσταση και το μήκος της γραμμής. Οι σχέσεις που παρουσιάζονται περιγράφουν τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ρεύματος



βραχυκύκλωσης για διάφορα είδη σφαλμάτων καθώς και η σχέση που καλύπτει την οποιαδήποτε θέση στη γραμμή και λαμβάνει υπόψιν τόσο την αντίσταση της γραμμής όσο και τη συνολική αντίσταση προς γη. [16]

Παρακάτω παρατίθενται οι σχέσεις για τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης

[16]:

- Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για σφάλματα φάσεων εμφανίζεται για ένα πλήρες (χωρίς αντίσταση σφάλματος) τριφασικό βραχυκύκλωμα στην αρχή της γραμμής. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης υπολογίζεται με τον τύπο:

$$I_{\Phi,MAX} = \frac{V}{Z_T \sqrt{3}} \quad (1)$$

- Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για σφάλματα φάσεων εμφανίζεται κατά το μη πλήρες διφασικό βραχυκύκλωμα στο τέλος της γραμμής. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης υπολογίζεται με τον τύπο:

$$I_{\Phi,MIN} = 0,7 I_{\Phi,MAX} \quad (2)$$

- Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς γη προκύπτει για ένα πλήρες μονοφασικό βραχυκύκλωμα στην αρχή της γραμμής. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς γη υπολογίζεται με τον τύπο:

$$I_{\Gamma,MAX} = \frac{V}{Z_T \sqrt{3}} \quad (3)$$

- Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς γη προκύπτει για ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα με αντίσταση σφάλματος 40Ω στην αρχή της γραμμής. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως προς γη υπολογίζεται με τον τύπο:

$$I_{\Gamma,MAX} = \frac{V}{(Z_T + 40) \sqrt{3}} \quad (4)$$

- Η σχέση που καλύπτει την οποιαδήποτε θέση στη γραμμή και λαμβάνει υπόψιν τόσο την αντίσταση της γραμμής όσο και τη συνολική αντίσταση προς γη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_{1\varphi} = \frac{V_{\varphi}}{\sqrt{(R_c \cdot l + R_N + R_{\varphi})^2 + (X_c \cdot l + X_T)^2}}$$

$V_{\varphi}$ : Φασική Τάση  
 $R_c$ : Αντίσταση Αγωγού  
 $R_N$ : Αντίσταση Ουδέτερου Κόμβου Μ/Σ  
 $R_{\varphi}$ : Αντίσταση Σφάλματος  
 $X_c$ : Επαγωγή Αγωγού  
 $X_T$ : Επαγωγή ΜΣ ΥΤ

(5)

Στις σχέσεις 1-4, V αναφέρεται στην τάση του δικτύου (σε volt),  $Z_T$  αναφέρεται στην αντίσταση της γραμμής (σε ohm) και  $Z_{\Gamma}$  αναφέρεται στην αντίσταση γείωσης (σε ohm). [16]

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι παραπάνω τύποι είναι απλές προσεγγίσεις και οι πραγματικές τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης μπορεί να επηρεαστούν από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών του δικτύου και της τοπολογίας του συστήματος. Για ακριβέστερο υπολογισμό των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης, συνιστάται η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού προσομοίωσης, όπως το PowerFactory, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την διπλωματική.

Επίσης, σε πλήθος επιστημονικών εργασιών [IEC 60865,60909,61660] μπορούν να αναζητηθούν και να αντληθούν περισσότερες και ποιο αναλυτικές πληροφορίες.

## 2.3 Προστασία Δικτύου Διανομής

Η προστασία στα δίκτυα διανομής είναι ένα σημαντικό θέμα που αφορά την ασφάλεια και την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου. Η εφαρμογή της στα δίκτυα γίνεται μέσω προστατευτικών συσκευών και μηχανισμών που επιτρέπουν την αυτόματη ανίχνευση των διαφορετικών τύπων σφαλμάτων και την άμεση απομόνωσή τους. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του χρόνου αποκατάστασης και των δυνητικών επιπτώσεων των βλαβών στους καταναλωτές και στο δίκτυο. Επιπλέον, η προστασία συμβάλλει στην ασφάλεια των εργαζομένων που ασχολούνται με τη συντήρηση και την επισκευή του δικτύου, καθώς και στην προστασία του εξοπλισμού από υπερφορτώσεις και βλάβες.

Συνολικά, η προστασία στα δίκτυα διανομής είναι απαραίτητη για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, εξασφαλίζοντας την προστασία του εξοπλισμού, των καταναλωτών και των εργαζομένων, καθώς και τη σταθερότητα του δικτύου σε περιπτώσεις βλαβών και ανωμαλιών.

## 2.4 Βασικός Εξοπλισμός Προστασίας Δικτύου Διανομής

### 2.4.1 Ηλεκτρονόμοι Προστασίας (H/N)

Οι ηλεκτρονόμοι αποτελούν τον "εγκέφαλο" των συστημάτων προστασίας. Λαμβάνουν μετρήσεις τάσης και ρεύματος από το δίκτυο, με τη χρήση μετασχηματιστών τάσης και έντασης, και επιτηρούν τη λειτουργία συγκεκριμένων στρατηγικών κόμβων. Οι μετρήσεις αυτές συγκρίνονται με τις ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου και όταν υπερβούν τα όρια, ανιχνεύεται σφάλμα και ενεργοποιούνται τα διακοπτικά μέσα. Στην συνέχεια γίνονται ως 2 ή 3 επιπλέον αυτόματοι επανέλεγχοι των ορίων, που αν εξακολουθεί να είναι εκτός, ο ηλεκτρονόμος μένει οριστικά κλειστός και καλείται συνεργείο για την επιδιόρθωση.

Σήμερα, οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί ηλεκτρονόμοι προσφέρουν πολλαπλά επίπεδα ρύθμισης, όπως ρυθμίσεις ρευμάτων ενεργοποίησης χρόνου απόσβεσης, κτλ. Επιπλέον, παρέχουν συνδυαστική προστασία από υπερτάσεις, υποτάσεις, υπερσυχνότητες, υποσυχνότητες, κατευθυντική προστασία και προστασία διαρροής ρεύματος προς τη γη.



Εικόνα 16 Ψηφιακός Η/Ν υπερέντασης και σφάλματος γης.

Με βάση τη χαρακτηριστική λειτουργία τους οι Η/Ν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως στιγμιαίοι, σταθερού χρόνου και αντιστρόφου χρόνου όπου οι αντιστρόφου χρόνου μπορούν να υποκατηγοριοποιηθούν σε αντιστρόφου χρόνου, πολύ αντιστρόφου χρόνου, εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου.

#### **2.4.1.1 Στιγμιαίοι Ηλεκτρονόμοι Προστασίας**

Οι στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι προστασίας είναι η κατηγορία ηλεκτρονόμων που λειτουργούν αμέσως ( $<0,1s$ ) και απότομα όταν οι τιμές των ρευμάτων ή των τάσεων υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο όριο. Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι προστασίας ανταποκρίνονται άμεσα σε αιφνίδιες και υψηλές τιμές ρευμάτων ή τάσεων και εκτελούν την απαιτούμενη προστατευτική ενέργεια, όπως αποσύνδεση του κυκλώματος ή ενεργοποίηση συναγερμού.

Οι στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι προστασίας χρησιμοποιούνται κυρίως για την προστασία από σοβαρά βραχυκυκλώματα, υπερφόρτωση, υπέρταση και άλλες επικίνδυνες συνθήκες στα ηλεκτρικά συστήματα. Λόγω της άμεσης απόκρισής τους, αυτό τους επιτρέπει να προστατεύουν αποτελεσματικά το σύστημα από επικίνδυνες καταστάσεις και να ελαχιστοποιούν την πιθανότητα ζημιάς στον εξοπλισμό ή τους κίνδυνους για τους χρήστες.

#### **2.4.1.2 Ηλεκτρονόμοι Σταθερού Χρόνου**

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας σταθερού χρόνου είναι η κατηγορία ηλεκτρονόμων που λειτουργούν με μια σταθερή χρονική καθυστέρηση πριν εκτελέσουν την προστατευτική ενέργεια. Αυτή η χρονική καθυστέρηση επιτρέπει την ανοχή προσωρινών υπερτάσεων ή υπερφορτώσεων, αλλά αν το πρόβλημα παραμείνει μετά το πέρας αυτής της χρονικής περιόδου τότε ο ηλεκτρονόμος θα εκτελέσει την απαιτούμενη ενέργεια προστασίας.

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας σταθερού χρόνου χρησιμοποιούνται για ποικίλες εφαρμογές προστασίας, όπως προστασία υπερφόρτωσης, προστασία βραχυκυκλώματος, προστασία υπερτάσεων, προστασία γης και άλλες. Η σταθερή χρονική καθυστέρηση παρέχει την ευελιξία για να αντιμετωπιστούν προσωρινές συνθήκες φόρτου και παρέχει επαρκή χρόνο για να εκτελεστούν αποκλίσεις από τα ονομαστικά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιούνται κυρίως στις γραμμές μεταφοράς.

Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων προστασίας σταθερού χρόνου περιλαμβάνουν τη ρύθμιση του χρόνου καθυστέρησης και των ορίων προστασίας, όπως η ρύθμιση των ορίων ρεύματος ή τάσης που ενεργοποιούν τον ηλεκτρονόμο προστασίας. Αυτές οι ρυθμίσεις προσαρμόζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά του συστήματος που προστατεύεται, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη προστασία του.

#### **2.4.1.3 Ηλεκτρονόμοι Αντιστρόφου Χρόνου**

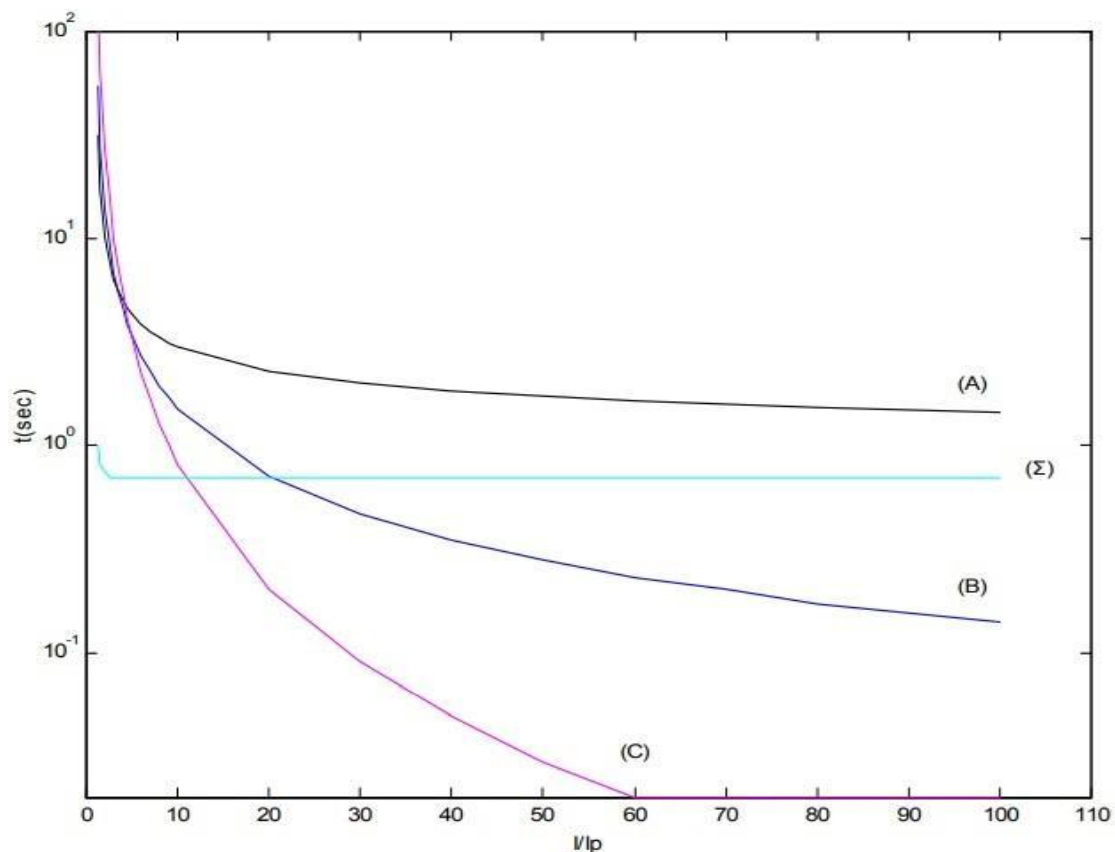
Οι ηλεκτρονόμοι αντίστροφου χρόνου (Inverse-Time Relays) είναι μια κατηγορία ηλεκτρονόμων προστασίας που λειτουργούν με βάση την αντίστροφη σχέση μεταξύ της τιμής του ρεύματος (ή της τάσης) και του χρόνου λειτουργίας τους. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρεύματος (ή η τάση), τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εκτελέσουν την προστατευτική ενέργεια.

Οι ηλεκτρονόμοι αντίστροφου χρόνου χρησιμοποιούνται για την προστασία από υπερφόρτωση και βραχυκυκλώματα στα ηλεκτρικά συστήματα. Ο χρόνος λειτουργίας τους αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του φορτίου, επιτρέποντας έτσι την προστασία από πιο μακροχρόνιες υπερφορτώσεις και αποτρέποντας την προσωρινή αποσύνδεση του συστήματος για προσωρινές αιχμές ρεύματος.

Οι ηλεκτρονόμοι αντίστροφου χρόνου ρυθμίζονται συνήθως με τρόπο που να εξασφαλίζουν την προστασία του συστήματος για μια εύρεση τιμών ρεύματος και χρόνου. Συνήθως χρησιμοποιούνται καμπύλες αντίστροφου χρόνου για την αναπαράσταση της λειτουργίας τους, όπου οι περιοχές χρόνου αντιστρέφονται ανάλογα με την αύξηση του ρεύματος.

Οι ηλεκτρονόμοι αντίστροφου χρόνου χρησιμοποιούνται ευρέως στα ηλεκτρικά δίκτυα και τα συστήματα διανομής για την προστασία των κυκλωμάτων και των εξοπλισμών από υπερφόρτωση και βραχυκυκλώματα.

Γενικά οι H/N πολύ αντιστρόφου χρόνου και οι εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου έχουν τις ίδιες λειτουργίες με τους αντιστρόφου χρόνου. Η μόνη τους διαφορά είναι ο χρόνος κλεισίματος του H/N όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 17 Χαρακτηριστικές Η/Ν αντιστρόφου χρόνου (Α), πολύ αντιστρόφου χρόνου (Β), εξαιρετικά αντιστρόφου χρόνου (C) και σταθερού χρόνου (Σ). [7]

#### 2.4.2 Διακόπτες Ισχύος (Δ/Ι)

Οι διακόπτες ισχύος (circuit-breakers) ανοίγουν και κλείνουν το κύκλωμα σε οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των κανονικών συνθηκών λειτουργίας και των βραχυκυκλωμάτων. Ο σκοπός τους είναι να προστατεύουν το δίκτυο και τον εξοπλισμό από υπερφόρτωση και κινδύνους που μπορεί να προκληθούν από βραχυκυκλώματα.

Οι διακόπτες ισχύος μπορούν να είναι διάφορων τύπων ανάλογα με το ρευστό που χρησιμοποιούν για τη σβέση του τόξου, όπως διακόπτες με πτωχό έλαιο (oil-minimum), διακόπτες με SF6 (εξαφθοριούχο θείο) και διακόπτες με κενό (vacuum).

Οι διακόπτες με SF6 (Εικόνα 18) χρησιμοποιούν το αέριο SF6 ως μέσο σβέσης του τόξου, και έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τους διακόπτες με πτωχό έλαιο οι οποίοι χρησιμοποιούν λάδι και ονομάζονται πτωχού λόγω της μικρότερης ποσότητας λαδιού που χρειάζονται συγκριτικά με τους παλιούς διακόπτες ελαίου.

Οι διακόπτες με κενό χρησιμοποιούν το κενό ως μονωτικό μέσο, και είναι αρκετά αποτελεσματικοί και αξιόπιστοι λόγω του ότι το απόλυτο κενό αποτελεί το 'τέλειο' μονωτικό.

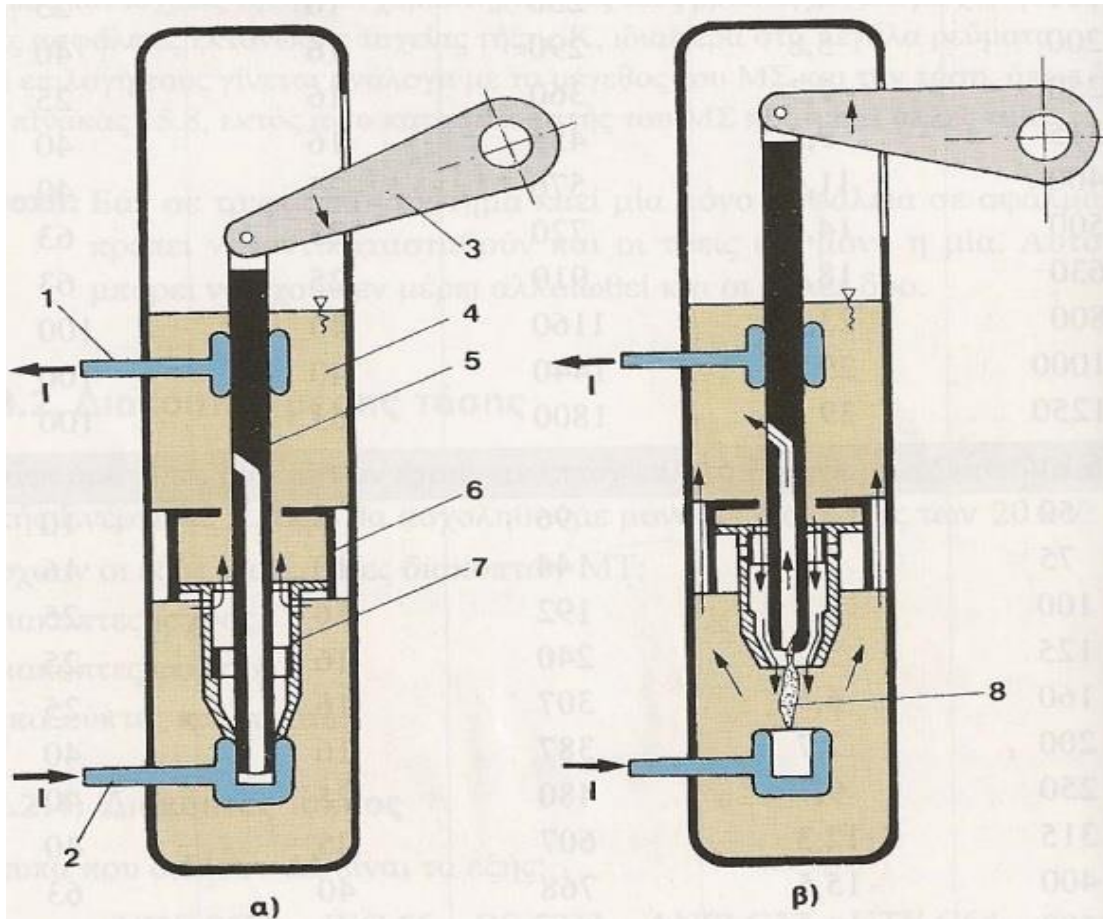
Η επιλογή του τύπου διακόπτη ισχύος εξαρτάται από τις απαιτήσεις, την απόδοση, το κόστος και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες του εκάστοτε συστήματος που προστατεύουν. [19]



Εικόνα 18 Διακόπτης Ισχύος SF6. [19]

Πίνακας 1 Μέρη του παραπάνω διακόπτη ισχύος SF6 (Εικόνα 18). [19]

Εξάρτημα	Περιγραφή
1	Ηλεκτρονόμος υπερέντασης
2	Μοχλός για τη μηχανική τάνυση του ελατηρίου κλεισίματος
3	Κουμπί ανοίγματος
4	Κουμπί κλεισίματος
5	Ένδειξη ότι το ελατήριο κλεισίματος είναι: – τανυσμένο (κίτρινο) – ατάνυστο (λευκό)
6	Συσκευή μπλοκαρίσματος και ένδειξης της πίεσης του αερίου SF6
7	Ένδειξη ανοικτός / κλειστός διακόπτης ισχύος
8	Ακροδέκτες μέσης τάσης
9	Μετασχηματιστές έντασης για τον ΗΝ υπερέντασης
10	Πόλος διακόπτη ισχύος



Εικόνα 19 Αρχή λειτουργίας (α) κλειστός διακόπτης και (β) ανοικτός διακόπτης Δ/Ι πτωχού ελαίου. [7]

Πίνακας 2 Βασικά στοιχεία Δ/Ι πτωχού ελαίου Εικόνας 19. [7]

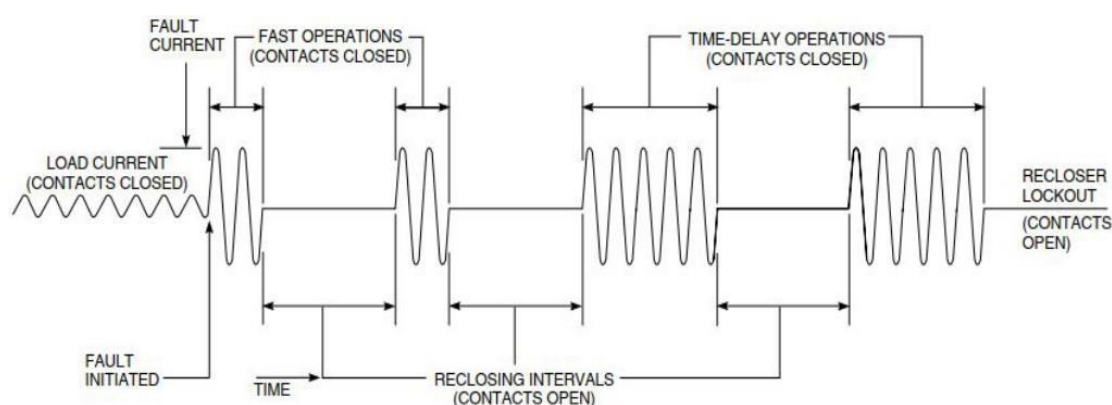
Εξάρτημα	Περιγραφή
1	Ακροδέκτης
2	Ακροδέκτης με επαφή
3	Μηχανισμός κίνησης
4	Λάδι
5	Κινούμενη επαφή
6	Κύλινδρος
7	Έμβολο
8	Τόξο

### 2.4.3 Διακόπτες Αυτόματης Επαναφοράς (Δ/ΑΕ, recloser)

Οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (reclosers) είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται κυρίως σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλου μήκους για να αποκαταστήσουν αυτόματα την παροχή ρεύματος μετά από προσωρινή βλάβη ή διακοπή όπως η επαφή κλαδιού δένδρου με ηλεκτρικές γραμμές ή η κεραυνοβόλος εκκένωση. Ουσιαστικά οι reclosers σχεδιάστηκαν για να αποκαθιστούν αυτόματα την παροχή ρεύματος μετά από την ανίχνευση και την απομόνωση της βλάβης. Μέσω της αυτόματης προσπάθειας αποκατάστασης του ρεύματος, οι reclosers βοηθούν στη μείωση των επιπτώσεων και της διάρκειας αυτών των προσωρινών διακοπών, βελτιώνοντας την αξιοπιστία του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρακάτω περιγράφεται η συνήθης λειτουργία των διακοπών αυτόματης επαναφοράς (Εικόνα 20):

- Κανονική λειτουργία: Ο διακόπτες αυτόματης επαναφοράς επιτρέπει τη ροή του ηλεκτρισμού μέσω της γραμμής διανομής χωρίς διακοπή κατά την κανονική λειτουργία.
- Ανίχνευση βλάβης: Όταν παρουσιάζεται μια βλάβη στη γραμμή διανομής, όπως ένα βραχυκύκλωμα ή μια προσωρινή βλάβη, ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς ανιχνεύει τις ανώμαλες συνθήκες ρεύματος ή τάσης.
- Προσπάθεια αποκλεισμού: Ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς διακόπτει τη ροή του ηλεκτρισμού ανοίγοντας τις επαφές του για να απομονώσει το τμήμα της γραμμής με τη βλάβη. Μετά από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (γνωστό ως χρόνος ανοίγματος), ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς προσπαθεί αυτόματα να κλείσει τις επαφές του για να αποκαταστήσει το ρεύμα.
- Δεύτερη ανίχνευση βλάβης: Εάν η βλάβη συνεχίζεται ή εμφανίζεται νέα βλάβη κατά τη διάρκεια της προσπάθειας αποκλεισμού, ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς διακόπτει ξανά τη ροή του ηλεκτρισμού και ξεκινά έναν δεύτερο κύκλο ανοίγματος-κλεισίματος μετά από άλλο ένα χρονικό διάστημα.
- Προσπάθειες αποκλεισμού: Ανάλογα με τη διαμόρφωση και τις ρυθμίσεις του διακόπτη αυτόματης επαναφοράς, μπορεί να επαναληφθούν πολλοί κύκλοι ανοίγματος-κλεισίματος (συνήθως 3 ή 4) πριν ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς κλειδώσει, υποδεικνύοντας μια συνεχιζόμενη βλάβη που απαιτεί χειροκίνητη παρέμβαση.



Εικόνα 20 Λειτουργία Δ/ΑΕ με τέσσερις πτώσεις. [7]

### 2.4.4. Ασφάλειες - Ασφαλειοαποξεύκτες (A/Z)

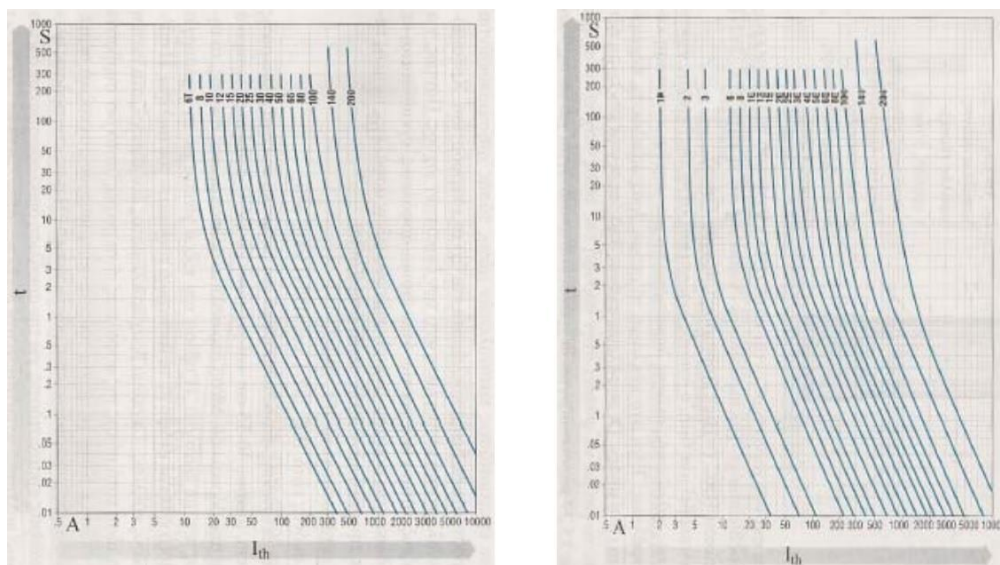
Τους ασφαλειοαποξεύκτες ή ασφάλειες εκτόνωσης ή αφοπλισμού τους συναντάμε στα σημεία διακλαδώσεων των εναέριων δικτύων. Αποτελούνται από ένα κοίλο μονωτικό σωλήνα διαμέτρου 2-3 cm και μήκους 30-35 cm (Εικόνα 21) το εσωτερικό του οποίου είναι καλυμμένο με βορικό οξύ. Στο εσωτερικό του σωλήνα υπάρχει ένας αγωγός, το τηκτό, ταυνομένο με ελατήριο. Σε περίπτωση υπερέντασης, το τηκτό τήκεται (λιώνει),

δημιουργείται τόξο στο εσωτερικό του σωλήνα, το οποίο παράγει υδρατμούς που βοηθούν στη σβέση του τόξου. [19]



Εικόνα 21 Ασφαλειοαποζεύκτες μέσης τάσης. [19]

Γενικά υπάρχουν 2 τύπου A/Z, οι ταχείας τήξεως (τύπου K) και οι βραδείας τήξεως (τύπου T). Λόγω της διαφοράς του χρόνου τήξης (Εικόνα22) μεταξύ των δυο οι τύπου K χρησιμοποιούνται για την προστασία πιο κρίσιμου εξοπλισμού όπως είναι οι μετασχηματιστές, εν αντίθεσή με τους βραδείας που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ως μέσο προστασίας των διακλαδώσεων και υποδιακλαδώσεων των γραμμών ‘κορμού’ του δικτύου. [19]



Εικόνα 22 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος – χρόνου ασφάλειας εκτόνωσης βραδείας τήξης (αριστερά) και ταχείας τήξης (δεξιά). [7]

#### 2.4.5 Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/Α)

Οι Διακόπτες Απομόνωσης (Δ/Α) (Εικόνα 23) χρησιμοποιούνται στα εναέρια δίκτυα διανομής για την απομόνωση των διακλαδώσεων σε περιπτώσεις μόνιμων σφαλμάτων. Αντίθετα με τις ασφάλειες, οι Δ/Α δεν αντιδρούν αυτόματα σε βραχυκυκλώματα ή



υπερφορτώσεις. Αντίθετα, ο ρόλος τους είναι να διακόπτουν την ενεργοποίηση του συστήματος στον απόκεντρο σταθμό όταν προκύπτει μόνιμο σφάλμα.

Η λειτουργία των  $\Delta/A$  συνήθως συνδυάζεται με τη χρήση υπερκείμενου  $\Delta/I$  ή  $\Delta/AE$ . Αυτοί οι διακόπτες είναι υπεύθυνοι για την αυτόματη επαναφορά της τροφοδοσίας μετά από μια προσωρινή διακοπή ή βλάβη, ενώ ο  $\Delta/A$  απομονώνει τη διακλάδωση που προκαλεί το μόνιμο σφάλμα. [19]



Εικόνα 23 Τριφασικός διακόπτης απομόνωσης. [7]

## 2.5 Κανόνες Εφαρμογής Προστασίας Δικτύου Διανομής

Το δίκτυο διανομής ΜΤ εκτείνεται στο δευτερεύον των μετασχηματιστών (Μ/Σ) ισχύος, υποβιβασμού της τάσης, των υποσταθμών 150/20-15 kV και τροφοδοτεί επίσης πελάτες ΜΤ. Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (ΧΤ) τροφοδοτεί όλους τους υπόλοιπους πελάτες μέσω Μ/Σ διανομής 20-15/0,4 kV.

Η προστασία του κορμού γίνεται από τον διακόπτη ισχύος του υποσταθμού 150/20-15 kV ή από τον διακόπτη ισχύος του υποσταθμού και ένα  $\Delta/AE$ , για γραμμές μεγάλου μήκους. Η προστασία των διακλαδώσεων γίνεται μέσω ασφαλειοποζευκτών (Α/Ζ) και διακοπών απομόνωσης ( $\Delta/A$ ). Οι Μ/Σ διανομής από την πλευρά της μέσης τάσης ασφαλιζονται με Α/Ζ ταχείας τήξεως τύπου Κ. [18]

Ο  $\Delta/I$  του υποσταθμού και ο  $\Delta/AE$ , διαθέτουν προστασία υπερέντασης έναντι σφαλμάτων φάσεων και γης, έχουν πίνακα ελέγχου και εκτελούν κύκλο λειτουργίας πτώσεων-αυτομάτων επαναφορών σε περίπτωση σφάλματος. Στα εναέρια δίκτυα διανομής Μ.Τ. ρυθμίζονται συνήθως σε μία στιγμιαία λειτουργία ακολουθούμενη από τρεις λειτουργίες με χρονική καθυστέρηση, ενώ στα υπόγεια σε μια στιγμιαία λειτουργία ακολουθούμενη από μια λειτουργία με χρονική καθυστέρηση. Το παροδικό σφάλμα απαλείφεται με τη στιγμιαία λειτουργία, ενώ σε μόνιμο σφάλμα φάσεων ή γης, στην πρώτη λειτουργία με χρονική καθυστέρηση τήκονται τα τηκτά των Α/Ζ που προστατεύουν τις διακλαδώσεις. Τα μεγέθη των τηκτών των Α/Ζ εκτόνωσης που χρησιμοποιούνται για την προστασία των διακλαδώσεων Μ.Τ. είναι μέχρι 30 Α βραδείας τήξεως (30 T) μετά από τον  $\Delta/I$  του υποσταθμού 150/20-15 kV και 20 Α (20 T) μετά από  $\Delta/AE$ . Όταν το μέγιστο φορτίο της διακλάδωσης υπερβαίνει τα 30 Α χρησιμοποιούνται μονοπολικοί και τριπολικοί διακόπτες απομόνωσης ( $\Delta/A$ ).

Ο  $\Delta/A$  συνεργάζεται με το προηγούμενο προς την πλευρά της πηγής μέσω προστασίας και έχει την ικανότητα κλεισίματος με σφάλμα (making capacity). Οι ηλεκτρονικοί  $\Delta/A$  διαθέτουν πίνακα ελέγχου. Τόσο οι μονοπολικοί με υδραυλικό μηχανισμό  $\Delta/A$ , όσο και οι ηλεκτρονικοί τριπολικοί  $\Delta/A$ , ρυθμίζονται σε μία λειτουργία λιγότερη από αυτές του προτεταμένου μέσου προστασίας και απομονώνουν το εσφαλμένο τμήμα της διακλάδωσης

που προστατεύουν, ενώ είναι ανοικτό το προηγούμενο μέσο προστασίας (δηλ. ο  $\Delta/I$  του υποσταθμού ή ο  $\Delta/AE$ ). [18]

Αυτή η συνεργασία ονομάζεται επιλεκτικότητα ή επιλεκτική συνεργασία. Ο στόχος αυτής είναι να διασφαλιστεί ότι οι χρόνοι διέγερσης μειώνονται καθώς προχωράμε από την τροφοδότηση στον καταναλωτή. Αυτό επιτυγχάνεται διακόπτοντας γρήγορα το σφάλμα και περιορίζοντας την αποσύνδεση μόνο στο τμήμα του δικτύου ή της εγκατάστασης όπου εμφανίζεται το σφάλμα. Με αυτόν τον τρόπο προστατεύονται οι καταναλωτές και οι εργαζόμενοι από ηλεκτροπληξία, ενώ περιορίζονται οι ζημιές στο συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου ή της εγκατάστασης.

Για να επιτευχθεί η επιλεκτικότητα, οι χρόνοι διέγερσης των μέσων προστασίας πρέπει να διαφέρουν κατά τουλάχιστον 0,4 δευτερόλεπτα μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, οι χρόνοι διέγερσης σε ένα μέσο προστασίας πρέπει να είναι 0,4 δευτερόλεπτα μεγαλύτεροι από τους χρόνους του αμέσως επόμενου μέσου προστασίας και μικρότεροι από τον αμέσως προηγούμενο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η συνεργασία μεταξύ των μέσων προστασίας, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική προστασία του συστήματος και των χρηστών του. [17]

Σε περίπτωση ακτινικού δικτύου διανομής με διασπαρμένη παραγωγή ακολουθούμε τους ίδιους κανόνες, ωστόσο επιβάλλεται τα μέσα προστασίας να είναι κατευθυντικά (directional), αξιόπιστα και μη παθητικά, ούτως ώστε σε περίπτωση σφάλματος, να αποφεύγονται λανθασμένες λειτουργίες των  $\Delta/A$  και λανθασμένες απαριθμήσεις των  $\Delta/AE$  καθώς και προβλήματα τύφλωσης της προστασίας. [18]

## Κεφάλαιο 3 Περιγραφή Βασικών Εννοιών Γειώσεων στο Δίκτυο Διανομής

### 3.1 Εισαγωγή

Σε κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση, ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία είναι η επαρκής γείωση, ειδικότερα η γείωση των υποσταθμών υψηλής και μέσης τάσης για την προστασία των ανθρώπων και του εξοπλισμού σε περίπτωση ηλεκτρικής βλάβης. Τα καλά σχεδιασμένα συστήματα γείωσης εξασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα των ηλεκτρικών συστημάτων και την ασφάλεια του προσωπικού. Ωστόσο, οι διαδικασίες σχεδίασης συχνά περιορίζονται από μια σειρά παραγόντων που είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. [20]

### 3.2 Γείωση και Αντίσταση Γείωσης

Η γείωση ορίζεται ως μια αγωγίμη σύνδεση, εσκεμμένη ή μη, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή εξοπλισμός συνδέεται με το έδαφος ή άλλο σημείο μηδενικού δυναμικού. Συνεπώς, η γείωση σημαίνει ότι ένα δεδομένο ηλεκτρικό σύστημα, κύκλωμα ή συσκευή συνδέεται με τη γη, λειτουργώντας ως ένα είδος αντικαταστάτη της γης, με σκοπό να εδραιώσει και να διατηρήσει το δυναμικό των αγωγών που είναι συνδεδεμένοι με αυτό περίπου στο δυναμικό της γης, επιτρέποντας την οδήγηση ηλεκτρικών ρευμάτων προς και από τη γη. [20]

Έτσι, μια ασφαλής σχεδίαση συστήματος γείωσης πρέπει να παρέχει τα ακόλουθα:

- Έναν τρόπο για τη μεταφορά και διάχυση ηλεκτρικών ρευμάτων στη γη κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας και κατάστασης βλάβης, χωρίς να υπερβαίνονται οι οριακές τιμές λειτουργίας του εξοπλισμού ή να επηρεάζεται αρνητικά η συνέχεια της υπηρεσίας.
- Ένα τέτοιο επίπεδο ανθρώπινης ασφάλειας, ώστε κάποιος που εργάζεται ή περπατά στην περιοχή των γειωμένων εγκαταστάσεων να μην εκτίθεται στον κίνδυνο της ηλεκτροπληξίας.

Ωστόσο, μια χαμηλή αντίστασης γείωσης δεν αποτελεί αυτή καθαυτή εγγύηση ασφάλειας. Για παράδειγμα, πριν από τρεις ή τέσσερις δεκαετίες, πολλοί θεωρούσαν πως οποιοδήποτε αντικείμενο είναι γειωμένο μπορεί να αγγιχθεί με ασφάλεια. Αυτή η παρανόηση πιθανότατα συνέβαλε σε πολλά τραγικά ατυχήματα στο παρελθόν. Επειδή δεν υπάρχει απλή σχέση μεταξύ της αντίστασης του γείωσης συστήματος συνολικά και του μέγιστου ρεύματος ηλεκτροπληξίας στο οποίο μπορεί να εκτεθεί ένα άτομο, ένα σύστημα ή μέρος του συστήματος (π.χ. υποσταθμός ή πύργος) με σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης μπορεί να είναι επικίνδυνο υπό ορισμένες συνθήκες, ενώ ένα άλλο μέρος του συστήματος με πολύ υψηλή αντίσταση γείωσης μπορεί ακόμα να είναι ασφαλές ή να μπορεί να γίνει ασφαλές με προσεκτικό σχεδιασμό. Μία τέτοια συνθήκη αποτελεί η ανύψωση του δυναμικού γης (Ground Potential Rise - GPR). [21]

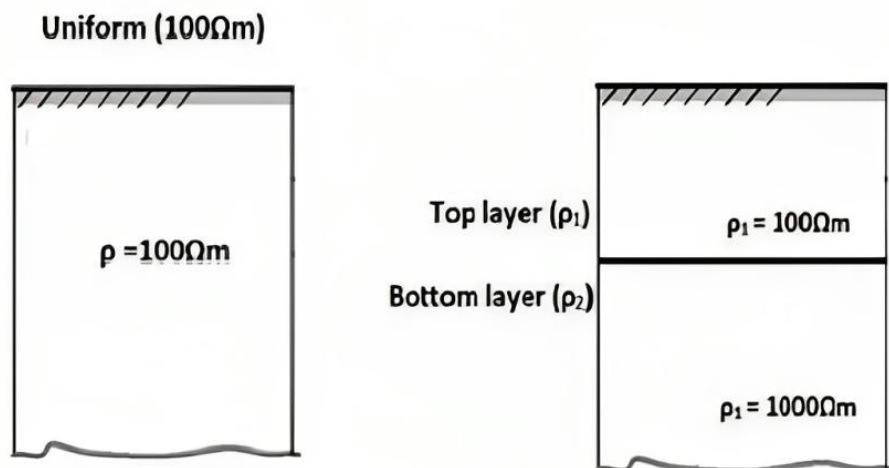
Η ανύψωση του δυναμικού γης (Ground Potential Rise - GPR) είναι μια συνάρτηση της τιμής του ελέγχου ροής, της τάσης του συστήματος και της αντίστασης του εδάφους (συστήματος). Η τιμή του ρεύματος μέσα από το σύστημα γείωσης πολλαπλασιάζεται με την αντίστασή του, η οποία μετριέται από ένα σημείο μακριά από τον υποσταθμό, και καθορίζει την ανύψωση του δυναμικού γης ως προς την άπειρη γη. [21]

Η αντίσταση του εδάφους μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια που έχουν τοποθετηθεί στο έδαφος. Για παράδειγμα, μεταλλικοί ράβδοι χρησιμοποιούνται για τις γραμμές μεταφοράς, ενώ το σύστημα πλέγματος που αποτελείται από χαλκό-αγωγούς και ράβδους χρησιμοποιείται για τους υποσταθμούς. [20]

Η αντίσταση ενός ηλεκτροδίου γείωσης εξαρτάται από:

1. την αντίσταση του ίδιου του ηλεκτροδίου και των συνδέσεών του,
2. την αντίσταση επαφής μεταξύ του ηλεκτροδίου και του περιβάλλοντος εδάφους
3. την αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους

Οι πρώτες δύο αντιστάσεις είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με την αντίσταση του εδάφους και, συνεπώς, μπορεί να αγνοηθούν σε ορισμένες εφαρμογές. Ωστόσο, η τρίτη αντίσταση είναι συνήθως πολύ μεγάλη και εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους (ομοιόμορφο, πολυστρωματικό) (Εικόνα 24), τα χημικά συστατικά, το επίπεδο υγρασίας και τη θερμοκρασία του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο.



Εικόνα 24 Τύποι εδάφους ομοιόμορφο (αριστερά), διστρωματικό (δεξιά).

Στον Πίνακα 3 δίνονται τυπικές τιμές αντίστασης για διάφορους τύπους εδάφους. Ωστόσο, η αντίσταση του εδάφους αλλάζει επίσης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του χημικού περιεχομένου. Συνεπώς, στις πρακτικές εφαρμογές, ο μόνος τρόπος για να προσδιοριστεί η αντίσταση του εδάφους είναι με τη μέτρησή της. Οι πιο γνωστοί τρόποι μέτρησής της είναι χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων και τη μέθοδο Wenner. [20]

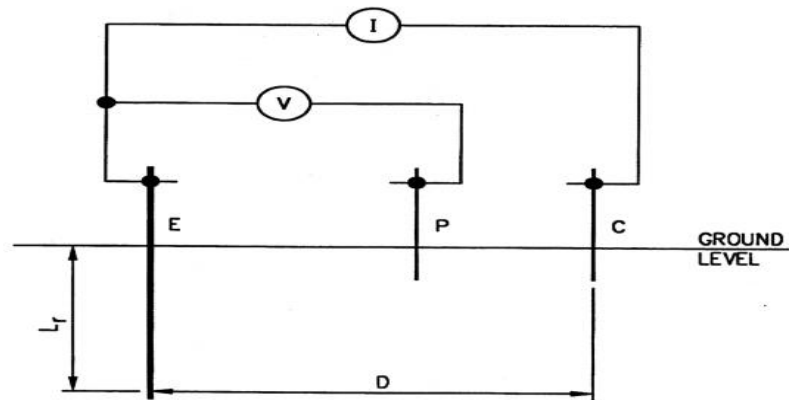
Πίνακας 3 Αντίσταση Διαφορετικών Εδαφών. [21]

Τύπος Εδάφους	Αντίσταση
Θαλασσινό νερό	0.01-1.0
Υγρό οργανικό έδαφος	10
Υγρό έδαφος	100
Ξηρό έδαφος	1000
Βασικός βράχος	$10^4$
Καθαρός ασβεστόλιθος	$10^7$
Αμμολίθος	$10^9$
Συνθλιβμένος βράχος	$1.5 \times 10^8$

Για την μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων (Εικόνα 25) χρησιμοποιούνται 3 ράβδοι ηλεκτρόδια και μια πηγή ρεύματος. Η πρώτη ράβδος τοποθετείτε σε βάθος  $L_r$  ονομάζεται ηλεκτρόδιο ή ράβδος οδηγός. Οι άλλες δύο ράβδοι, γνωστές ως ράβδοι αναφοράς, οδηγούνται σε μικρό βάθος σε μια ευθεία γραμμή από τη ράβδο οδηγό όπου από την μια μετράμε την τάση και από την άλλη το ρεύμα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Η τελική τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (6)$$

όπου  $L_r$  το μήκος του ηλεκτροδίου οδηγού και  $d$  η διάμετρος του σε μέτρα (m).

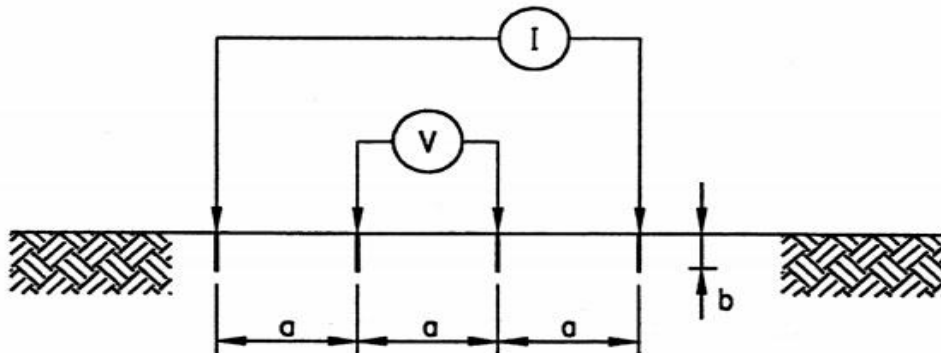


Εικόνα 25 Διάταξη μεθόδου των τριών ηλεκτροδίων. [20]

Η μέθοδος Wenner, όπως φαίνεται στην Εικόνα 26, είναι η πιο κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται. Τέσσερα ηλεκτρόδια εισέρχονται στο έδαφος κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής, σε ίσες αποστάσεις  $a$ (m), οδηγούμενες σε βάθος  $b$ (m). Στη συνέχεια, μετρείται η τάση μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων και διαιρείται με το ρεύμα μεταξύ των δύο εξωτερικών ηλεκτροδίων για να δώσει μια τιμή της αντίστασης  $R$ . [25]

Η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (7)$$



Εικόνα 26 Διάταξη μεθόδου Wenner. [20]

### 3.3 Η Ηλεκτροπληξία και οι Επιπτώσεις της στον Άνθρωπο

Για να σχεδιάσουμε σωστά μια γείωση εξοπλισμού για τις γραμμές υψηλής τάσης ή/και τους υποσταθμούς, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πιο σημαντικού μέρους του κυκλώματος, του ανθρώπινου σώματος. Γενικά, τα ρεύματα ηλεκτροπληξίας κατηγοριοποιούνται με βάση τον βαθμό σοβαρότητας της ηλεκτροπληξίας που προκαλούν. Για παράδειγμα, τα ρεύματα που προκαλούν άμεση φυσιολογική βλάβη ονομάζονται πρωτογενή ρεύματα ηλεκτροπληξίας, ενώ τα ρεύματα που δεν μπορούν να προκαλέσουν άμεση φυσιολογική βλάβη αλλά μπορεί να προκαλέσουν ακαθόριστες μυϊκές αντιδράσεις ονομάζονται δευτερεύοντα ρεύματα ηλεκτροπληξίας. Αυτά τα ρεύματα ηλεκτροπληξίας μπορεί να είναι είτε μόνιμα είτε παροδικά. Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), τα μόνιμα ρεύματα είναι συνεχή ρεύματα στα 60 Hz ή 50 Hz. Τα παροδικά ρεύματα, από την άλλη πλευρά, είναι ρεύματα αποφόρτισης που μειώνονται γρήγορα με τον χρόνο. [21]

Ο Πίνακας 4 δείχνει τις πιθανές επιπτώσεις των ρευμάτων ηλεκτροπληξίας στους ανθρώπους. Σημειώστε ότι η κατώτατη τιμή για έναν κανονικά υγιή άνθρωπο για να αισθανθεί ένα ρεύμα είναι περίπου 1 mA. Αυτή είναι η τιμή του ρεύματος στην οποία ένα άτομο μπορεί μόλις να αισθανθεί ένα ελαφρύ τσίμπημα στα χέρια ή τα δάχτυλα λόγω της ροής του ρεύματος. Ρεύματα περίπου 10-30 mA μπορούν να προκαλέσουν έλλειψη ελέγχου των μυών. Στους περισσότερους ανθρώπους, ένα ρεύμα των 100 mA θα προκαλέσει κολπική μαρμαρυγή. Ρεύματα υψηλότερων τιμών μπορούν να σταματήσουν την καρδιά εντελώς ή να προκαλέσουν σοβαρά ηλεκτρικά εγκαύματα. Η κολπική μαρμαρυγή είναι μια κατάσταση όπου η καρδιά χτυπά με ανεπαρκή και ανώμαλο ρυθμό, με θανατηφόρα αποτελέσματα. Επομένως, η κατώτατη τιμή της κολπικής μαρμαρυγής είναι η κύρια ανησυχία στον σχεδιασμό της γείωσης. Ρεύματα από 1 mA και άνω, αλλά λιγότερα από 6 mA, συχνά καθορίζονται ως δευτερεύοντα ρεύματα ηλεκτροπληξίας. [21]

Πίνακας 4 Επίδραση Ηλεκτρικού Ρεύματος (mA) σε Άνδρες και Γυναίκες. [21]

Επιπτώσεις	DC		AC(50 Hz)	
	Άντρες	Γυναίκες	Άντρες	Γυναίκες
1.Καμία αίσθηση στο χέρι	1	0.6	1	0.6
2.Απαλή τσιμπητή αίσθηση	5.2	3.5	2	1.2
3.Ηλεκτροπληξία - μη επίπονη και μη απώλεια μυϊκού ελέγχου	9	6	5	3
4.Επίπονη ηλεκτροπληξία αλλά μη απώλεια μυϊκού ελέγχου	62	41	10	6
5.Επίπονη ηλεκτροπληξία όριο απελευθέρωσης	76	51	20	12
6.Επίπονη και σοβαρή ηλεκτροπληξία, μυϊκές συσπάσεις, δυσκολία	90	60	30	18

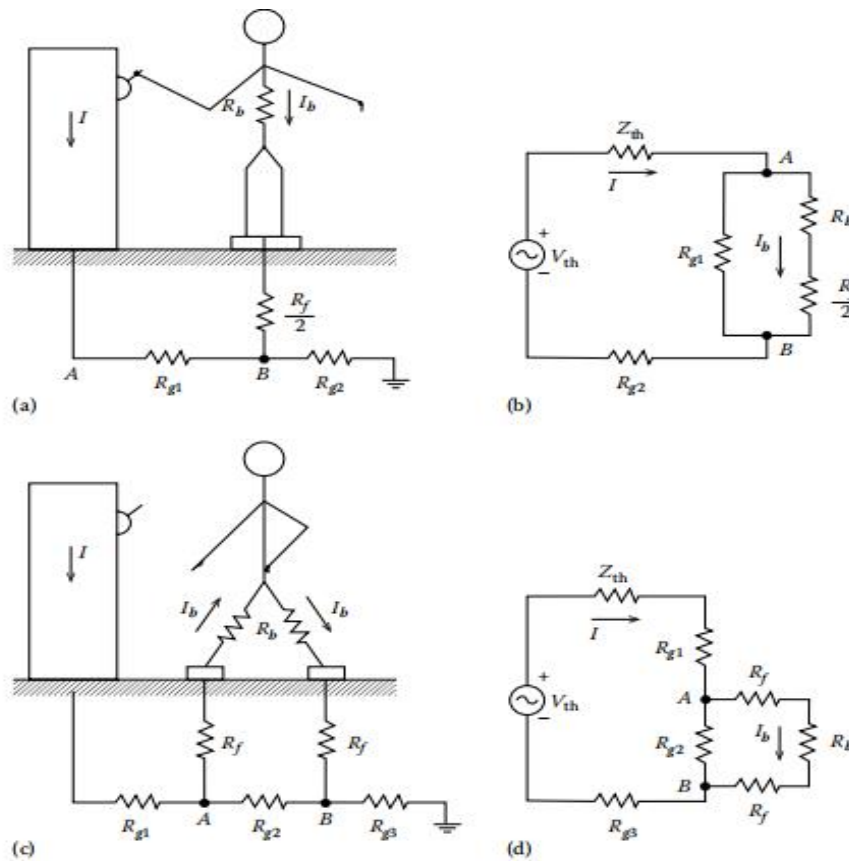
7.Πιθανή Κολπική μαρμαρυγή από σύντομες ηλεκτροπληξίες				
α. Διάρκεια ηλεκτροπληξίας 0,03 s	1300	1300	1000	1000
β. Διάρκεια ηλεκτροπληξίας 3,0 s	500	500	100	100
γ. Σχεδόν βέβαιη κολπική μαρμαρυγή (εάν η διάρκεια της ηλεκτροπληξίας υπερβαίνει το διάστημα ενός καρδιακού παλμού)	1375	1375	300	300

Το ανθρώπινο σώμα μπορεί να αντέξει ελαφρώς μεγαλύτερες ηλεκτρικές τάσεις στα 25 Hz και περίπου πέντε φορές μεγαλύτερες στην άμεση ρεύματος (DC). Επίσης, σε συχνότητες 1.000 ή 10.000 Hz, μπορούν να ανεχθούν ακόμη μεγαλύτερες ηλεκτρικές τάσεις. Στην περίπτωση της κεραυνοπληξίας, το ανθρώπινο σώμα φαίνεται ότι μπορεί να αντέξει πολύ υψηλά ρεύματα, ίσως κατά τάξη μεγέθους των εκατοντάδων αμπέρ.

Όταν το ανθρώπινο σώμα γίνεται μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, το ρεύμα που το διαπερνά μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας το θεώρημα του Thévenin και το νόμο ρευμάτων Kirchhoff, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 27](#). Για το συνεχές ρεύμα (DC) και το εναλλασσόμενο (AC) στα 50 Hz, το ανθρώπινο σώμα μπορεί να αντικατασταθεί από μια αντίσταση στα ισοδύναμα κυκλώματα. Η αντίσταση του σώματος που λαμβάνεται υπόψη είναι συνήθως μεταξύ δύο ακραίων σημείων, είτε από το ένα χέρι στα δύο πόδια είτε από το ένα πόδι στο άλλο.

Πειράματα έχουν δείξει ότι το σώμα μπορεί να αντέξει πολύ μεγαλύτερο ρεύμα που ρέει από ένα πόδι στο άλλο από ό,τι όταν το ρεύμα ρέει από το ένα χέρι στα πόδια. Η [Εικόνα 27α](#) δείχνει μια περίπτωση με το ρεύμα να ρέει από το χέρι προς τα πόδια.

Αντίθετα, η [Εικόνα 27β](#) δείχνει μια περίπτωση με το ρεύμα να ρέει από το ένα πόδι προς το άλλο πόδι. Σημειώστε ότι σε κάθε περίπτωση, το ρεύμα του σώματος  $I_b$  οφείλεται στη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και B.



Εικόνα 27 Κλασικές καταστάσεις κινδύνου ηλεκτροπληξίας: (α) Τάση επαφής, (β) το αντίστοιχο κύκλωμα, (γ) τάση βήματος, (δ) το αντίστοιχο κύκλωμα. [21]

Συνήθως, ρεύματα 1 mA ή περισσότερο, αλλά λιγότερα από 6 mA, καθορίζονται ως δευτερεύοντα ρεύματα (ρεύματα απελευθέρωσης). Το ρεύμα απελευθέρωσης είναι το μέγιστο επίπεδο ρεύματος, στο οποίο ένας άνθρωπος που κρατά έναν ενεργοποιημένο αγωγό μπορεί να ελέγξει αρκετά τους μύες του για να τον αφήσει. Για το 99,5% του πληθυσμού, το ελάχιστο απαιτούμενο ρεύμα του σώματος  $I_b$  στα 60 Hz, που οδηγεί σε πιθανή θανατηφόρο καρδιακή μαρμαρυγή για ένα άτομο 50 κιλών, μπορεί να εκφραστεί ως

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \text{ A} \quad (8)$$

και για ένα άτομο 70 κιλών ως

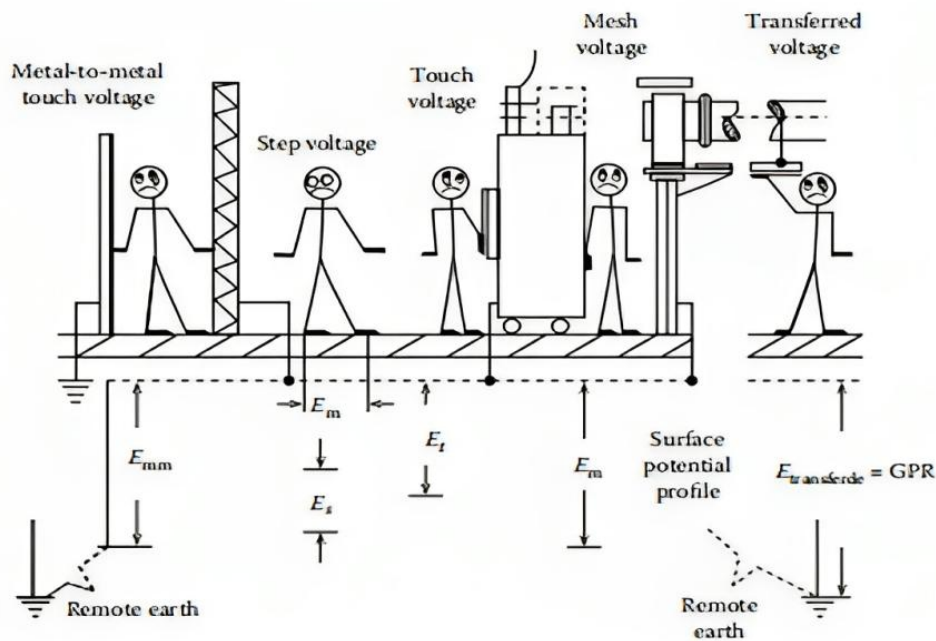
$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \text{ A} \quad (9)$$

όπου  $t_s$  ο χρόνος απελευθέρωσης που κυμαίνεται μεταξύ των 8.3 ms και 5 s.

Οι επιπτώσεις όταν το ηλεκτρικό ρεύμα περνά μέσα από το ανθρώπινο σώμα επηρεάζονται από αρκετούς παράγοντες, όπως τη διάρκεια, το μέγεθος και τη συχνότητα του ρεύματος. Το ρεύμα αυτό ρέει συνήθως μεταξύ δύο άκρων, όπως από το ένα χέρι στα δύο πόδια ή από το ένα πόδι στο άλλο. Η Εικόνα 28 απεικονίζει διαφορετικές καταστάσεις που σχετίζονται με ένα άτομο και εγκαταστάσεις που είναι συνδεδεμένες στη γη κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος. [21]



Οι όροι που χρησιμοποιούνται στην εικόνα έχουν συγκεκριμένες σημασίες. Η "mesh voltage" αναφέρεται στη μέγιστη τάση επαφής μέσα σε ένα πλέγμα γείωσης. "Metal-to-metal touch voltage" αναπαριστά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων ή δομών μέσα σε έναν χώρο υποσταθμού που μπορεί να γεφυρωθεί από άμεση επαφή χεριού προς χέρι ή πόδι προς πόδι. Η "step voltage" είναι η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης εφαρμοζόμενη μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το βήμα του οποίου έχει άνοιγμα 1m, ενώ το άτομο δεν έρχεται σε επαφή με γειωμένα αντικείμενα. Από την άλλη, η "touch voltage" αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ της ανύψωσης δυναμικού γης (GPR) και του δυναμικού επιφανείας στο σημείο, όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως το χέρι του έρχεται σε επαφή με μια γειωμένη εγκατάσταση. Το "transferred voltage" είναι μια ειδική περίπτωση της τάσης επαφής (touch voltage) όπου τάση μεταφέρεται εντός ή εκτός του υποσταθμού προς ή από ένα απομακρυσμένο εξωτερικό σημείο. [21]



Εικόνα 28 Πιθανές βασικές καταστάσεις ηλεκτροπληξίας. [21]

Το "GPR" (Ανύψωση του Δυναμικού της Γης), όπως έχει ειπωθεί και στο [Κεφάλαιο 3.2](#), είναι το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που μπορεί να έχει ένα πλέγμα γείωσης του υποσταθμού σε σχέση με ένα απομακρυσμένο γειτονικό σημείο που υποθέτουμε ότι βρίσκεται υπό δυναμικό μηδέν. Αυτή η τάση ισούται με το μέγιστο ρεύμα του πλέγματος πολλαπλασιασμένο με την αντίσταση του. Κατά την κανονική λειτουργία, ο γειωμένος ηλεκτρικός εξοπλισμός λειτουργεί κοντά στο μηδενικό δυναμικό της γης, πράγμα που σημαίνει ότι το δυναμικό ενός γειωμένου ουδέτερου αγωγού είναι σχεδόν ίδιο με το δυναμικό της απομακρυσμένης γης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος ως προς γη, ένα μέρος του ρεύματος βραχυκυκλώματος που διακινείται από το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού στη γη προκαλεί την αύξηση του δυναμικού του πλέγματος σε σχέση με την απομακρυσμένη γη. [21]

### 3.4 Συστήματα Γείωσης MT/XT

Τα συστήματα γείωσης αναφέρονται στις δομές και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ασφαλών και αποτελεσματικών γειωτικών συνδέσεων σε ηλεκτρικά κυκλώματα και εγκαταστάσεις. Ο σκοπός των συστημάτων γείωσης είναι να διασφαλίσουν την ασφάλεια των ανθρώπων και των συσκευών από τυχόν επικίνδυνες τάσεις και να διευκολύνουν την απομάκρυνση στατικής ηλεκτρικής φόρτισης προς τη γη. [22]

Υπάρχουν 3 κύρια είδη συστημάτων γείωσης. Αυτά είναι:

- **Γείωση λειτουργίας:** Αυτό είναι το σύστημα που εξασφαλίζει τη γείωση των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων που ανήκουν στο βασικό κύκλωμα λειτουργίας (ουδέτερος κόμβος γεννητριών, μετασχηματιστών κ.λπ.).
- **Γείωση προστασίας:** Αυτό το σύστημα εστιάζει στην αγωγίμη σύνδεση των μεταλλικών μερών των συσκευών που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας, με σκοπό την προστασία από επικίνδυνες τάσεις.
- **Γείωση ασφαλείας:** Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση στατικής ηλεκτρικής φόρτισης από τα κτίρια και τις εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των αλεξικέραυνων που διασφαλίζουν την ασφάλεια από κεραυνούς.

Οι κατάλληλες μέθοδοι και πρακτικές για την εγκατάσταση συστημάτων γειώσεων εξαρτώνται από τους τύπους των εγκαταστάσεων, τους κανονισμούς ασφαλείας και τις τοπικές συνθήκες.

Για την χαμηλή τάση διακρίνονται τρεις οικογένειες συστημάτων γείωσης, χρησιμοποιώντας τους διακριτικούς δύο χαρακτήρες TN, TT και IT.

Ο πρώτος χαρακτήρας υποδεικνύει τη σύνδεση μεταξύ της γης και του εξοπλισμού παροχής ισχύος (γεννήτριας ή μετασχηματιστή):

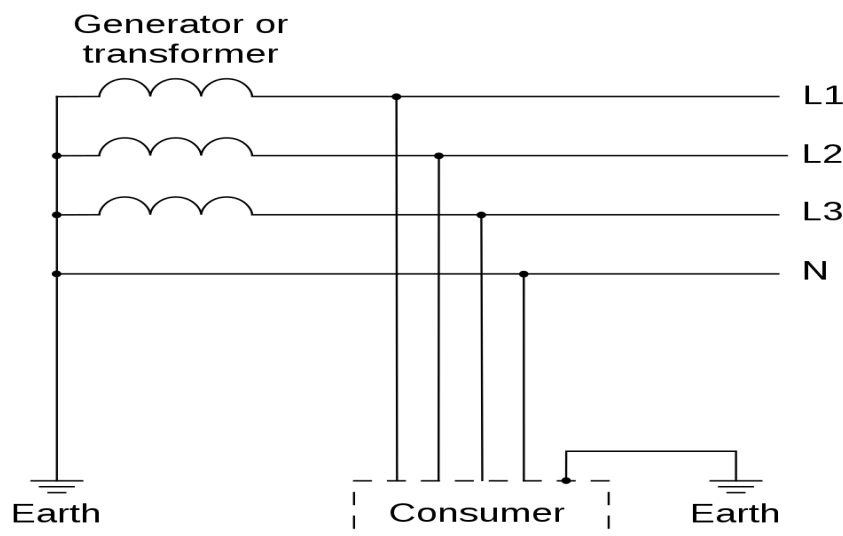
- "T" — Άμεση σύνδεση ενός σημείου με τη γη
- "I" — Κανένα σημείο δεν είναι συνδεδεμένο με τη γη, εκτός ίσως από μια υψηλή αντίσταση.

Ο δεύτερος χαρακτήρας υποδεικνύει τη σύνδεση μεταξύ της γης ή του δικτύου και της ηλεκτρικής συσκευής που τροφοδοτείται:

- "T" — Η σύνδεση με τη γη είναι με τοπική άμεση σύνδεση με τη γη, συνήθως μέσω ενός αγωγού γείωσης.
- "N" — Η σύνδεση με τη γη παρέχεται από το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

### Σύστημα TT (γείωση του ουδέτερου)

Ένα σημείο στην πηγή της τροφοδοσίας συνδέεται απευθείας με τη γη. Όλα τα εξωτερικά αγωγίμα μέρη συνδέονται με έναν ξεχωριστό ηλεκτρόδιο γης στην εγκατάσταση. Αυτό το ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητο από το ηλεκτρόδιο της πηγής. Οι δύο ζώνες επιρροής μπορεί να επικαλύπτονται χωρίς να επηρεάζουν τη λειτουργία των προστατευτικών συσκευών.



Εικόνα 29 Σύστημα γείωσης TT. [22]

### Συστήματα TN (εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη συνδεδεμένα στον ουδέτερο αγωγό)

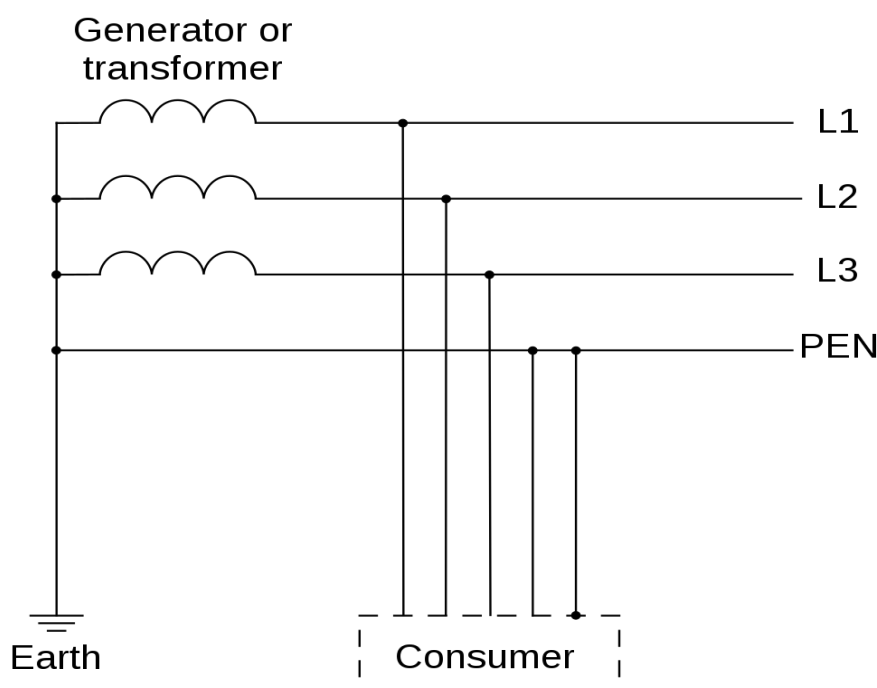
Η πηγή γειώνεται όπως και στο σύστημα TT. Στην εγκατάσταση, όλα τα εκτεθειμένα και εξωτερικά αγωγίμα μέρη συνδέονται στον ουδέτερο αγωγό. Υπάρχουν 3 εκδοχές του συστήματος TN τα TN-C, TN-S και το TN-C-S.

#### Σύστημα TN-C

Ο ουδέτερος αγωγός χρησιμοποιείται και ως προστατευτικός αγωγός και αναφέρεται ως αγωγός PEN (Protective Earth and Neutral). Αυτό το σύστημα δεν επιτρέπεται για αγωγούς μικρότερους των 10 mm<sup>2</sup> ή για φορητό εξοπλισμό.

Το σύστημα TN-C απαιτεί ένα αποτελεσματικό ισοδυναμικό περιβάλλον εντός της εγκατάστασης, με διασκορπισμένα ηλεκτρόδια γης που τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο συστηματικά, διότι ο αγωγός PEN είναι ταυτόχρονα και ο ουδέτερος αγωγός και μεταφέρει ασύμμετρα ρεύματα, καθώς και ρεύματα 3ης τάξης αρμονικής (και τα πολλαπλά τους).

Στο σύστημα TN-C, η λειτουργία του "προστατευτικού αγωγού" έχει προτεραιότητα έναντι της "ουδέτερης λειτουργίας". Ειδικότερα, ένας αγωγός PEN πρέπει πάντα να συνδέεται με τον τερματικό γείωσης, και ένας διακόπτης χρησιμοποιείται για να συνδέσει αυτόν τον τερματικό με τον ουδέτερο τερματικό.

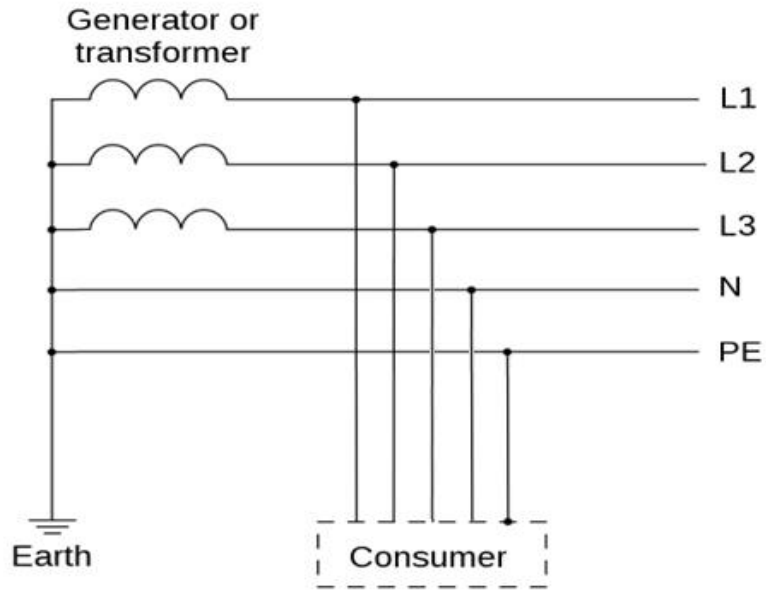


Εικόνα 30 Σύστημα γείωσης TN-C. [22]

#### Σύστημα TN-S (5 αγωγοί)

Το σύστημα TN-S (5 αγωγοί) είναι υποχρεωτικό για κυκλώματα με αγωγούς μικρότερους των 10 mm<sup>2</sup> ή για φορητό εξοπλισμό.

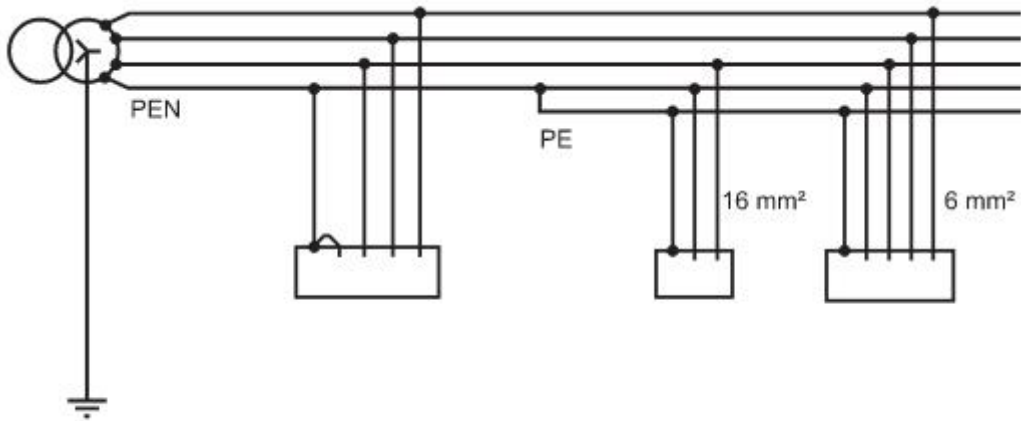
Ο προστατευτικός αγωγός και ο ουδέτερος αγωγός είναι χωριστοί. Σε υπόγεια συστήματα καλωδίωσης όπου υπάρχουν καλώδια με μολύβδο, ο προστατευτικός αγωγός είναι γενικά το μολύβδινο περίβλημα.



Εικόνα 31 Σύστημα γείωσης TN-S. [22]

### Σύστημα TN-C-S

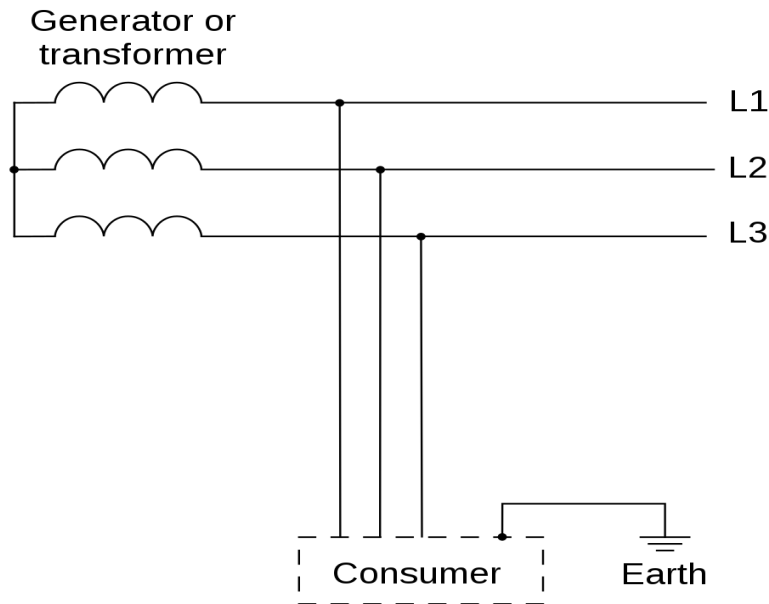
Τα συστήματα TN-C και TN-S μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια εγκατάσταση. Για το σύστημα TN-C-S, θέλει μεγάλη προσοχή, το σύστημα TN-C (4 αγωγοί) να μην χρησιμοποιείται κάτω από το σύστημα TN-S (5 αγωγοί), καθώς οποιαδήποτε διακοπή στον ουδέτερο στο πάνω μέρος θα οδηγούσε σε διακοπή στον προστατευτικό αγωγό στο κάτω μέρος και, συνεπώς, σε κίνδυνο.



Εικόνα 32 Σύστημα γείωσης TN-C-S. [22]

### Σύστημα IT (απομονωμένος ή γειωμένος ουδέτερος)

Στο σύστημα IT, ο ουδέτερος αγωγός είναι είτε απομονωμένος από τη γη, είτε είναι γειωμένος σε κάποιο ουδέτερο σημείο με μια υψηλή αντίσταση.



Εικόνα 33 Σύστημα γείωσης IT. [22]

### 3.5 Συστήματα Ηλεκτροδίων Γείωσης

Τα συστήματα ηλεκτροδίων γείωσης αναφέρονται στα διάφορα συστατικά και μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί μια ασφαλή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης και της Γης, επίσης γνωστή ως γείωση. Αυτά τα συστήματα είναι κρίσιμα για την ασφάλεια και την ορθή λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων, αποτρέποντας ηλεκτροπληξίες, διαχειρίζοντας τα ρεύματα σφαλμάτων και μεταφέροντας την ενέργεια από κεραυνούς προς τη γη. [23]

#### 3.5.1 Γειωτής Ράβδου

Οι γειωτές ράβδοι, είναι μεταλλικές ράβδοι που εισάγονται στο έδαφος για να δημιουργήσουν άμεση ηλεκτρική διασύνδεση ανάμεσα σε ένα ηλεκτρικό σύστημα και τη Γη. Παίζουν ένα κρίσιμο ρόλο στα συστήματα γείωσης παρέχοντας ένα μονοπάτι χαμηλής αντίστασης για τη διάχυση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο έδαφος, μειώνοντας τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας και βοηθώντας στη διαχείριση παροδικών γεγονότων, όπως οι κεραυνοί.

Οι γείωσης ράβδοι συνήθως είναι κατασκευασμένοι από υλικά όπως χαλκός ή γαλβανισμένος χάλυβας λόγω της καλής τους αγωγιμότητας και αντοχής στη διάβρωση. Έχουν διάφορα μήκη και διαμέτρους ανάλογα με παράγοντες, όπως ο τύπος του εδάφους και οι απαιτήσεις του ηλεκτρικού συστήματος. [23]

#### 3.5.2 Γειωτής Πλάκας

Μια γείωση μπορεί επίσης να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ενός αγωγού πλάκας τοποθετημένη σε βάθος τουλάχιστον 0,5 m. Η πλάκα πρέπει να έχει ελάχιστη επιφάνεια 0,20 m<sup>2</sup> για επαφή με τη Γη. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι μια πλάκα γείωσης μπορεί να έχει διαστάσεις 0,35 m X 0,35 m, αφού υπάρχουν 2 πλευρές της πλάκας σε επαφή με τη Γη. Για πλάκες που κατασκευάζονται από ακάλυπτο σίδηρο ή χάλυβα, το ελάχιστο πάχος της πλάκας είναι ¼ ίντσα για να ληφθεί υπόψη η διάβρωση της πλάκας με τον χρόνο. Οι πλάκες από μη-σιδηρούχα μέταλλα επιτρέπεται να έχουν πάχος μόλις 1,5 χιλιοστών. [23]

### 3.5.3 Μεταλλικός Αγωγός Νερού

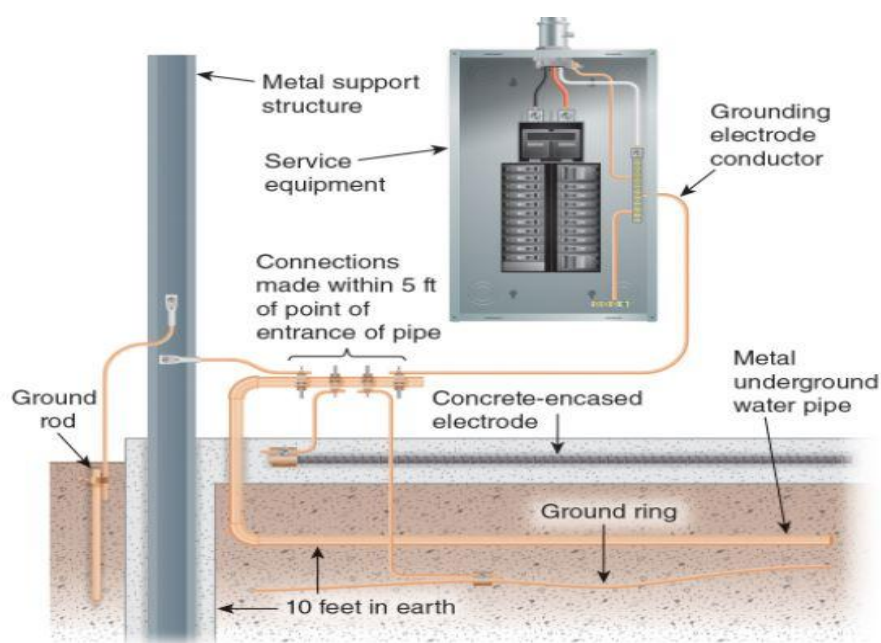
Ο μεταλλικός υπόγειος σωλήνας νερού συχνά αναφέρεται ως "σύνδεσμος νερού" από πολλούς στον τομέα. Για έναν μεταλλικό υπόγειο σωλήνα νερού να προσδιοριστεί ως ηλεκτρόδιο, πρέπει να έχουμε τουλάχιστον 3 m άμεσης επαφής με τη Γη. [23]

### 3.5.4 Μεταλλική Δομή Υποστήριξης στο Έδαφος

Η μεταλλική δομή υποστήριξης στο έδαφος συχνά αναφέρεται ως "κτιριακός χάλυβας", αλλά είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι όχι όλα τα ατσάλινα πλαίσια ενός κτιρίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια γείωσης. Για να προσδιοριστεί μια μεταλλική δομή ως ηλεκτρόδιο γείωσης, πρέπει να υπάρχει άμεση επαφή με το έδαφος ή με το σκυρόδεμα που έρχεται άμεσα σε επαφή με το έδαφος. Τα ατσάλινα κτιριακά πλαίσια συχνά στερεώνονται με βίδες σε βίδες που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα του θεμελίου και δεν έχουν φυσική επαφή με τη Γη ίδια. Για το μεταλλικό πλαίσιο ενός κτιρίου να προσδιοριστεί ως ηλεκτρόδιο, πρέπει να υπάρχει ελάχιστο ύψος 3 m σε επαφή με το έδαφος, με ή χωρίς σκυρόδεμα. Εάν υπάρχουν πολλές μεταλλικές δομές που πληρούν αυτή την προϋπόθεση, αρκεί να συνδεθεί μία με το σύστημα ηλεκτροδίου γείωσης. Ωστόσο, δεν υπάρχει καμία απαγόρευση για τη χρήση πολλαπλών μεταλλικών ηλεκτροδίων στο έδαφος ως μέρος του συστήματος γείωσης του κτιρίου. [23]

### 3.5.5 Ηλεκτρόδιο Καλυπτόμενο από Σκυρόδεμα

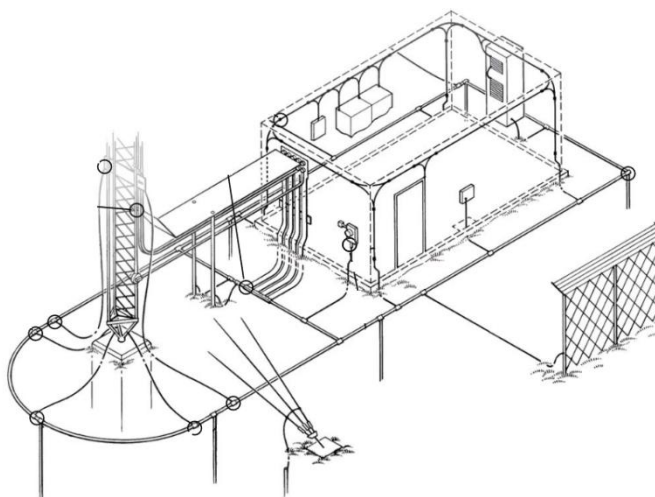
Το ηλεκτρόδιο που καλύπτεται από σκυρόδεμα είναι ένα ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιεί τα δομικά στοιχεία του σκυροδέματος ενός κτιρίου για να δημιουργήσει σύνδεση με τη Γη. Ποιο γνωστή και ως θεμελιακή γείωση, αυτή η μέθοδος είναι η πλέον ποιο αποτελεσματική και ασφαλής μέθοδος γείωσης κτιριακών εγκαταστάσεων. Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι για τη δημιουργία αυτού του ηλεκτροδίου. Αυτό το ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι είτε ένα ελάχιστο πάχους 25 γυμνό χαλκό καλώδιο είτε μπορεί να είναι ατσάλινες ράβδοι ενίσχυσης χωρίς επικάλυψη με ελάχιστη διάμετρο 1/2 ίντσας. Και οι δύο μέθοδοι πρέπει να είναι ελάχιστα 3 m σε μήκος και να επικαλύπτονται από τουλάχιστον 2 ίντσες σκυροδέματος που βρίσκεται σε άμεση επαφή με τη Γη. Όταν αυτό το ηλεκτρόδιο αποτελείται από ατσάλινες ράβδους ενίσχυσης, επιτρέπεται να συνδεθούν πολλαπλά μικρότερα τμήματα ράβδων με τους συνηθισμένους τρόπους, αλλά το τελικό συναρμολογημένο μήκος πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από 3m. Και πάλι, σε κτίρια με πολλά διαθέσιμα ηλεκτρόδια, επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί απλώς ένα μόνο ηλεκτρόδιο στο συνολικό σύστημα.



Εικόνα 34 Συστήματα ηλεκτροδίων γείωσης. [23]

### 3.5.6. Περιμετρικός Γειωτής

Ένας περιμετρικός γειωτής είναι ένα ηλεκτρόδιο γείωσης που περιβάλλει εντελώς το κτίριο ή τη δομή. Αυτό αποτελείται από ένα γυμνό χάλκινο καλώδιο πάχους τουλάχιστον 35 mm και πρέπει να έχει μήκος τουλάχιστον 3m. Αυτός ο τύπος ηλεκτροδίου πρέπει να εγκατασταθεί και δεν είναι μέρος του κτιρίου ή της δομής όπως τα πρώτα τρία ηλεκτρόδια.



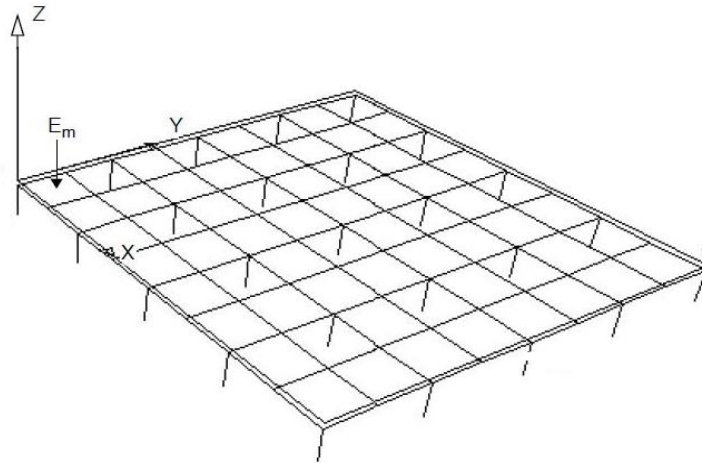
Εικόνα 35 Περιμετρική γείωση Εγκατάστασης. [24]

### 3.5.7. Γειωτής Πλέγματος

Το πλέγμα γείωσης είναι μια μέθοδος γείωσης που περιλαμβάνει τον χρήση ενός πλέγματος αγώγιμου υλικού, συνήθως χαλκού, που τοποθετείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό σύστημα του κτιρίου ή της δομής. Το πλέγμα αυτό είναι συχνά σε μορφή πλακέτας (Εικόνα 36), με πολλές αγώγιμες λωρίδες που διασχίζουν το έδαφος.

Η γείωση μέσω πλέγματος έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει ομοιόμορφη και ευρεία επαφή με το έδαφος, βοηθώντας στη διάχυση των ρευμάτων σφάλματος. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας ή τη διαχείριση ρευμάτων σφαλμάτων σε ευαίσθητες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως σε ιατρικά κτίρια ή εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πλέγμα γείωσης μπορεί να συνδυαστεί με άλλα είδη ηλεκτροδίων γείωσης για να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα του συστήματος γείωσης.[28]



Εικόνα 36 Γειωτής πλέγματος 8X8.

### 3.5.8. Συνδυαστικές Μέθοδοι Γείωσης

Σε πολλές περιπτώσεις, η υψηλή αντίσταση του εδάφους (όπως βραχώδες έδαφος, ξηρή άμμος κ.λπ.) και/ή η έλλειψη επαρκούς χώρου για την εγκατάσταση γείωσης αποτελούν εμπόδια στο να κατασκευαστεί και να υλοποιηθεί ένα αποτελεσματικό σύστημα γείωσης. Γι' αυτό τον λόγο, είναι δυνατό να συνδυάζονται διάφορα συστήματα γείωσης με στόχο την επίτευξη της επιθυμητής αντίστασης γείωσης. Ένα συχνό παράδειγμα αυτού είναι το πλέγμα γείωσης σε συνδυασμό με τους γειωτές ράβδους με διάφορες γεωμετρίες.



# Κεφάλαιο 4 Παρουσίαση Λογισμικού Προσομοιώσεων και Ανάλυση & Μελέτη Συστήματος Γείωσης σε Τυπικό Δίκτυο Διανομής

## 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής, αναλύεται η αποτελεσματικότητα τριών πλεγμάτων γείωσης για υπαίθρια δίκτυα χαμηλής τάσης. Η μελέτη περιλαμβάνει τη χρήση δύο λογισμικών, το SES AutoGridPro και το PowerFactory.

Στο SES AutoGridPro, προσομοιώθηκαν τα πλέγματα και αναλύθηκε η κατανομή των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής που προκύπτουν όταν κάποιος άνθρωπος έρχεται σε επαφή με το μεταλλικό περίβλημα του υποσταθμού, ένα μεταλλικό αντικείμενο που έχει κοινή γείωση με τον υποσταθμό ή ακόμα και όταν ένα μεταλλικό αντικείμενο γεφυρώνει την απόσταση ανάμεσα σε αυτό και τον υποσταθμό, ενώ παράλληλα συμβαίνει μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γείωση. Επίσης, από το AutoGridPro υπολογίστηκαν η συνολική αντίσταση γείωσης για κάθε σύστημα και τα ασφαλή όρια τάσης που αφορούν τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής.

Με τη χρήση του PowerFactory, προσομοιώθηκε μια γραμμή μέσης τάσης και μελετήθηκαν οι συνέπειες βραχυκυκλωμάτων σε διάφορα σημεία της. Εκμεταλλευόμενοι τη συνολική αντίσταση γείωσης που προκύπτει από το AutoGridPro, υπολογίστηκαν τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως που προκαλούνται από μονοφασικά βραχυκυκλώματα προς τη γείωση στην αρχή, στο μέσον και στο τέλος της γραμμής. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιήθηκαν στο AutoGridPro για να υπολογιστούν οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια λεπτομερής ανάλυση των λογισμικών SES AutoGridPro και PowerFactory, καθώς και των δεδομένων που εισήχθησαν σε αυτά για την προσομοίωση των επιθυμητών πλεγμάτων γείωσης.

## 4.2 Παρουσίαση Λογισμικού PowerFactory

Το PowerFactory είναι μια κορυφαία εφαρμογή λογισμικού ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και βιομηχανικών συστημάτων.

Καλύπτει ολόκληρο το φάσμα λειτουργικότητας από τις βασικές λειτουργίες έως τις υψηλά προηγμένες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αναλύσεων για αιολική ενέργεια, διεσπαρμένης παραγωγής, προσομοίωσης πραγματικού χρόνου και παρακολούθησης της απόδοσης για τον έλεγχο και την επίβλεψη των συστημάτων. Το PowerFactory είναι εύκολο στη χρήση, πλήρως συμβατό με τα Windows και συνδυάζει αξιόπιστες και ευέλικτες δυνατότητες μοντελοποίησης συστημάτων με προηγμένους αλγόριθμους και ένα μοναδικό σύστημα βάσης δεδομένων.

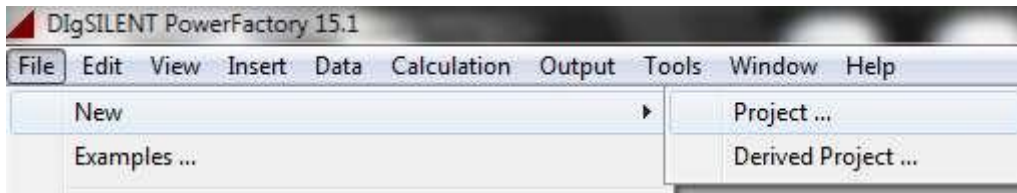
Επιπλέον, με την ευελιξία της για σενάρια και διασύνδεση, το PowerFactory είναι ιδανικό για υψηλά αυτοματοποιημένες και ενσωματωμένες λύσεις στις επιχειρηματικές σας εφαρμογές.

Με τη χρήση του PowerFactory, προσομοιώθηκαν τα πραγματικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας γραμμής MT μήκους 20 χιλιομέτρων με διασπαρμένη παραγωγή, που θα αναλύσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά της σε επόμενο κεφάλαιο.[26]

### 4.2.1 Δημιουργία Νέου Project

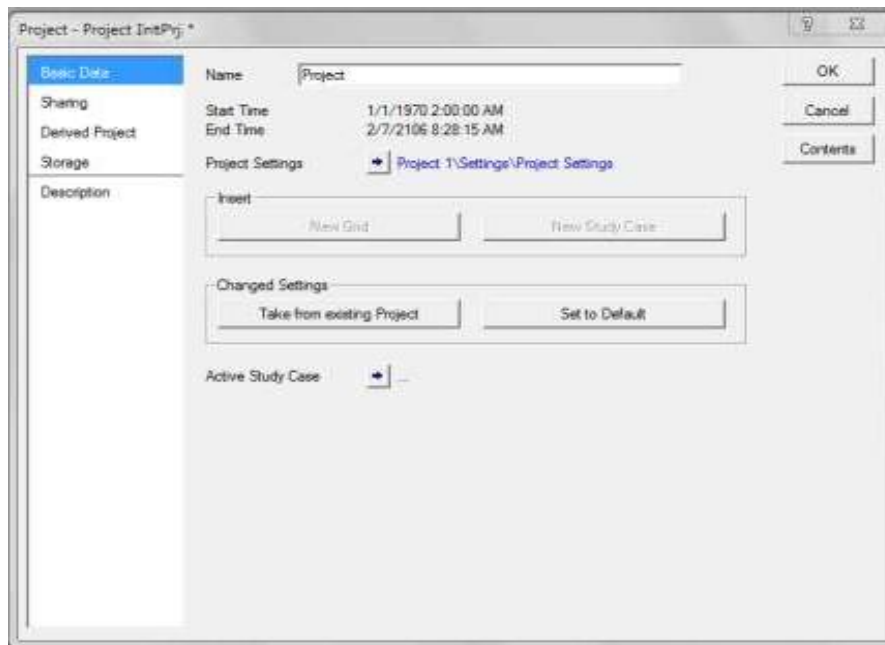
Για να δημιουργήσουμε ένα νέο Project στον φάκελο του χρήστη μας, ακολουθούμε τα εξής βήματα:

1. Κάνουμε κλικ στο μενού File που βρίσκεται στην κύρια γραμμή μενού.
2. Επιλέγουμε την επιλογή New.
3. Επιλέξτε το Project... όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 37).



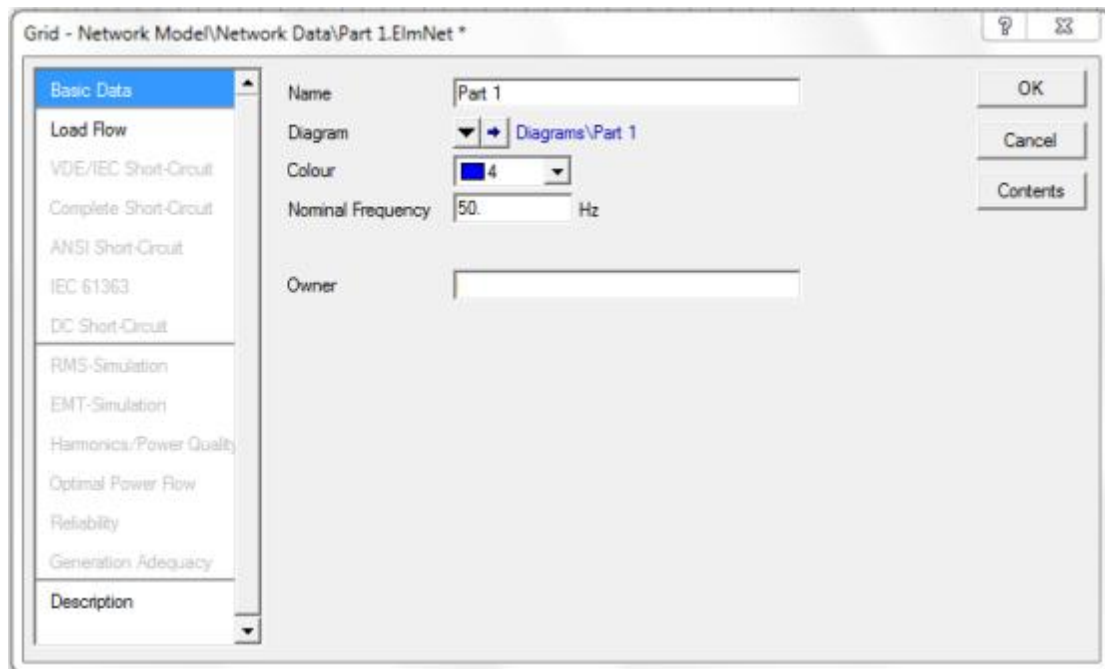
Εικόνα 37 Δημιουργία νέου Project.

Στην συνέχεια το πρόγραμμα μας ανοίγει το παράθυρο της Εικόνας 38 όπου ονοματίζουμε το νέο Project και πατάμε OK.



Εικόνα 38 Παράθυρο ονοματοδοσίας νέου Project.

Η δημιουργία ενός νέου έργου θα απενεργοποιήσει οποιοδήποτε ενεργό έργο υπήρχε, αν υπήρχε κάποιο ενεργό, και θα κλείσει όλα τα σχετικά γραφικά παράθυρα. Επιπροσθέτως, ένα έργο πρέπει να έχει τουλάχιστον ένα φάκελο πλέγματος όπου καθορίζεται ένα υποσύστημα ισχύος. Συνεπώς, ένας φάκελος πλέγματος δημιουργείται αυτόματα και εμφανίζεται η διάλογος επεξεργασίας του, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39 Παράθυρο επεξεργασίας grid.

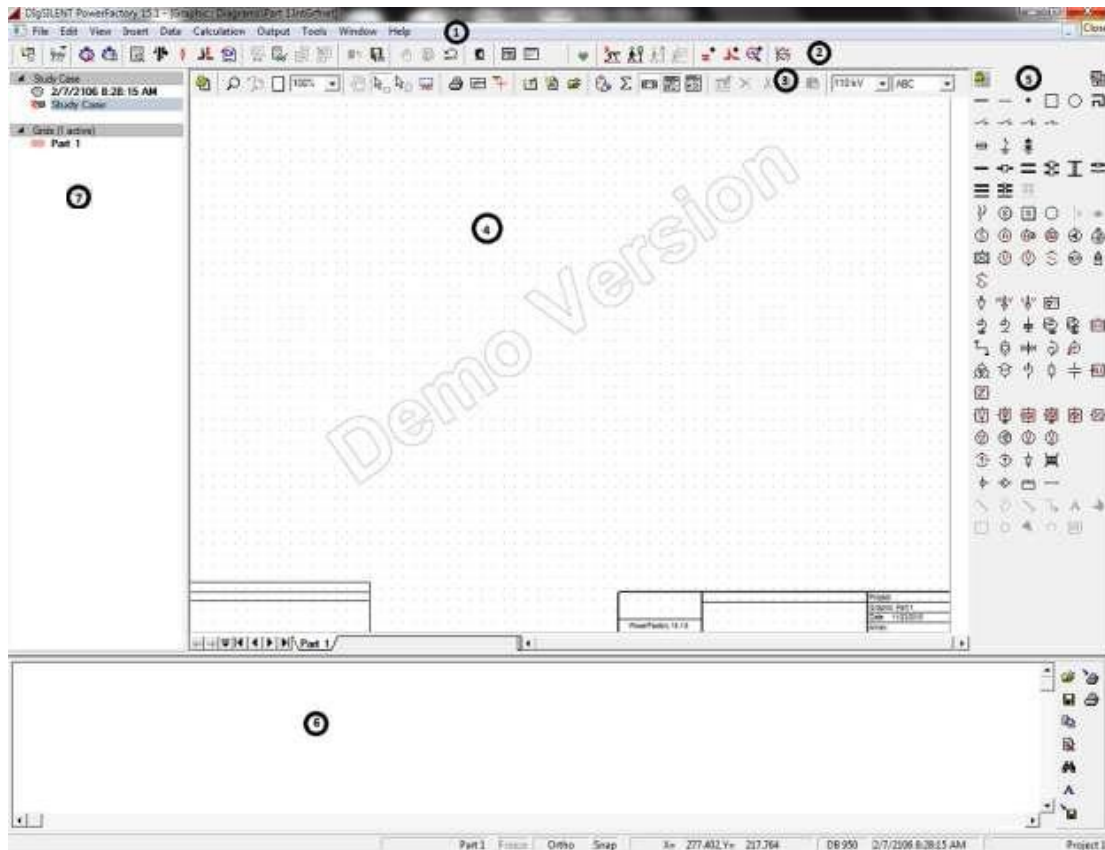
Όπου ενδεικτικά κάνουμε τις εξής ρυθμίσεις:

- Ονοματίζουμε το grid ενδεικτικά ως Part 1.
- Επιλέγουμε το επιθυμητό χρώμα ,στην δικιά μας περίπτωση το μπλε.
- Θέτουμε την συχνότητα συστήματος στα 50 Hz.
- Δίνουμε το όνομα του Owner.
- Τέλος πατάμε OK.

Πατώντας OK έχουμε ουσιαστικά τελειώσει με το αρχικό κομμάτι της δημιουργίας νέου Project.

#### 4.2.2 Χώρος Σχεδιασμού Νέου Project

Μετά την δημιουργία του νέου Project το πρόγραμμα μας έχει βάλει στον χώρο σχεδιασμού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 40), όπου έχει τα εξής αριθμημένα σημεία:



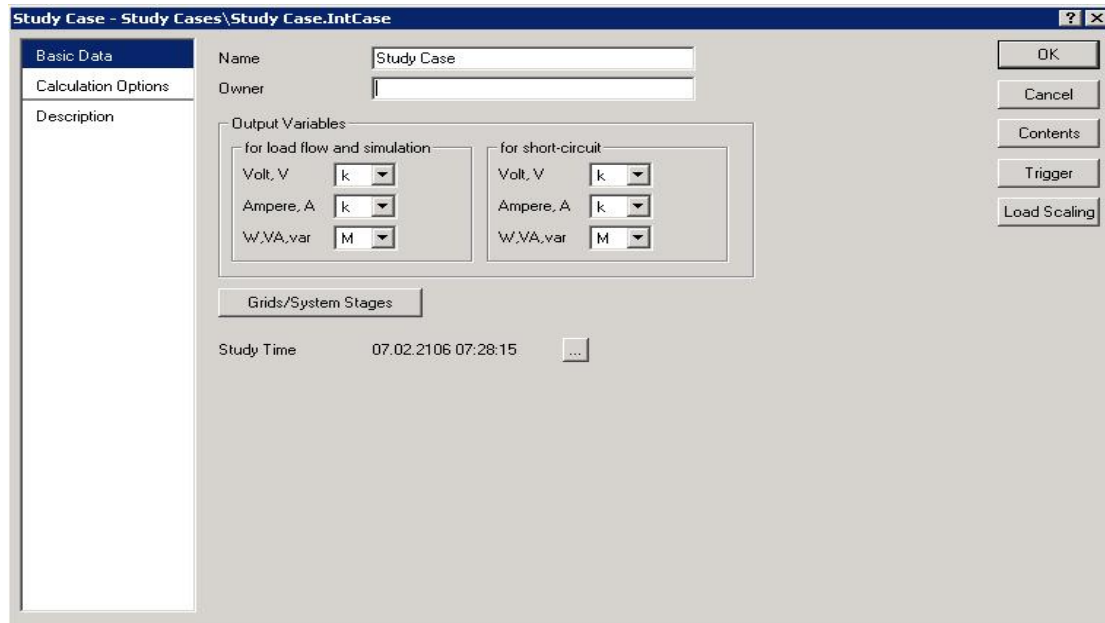
Εικόνα 40 Χώρος Σχεδιασμού Νέου Project.

1. Η γραμμή κύριου μενού.
2. Η γραμμή κύριας μπάρας. Αυτή περιλαμβάνει ένα πλαίσιο λίστας που εμφανίζει όλες τις περιπτώσεις μελέτης που είναι διαθέσιμες. Επιλέγοντας μια διαφορετική περίπτωση μελέτης από τη λίστα, αλλάζει σε αυτή την περίπτωση μελέτης.
3. Η γραμμή εικονιδίων του τοπικού γραφικού παραθύρου. Αυτή η γραμμή εργαλείων εμφανίζεται επίσης με μικρά κουμπιά "πάνω" και "κάτω" που επιτρέπουν την πρόσβαση σε επιπρόσθετα κουμπιά εάν το παράθυρο είναι πολύ μικρό για να εμφανίσει όλα τα κουμπιά. Τα εικονίδια σε αυτή την γραμμή εξαρτώνται από το περιεχόμενο του παραθύρου που εμφανίζεται. Σε αυτήν την συγκεκριμένη περίπτωση, είναι το γραφικό παράθυρο με τον μονόγραμμο.
4. Το άδειο παράθυρο μονογραμμικής σχεδίασης με η χωρίς πλέγμα. Το πλέγμα δείχνει πού θα προσκολλώνται γραφικά στοιχεία.
5. Η εργαλειοθήκη σχεδίασης των στοιχείων του συστήματος (πηγές, γραμμές μεταφοράς, ασφάλειες κτλ.)
6. Το παράθυρο εξόδου. Αυτό είναι το λευκό παράθυρο κάτω από το παράθυρο σχεδίασης. Χρησιμοποιείται για την εμφάνιση μηνυμάτων, αναφορών κειμένου και επίσης εμφανίζει ενεργές συνδέσεις για την αποσφαλμάτωση του μοντέλου δεδομένων.
7. Μπάρες case study και grid.

#### 4.2.3 Επεξεργασία Study Case

Αν και το δημιουργημένο project μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως είναι, μπορούμε κάνουμε επιπλέον επεξεργασία επιλέγοντας την επιλογή *Select the Edit → Project Data → Study Case*.

Από το κύριο μενού. Το παράθυρο επεξεργασίας του study case απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.

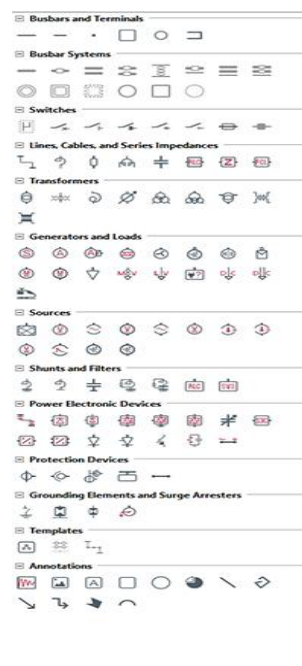


Εικόνα 41 Παράθυρο επεξεργασίας study case.

Από εδώ μπορούμε να αλλάξουμε την ονομασία του study case καθώς και να αλλάξουμε τα μεγέθη τιμών εξόδου μετά από μια προσομοίωση.

#### 4.2.4 Εισαγωγή Βασικών Στοιχείων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το πρόγραμμα PowerFactory επιτρέπει τη δημιουργία νέων σχεδίων ενεργού συστήματος ηλεκτροδότησης δημιουργώντας όλα τα στοιχεία και συνδέοντάς τα χειροκίνητα καθορίζοντας έτσι την τοπολογία και το σχέδιο του συστήματος. Η πιο βολική μέθοδος για την επίτευξη αυτού είναι η χρήση της εργαλειοθήκης σχεδίασης των στοιχείων του συστήματος που φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα η όπως φαίνεται στο νούμερο 6 της Εικόνας 40.

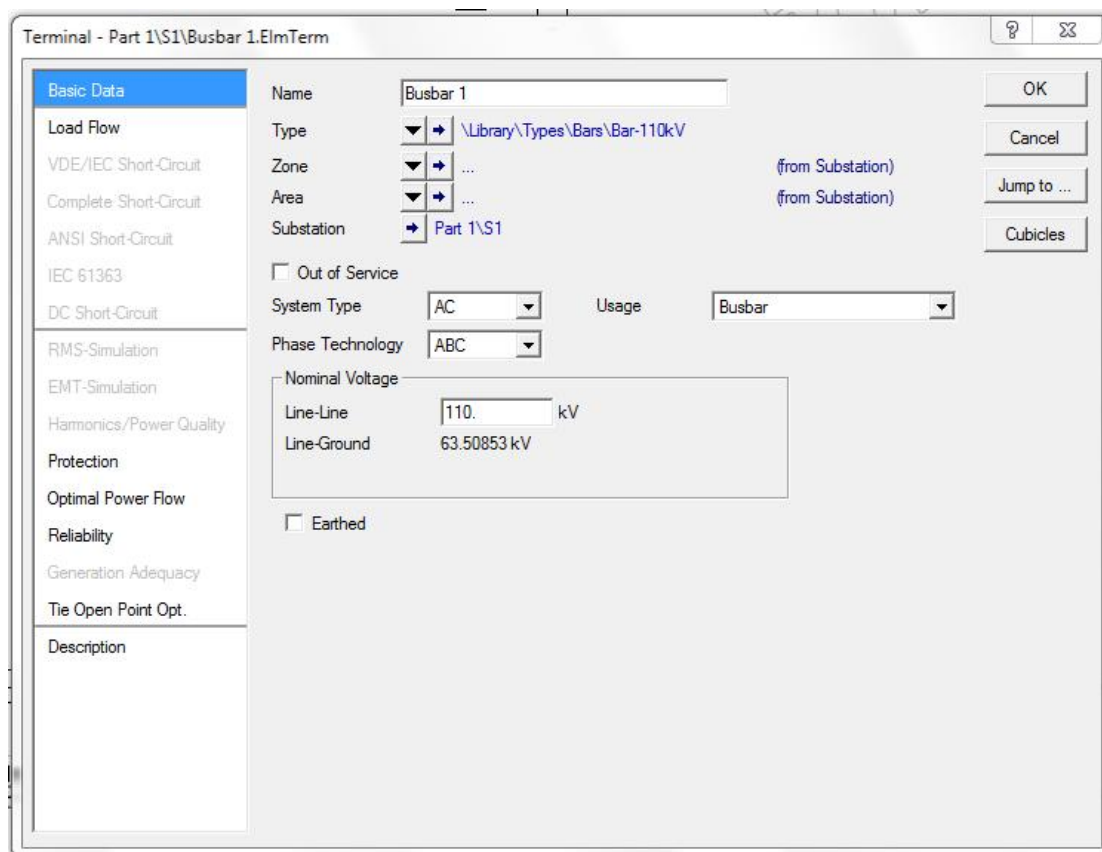


Εικόνα 42 Εργαλειοθήκη σχεδίασης στοιχείων συστήματος Powerfactory.

Όλες οι πληροφορίες των στοιχείων είναι επίσης προσβάσιμες μέσω ενός περιβάλλοντος βάσης δεδομένων κειμένου που ονομάζεται "Data Manager".



Τα εικονίδια ενός γραμμικού διαγράμματος χρησιμοποιούνται για την δημιουργία νέων στοιχείων του συστήματος ηλεκτροδότησης και την εισαγωγή τους στο σχέδιο του δικτύου.

Η επεξεργασία των δημιουργημένων στοιχείων του συστήματος ηλεκτροδότησης (π.χ. ορισμός τάσης ή άλλες ηλεκτρικές παραμέτρους) μπορεί να γίνει από το εικονίδιο ενός στοιχείου από το γραμμικό σχέδιο. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας διπλό κλικ στα γραφικά σύμβολα. Αυτό θα ανοίξει το αντίστοιχο διάλογο δεδομένων του στοιχείου του συστήματος ηλεκτροδότησης όπως φαίνεται π.χ. στην παρακάτω εικόνα για έναν ζυγό.

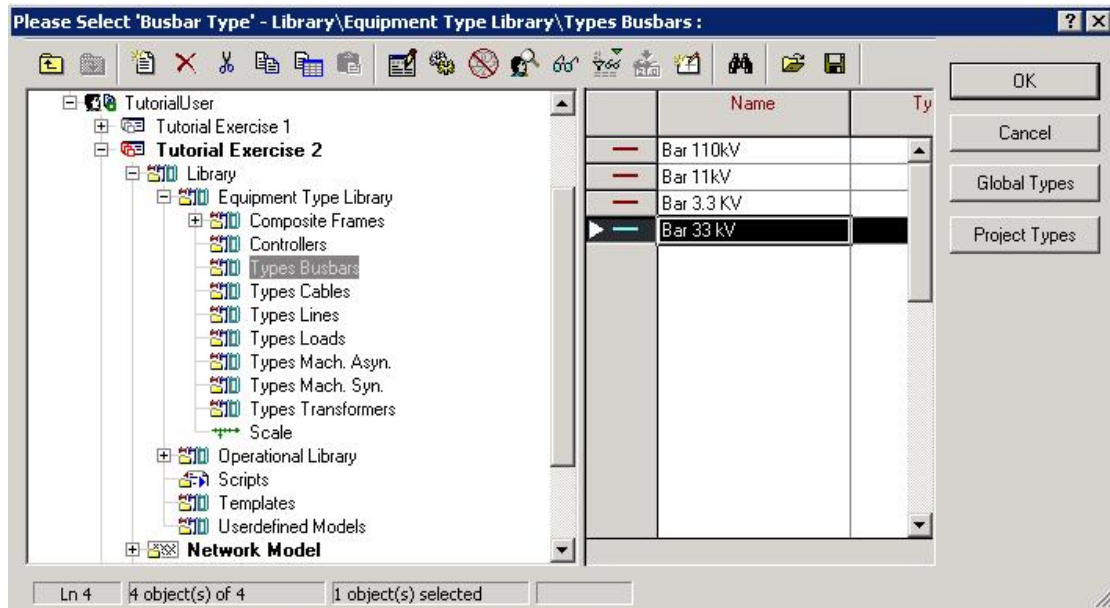


Εικόνα 43 Επεξεργασία Δεδομένων Ενός Ζυγού.

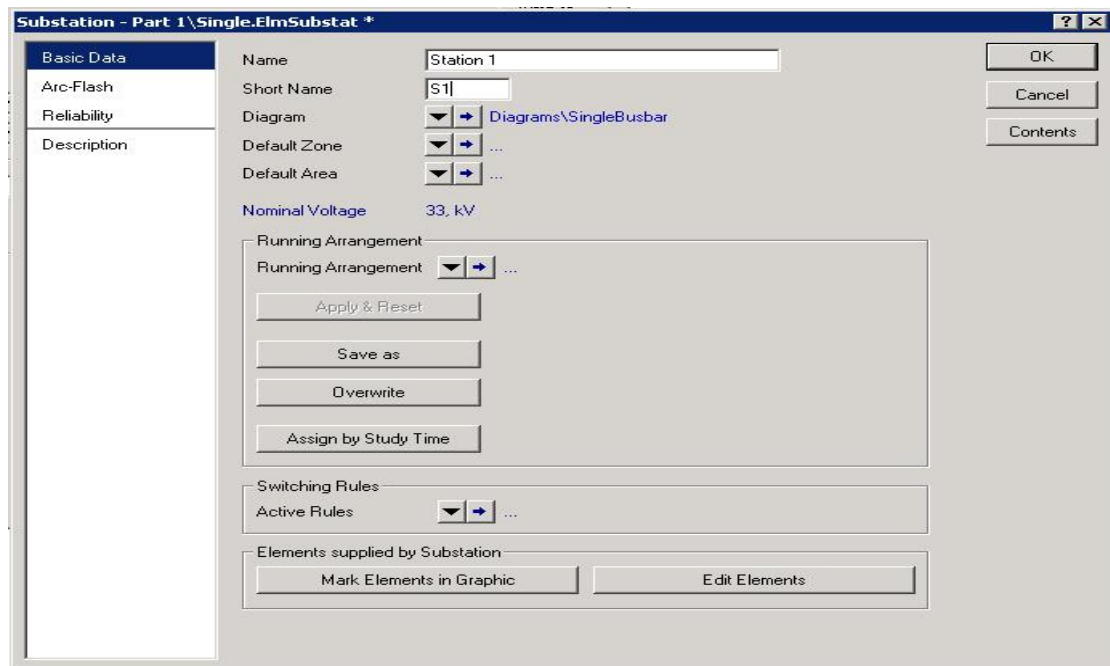
Για την παραπάνω περίπτωση στοιχείου συστήματος (Ζυγός) έχουμε τις εξής πληροφορίες:

- Καρτέλες σελίδων που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή παραμέτρων συγκεκριμένων για τον υπολογισμό (π.χ. 'Βασικά δεδομένα', 'Ροή φορτίου', κλπ.).
- Το όνομα του τερματικού.
- Τον τύπο του, με το κουμπί  αποκτάμε πρόσβαση στην βιβλιοθήκη τύπων του εκάστοτε στοιχείου (Εικόνα 44) όπου μπορούμε να επεξεργαστούμε τα στοιχεία του εκάστοτε στοιχείου.
- Μια Ζώνη και μια Περιοχή, στις οποίες ανήκει ο τερματικός.
- Το υποσταθμό στον οποίο ανήκει αυτό το τερματικό, πατώντας το κουμπί  ανοίγει το παράθυρο επεξεργασίας του υποσταθμού. (Εικόνα 45)
- Ο τύπος του Συστήματος (AC, DC ή AC/BI για διφασικά AC συστήματα όπως τα συστήματα σιδηροδρόμων).

- Η Τεχνολογία Φάσης για τον καθορισμό του αριθμού των φάσεων. Για παράδειγμα, μπορείτε να επιλέξετε εάν το τερματικό έχει ουδέτερου αγωγό ή όχι.
- Η ονομαστική τάση του τερματικού.




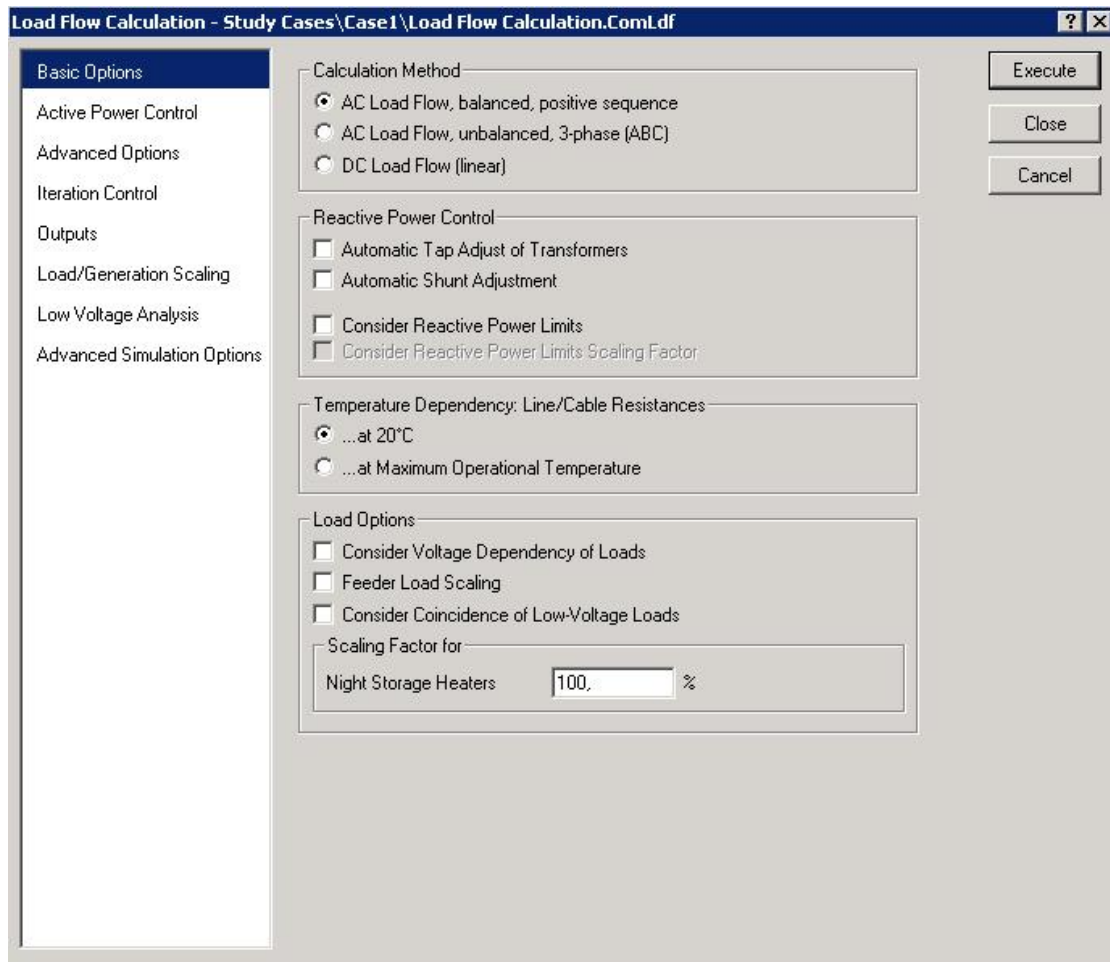
Εικόνα 44 Βιβλιοθήκη Τύπων Ηλεκτρικών Στοιχείων Συστήματος.



Εικόνα 45 Παράθυρο Επεξεργασίας Υποσταθμού.

#### 4.2.5 Υπολογισμός Ροής Φορτίου

Μια υπολογιστική διαδικασία ροής φορτίου (load flow calculation) μπορεί να ξεκινήσει από το κύριο μενού (*Calculation* → *Load flow*) ή κάνοντας κλικ στο εικονίδιο Ροής Φορτίου ( ) στην κύρια γραμμή εργαλείων. Αυτό θα ανοίξει το παρακάτω παράθυρο ρυθμίσεων για τον υπολογισμό της ροής φορτίου του συστήματος (Εικόνα 46).



Εικόνα 46 Παράθυρο ρυθμίσεων υπολογισμού ροής φορτίου.

Αυτός ο διάλογος εντολής προσφέρει διάφορες επιλογές για τον υπολογισμό της ροής του φορτίου.

Για τον υπολογισμό φορτίου σε αυτήν την διπλωματική εργασία, είχαμε επιλέξει τις παρακάτω ρυθμίσεις:

- Calculation Method = AC Load Flow, balanced, positive sequence.
- Temperature Dependency: Line/Cable Resistances = ...at 20 ° C.
- Απενεργοποιούμε όλες τις άλλες επιλογές στην καρτέλα βασικών επιλογών.
- Πατήστε το κουμπί "Εκτέλεση" (Execute).

Αν έχουμε κατασκευάσει το σύστημα μας σωστά, μετά την εκτέλεση θα δούμε στο παράθυρο εξόδου το εξής μήνυμα:

***DlgSI/info - Load flow calculation successful.***

Ενώ σε περίπτωση σφάλματος:


***DlgSI/err - Error in load flow data!***

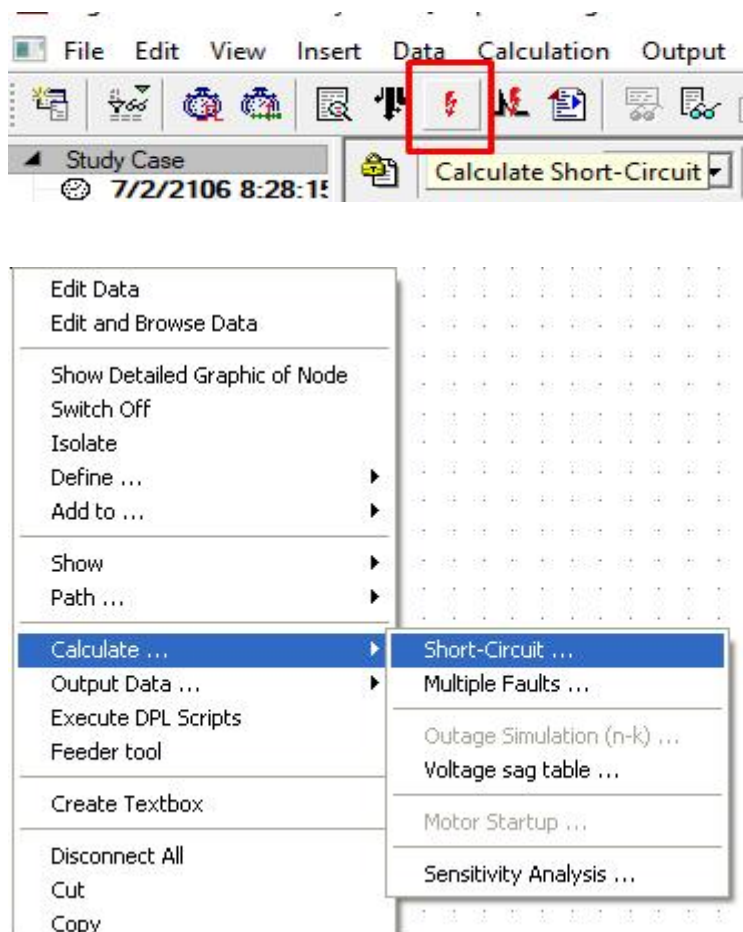
***DlgSI/info - Load flow calculation not executed.***

***DlgSI/err - last command leads to error(s), see output window!***



#### 4.2.6 Εκτέλεση Υπολογισμών Βραχυκυκλώματος

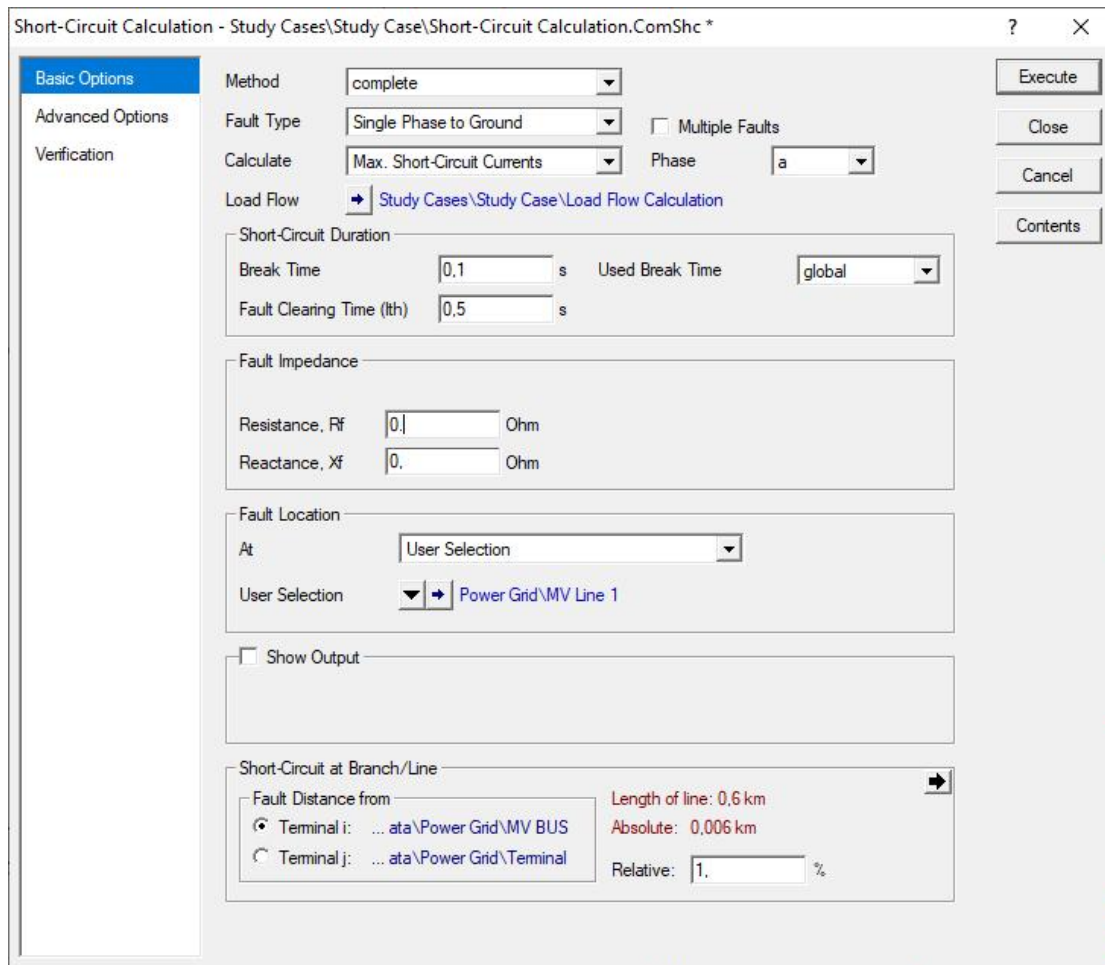
Η διαδικασία υπολογισμών βραχυκυκλώματος (short-circuit calculation) μπορεί να ξεκινήσει από το κύριο μενού (Calculate → short-circuit), κάνοντας κλικ στο εικονίδιο βραχυκυκλώματος (  ) στην κύρια γραμμή εργαλείων, ή απευθείας από το γραμμικό σχέδιο κάνοντας δεξί click το στοιχείο όπου θα γίνει το βραχυκύκλωμα και επιλέγοντας (Calculate → short-circuit) .



Εικόνα 47 Τρόποι Υπολογισμών Βραχυκυκλωμάτων.

Στην συνέχεια μας ανοίγει το παράθυρο της Εικόνας 48 όπου για τις απαιτήσεις αυτής της διπλωματικής κάνουμε τις εξής ρυθμίσεις:

- Στην επιλογή Method επιλέγουμε την επιλογή complete
- Στο Fault Type επιλέγουμε Single phase to Ground
- Στην επιλογή Resistance, Rf συμπληρώνουμε την τιμή της συνολικής αντίστασης γείωσης που την υπολογίζουμε με την χρήση του προγράμματος SES AutoGridPro.
- Τέλος στην επιλογή Relative κάτω δεξιά επιλέγουμε το ακριβές σημείο βραχυκυκλώματος του τμήματος που επιλέξαμε και πατάμε Execute.



Εικόνα 48 Ρυθμίσεις Υπολογισμού Βραχυκυκλώματος.

Η υπολογιστική διαδικασία βραχυκυκλώματος ξεκινά για ένα βραχυκύκλωμα μόνο στον επιλεγμένο ακροδέκτη. Τα αποτελέσματα δείχνουν τις ροές ρευμάτων σε ολόκληρο το δίκτυο.

### 4.3 Παρουσίαση Λογισμικού SES AutogridPro

Αυτό το ισχυρό, αλλά εύχρηστο λογισμικό πακέτο παρέχει ένα απλό, ενοποιημένο και αυτοματοποιημένο περιβάλλον για τη διενέργεια μελετών γείωσης. Αποτελείται από αρκετά ενσωματωμένα ενότητες υπολογισμού που έχουν σχεδιαστεί για τη μελέτη της αποτελεσματικότητας των εγκαταστάσεων γείωσης όσον αφορά την ηλεκτρική ασφάλεια τόσο του προσωπικού όσο και του εξοπλισμού, επιτρέποντάς μας να προτείνουμε βελτιώσεις υφιστάμενων η και σχεδιασμό νέων εγκαταστάσεων.

Ποιο συγκεκριμένα με το AutoGrid Pro, μπορούμε να:

1. μοντελοποιήσουμε γειώσεις κάθε σχήματος.
2. κάνουμε υπολογισμούς για την παρουσία κοντινών παθητικών ή φορτισμένων θαμμένων δομών, με δυνατότητα μοντελοποίησης πολλαπλών ηλεκτροδίων .
3. ερμηνεύσουμε μετρήσεων αντίστασης εδάφους που λαμβάνονται με τις μεθόδους Wenner, Schlumberger, Unipolar, Dipole-Dipole ή γενικευμένες μεθόδους.
4. μοντελοποιήσουμε ποικίλους πολύπλοκους τύπους εδάφους.
5. Κάνουμε υπολογισμούς για την παρουσία μεταδόσεων, διανομών ή καλωδίων που συνδέονται στο σύστημα γείωσης, όπως υπολογισμός της διανομής του ρεύματος

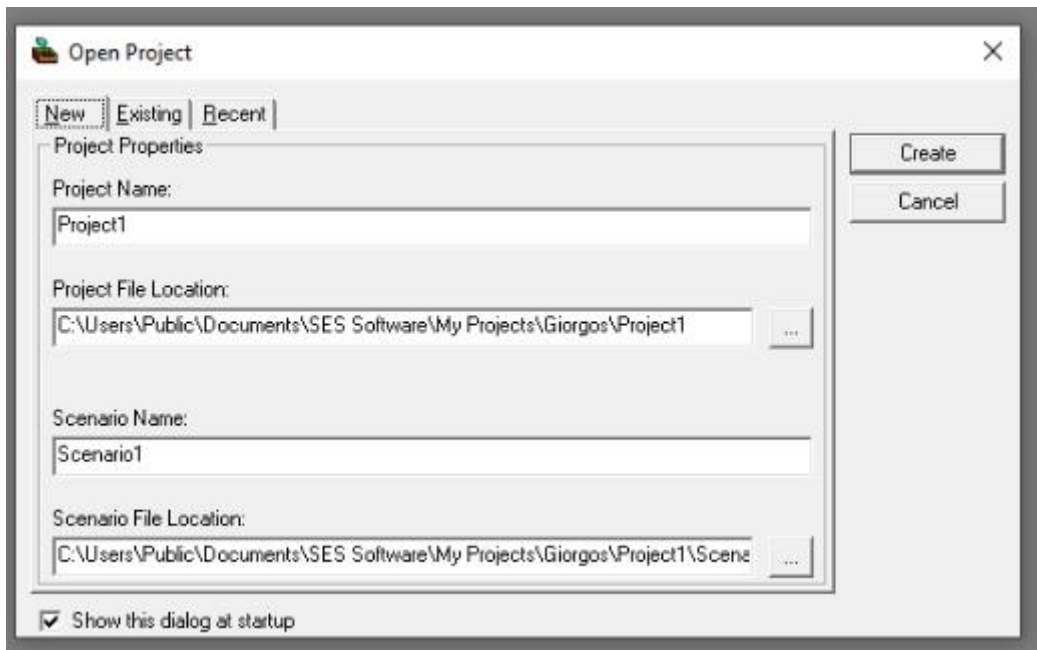
σφάλματος κατά μήκος των κυκλωμάτων που συνδέονται στο κύριο δίκτυο (αγωγοί αέρα, αγωγοί προστασίας, αγωγοί ουδέτερου, ή επικαλύψεις και πανοπλίες καλωδίων), με σκοπό τη μείωση του καθαρού ποσού του ρεύματος σφάλματος που εισάγεται στο κύριο δίκτυο.

6. Κάνουμε υπολογισμούς για την αντίσταση κάθε συστήματος γείωσης και της ανύψωσης του δυναμικού του γης, καθώς και των κοντινών θαμμένων μεταλλικών δομών.
7. Κάνουμε υπολογισμούς για την των αναμενόμενων εδαφικών δυναμικών, τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων σε οποιοδήποτε σημείο εντός ή εκτός της εγκατάστασης.
8. Θεσπίζουμε κριτήρια για την αξιολόγηση θεμάτων ασφάλειας και εντοπισμό περιοχών όπου υπερβαίνονται τα ασφαλή όρια.[27]

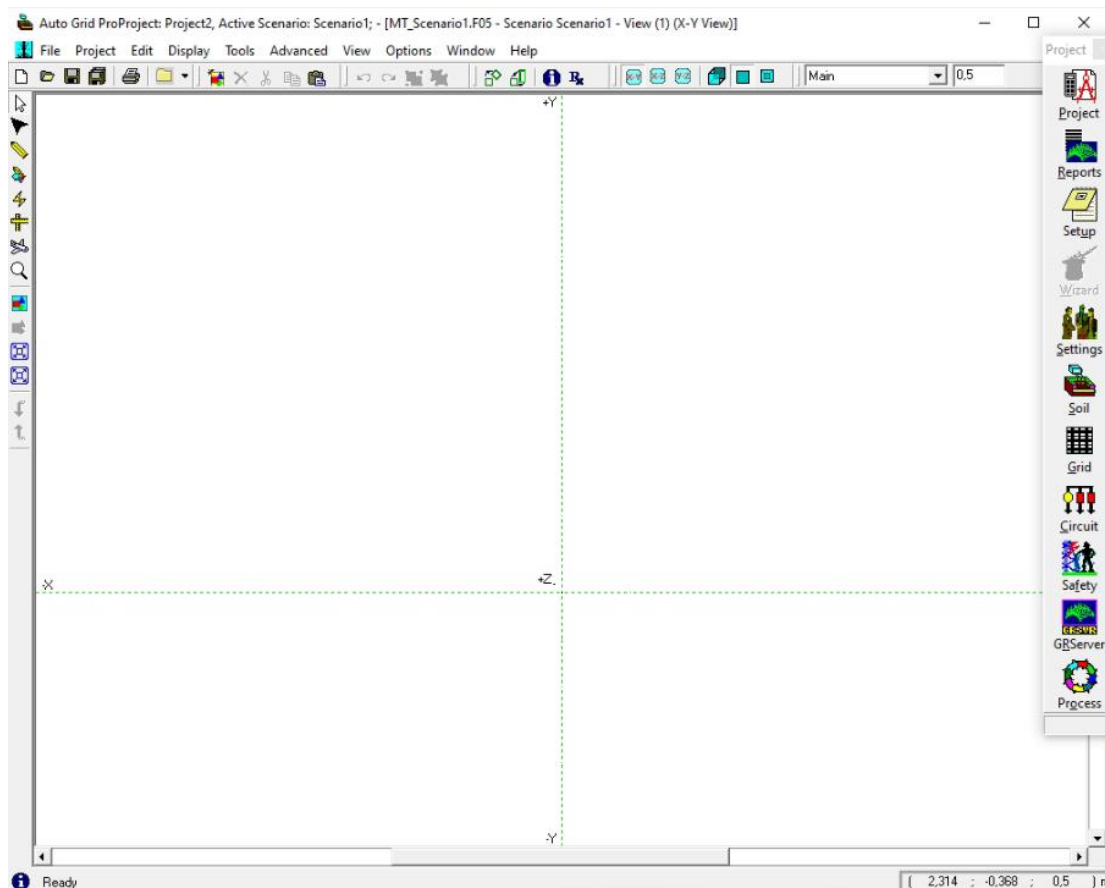
#### 4.3.1 Δημιουργία Νέας Μελέτης

Εκκινώντας το SES AutoGridPro, θα δούμε ένα παράθυρο όπως αυτό που φαίνεται στην [Εικόνα 49](#), όπου κάνουμε τις εξής ενέργειες:

1. Επιλέγοντας "New --> Project Name", μπορούμε να ορίσουμε το όνομα που θέλουμε να δώσουμε στην μελέτη μας.
2. Στο πεδίο "Project File Location", μπορούμε να καθορίσουμε την τοποθεσία όπου θα αποθηκευτεί η μελέτη μας στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή.
3. Πατώντας την επιλογή Create ουσιαστικά έχουμε δημιουργήσει το Project μας και το πρόγραμμα μας πηγαίνει στο παράθυρο σχεδιασμού ή αλλιώς παράθυρο εργασίας. ([Εικόνα 50](#))




Εικόνα 49 Παράθυρο δημιουργίας νέας εργασίας.

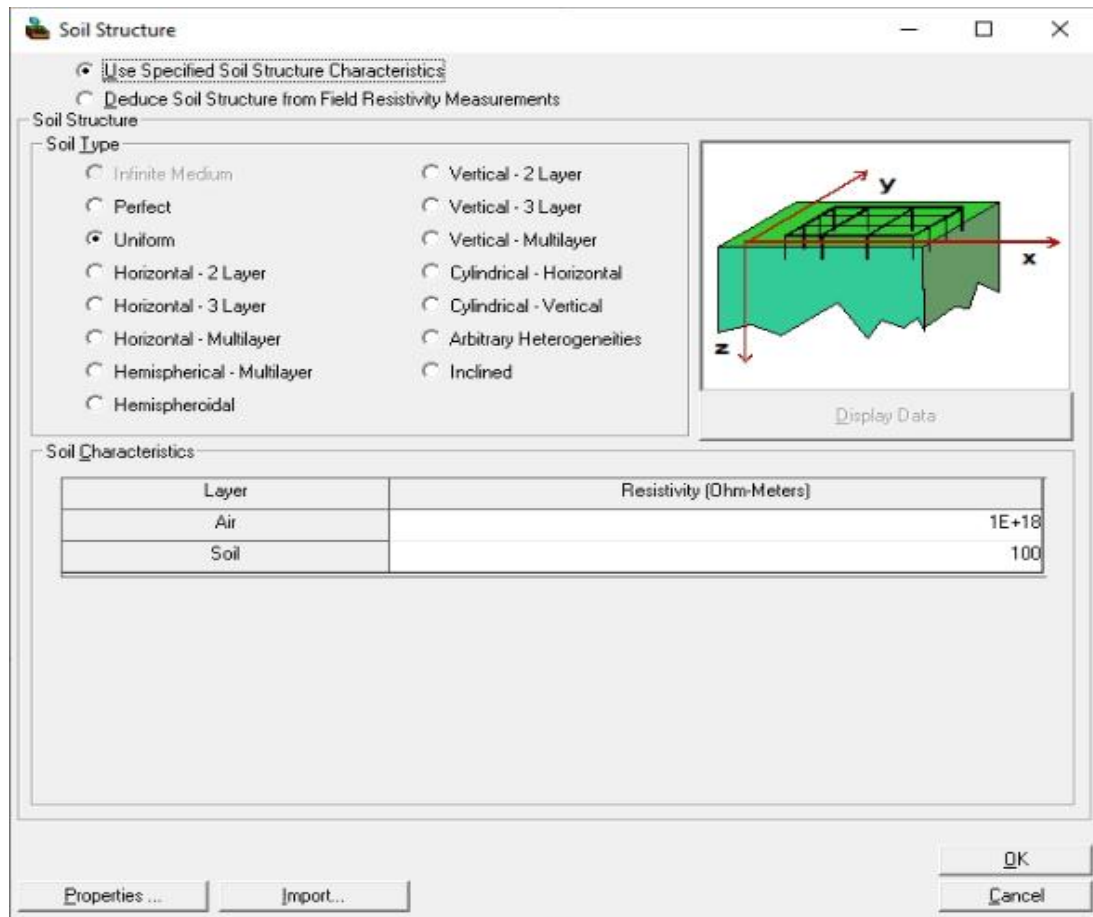


Εικόνα 50 Παράθυρο Σχεδιασμού.

### 4.3.2 Ρυθμίσεις Χαρακτηριστικών Εδάφους


Η πρώτη ρύθμιση που πρέπει να γίνει πριν προχωρήσουμε στον σχεδιασμό του συστήματος γείωσης μας είναι αυτή των χαρακτηριστικών του εδάφους. Αυτή γίνεται ως εξής.

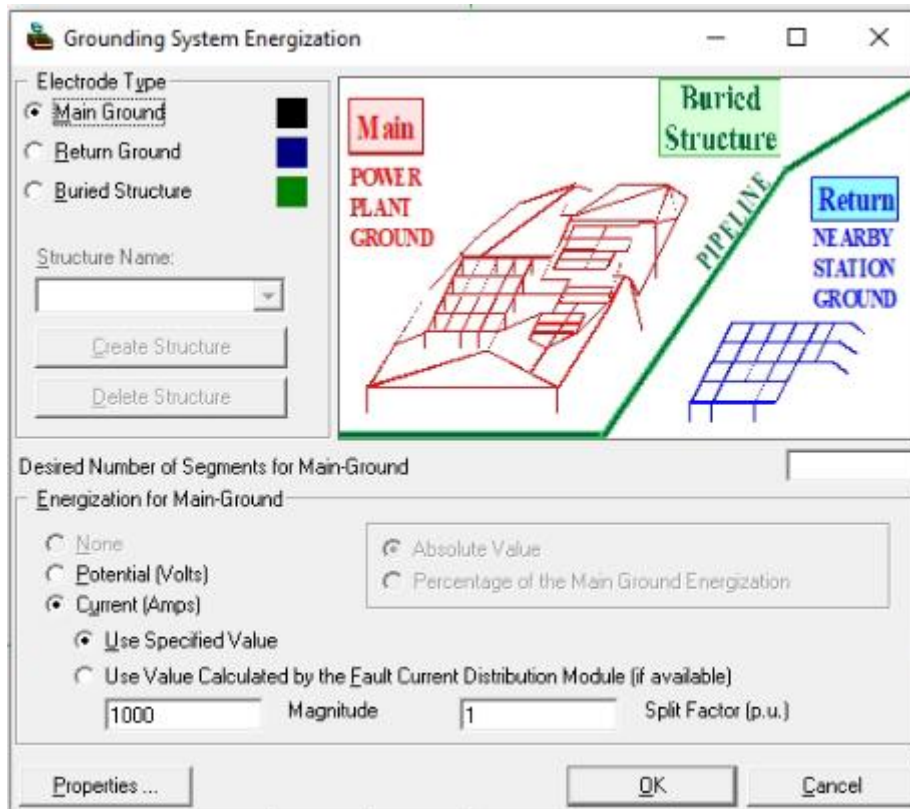
1. Από το κεντρικό παράθυρο σχεδιασμού πατάμε είτε το εικονίδιο Soil (  ) είτε από την γραμμή του κύριου μενού επιλέγουμε *Project>Define Soil Characteristics*.
2. Στο παράθυρο που θα μας ανοίξει (Εικόνα 51) επιλέγουμε την επιλογή 'Use Specified Soil Structure Characteristics'.
3. Στον πίνακα με τις επιλογές Soil επιλέγουμε την επιθυμητή διάταξη του εδάφους. Στις δικές μας μελέτες χρησιμοποιήθηκαν η Uniform(ομοιόμορφη) και η Horizontal 2 Layer (Διστρωματική).
4. Στην επιλογή Soil του Soil Characteristics εισάγουμε τις τιμές της ειδικής αγωγιμότητας του εδάφους για κάθε στρώμα του. Στις προσομοιώσεις μας έγιναν πληθώρα δοκιμών και για τις δυο περιπτώσεις ( $\rho = 50-1000 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_1 = 100 - 1000 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 100-2000 \Omega\text{m}$ ).
5. Πατάμε OK.



Εικόνα 51 Παράθυρο Ρυθμίσεων Χαρακτηριστικών Εδάφους.

### 4.3.3 Ρυθμίσεις Συστήματος Γείωσης

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή βασικών παραμέτρων για το σύστημα γείωσης. Αυτό μπορεί να γίνει είτε μέσω της επιλογής του εικονιδίου Grid (  ), είτε από το μενού ως εξής: Project>Define Grounding System Energization and Buried Structures. Αυτή η επιλογή θα σας οδηγήσει στο παρακάτω παράθυρο:




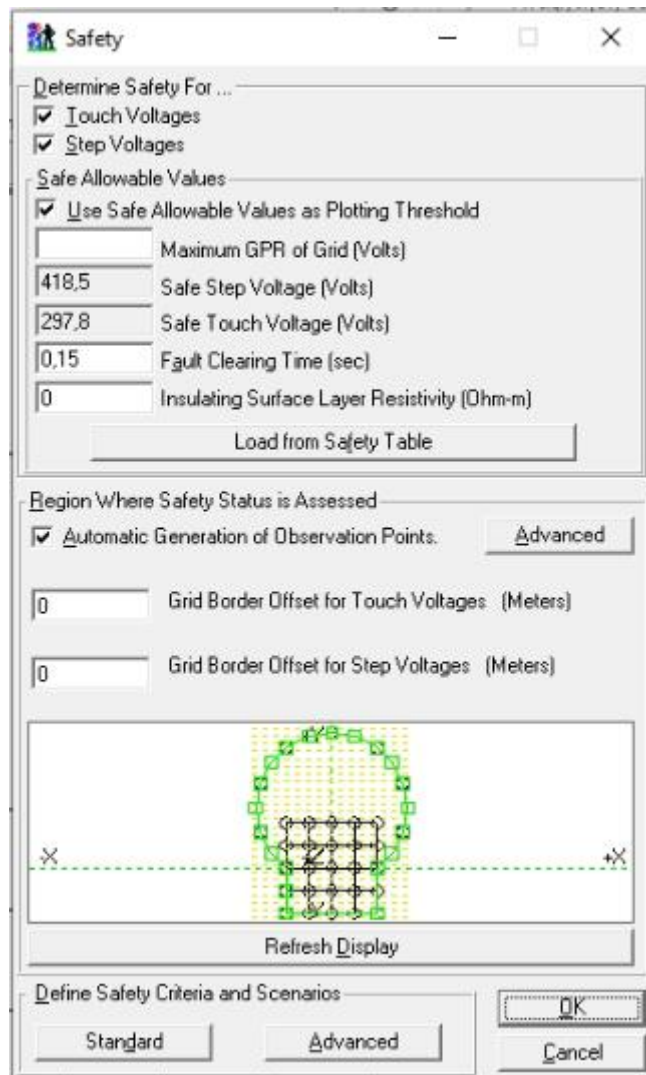
Εικόνα 52 Παράθυρο Ρυθμίσεων Συστήματος Γείωσης.

Οι ρυθμίσεις που κάνουμε είναι οι εξής:

1. Στο Electrode Type επιλέγουμε την επιλογή Main Ground
2. Στην κατηγορία Energization for Main-Ground βάζουμε την επιλογή Current(Amps) και ορίζουμε το μέγιστο ρεύμα που θα περάσει από το σύστημα γείωσης, το οποίο το υπολογίζουμε από το πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων PowerFactory όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2.6 για τις εκάστοτε θέσεις βραχυκυκλώματος (L=0,L=10,L=20km).Αυτό το βήμα προϋποθέτει να έχουμε τρέξει μια δοκιμαστική φορά το σχεδιαζόμενο μας σύστημα γείωσης με τις default ρυθμίσεις συστήματος γείωσης και ασφάλειας όπου το μόνο που θα έχουμε εισαγάγει είναι τα επιθυμητά χαρακτηριστικά εδάφους.Έτσι θα έχουμε την τιμή της αντίστασης γείωσης που χρειάζεται το βήμα 4.2.6 για να μας βγάλει την σωστή τιμή των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.
3. Πατάμε Ok

#### 4.3.4 Ρυθμίσεις και Επιλογές Ασφάλειάς

Για να βγάλουμε τα ασφαλή επίπεδα τάσης επαφής και βηματικής τάσης, πηγαίνουμε στις επιλογές ασφάλειας είτε μέσω της επιλογής Safety (  ), είτε από το μενού ως εξής: Project>Define Safety Criteria. Αυτή η επιλογή θα μας οδηγήσει σε ένα παράθυρο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

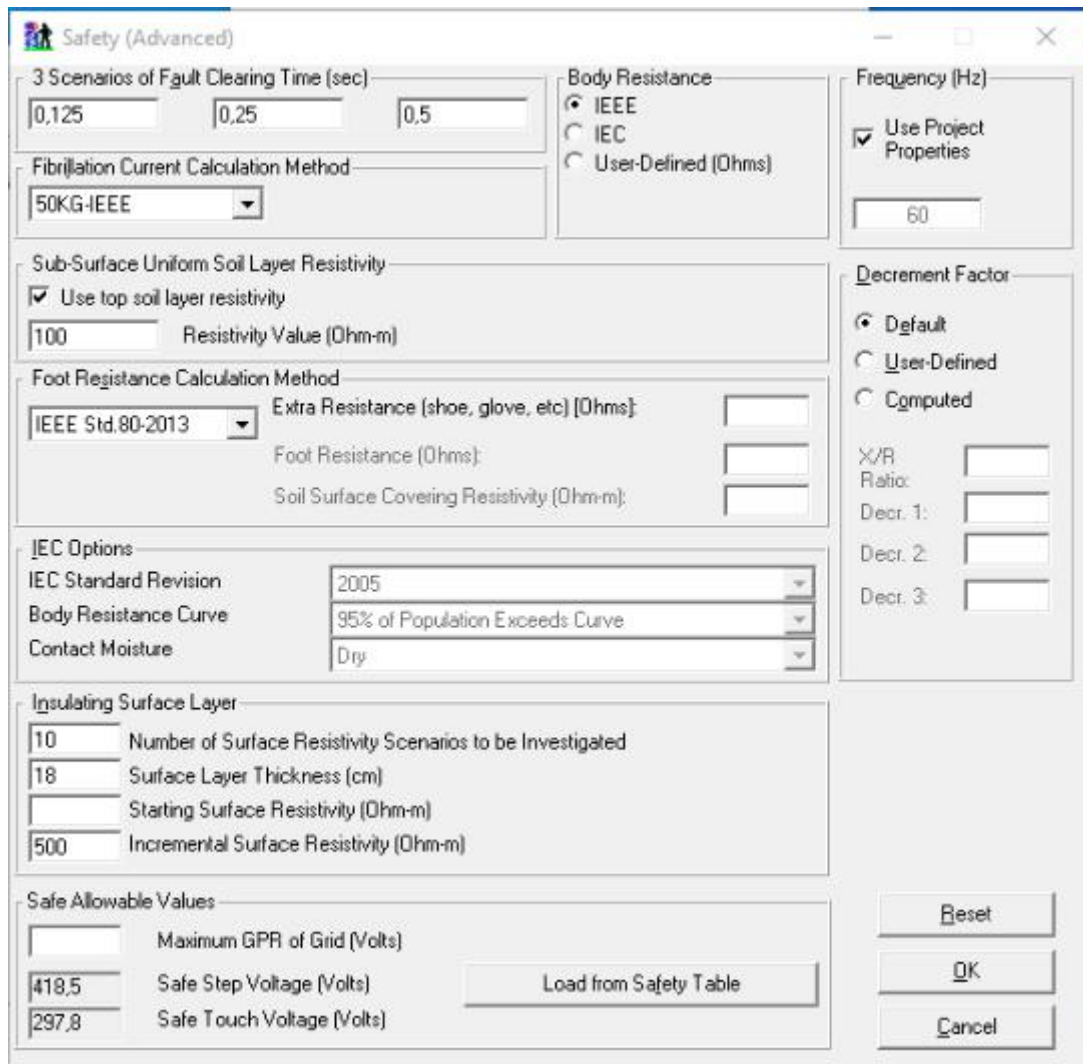


Εικόνα 53 Παράθυρο επιλογών Ασφάλειας.

Εδώ εισάγοντας την τιμή του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος (Fault clearing Time), που στην περίπτωση μας, λόγω των ηλεκτρονόμων εκκαθάρισης του συστήματος το οποίο προσομοιώσαμε στο PowerFactory, είναι 0.15 s, παίρνουμε τα ασφαλή επίπεδα τάσης επαφής (Safe Touch Voltage) και βηματικής τάσης (Safe Step Voltage).

επίσης, στην επιλογή Insulating Surface Resistivity μπορούμε να επιλέξουμε την ειδική αντίσταση του υλικού επίστρωσης καθώς και τα όρια της περιοχής στην οποία ελέγχεται η τάση επαφής και η βηματική τάση κατά την προσομοίωση.

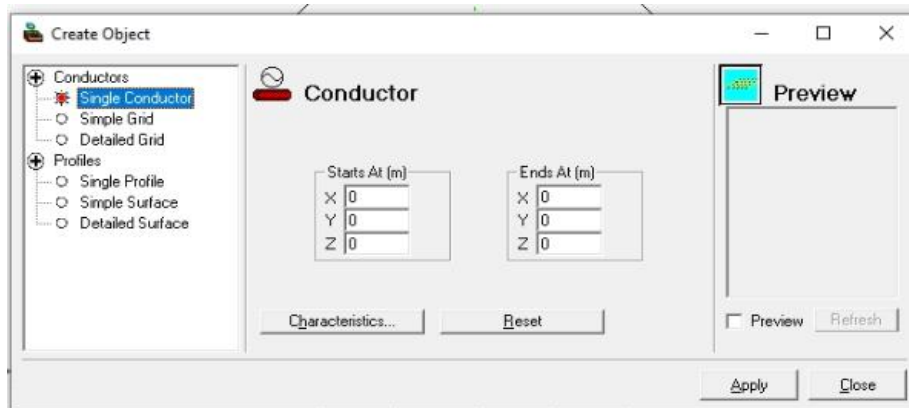
Τέλος, πατώντας το κουμπί "Advanced" κάτω από την κατηγορία "Define Safety Criteria and Scenarios", μας ανοίγει το παράθυρο της Εικόνας 54 όπου από εκεί ρυθμίζουμε τις τιμές της αντίστασης του σώματος (IEEE 1000 Ω), την συχνότητα συστήματος (50Hz), πιθανές επιπλέον αντιστάσεις σώματος μέσω προστατευτικού εξοπλισμού (Extra Resistance) βάσει του προτύπου IEEE Std.80-2013 καθώς και το πάχος του υλικού επίστρωσης που μπορεί να έχει τοποθετηθεί (συνήθως 15-20 cm).



Εικόνα 54 Παράθυρο προηγμένων ρυθμίσεων ασφάλειας.

#### 4.3.5 Σχεδιασμός Συστήματος Γείωσης

Για τον σχεδιασμό απλών πλεγμάτων η απλών αγωγών, είτε πηγαίνουμε από το μενού στις επιλογές Edit > Create Object ή με δεξί click στο παράθυρο σχεδίασης πατάμε πάλι την επιλογή Create Object. Αυτή η ενέργεια μας ανοίγει το παρακάτω παράθυρο.

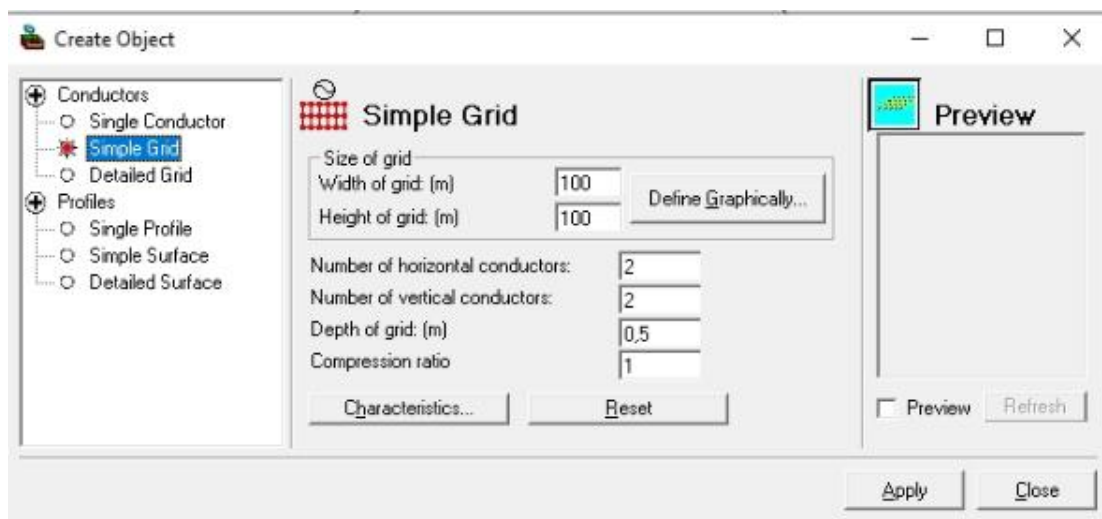


Εικόνα 55 Παράθυρο Εισαγωγής Αγωγού.



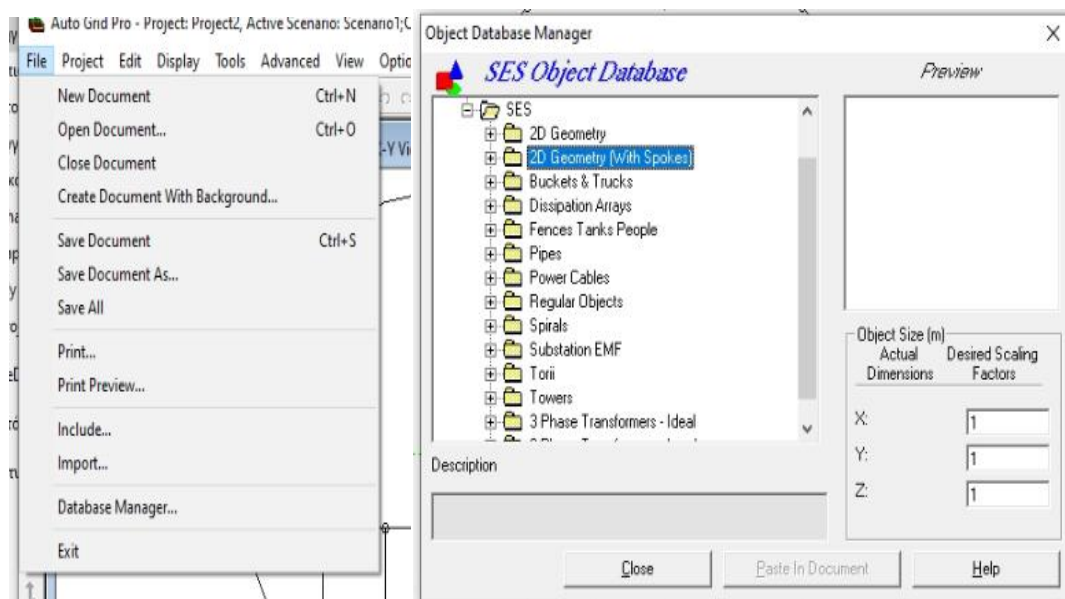
Εδώ θέτοντας την αρχή και το τέλος με τις συντεταγμένες αρχής και τέλους εισάγουμε στον χώρο έναν μονό αγωγό όπου πατώντας το κουμπί Characteristics μπορούμε να θέσουμε και τα βασικά χαρακτηριστικά του (π.χ. πάχος αγωγού).

Από την στήλη Conductors, αν επιλέξουμε την επιλογή Simple Grid, μας ανοίγει το παρακάτω παράθυρο (Εικόνα 56). Από αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα απλό πλέγμα γείωσης με τις επιθυμητές διαστάσεις (Επιλογές Width, height of the grid), τον αριθμό των κάθετων και οριζοντίων ράβδων (Number of horizontal, vertical conductors) καθώς και το επιθυμητό βάθος το οποίο είναι τοποθετημένο (Depth of grid).



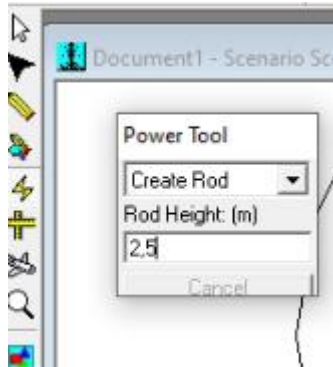
Εικόνα 56 Παράθυρο Εισαγωγής Πλέγματος.

Εξίσου χρήσιμο εργαλείο είναι και η βάση δεδομένων αντικειμένων της SES (Εικόνα 57), όπου από εκεί μπορούμε να εισάγουμε αγωγούς και πλέγματα διάφορων γεωμετριών. Η πρόσβαση σε αυτές τις βιβλιοθήκες αντικειμένων γίνονται εύκολα πατώντας την επιλογή Data Manager από την επιλογή File του κυρίως μενού.



Εικόνα 57 Βάση Δεδομένων Αντικειμένων SES.

Τέλος για την εισαγωγή κάθετων ράβδων γείωσης επιλέγουμε το εικονίδιο Power Tools(⚡) και στην συνέχεια στις επιλογές που μας εμφανίζονται επιλέγουμε την επιλογή Create Rod που μέσω της επιλογής Rod Height ρυθμίζουμε το επιθυμητό ύψος των ράβδων γείωσης. Η εισαγωγή μετά αυτών των ράβδων γίνεται με απλό αριστερό κλικ στα επιθυμητά σημεία στον χώρο σχεδίασης.

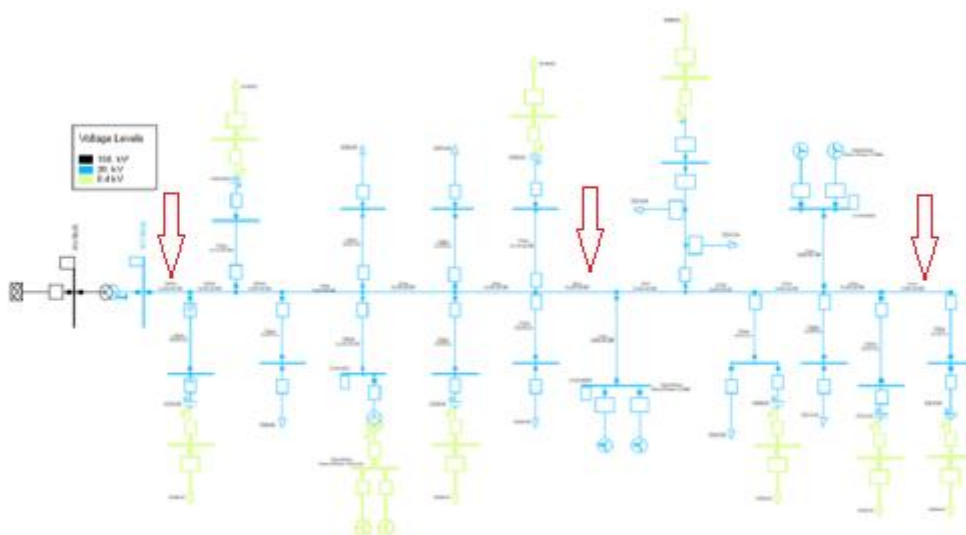


Εικόνα 58 Power Tool Εισαγωγή Ράβδου Γείωσης 2,5 m.

## Κεφάλαιο 5 Ανάλυση & Μελέτη Συστήματος Γείωσης σε τυπικό Δίκτυο Διανομής

### 5.1 Προσομοίωση Συστήματος Γείωσης σε Τυπικό Δίκτυο Διανομής

Για τον σκοπό της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση ενός τυπικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το δίκτυο λειτουργεί σε τάση 20 kV και έχει μήκος 20 χιλιομέτρων. Επιπλέον, υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή, και τα τρία διαφορετικά επίπεδα τάσης (150 kV, 20 kV και 0.4 kV) αναπαρίστανται με διαφορετικά χρώματα στο μονογραμμικό σχέδιο της Εικόνας 59. Επίσης τα βελάκια στην εικόνα 59 αναπαριστούν τα σημεία στον κορμό όπου εφαρμόστηκαν τα βραχυκυκλώματα ( $L=0$  km,  $L=10$  km,  $L=20$  km). Το δίκτυο είναι τριφασικό, αποτελείται από τρεις αγωγούς και είναι γειωμένο στην πλευρά της αναχώρησης (sending end) με τη χρήση αντίστασης. Σε περίπτωση που προκύψει μονοφασικό σφάλμα Γης, αυτή η αντίσταση έχει σχεδιαστεί για να περιορίσει τη μέγιστη ένταση βραχυκυκλώματος στα 1000 A. Στοιχεία όπως ο τύπος της γραμμής, τα υλικά, οι απώλειες ισχύος, οι αντιστάσεις και άλλες τεχνικές παράμετροι που σχετίζονται με τη λειτουργία και την ασφάλεια του δικτύου παραθέτονται στους Πίνακες 5 - 7.



Εικόνα 59 Τυπική εναέρια γραμμή MT με καταναλώσεις XT και παραγωγούς ΑΠΕ.

Πίνακας 5 Στοιχεία Δικτύου Υψηλής Τάσης.

Χαρακτηριστικά	Μέγιστα	Ελάχιστα
Ισχύς Βραχυκύκλωσης $S_k''$	8054 MVA	7794 MVA
Ένταση Βραχυκύκλωσης $I_k$	31 kA	30 kA
Ένταση Βραχυκύκλωσης $I_k$	0.1	0.1
R/ X	1	1
$Z_2/Z_1$	1	1
$X_2/X_1$	0.1	0.1
$R_2/X_0$	8054 MVA	7794 MVA

Πίνακας 6 Στοιχεία Μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ.

Χαρακτηριστικά	Μέγιστα
Ονομαστική Ισχύς	50 MVA
Συχνότητα	50 Hz
Ονομαστική Τάση Πρωτεύοντος	150 KV
Ονομαστική Τάση Δευτερεύοντος	20 KV
Τάση Βραχυκύκλωσης, $U_k$	20%
Απώλειες Χαλκού	0 KW
Τάση Βραχυκύκλωσης, $U_{k0}$	20%
Vector Group	Dyn1
Αντίσταση Αστερα, $R_c$	12 Ω

Πίνακας 7 Στοιχεία Αγωγών.

Τύπος Αγωγού	$I_{max}$ (A)	Αντίσταση μονοφασικού σφάλματος γης, $R_{If}$ ( $\Omega/km$ )	Αντίδραση μονοφασικού σφάλματος γης, $X_{If}$ ( $\Omega/km$ )
3x95 ASCR	448	0.264	0.741
3x50 ASCR	296	0.453	0.785
3x35 ASCR	224	0.625	0.796
3x50 Cu	232	0.475	0.785
3x35 Cu	285	0.645	0.8

Πίνακας 8 Στοιχεία Μετασχηματιστών MT/XT

Ονομαστική Ισχύς (kVA)	Τάση Βραχυκύκλωσης, $U_k$ (%)	Τάση Βραχυκύκλωσης, $U_{k0}$ (%)	Vector Group
100	4	3	Yzn11
160	4	3	Dyn11
250	4	3	Dyn11
400	4	3	Dyn11
630	4	3	Dyn11
1000	6	3	Dyn11

Ποιο συγκεκριμένα η παραπάνω διάταξη αποτελείται από τα εξής στοιχεία κύριας γραμμής:

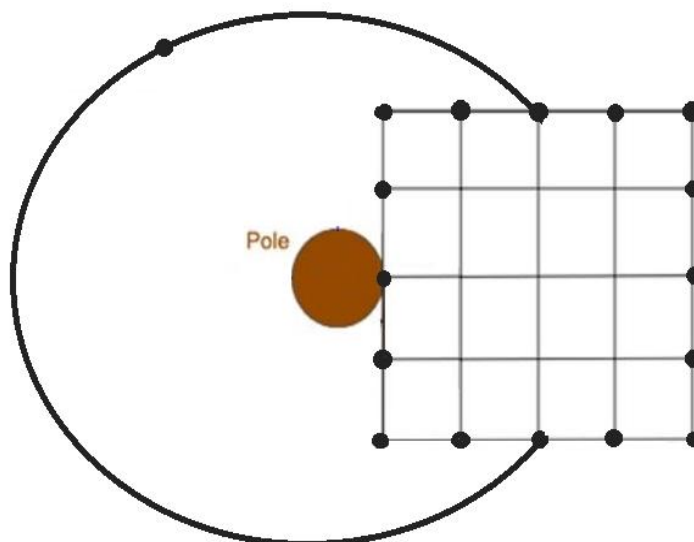
1. Ένα μετασχηματιστή έντασης.
2. Έναν ηλεκτρονόμο υπερέντασης (μοντέλο ABB REF 615) 80 A με χρόνο εκκαθάρισης  $t=0.15$  s, ρυθμισμένου κύκλου για μια στιγμιαία λειτουργία και μετά για τρεις χρονικές καθυστερήσεις με καμπύλες εξαιρετικά αντίστροφου χρόνου.
3. Ένα διακόπτη ισχύος.
4. Ασφαλειοαποζεύκτες βραδείας τήξεως (Τύπος T), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την προστασία των διακλαδώσεων που υπάρχουν κατά μήκος της κύριας γραμμής.

Ο Μ/Σ έντασης επιβλέπει την κύρια αναχώρηση της γραμμής, ενώ οι υπόλοιπες διατάξεις έχουν σχεδιαστεί για τον εντοπισμό και την απομάκρυνση με ασφαλή τρόπο βραχυκυκλωμάτων που μπορεί να προκύψουν σε διάφορα σημεία του δικτύου διανομής

## 5.2 Μελέτη Μοντέλων Συστημάτων Γείωσης

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, μελετήθηκε αναλυτικά το παρακάτω μοντέλο πλέγματος γείωσης μαζί με 2 μετατροπές του σε ένα μεγάλο εύρος ειδικών αντιστάσεων εδάφους ( $\rho = 15-1000 \Omega m$  ομοιόμορφο έδαφος,  $\rho_1=100-1000 \Omega m$   $\rho_2=250-2000 \Omega m$   $h= 1$  m για διστρωματικό έδαφος). Επιπροσθέτως, οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε κάθε παραλλαγή ομοιόμορφου εδάφους προσομοιώθηκαν για έδαφος με και χωρίς προστατευτικό στρώμα χαλκικού και άσφαλτου πάχους 18 εκατοστών ειδικής αντίστασης 2500 και 10000  $\Omega m$ . Για

τις περιπτώσεις του διστρωματικού εδάφους, οι προσομοιώσεις έγιναν με και χωρίς τη χρήση προστατευτικού στρώματος χαλκιού και ασφάλτου πάχους 18 εκατοστών για το αρχικό μοντέλο και με την χρήση προστατευτικού στρώματος χαλκιού και ασφάλτου πάχους 18 εκατοστών για τις δυο παραλλαγές αυτού. (Μοντέλα 2,3)



Εικόνα 60 Βασικό Μοντέλο Συστήματος Γείωσης.

Οι εκδοχές του παραπάνω μοντέλου που μελετήθηκαν είναι οι εξής:

1. Τετραγωνικό πλέγμα γείωσης διαστάσεων 1.2X1.2 m. με 16 κάθετους γειωτές ράβδους μήκους 2.5 m, μαζί με ημικυκλική διάταξη ακτίνας 1 m η οποία έχει και αυτή έναν κάθετο γειωτή ράβδο 2.5 m.
2. Τετραγωνικό πλέγμα γείωσης διαστάσεων 1.2X1.2 m. με 16 κάθετους γειωτές ράβδους μήκους 2.5 m, μαζί με ημικυκλική διάταξη ακτίνας 1.5 m η οποία έχει και αυτή έναν κάθετο γειωτή ράβδο 2.5 m.
3. Τετραγωνικό πλέγμα γείωσης διαστάσεων 1.2X1.2 m. με 16 κάθετους γειωτές ράβδους μήκους 2.5 m, μαζί με ημικυκλική διάταξη ακτίνας 1 m η οποία έχει 3 κάθετους γειωτές ράβδους 2.5 m.

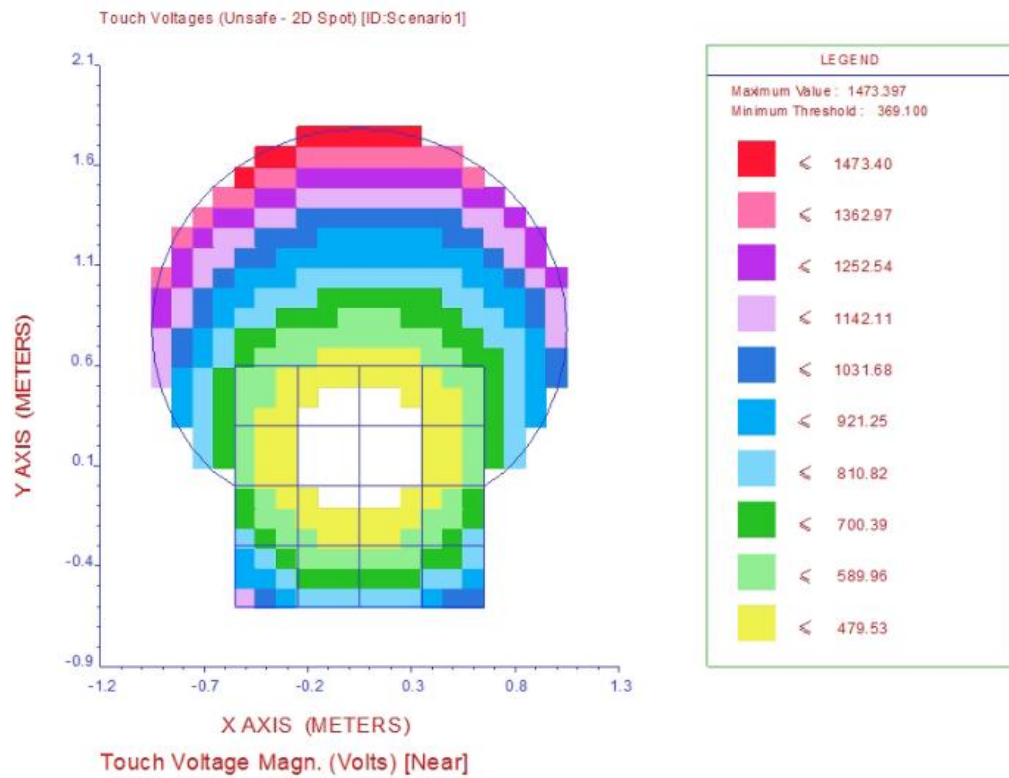
Το μοντέλο 1 αποτελεί σύστημα γειώσεις του ελληνικού ΔΕΔΔΗΕ για στύλους εξοπλισμένου σκυροδέματος όπου υπάρχει σύνδεση μεταξύ του εναερίου δικτύου και υπογείων καλωδίων μεταφοράς με τη χρήση διακόπτη αέρος.

Τα μοντέλα 2 και 3 είναι πιθανές βελτιώσεις του αρχικού μοντέλου ούτως ώστε να αντιμετωπιστούν τα όποια προβλήματα εμφανίζει το μοντέλο 1.

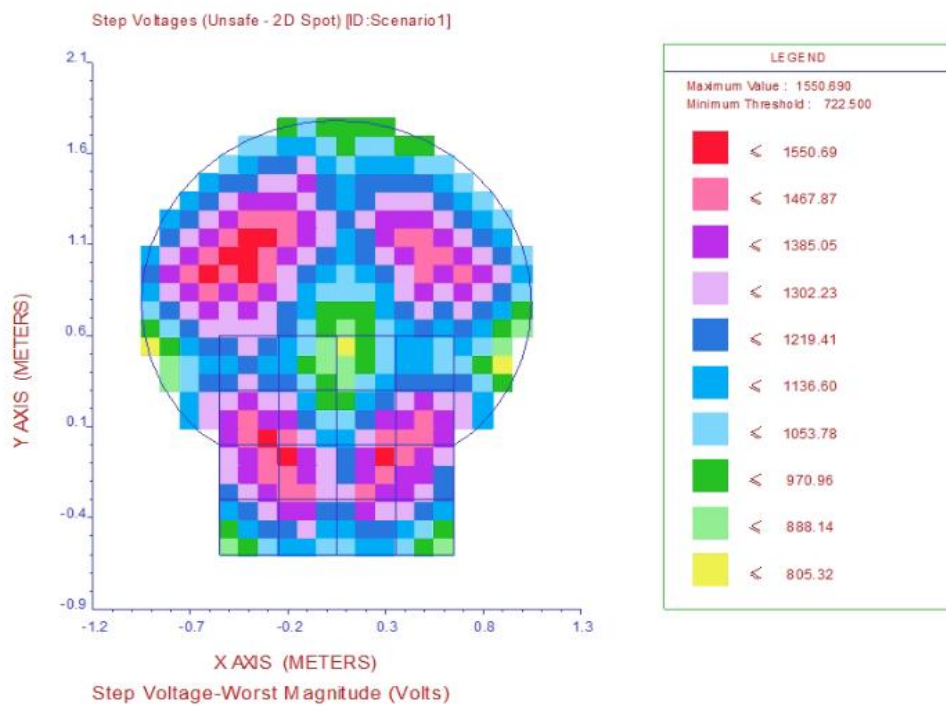
### 5.3. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

#### 5.3.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Μοντέλου Γείωσης 1

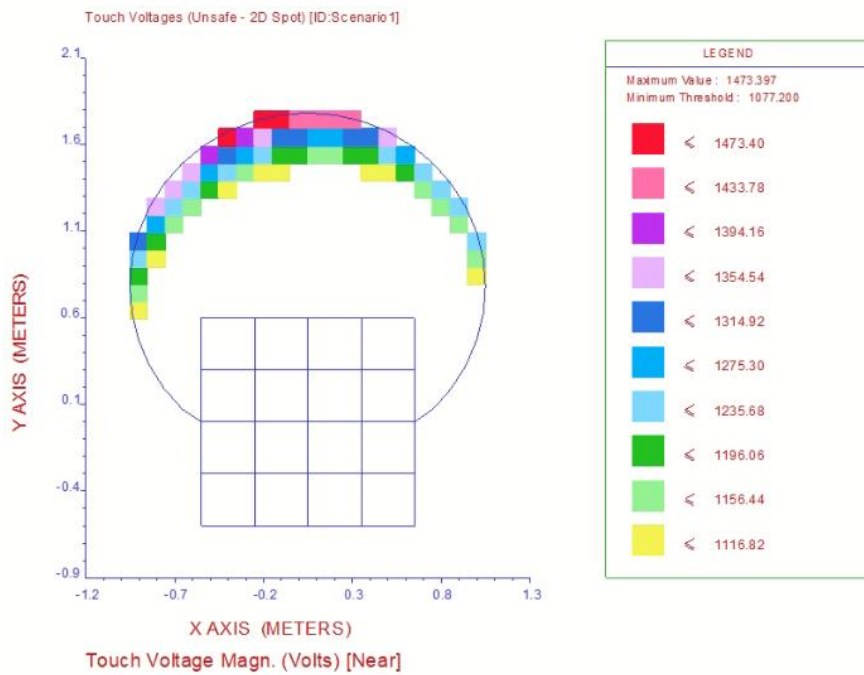
Στις Εικόνες 61-64 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις, για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος Γης στο μέσο της γραμμής (L=10km) για ομοιόμορφο έδαφος  $\rho=300 \Omega\text{m}$  με και χωρίς ειδική επίστρωση μεγάλης ειδικής αντίστασης ( $\rho=2500 \Omega\text{m}$ ) για το μοντέλο 1.



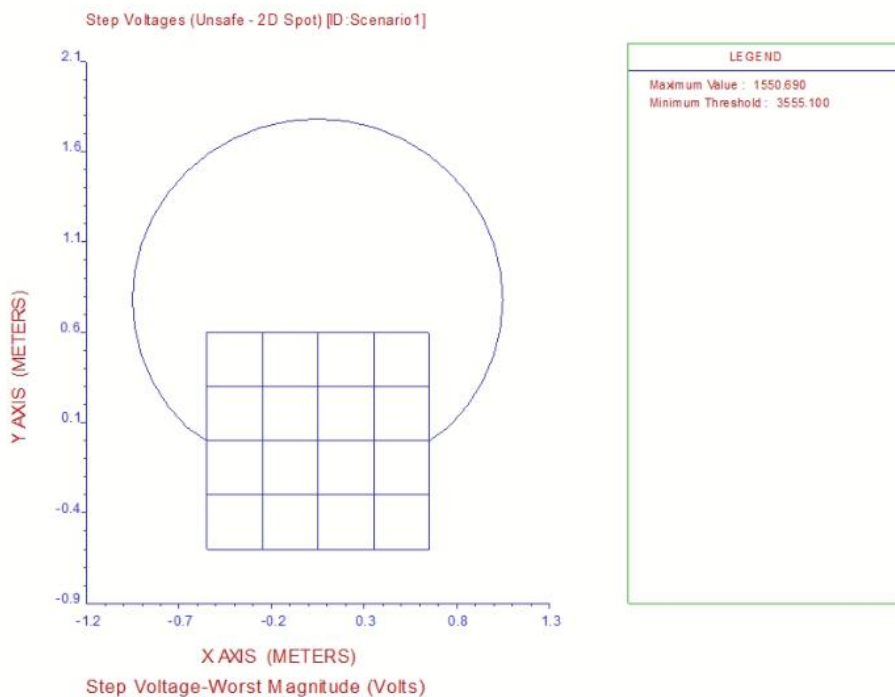
Εικόνα 61 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής,  $L=10\text{km}$ ,  $\rho=300\ \Omega\text{m}$  χωρίς υλικό επιφανείας.



Εικόνα 62 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις,  $L=10\text{km}$ ,  $\rho=300\ \Omega\text{m}$  χωρίς υλικό επιφανείας.



Εικόνα 63 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής,  $L=10\text{km}$ ,  $\rho=300 \Omega\text{m}$  με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  (χαλίκι).



Εικόνα 64 Αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις,  $L=10\text{km}$ ,  $\rho=300 \Omega\text{m}$  με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  (χαλίκι).



Στις παραπάνω φωτογραφίες με λευκό χρώμα είναι οι περιοχές όπου οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής δεν ξεπερνάνε τα ασφαλή όρια (Minimum Thresholds) .Αντίθετα όλες οι χρωματιστές είναι περιοχές όπου υπάρχει υπέρβαση των ορίων που συνεπάγεται ότι δεν είναι ασφαλείς.

Παρατηρούμε πως η προσθήκη χαλκιού ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  ως επιφανειακό στρώμα κατά την εγκατάσταση του πλέγματος γείωσης είναι επιτακτική, καθώς εξαλείφονται εντελώς οι επικίνδυνες βηματικές τάσεις που εμφανίζονται πάνω από το πλέγμα και περιορίζονται στα άκρα του κυκλικού βρόγχου οι οποίες εναπομέναντες τάσεις επαφής.

Μια προσθήκη επίστρωσης ασφάλτου ειδικής αντίστασης  $10000 \Omega\text{m}$  εξαλείφει πλήρως και τις εναπομέναντες αυτές τάσεις επαφής.

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικοί πίνακες των προσομοιώσεων, με τις τιμές των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων (κόκκινο είναι οι τάσεις εκτός ορίων και με πράσινο οι εντός), των επιτρεπτών τους ορίων, καθώς επίσης και άλλα στοιχεία όπως το ρεύμα βραχυκυκλώματος και η συνολική αντίσταση του συστήματος γείωσης για ομοιόμορφο και διστρωματικό έδαφος .

Πίνακας 8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ομοιόμορφο έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας. (πράσινο = κάτω από το όριο ασφαλών τάσεων, κόκκινο = πάνω από το όριο)

Ειδική Αντίσταση Εδάφους	Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
				If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
15	1.47	257.2	274.8	849	241.6	254.3	605	175.5	184.7	464	134.6	141.6
50	4.9	270.9	329.8	673	650.6	664.8	547	528.8	556.5	418	404.1	425.3
100	9.8	290.6	408.3	520	1005.5	1058.2	440	850.8	895.4	363	701.9	738.7
150	14.7	310.2	486.9	424	1229.7	1294.3	375	1087.7	1144.7	319	925.2	973.8
200	19.6	329.8	565.4	359	1388.3	1461.2	323	1249.1	1314.6	284	1098.2	1155.9
250	24.5	349.5	643.9	309	1493.7	1572.1	282	1363.1	1434.7	254	1227.8	1292.2
300	29.4	369.1	722.5	274	1589.4	1672.8	254	1473.4	1550.7	231	1339.9	1410.2
350	34.3	388.7	801	249	1685.1	1779.5	233	1576.8	1653.5	214	1448.2	1524.2
400	39.2	408.3	879.5	221	1709.3	1798.9	209	1616.5	1701.3	194	1500.5	1579.1
450	44.1	428	958	202	1757.6	1849.8	193	1679.3	1767.4	180	1566.2	1648.7
500	49	447.6	1036.6	186	1798.2	1892.6	177	1711.2	1801.0	166	1604.9	1689.1
600	58.8	486.9	1193.6	160	1908.7	2002.5	154	1786.6	1880.4	147	1705.4	1794.9
700	68.6	526.1	1350.7	144	1949.1	2051.3	141	1908.5	2006.6	136	1840.8	1937.3
800	78.4	565.4	1507.7	127	1964.5	2067.6	124	1918.1	2018.8	121	1871.7	1969.9
900	88.2	604.7	1664.8	113	1966.5	2069.6	111	1931.6	2032.9	109	1896.9	1996.3
1000	98	643.9	1821.9	103	1991.6	2096.1	100	1933.6	2035.0	98	1894.9	1994.3

Πίνακας 9 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ομοιόμορφο έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega \cdot m$  (χαλίκι).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους $\rho$ ( $\Omega m$ )	Αντίσταση Γείωσης $R$ ( $\Omega$ )	Όριο Τάσης Επαφής $V_{tsafe}$ (V)	Όριο Βηματικής Τάσης $V_{ssafe}$ (V)	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
				If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
15	1.47	1048.7	3440.9	849	241.6	254.3	605	175.5	184.7	464	134.6	141.6
50	4.9	1052.4	3455.6	673	650.6	664.8	547	528.8	556.5	418	404.1	425.3
100	9.8	1057.5	3476.2	520	1005.5	1058.2	440	850.8	895.4	363	701.9	738.7
150	14.7	1062.6	3496.5	424	1229.7	1294.3	375	1087.7	1144.7	319	925.2	973.8
200	19.6	1067.6	3516.4	359	1388.3	1461.2	323	1249.1	1314.6	284	1098.2	1155.9
250	24.5	1072.4	3535.9	309	1493.7	1572.1	282	1363.1	1434.7	254	1227.8	1292.2
300	29.4	1077.2	3555.1	274	1589.4	1672.8	254	1473.4	1550.7	231	1339.9	1410.2
350	34.3	1082.0	3574.0	249	1685.1	1779.5	233	1576.8	1653.5	214	1448.2	1524.2
400	39.2	1086.6	3592.6	221	1709.3	1798.9	209	1616.5	1701.3	194	1500.5	1579.1
450	44.1	1091.2	3610.8	202	1757.6	1849.8	193	1679.3	1767.4	180	1566.2	1648.7
500	49	1095.6	3628.7	186	1798.2	1892.6	177	1711.2	1801.0	166	1604.9	1689.1
600	58.8	1104.4	3663.7	160	1908.7	2002.5	154	1786.6	1880.4	147	1705.4	1794.9
700	68.6	1112.9	3697.7	144	1949.1	2051.3	141	1908.5	2006.6	136	1840.8	1937.3
800	78.4	1121.1	3730.6	127	1964.5	2067.6	124	1918.1	2018.8	121	1871.7	1969.9
900	88.2	1129.1	3762.6	113	1966.5	2069.6	111	1931.6	2032.9	109	1896.9	1996.3
1000	98	1136.9	3793.7	103	1991.6	2096.1	100	1933.6	2035.0	98	1894.9	1994.3

Πίνακας 10 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για διστρωματικό έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης.

Ειδική Αντίσταση Εδάφους		Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
100	250	12.9	290.6	408.3	456	1448.2	1563.7	399	1267.2	1368.3	336	1067.1	1152.3
	500	28.3	290.6	408.3	284	1022.1	1123.9	262	1079.7	1187.4	238	980.8	1078.6
	750	34.4	290.6	408.3	248	1140.9	1273.9	233	1071.9	1196.9	213	979.9	1094.1
	1000	38.9	290.6	408.3	223	1089.2	1227.8	211	1030.6	1161.7	196	957.3	1079.1
	2000	50.1	290.6	408.3	184	996.6	1140.9	176	953.3	1091.3	166	899.1	1029.3
250	100	11.2	349.5	643.9	490	1206.7	1208.1	421	1030.8	1038.0	351	864.4	865.4
	500	40.8	349.5	643.9	216	1545.6	1656.1	204	1459.8	1564.1	190	1359.6	1456.8
	750	53.1	349.5	643.9	175	1505.1	1634.1	168	1444.9	1568.7	159	1367.5	1484.7
	1000	62.8	349.5	643.9	153	1465.4	1603.0	148	1417.5	1550.6	142	1360.0	1487.8
	2000	88.6	349.5	643.9	113	1318.9	1475.9	111	1295.6	1449.7	109	1272.3	1423.6
500	100	11.9	447.6	1036.6	475	1305.7	1284.3	412	1132.5	1113.9	345	948.4	932.8
	250	27.4	447.6	1036.6	291	1713.6	1725.8	270	1589.9	1601.2	243	1430.9	141.1
	750	66.7	447.6	1036.6	149	1832.3	1945.4	145	1783.1	1893.2	138	1697.0	1801.8
	1000	81.6	447.6	1036.6	124	1774.6	1901.5	120	1717.4	1840.1	117	1674.4	1794.1
	2000	125.5	447.6	1036.6	89	1704.8	1864.9	89	1704.8	1864.9	88	1685.6	1843.9
1000	100	12.2	643.9	1821.9	470	1369.3	1331.9	408	1188.6	1156.2	340	950.5	963.5
	250	29.2	643.9	1821.9	276	1842.9	1864.9	256	1709.3	1691.6	233	1555.8	1539.9
	500	54.7	643.9	1821.9	172	2025.6	2040.1	165	1943.2	1957.1	156	1837.2	1850.3
	750	77.4	643.9	1821.9	129	2049.4	2094.9	125	1985.9	2029.5	120	1906.4	1948.8
	2000	163.3	643.9	1821.9	80	2289.8	2453.5	80	2289.8	2453.5	80	2289.8	2453.5

Πίνακας 11 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για διστρωματικό έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega \cdot m$  (χαλίκι).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους		Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	R ( $\Omega$ )	Vtsafe ( V )	Vssafe ( V )	If ( A )	Vt ( V )	Vs ( V )	If ( A )	Vt ( V )	Vs ( V )	If ( A )	Vt ( V )	Vs ( V )
100	250	12.9	1057.5	3476.2	456	1448.2	1563.7	399	1267.2	1368.3	336	1067.1	1152.3
	500	28.3	1057.5	3476.2	284	1022.1	1123.9	262	1079.7	1187.4	238	980.8	1078.6
	750	34.4	1057.5	3476.2	248	1140.9	1273.9	233	1071.9	1196.9	213	979.9	1094.1
	1000	38.9	1057.5	3476.2	223	1089.2	1227.8	211	1030.6	1161.7	196	957.3	1079.1
	2000	50.1	1057.5	3476.2	184	996.6	1140.9	176	953.3	1091.3	166	899.1	1029.3
250	100	11.2	1072.4	3535.9	490	1206.7	1208.1	421	1030.8	1038.0	351	864.4	865.4
	500	40.8	1072.4	3535.9	216	1545.6	1656.1	204	1459.8	1564.1	190	1359.6	1456.8
	750	53.1	1072.4	3535.9	175	1505.1	1634.1	168	1444.9	1568.7	159	1367.5	1484.7
	1000	62.8	1072.4	3535.9	153	1465.4	1603.0	148	1417.5	1550.6	142	1360.0	1487.8
	2000	88.6	1072.4	3535.9	113	1318.9	1475.9	111	1295.6	1449.7	109	1272.3	1423.6
500	100	11.9	1095.6	3628.7	475	1305.7	1284.3	412	1132.5	1113.9	345	948.4	932.8
	250	27.4	1095.6	3628.7	291	1713.6	1725.8	270	1589.9	1601.2	243	1430.9	1411.1
	750	66.7	1095.6	3628.7	149	1832.3	1945.4	145	1783.1	1893.2	138	1697.0	1801.8
	1000	81.6	1095.6	3628.7	124	1774.6	1901.5	120	1717.4	1840.1	117	1674.4	1794.1
	2000	125.5	1095.6	3628.7	89	1704.8	1864.9	89	1704.8	1864.9	88	1685.6	1843.9
1000	100	12.2	1136.9	3793.7	470	1369.3	1331.9	408	1188.6	1156.2	340	950.5	963.5
	250	29.2	1136.9	3793.7	276	1842.9	1864.9	256	1709.3	1691.6	233	1555.8	1539.9
	500	54.7	1136.9	3793.7	172	2025.6	2040.1	165	1943.2	1957.1	156	1837.2	1850.3
	750	77.4	1136.9	3793.7	129	2049.4	2094.9	125	1985.9	2029.5	120	1906.4	1948.8
	2000	163.3	1136.9	3793.7	80	2289.8	2453.5	80	2289.8	2453.5	80	2289.8	2453.5

Πίνακας 12 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ομοιόμορφο έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega \cdot m$  (άσφαλτος).

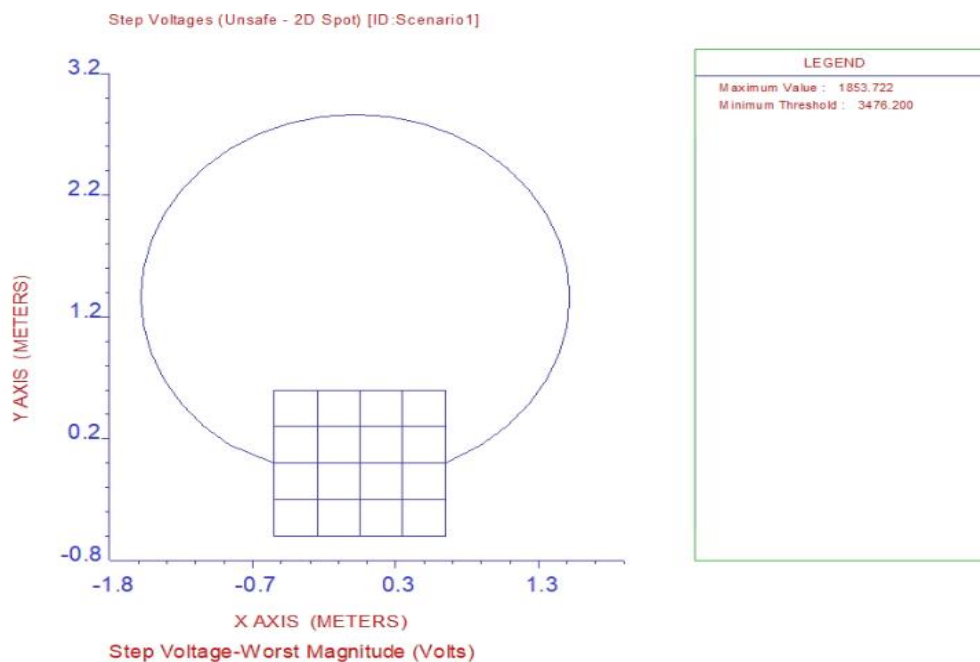
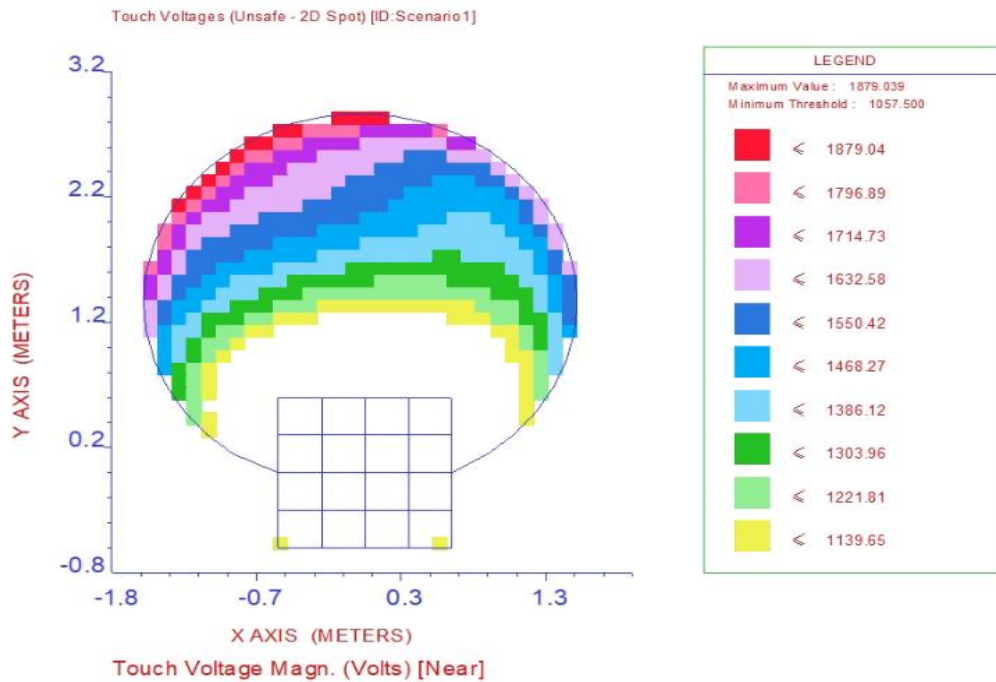
Ειδική Αντίσταση Εδάφους	Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
				If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
$\rho$ ( $\Omega m$ )	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
15	1.47	3436.1	12990.6	849	241.6	254.3	605	175.5	184.7	464	134.6	141.6
50	4.9	3439.8	13005.4	673	650.6	664.8	547	528.8	556.5	418	404.1	425.3
100	9.8	3445.1	13026.5	520	1005.5	1058.2	440	850.8	895.4	363	701.9	738.7
150	14.7	3450.3	13047.5	424	1229.7	1294.3	375	1087.7	1144.7	319	925.2	973.8
200	19.6	3455.6	13068.4	359	1388.3	1461.2	323	1249.1	1314.6	284	1098.2	1155.9
250	24.5	3460.8	13089.4	309	1493.7	1572.1	282	1363.1	1434.7	254	1227.8	1292.2
300	29.4	3466.1	13110.5	274	1589.4	1672.8	254	1473.4	1550.7	231	1339.9	1410.2
350	34.3	3471.3	13131.5	249	1685.1	1779.5	233	1576.8	1653.5	214	1448.2	1524.2
400	39.2	3476.6	13152.4	221	1709.3	1798.9	209	1616.5	1701.3	194	1500.5	1579.1
450	44.1	3481.8	13173.4	202	1757.6	1849.8	193	1679.3	1767.4	180	1566.2	1648.7
500	49	3487.1	13194.5	186	1798.2	1892.6	177	1711.2	1801	166	1604.9	1689.1
600	58.8	3496.5	13232	160	1908.7	2002.5	154	1786.6	1880.4	147	1705.4	1794.9
700	68.6	3506.5	13272	144	1949.1	2051.3	141	1908.5	2006.6	136	1840.8	1937.3
800	78.4	3516.4	13311.6	127	1964.5	2067.6	124	1918.1	2018.8	121	1871.7	1969.9
900	88.2	3526.4	13351.6	113	1966.5	2069.6	111	1931.6	2032.9	109	1896.9	1996.3
1000	98	3536.3	13391.4	103	1991.6	2096.1	100	1933.6	2035	98	1894.9	1994.3

Πίνακας 13 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για διστρωματικό έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega \cdot m$  (άσφαλτος).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους		Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	R ( $\Omega$ )	Vtsafe ( V )	Vssafe ( V )	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)
100	250	12.9	3445.1	13026.5	456	1448.2	1563.7	399	1267.2	1368.3	336	1067.1	1152.3
	500	28.3	3445.1	13026.5	284	1022.1	1123.9	262	1079.7	1187.4	238	980.8	1078.6
	750	34.4	3445.1	13026.5	248	1140.9	1273.9	233	1071.9	1196.9	213	979.9	1094.1
	1000	38.9	3445.1	13026.5	223	1089.2	1227.8	211	1030.6	1161.7	196	957.3	1079.1
	2000	50.1	3445.1	13026.5	184	996.6	1140.9	176	953.3	1091.3	166	899.1	1029.3
250	100	11.2	3460.8	13089.4	490	1206.7	1208.1	421	1030.8	1038.0	351	864.4	865.4
	500	40.8	3460.8	13089.4	216	1545.6	1656.1	204	1459.8	1564.1	190	1359.6	1456.8
	750	53.1	3460.8	13089.4	175	1505.1	1634.1	168	1444.9	1568.7	159	1367.5	1484.7
	1000	62.8	3460.8	13089.4	153	1465.4	1603.0	148	1417.5	1550.6	142	1360.0	1487.8
	2000	88.6	3460.8	13089.4	113	1318.9	1475.9	111	1295.6	1449.7	109	1272.3	1423.6
500	100	11.9	3487.1	13194.5	475	1305.7	1284.3	412	1132.5	1113.9	345	948.4	932.8
	250	27.4	3487.1	13194.5	291	1713.6	1725.8	270	1589.9	1601.2	243	1430.9	141.1
	750	66.7	3487.1	13194.5	149	1832.3	1945.4	145	1783.1	1893.2	138	1697.0	1801.8
	1000	81.6	3487.1	13194.5	124	1774.6	1901.5	120	1717.4	1840.1	117	1674.4	1794.1
	2000	125.5	3487.1	13194.5	89	1704.8	1864.9	89	1704.8	1864.9	88	1685.6	1843.9
1000	100	12.2	3536.3	13391.4	470	1369.3	1331.9	408	1188.6	1156.2	340	950.5	963.5
	250	29.2	3536.3	13391.4	276	1842.9	1864.9	256	1709.3	1691.6	233	155.8	1539.9
	500	54.7	3536.3	13391.4	172	2025.6	2040.1	165	1943.2	1957.1	156	1837.2	1850.3
	750	77.4	3536.3	13391.4	129	2049.4	2094.9	125	1985.9	2029.5	120	1906.4	1948.8
	2000	163.3	3536.3	13391.4	80	2289.8	2453.5	80	2289.8	2453.5	80	2289.8	2453.5

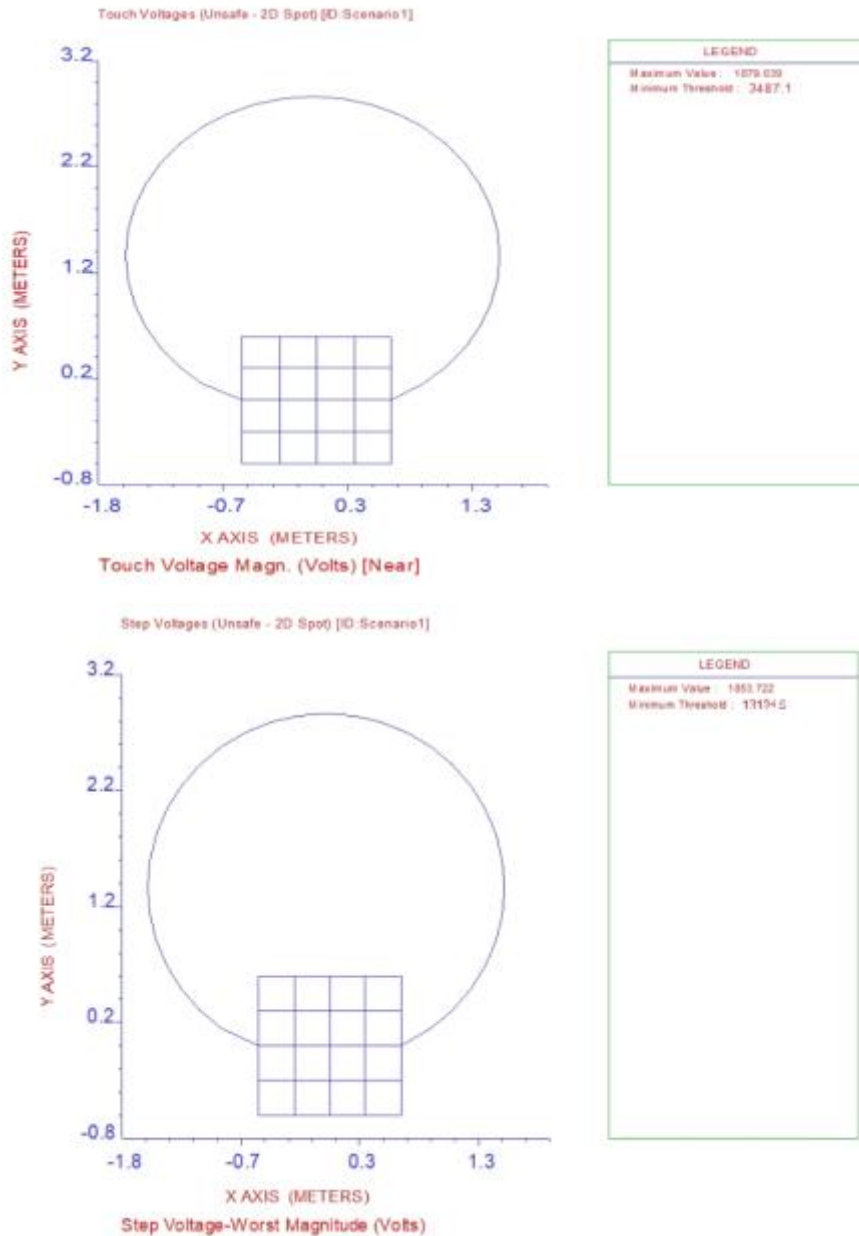
### 5.3.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Μοντέλου Γείωσης 2

Στην [Εικόνας 65-66](#) φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις, για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος Γης στο μέσο της γραμμής (L=10km) για ομοιόμορφο έδαφος  $\rho=500 \Omega\text{m}$  με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  και  $\rho=10000 \Omega\text{m}$ .



**Εικόνα 65** Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις μοντέλου 2 με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  (χαλίκι).





Εικόνα 66 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις μοντέλου 2 με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega\text{m}$  (άσφαλτος).

Παρατηρούμε ότι όπως και στο μοντέλο 1 με τη προσθήκη ειδικής επίστρωσης ασφάλτου  $\rho=10000 \Omega\text{m}$  (Πίνακας 17) εξαλείφουμε πλήρως τις επικίνδυνες τάσεις επαφής). Παρακάτω φαίνονται οι αναλυτικοί πίνακες τιμών των προσομοιώσεων για το μοντέλο γείωσης 2 με επίστρωση υλικού επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$ (χαλίκι) και  $10000 \Omega\text{m}$ (άσφαλτος).

Πίνακας 14 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 2 για ομοιόμορφο έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega \cdot m$  (χαλίκι).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους	Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
				If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
$\rho$ ( $\Omega m$ )	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
15	1.33	1048.7	3440.9	865	253.9	250.5	630	184.9	182.5	462	135.6	133.8
50	4.43	1052.4	3455.6	690	675.3	666.1	550	538.3	531.1	423	413.9	408.4
100	8.87	1057.5	3476.2	560	1096.1	1081.3	469	917.9	905.6	379	741.8	731.8
150	13.3	1062.6	3496.5	452	1327.1	1309.1	411	1206.7	1190.4	332	974.8	961.6
200	17.7	1067.6	3516.4	385	1507.1	1486.8	341	1334.9	1316.9	296	1158.7	1143.1
250	22.2	1072.4	3535.9	340	1663.7	1641.3	309	1512.1	1491.6	274	1340.8	1322.7
300	26.6	1077.2	3555.1	297	1743.9	1720.2	274	1608.9	1587.2	246	1444.5	1425.1
350	31.11	1082.0	3574.0	266	1822.3	1797.7	248	1698.9	1676.1	227	1555.1	1534.1
400	35.57	1086.6	3592.6	241	1886.9	1861.44	226	1769.4	1745.6	209	1636.3	1614.3
450	39.9	1091.2	3610.8	220	1937.7	1911.6	208	1832.1	1807.4	193	1699.9	1677.1
500	44.3	1095.6	3628.7	200	1957.3	1930.9	192	1879.1	1853.7	179	1751.8	1728.2
600	53.2	1104.4	3663.7	175	2055.1	2027.5	168	1972.9	1946.1	159	1867.3	1842.1
700	62.1	1112.9	3697.7	154	2110.0	2081.6	149	2041.1	2013.9	143	1959.3	1932.9
800	70.9	1121.1	3730.6	139	2176.5	2147.2	135	2113.9	2085.4	130	2035.6	2008.2
900	79.8	1129.1	3762.6	126	2219.6	2189.7	122	2149.2	2120.2	118	2078.7	2050.7
1000	88.7	1136.9	3793.7	113	2211.8	2181.9	111	2172.6	2143.4	109	2133.5	2104.7

Πίνακας 15 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 2 για ομοιόμορφο έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega \cdot m$  (άσφαλτος).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους	Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
				$\rho$ ( $\Omega m$ )	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)
15	1.33	3436.1	12990.6	865	253.9	250.5	630	184.9	182.5	462	135.6	133.8
50	4.43	3439.8	13005.4	690	675.3	666.1	550	538.3	531.1	423	413.9	408.4
100	8.87	3445.1	13026.5	560	1096.1	1081.3	469	917.9	905.6	379	741.8	731.8
150	13.3	3450.3	13047.5	452	1327.1	1309.1	411	1206.7	1190.4	332	974.8	961.6
200	17.7	3455.6	13068.4	385	1507.1	1486.8	341	1334.9	1316.9	296	1158.7	1143.1
250	22.2	3460.8	13089.4	340	1663.7	1641.3	309	1512.1	1491.6	274	1340.8	1322.7
300	26.6	3466.1	13110.5	297	1743.9	1720.2	274	1608.9	1587.2	246	1444.5	1425.1
350	31.11	3471.3	13131.5	266	1822.3	1797.7	248	1698.9	1676.1	227	1555.1	1534.1
400	35.57	3476.6	13152.4	241	1886.9	1861.44	226	1769.4	1745.6	209	1636.3	1614.3
450	39.9	3481.8	13173.4	220	1937.7	1911.6	208	1832.1	1807.4	193	1699.9	1677.1
500	44.3	3487.1	13194.5	200	1957.3	1930.9	192	1879.1	1853.7	179	1751.8	1728.2
600	53.2	3496.5	13232	175	2055.1	2027.5	168	1972.9	1946.1	159	1867.3	1842.1
700	62.1	3506.5	13272	154	2110.0	2081.6	149	2041.1	2013.9	143	1959.3	1932.9
800	70.9	3516.4	13311.6	139	2176.5	2147.2	135	2113.9	2085.4	130	2035.6	2008.2
900	79.8	3526.4	13351.6	126	2219.6	2189.7	122	2149.2	2120.2	118	2078.7	2050.7
1000	88.7	3536.3	13391.4	113	2211.8	2181.9	111	2172.6	2143.4	109	2133.5	2104.7

Πίνακας 16 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 2 για διστρωματικό έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega \cdot m$  (χαλίκι).

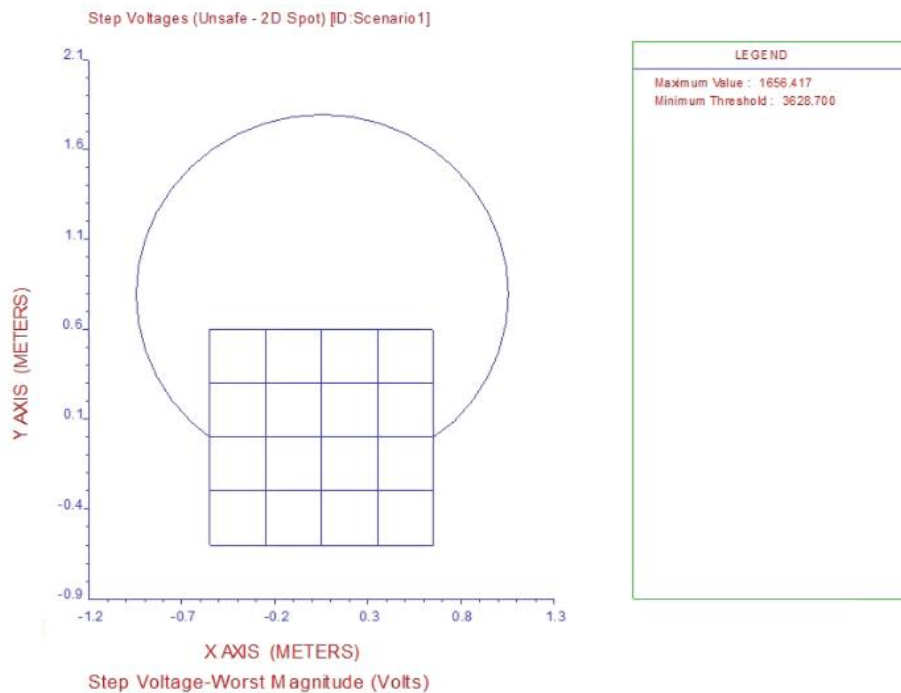
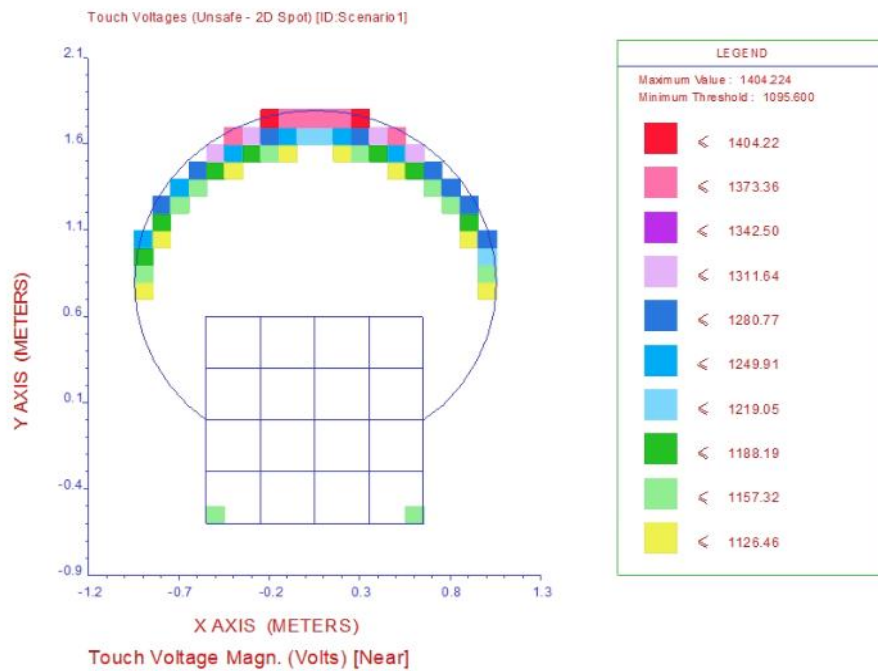
Ειδική Αντίσταση Εδάφους		Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	R ( $\Omega$ )	Vtsafe ( V )	Vssafe ( V )	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)
100	250	16.78	1057.5	3476.2	400	1160.4	1267.6	354	1026.9	11121.8	306	887.7	969.8
	500	25.05	1057.5	3476.2	309	1096.8	1285.7	283	1004.5	1177.5	254	901.6	1056.3
	750	30.58	1057.5	3476.2	272	1051.3	1271	252	974.1	11776	229	885.1	1070.1
	1000	34.73	1057.5	3476.2	245	990.7	1222.1	230	930.1	1148.1	211	853.2	1053.7
	2000	45.08	1057.5	3476.2	201	879.4	1114.3	190	831.2	1053.2	178	778.7	986.8
250	100	10.34	1072.4	3535.9	497	1364.3	1230.9	424	1163.9	1050.1	353	969.1	874.3
	500	36.35	1072.4	3535.9	236	1578.7	1679.8	221	1478.4	1573.1	205	1971.3	1459.2
	750	47.08	1072.4	3535.9	194	1496.9	1667.6	186	1435.2	1598.8	176	1358.1	1512.9
	1000	55.59	1072.4	3535.9	170	1427.6	1639.9	163	1368.8	1572.4	155	1301.7	1495.2
	2000	78.69	1072.4	3535.9	127	1241.6	1507.1	124	1212.3	1471.4	121	1182.7	1435.8
500	100	11.07	1095.6	3628.7	490	1581.7	1358.5	420	1355.7	1164.4	350	1129.8	970.4
	250	25.08	1095.6	3628.7	309	1984.3	1826.7	284	1823	1678.9	254	1631.1	1501.5
	750	59.64	1095.6	3628.7	160	1897.8	1950.7	154	1826.6	1877.6	147	1743.6	1792.3
	1000	72.71	1095.6	3628.7	134	1792.8	1907.6	131	1752.7	1864.9	126	1685.8	1793.7
	2000	111.17	1095.6	3628.7	95	1595.6	1832.8	94	1578.8	1813.5	93	1562.1	1794.3
1000	100	11.5	1136.9	3793.7	486	1708.8	1414.9	417	1466.3	1214.3	348	1223.6	1013.5
	250	27.18	1136.9	3793.7	290	2241.3	1951.6	265	2048.1	1783.3	240	1854.9	1615.1
	500	50.17	1136.9	3793.7	183	2350.3	2163.6	175	2247.5	2069.1	165	2119.1	1950.8
	750	70.28	1136.9	3793.7	139	2309.1	2214.5	135	2242.6	2150.7	130	2159.5	2071.1
	2000	145.41	1136.9	3793.7	85	2274.5	2420.1	85	2274.5	2420.1	84	2247.7	2391.7

Πίνακας 17 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 2 για διστρωματικό έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega \cdot m$  (άσφαλτος).

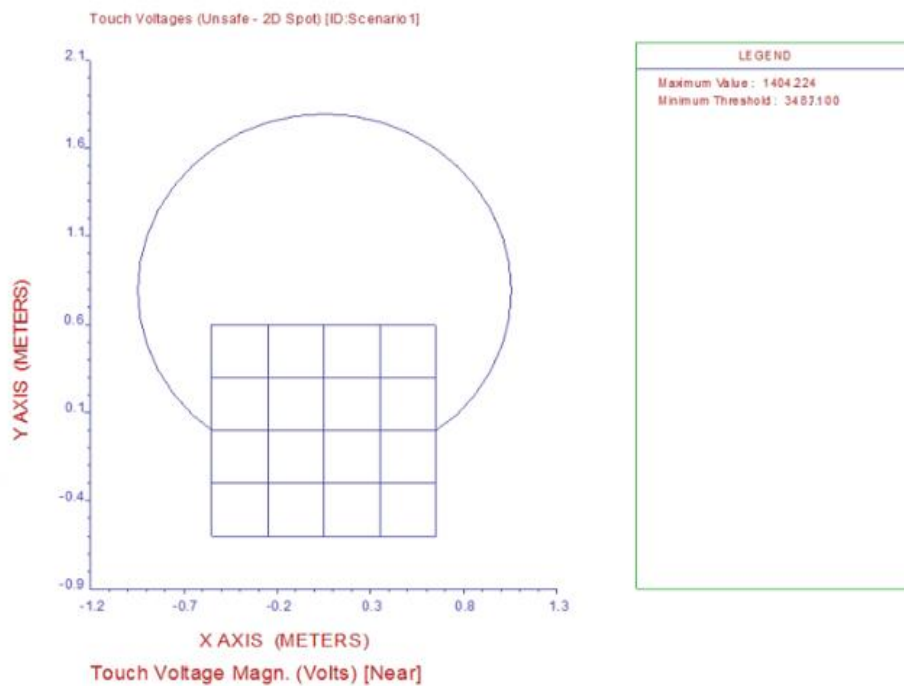
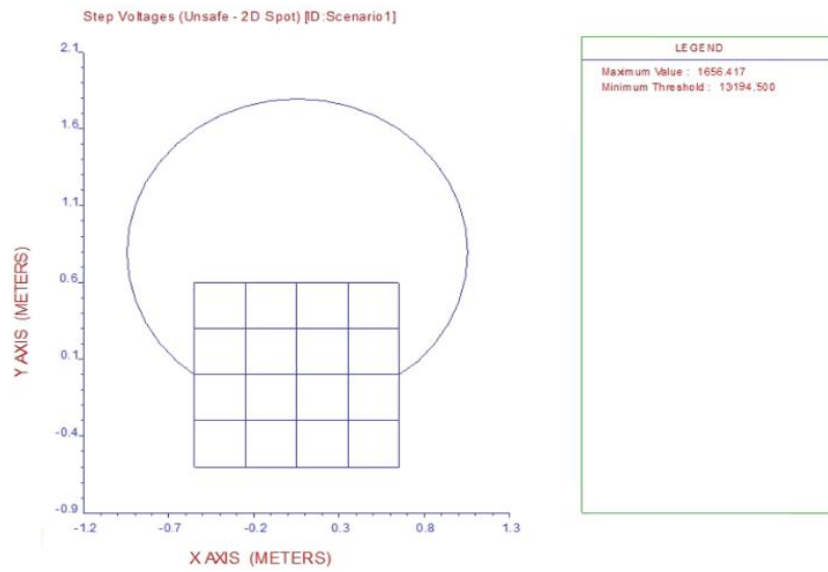
Ειδική Αντίσταση Εδάφους		Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
100	250	16.78	3445.1	13026.5	400	1160.4	1267.6	354	1026.9	11121.8	306	887.7	969.8
	500	25.05	3445.1	13026.5	309	1096.8	1285.7	283	1004.5	1177.5	254	901.6	1056.3
	750	30.58	3445.1	13026.5	272	1051.3	1271	252	974.1	11776	229	885.1	1070.1
	1000	34.73	3445.1	13026.5	245	990.7	1222.1	230	930.1	1148.1	211	853.2	1053.7
	2000	45.08	3445.1	13026.5	201	879.4	1114.3	190	831.2	1053.2	178	778.7	986.8
250	100	10.34	3460.8	13089.4	497	1364.3	1230.9	424	1163.9	1050.1	353	969.1	874.3
	500	36.35	3460.8	13089.4	236	1578.7	1679.8	221	1478.4	1573.1	205	1971.3	1459.2
	750	47.08	3460.8	13089.4	194	1496.9	1667.6	186	1435.2	1598.8	176	1358.1	1512.9
	1000	55.59	3460.8	13089.4	170	1427.6	1639.9	163	1368.8	1572.4	155	1301.7	1495.2
	2000	78.69	3460.8	13089.4	127	1241.6	1507.1	124	1212.3	1471.4	121	1182.7	1435.8
500	100	11.07	3487.1	13194.5	490	1581.7	1358.5	420	1355.7	1164.4	350	1129.8	970.4
	250	25.08	3487.1	13194.5	309	1984.3	1826.7	284	1823	1678.9	254	1631.1	1501.5
	750	59.64	3487.1	13194.5	160	1897.8	1950.7	154	1826.6	1877.6	147	1743.6	1792.3
	1000	72.71	3487.1	13194.5	134	1792.8	1907.6	131	1752.7	1864.9	126	1685.8	1793.7
	2000	111.17	3487.1	13194.5	95	1595.6	1832.8	94	1578.8	1813.5	93	1562.1	1794.3
1000	100	11.5	3536.3	13391.4	486	1708.8	1414.9	417	1466.3	1214.3	348	1223.6	1013.5
	250	27.18	3536.3	13391.4	290	2241.3	1951.6	265	2048.1	1783.3	240	1854.9	1615.1
	500	50.17	3536.3	13391.4	183	2350.3	2163.6	175	2247.5	2069.1	165	2119.1	1950.8
	750	70.28	3536.3	13391.4	139	2309.1	2214.5	135	2242.6	2150.7	130	2159.5	2071.1
	2000	145.41	3536.3	13391.4	85	2274.5	2420.1	85	2274.5	2420.1	84	2247.7	2391.7

### 5.3.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Μοντέλου Γείωσης 3

Στην [Εικόνα 67-68](#) φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις, για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος Γης στο μέσο της γραμμής (L=10km) για ομοιόμορφο έδαφος  $\rho=500 \Omega\text{m}$  με επίστρωση υλικού επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  και  $\rho=10000 \Omega\text{m}$  και οι αναλυτικοί πίνακες τιμών των προσομοιώσεων με επίστρωση υλικού μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  και  $10000 \Omega\text{m}$ .



[Εικόνα 67](#) Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις μοντέλου 3 με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega\text{m}$  (χαλίκι).



Εικόνα 67 Αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις μοντέλου 3 με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega m$  (άσφαλτος).

Πίνακας 18 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 3 για ομοιόμορφο έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega \cdot m$  (χαλίκι).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους	Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
				If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
$\rho$ ( $\Omega m$ )	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
15	1.396	1048.7	3440.9	855	197.9	238.1	625	144.7	173.9	460	106.5	128.1
50	4.653	1052.4	3455.6	685	528.6	635.6	547	422.1	507.6	421	324.9	390.6
100	9.307	1057.5	3476.2	541	835	1004.1	459	708.4	851.8	371	572.6	688.5
150	13.96	1062.6	3496.5	445	1030.2	1233.4	390	902.9	1085.7	329	761.7	915.9
200	18.61	1067.6	3516.4	378	1166.8	1403.5	340	1049.5	1262.0	294	907.5	1091.3
250	23.27	1072.4	3535.9	320	1234.7	1484.7	292	1126.7	1354.8	260	1003.2	1206.3
300	27.92	1077.2	3555.1	287	1328.9	1597.9	264	1222.4	1469.8	239	1106.6	1330.6
350	32.57	1082.0	3574.0	257	1388.3	1669.4	240	1296.5	1558.9	221	1193.8	1435.5
400	37.23	1086.6	3592.6	233	1438.5	1729.7	220	1358.2	1633.2	204	1259.4	1514.4
450	41.88	1091.2	3610.8	213	1479.4	1778.8	201	1396.1	1678.7	188	1305.7	1570.1
500	46.53	1095.6	368.7	194	1497.1	1800.2	185	1427.7	1716.7	174	1342.8	1614.6
600	55.84	1104.4	3663.7	171	1583.6	1904.1	163	1509.5	1815.1	155	1435.4	1725.9
700	65.15	1112.9	3697.7	148	1598.9	1922.7	142	1534.2	1844.8	138	1490.9	1792.8
800	74.45	1121.1	3730.6	132	1629.8	1959.8	128	1580.5	1900.4	123	1518.7	1826.2
900	83.76	1129.1	3762.6	120	1666.9	2004.3	116	1611.3	1937.5	112	1555.8	1870.7
1000	93.07	1136.9	3793.7	109	1682.3	2022.9	105	1620.6	1948.7	103	1589.7	1911.6



Πίνακας 19 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 3 για ομοιόμορφο έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega \cdot m$  (άσφαλτος).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους	Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
				If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
$\rho$ ( $\Omega m$ )	R ( $\Omega$ )	Vtsafe (V)	Vssafe (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)	If (A)	Vt (V)	Vs (V)
15	1.396	3436.1	12990.6	855	197.9	238.1	625	144.7	173.9	460	106.5	128.1
50	4.653	3439.8	13005.4	685	528.6	635.6	547	422.1	507.6	421	324.9	390.6
100	9.307	3445.1	13026.5	541	835	1004.1	459	708.4	851.8	371	572.6	688.5
150	13.96	3450.3	13047.5	445	1030.2	1233.4	390	902.9	1085.7	329	761.7	915.9
200	18.61	3455.6	13068.4	378	1166.8	1403.5	340	1049.5	1262.0	294	907.5	1091.3
250	23.27	3460.8	13089.4	320	1234.7	1484.7	292	1126.7	1354.8	260	1003.2	1206.3
300	27.92	3466.1	13110.5	287	1328.9	1597.9	264	1222.4	1469.8	239	1106.6	1330.6
350	32.57	3471.3	13131.5	257	1388.3	1669.4	240	1296.5	1558.9	221	1193.8	1435.5
400	37.23	3476.6	13152.4	233	1438.5	1729.7	220	1358.2	1633.2	204	1259.4	1514.4
450	41.88	3481.8	13173.4	213	1479.4	1778.8	201	1396.1	1678.7	188	1305.7	1570.1
500	46.53	3487.1	13194.5	194	1497.1	1800.2	185	1427.7	1716.7	174	1342.8	1614.6
600	55.84	3496.5	13232	171	1583.6	1904.1	163	1509.5	1815.1	155	1435.4	1725.9
700	65.15	3506.5	13272	148	1598.9	1922.7	142	1534.2	1844.8	138	1490.9	1792.8
800	74.45	3516.4	13311.6	132	1629.8	1959.8	128	1580.5	1900.4	123	1518.7	1826.2
900	83.76	3526.4	13351.6	120	1666.9	2004.3	116	1611.3	1937.5	112	1555.8	1870.7
1000	93.07	3536.3	13391.4	109	1682.3	2022.9	105	1620.6	1948.7	103	1589.7	1911.6

**Πίνακας 20** Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 3 για διστρωματικό έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=2500 \Omega \cdot m$  (χαλίκι).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους		Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	R ( $\Omega$ )	V <sub>tsafe</sub> ( V )	V <sub>ssafe</sub> ( V )	I <sub>f</sub> ( A )	V <sub>t</sub> ( V )	V <sub>s</sub> (V)	I <sub>f</sub> ( A )	V <sub>t</sub> ( V )	V <sub>s</sub> (V)	I <sub>f</sub> ( A )	V <sub>t</sub> ( V )	V <sub>s</sub> (V)
100	250	18.2	1057.5	3476.2	378	1012.4	1229.9	339	907.9	1103.1	294	787.4	956.7
	500	27.5	1057.5	3476.2	290	1037.3	1294.7	269	962.2	1200.9	242	865.6	1080.4
	750	33.7	1057.5	3476.2	250	1012.4	1274.1	235	951.7	1197.7	215	870.7	1095.7
	1000	38.2	1057.5	3476.2	225	976.5	1235.5	212	920.1	1164.1	197	854.9	1081.7
	2000	49.5	1057.5	3476.2	185	903.8	1153.7	177	864.7	1103.9	167	815.9	1041.5
250	100	10.5	1072.4	3535.9	507	951.9	1113.9	434	814.8	953.6	357	670.3	784.4
	500	39.2	1072.4	3535.9	222	1321.8	1591.7	210	1250.3	1505.6	195	1160.9	1398.1
	750	51.3	1072.4	3535.9	180	1426.4	1742.9	171	1250.8	1528.5	162	1185.1	1448.1
	1000	60.9	1072.4	3535.9	158	1302.4	1618.9	153	1261.1	1567.6	146	1203.5	1495.9
	2000	86.8	1072.4	3535.9	115	1184.1	1493.1	113	1163.5	1467.1	111	1142.9	1441.2
500	100	11.03	1095.6	3628.7	490	1008.8	1163.8	420	864.7	997.5	350	720.6	831.2
	250	25.7	1095.6	3628.7	302	1369.4	1609.9	278	1260.5	1482.1	249	1129.1	1327.4
	750	63.6	1095.6	3628.7	153	1541.4	1836.5	147	1480.9	1764.4	141	1420.5	1692.4
	1000	78.3	1095.6	3628.7	127	1512.2	1821.1	123	1464.6	1763.7	119	1416.9	1706.4
	2000	121.9	1095.6	3628.7	92	1516.7	1885.3	91	1500.2	1864.8	90	1483.7	1844.3
1000	100	11.3	1136.9	3793.7	491	1056.6	1209.1	421	905.9	1036.8	349	751.1	859.5
	250	27.2	1136.9	3793.7	294	1478.3	1711.7	273	1372.7	1589.5	245	1231.9	1426.4
	500	51.4	1136.9	3793.7	180	1632.4	1919.2	172	1553.8	1833.9	162	1469.1	1727.3
	750	73.1	1136.9	3793.7	133	1666.6	1940.9	130	1628.9	1897.1	125	1566.3	1824.1
	2000	156.7	1136.9	3793.7	82	1952.8	2351.6	81	1928.9	2322.9	80	1905.2	2294.3

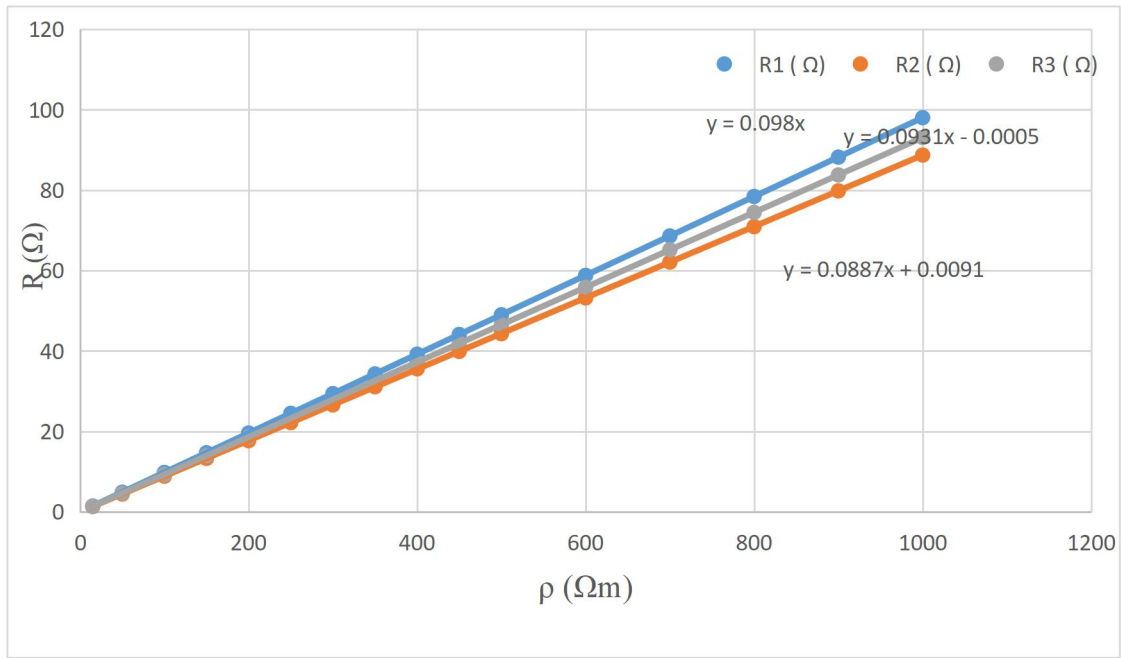
Πίνακας 21 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου 3 για διστρωματικό έδαφος με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega \cdot m$  (άσφαλτος).

Ειδική Αντίσταση Εδάφους		Αντίσταση Γείωσης	Όριο Τάσης Επαφής	Όριο Βηματικής Τάσης	L=0 km			L=10 km			L=20 km		
$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	R ( $\Omega$ )	Vtsafe ( V )	Vssafe ( V )	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)	If ( A )	Vt ( V )	Vs (V)
100	250	18.2	3445.1	13026.5	378	1012.4	1229.9	339	907.9	1103.1	294	787.4	956.7
	500	27.5	3445.1	13026.5	290	1037.3	1294.7	269	962.2	1200.9	242	865.6	1080.4
	750	33.7	3445.1	13026.5	250	1012.4	1274.1	235	951.7	1197.7	215	870.7	1095.7
	1000	38.2	3445.1	13026.5	225	976.5	1235.5	212	920.1	1164.1	197	854.9	1081.7
	2000	49.5	3445.1	13026.5	185	903.8	1153.7	177	864.7	1103.9	167	815.9	1041.5
250	100	10.5	3460.8	13089.4	507	951.9	1113.9	434	814.8	953.6	357	670.3	784.4
	500	39.2	3460.8	13089.4	222	1321.8	1591.7	210	1250.3	1505.6	195	1160.9	1398.1
	750	51.3	3460.8	13089.4	180	1426.4	1742.9	171	1250.8	1528.5	162	1185.1	1448.1
	1000	60.9	3460.8	13089.4	158	1302.4	1618.9	153	1261.1	1567.6	146	1203.5	1495.9
	2000	86.8	3460.8	13089.4	115	1184.1	1493.1	113	1163.5	1467.1	111	1142.9	1441.2
500	100	11.03	3487.1	13194.5	490	1008.8	1163.8	420	864.7	997.5	350	720.6	831.2
	250	25.7	3487.1	13194.5	302	1369.4	1609.9	278	1260.5	1482.1	249	1129.1	1327.4
	750	63.6	3487.1	13194.5	153	1541.4	1836.5	147	1480.9	1764.4	141	1420.5	1692.4
	1000	78.3	3487.1	13194.5	127	1512.2	1821.1	123	1464.6	1763.7	119	1416.9	1706.4
	2000	121.9	3487.1	13194.5	92	1516.7	1885.3	91	1500.2	1864.8	90	1483.7	1844.3
1000	100	11.3	3536.3	13391.4	491	1056.6	1209.1	421	905.9	1036.8	349	751.1	859.5
	250	27.2	3536.3	13391.4	294	1478.3	1711.7	273	1372.7	1589.5	245	1231.9	1426.4
	500	51.4	3536.3	13391.4	180	1632.4	1919.2	172	1553.8	1833.9	162	1469.1	1727.3
	750	73.1	3536.3	13391.4	133	1666.6	1940.9	130	1628.9	1897.1	125	1566.3	1824.1
	2000	156.7	3536.3	13391.4	82	1952.8	2351.6	81	1928.9	2322.9	80	1905.2	2294.3

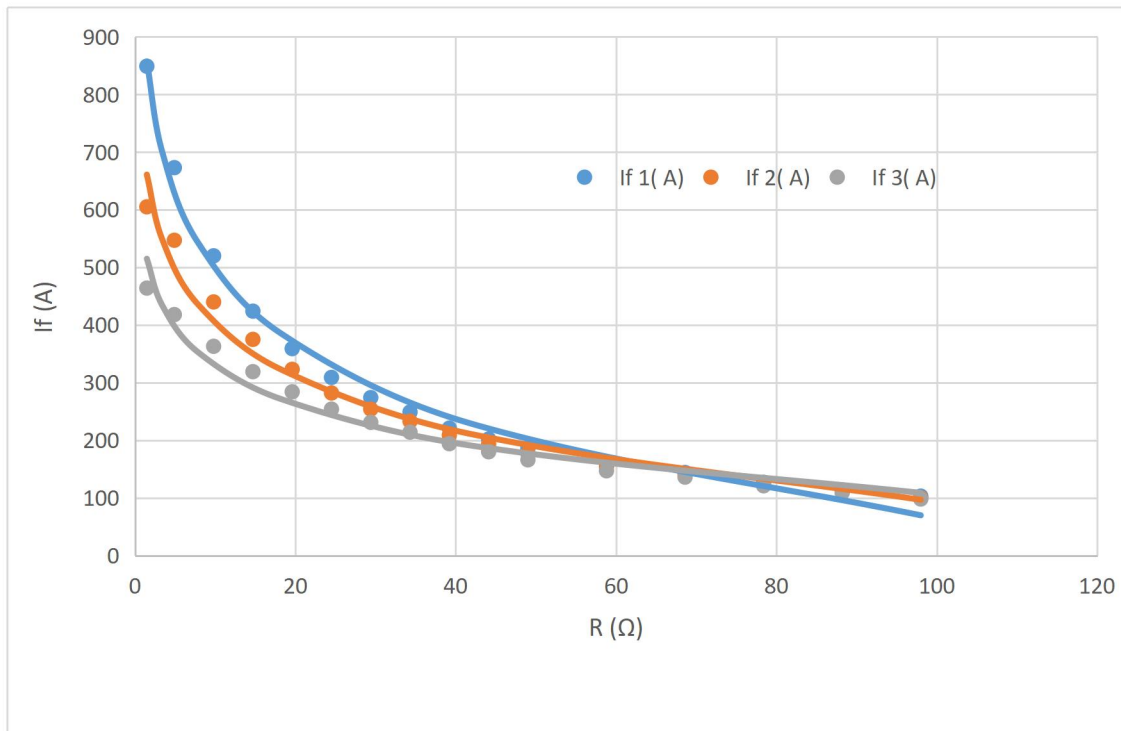
## 5.4 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν, να εξάγουμε χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοσή συστημάτων γειώσεων του ελληνικού ΔΕΔΔΗΕ για στύλους εξοπλισμένου σκυροδέματος όπου υπάρχει σύνδεση μεταξύ του εναερίου δικτύου και υπογείων καλωδίων μεταφοράς με την χρήση διακόπτη αέρος σε ένα μεγάλο εύρος ειδικών αντιστάσεων εδάφους καθώς επίσης να ελεγχθούν και να προωθηθούν πιθανές εναλλακτικές και βελτιώσεις του υπάρχοντος αυτού συστήματος. Κατά την διεκπεραίωση των προσομοιώσεων εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

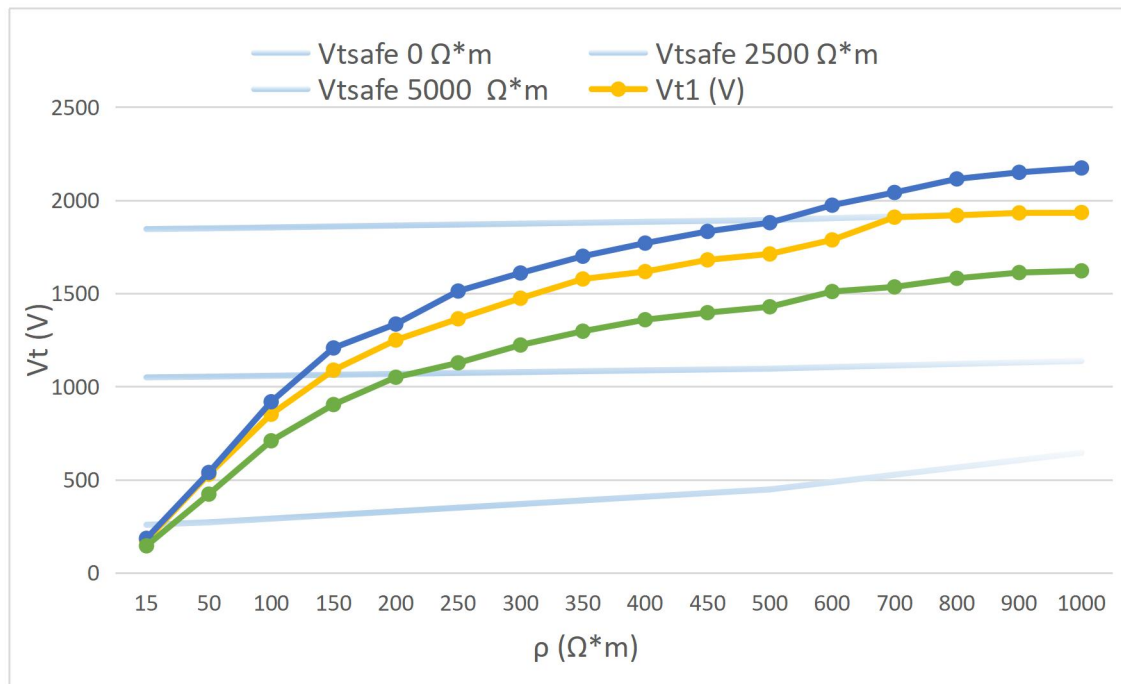
- Γενικά παρατηρούμε ότι όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα έχουν ένα αρκετά πυκνό σχεδιασμό όσον αφορά το πλεγμα 4X4, καθώς αποτελείται από 16 ράβδους γειωτές μήκους 2.5 μέτρων, οι οποίες είναι πολλές σε τόσο κοντινή απόσταση. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο ράβδους θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το μήκος τους (2.5 μ) για να μην παρεμβαίνει το πεδίο της μίας στην άλλη.
- Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων γείωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιοχή εγκατάστασής τους. Συγκεκριμένα, όταν ένα βραχυκύκλωμα συμβεί σε μεγάλη απόσταση από τον υποσταθμό, το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι χαμηλότερο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πλέγματα γείωσης να μπορούν πιο εύκολα να αποτρέψουν την εμφάνιση επικίνδυνων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων όπως φαίνεται και από την [Εικόνα 69](#).
- Όσο μεγαλύτερη η απόσταση του βραχυκυκλώματος από τον υποσταθμό τόσο πιο μικρές γίνονται οι τιμές των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων
- Και για τα τρία μοντέλα γείωσης, για ομοιόμορφο έδαφος, υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ της συνολικής αντίστασης γείωσης του συστήματος γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αυτή η γραμμική σχέση ισχύει για διάφορες τιμές των αντιστάσεων γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους ([Εικόνα 68](#)).
- Στο δεύτερο μοντέλο παρατηρούμε ότι, με την αύξηση της ακτίνας του κυκλικού βρόγχου, υπάρχει μια αύξηση στις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις. Μεγαλύτερη παρατηρείτε ότι είναι η αύξηση των μεγίστων τάσεων επαφής κάτι το οποίο εμείς δεν θέλουμε να συμβεί..
- Στο τρίτο μοντέλο, με την προσθήκη των δυο γειωτών ράβδων, παρατηρείτε μια πτώση της τάξης του 15% στις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και μια πιο μικρή πτώση 3.5% στις βηματικές τάσεις.
- Παρατηρούμε ότι και τα τρία μοντέλα γείωσης έχουν ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τις βηματικές τάσεις τους, ενώ θα περιμέναμε το δεύτερο μοντέλο να έχει καλύτερη απόδοση από τα άλλα δυο λόγω μικρότερης αντίστασης τελικά υπάρχει μια αύξηση στις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής που συνεπάγεται πτώση της απόδοσης.
- Παρατηρούμε ότι η επίστρωση με υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης  $\rho=10000 \Omega \cdot m$  (άσφαλτος) μας προσφέρει πλήρης κάλυψη, σε όλα τα μοντέλα που δοκιμάσαμε, σε αντίθεση με την επίστρωση με χαλίκι, η οποία θα μπορούσε να θεωρηθεί επαρκής μόνο για εδάφη με πολύ μικρή ειδική αντίσταση.



**Εικόνα 68** Σύγκριση αντιστάσεων γείωσης  $R(\Omega)$  των τριών μοντέλων γείωσης (R1 -> Μοντέλο Γείωσης 1, R2 -> Μοντέλο Γείωσης 2 και R3 -> Μοντέλο Γείωσης 3) ως προς την ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ) σε ομοιόμορφο έδαφος.



**Εικόνα 69** Σύγκριση ρεύματος βραχυκυκλώματος  $I_f(A)$  ως προς την ειδική αντίσταση  $R$  ( $\Omega$ ) ανάλογα την απόσταση  $L$  ( $I_{f1} \rightarrow L=0km, I_{f2} \rightarrow L=10km, I_{f3} \rightarrow L=20km$ ) από το υποσταθμό του μοντέλου 1.



**Εικόνα 70** Σύγκριση μέγιστης τάσης επαφής  $V_t$  (V) των τριών μοντέλων γείωσης ( $V_{t1}$ ,  $V_{t2}$  και  $V_{t3}$ ) ως προς την ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ), σε ομοιόμορφο έδαφος για διάφορα υλικά επιφανείας, σε απόσταση από τον υποσταθμό  $L = 10km$ .

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, συνιστάται να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω προτάσεις κατά την εγκατάσταση στύλων εξοπλισμένου σκυροδέματος όπου υπάρχει σύνδεση μεταξύ του εναερίου δικτύου και υπογείων καλωδίων μεταφοράς με τη χρήση διακόπτη αέρος.

- Η εγκατάσταση στύλων εξοπλισμένου σκυροδέματος όπου υπάρχει σύνδεση μεταξύ του εναερίου δικτύου και υπογείων καλωδίων μεταφοράς με τη χρήση διακόπτη αέρος να γίνεται όσο το δυνατόν πιο μακριά από τον Υ/Σ, καθώς οι χειρότερες περιπτώσεις όπου παρατηρούνται τα μεγαλύτερα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι όταν το βραχυκύκλωμα γίνεται κοντά στον Υ/Σ ( $L=0m$ ). Όπου δεν είναι αυτό κατασκευαστικά δυνατόν ο χώρος πρέπει να μην είναι ελεύθερα προσβάσιμος σε μη εξειδικευμένο προσωπικό.
- Συνιστάται η μετατροπή του πρωτοτύπου μοντέλου 1 σε αυτό του μοντέλου 3 όπου προσφέρει καλύτερη ασφάλεια λόγω της μείωσης των μεγίστων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Συνδυάζοντας το με προστατευτικό στρώμα ασφάλτου ειδικής αντίστασης  $10000 \Omega m$  πετυχαίνουμε πλήρη κάλυψη από τα ανεπιθύμητα επίπεδα τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων.
- Τάσεις επαφής, οι οποίες ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια, εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στις άκρες του κυκλικού βρόχου γείωσης. Είναι, συνεπώς, σημαντικό να τονιστεί πως δεν συνιστάται η τοποθέτηση μεταλλικών αντικείμενων τουλάχιστον  $1.5$  μέτρο από αυτά καθώς και η πρόσβαση στα ήδη υπάρχοντα μεταλλικά αντικείμενα να γίνεται από την πλευρά του πλέγματος γείωσης όπου εκεί οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής δεν ξεπερνάνε τα ασφαλή όρια, για την περίπτωση που έχουμε προστατευτικό στρώμα χαλκιού.
- Τέλος, γενικά για μελλοντικές τέτοιες εγκαταστάσεις, πριν γίνει η εγκατάσταση, θα πρέπει να γίνεται μέτρηση/μελέτη της ειδικής αντίστασης του εδάφους για να εξάγονται πιο ακριβή αποτελέσματα και προσομοιώσεις. Καθώς τα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι βασισμένα στα ομοιογενή εδάφη, τα οποία αποτελούν ιδανικά σενάρια που χρησιμοποιούνται για διευκόλυνση στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

## Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς, Κ. Κονταζής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, 1η Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία,
- [2] [www.noesis.edu.gr](http://www.noesis.edu.gr), Διαδικτυακός τόπος, <https://www.noesis.edu.gr/noesis-online/wiki-technologias/electricity/παραγωγή/σταθμοί-παραγωγής-ηλεκτρικού-ρεύματ/>
- [3] <https://www.shutterstock.com/fr/g/hrui>, Προφίλ Φωτογράφου
- [4] [www.admie.gr](http://www.admie.gr), Διαδικτυακός τόπος, <https://www.admie.gr/systima/perigrabi/basika-stoixeia>
- [5] [www.deddie.gr](http://www.deddie.gr), Διαδικτυακός τόπος, <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/>
- [6] K. Prakash, A. Lallu, F. R. Islam, K. A. Mamun, Review of Power System Distribution Network Architecture, School of Engineering and Physics, The University of the South Pacific, USP, Suva, Fiji, 2016
- [7] Κυριάκος Φ. Ευγενίδης, «Μελέτη Επάρκειας Συστήματος Γείωσης στα Δίκτυα Διανομής Μέσης Τάσης με Διασπαρμένη Παραγωγή υπό την Επίδραση Μεταβλητών Παραμέτρων», Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα, 2022
- [8] Thomas Allen, Short Electric Power Distribution Equipment and Systems, 2005, Σύγγραμμα
- [9] <https://www.electricaleasy.com>, Διαδικτυακός τόπος, <https://www.electricaleasy.com/2017/03/underground-power-cables.html>
- [10] Dinmohammadi, F., Flynn, D., Bailey, C., Pecht, M., Yin, C., Rajaguru, P., & Robu, *Predicting Damage and Life Expectancy of Subsea Power Cables in Offshore Renewable Energy Applications*, Smart Systems Group, School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University., Department of Mathematical Sciences, University of Greenwich, Center for Advanced Life Cycle Engineering (CALCE), University of Maryland at College Park, 2019.
- [11] <https://www.benardmakaa.com/wp-content/uploads/2018/10/Lecture-9-Overhead-transmission-lines.pdf>, Σημειώσεις Διαλέξεων.
- [12] Σολδάτος Σ., Προσομοιώσεις δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, 2017, Σύγγραμμα
- [13] Νικόλαος Α. Βοβός “Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας” ,Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2009
- [14] Γ. Ν. Κορρές και Β. Παπασπηλιωτόπουλος, «Ανάλυση προβλημάτων επιλογικής συνεργασίας των προστασιών του δικτύου λόγω υψηλής διεύθυνσης μονάδων ΔΠ - Προτάσεις βελτίωσης της λειτουργίας των υφιστάμενων προστασιών.» Αθήνα, 2016.
- [15] Parsotam, Ashok. . Same network, so what has gone wrong with the quality of supply and Voltage sags and customer relationship management, 2008
- [16] Οδηγία Διανομής Νο21, Προστασία Εναέριων Δικτύων ΜΤ Έναντι Βραχυκυκλώσεων
- [17] Π. Ντοκόπουλος: Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2005, Σύγγραμμα
- [18] ΔΕΗ, Οδηγία Διανομής Νο 21, “ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ”, 1973
- [19] <https://www.ti-soft.com/el/support/help/electricaldesign/knowledgebase/middlevoltage>, Διαδικτυακός τόπος
- [20] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., New York, 2000
- [21] Turan Gonen, Electric Power Distribution Engineering, Third Edition, 2014, Σύγγραμμα
- [22] IEC 60364-1: Electrical installations of buildings — Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions., Geneva.
- [23] <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Blogs-Landing-Page/NFPA-Today/Blog-Posts/2021/05/21/Understanding-Our-Electrical-World-8-Items-that-Form-the-Grounding-Electrode-System>, Διαδικτυακός τόπος
- [24] [https://hubbellcdn.com/ohwassets/HCE/burndy/grounding-superstore/BURNDY\\_Grounding\\_Catalog.pdf](https://hubbellcdn.com/ohwassets/HCE/burndy/grounding-superstore/BURNDY_Grounding_Catalog.pdf), Διαδικτυακός τόπος
- [25] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface

- [26] *Potentials of A Ground System*, The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., New York, 1983.
- [27] DIgSILENT PowerFactory 15 (2014), *User Manual*, Online Edition
- [28] SES AutogridPro ,A Simple Substation Grounding Analysis Using AutoGrid Pro,User Manual
- [29] Y.L. Chow, and M.M.A. Salama, “A simplified method for calculating the substation grounding grid resistance,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 9, pp. 736-742, Feb. 1994.
- [30] Turan Gonen, *Electric Power Transmission System Engineering*, Second Edition, 1983, Σύγγραμμα
- [31] F. R. ISLAM, K. PRAKASH, ,K. A. MAMUN , A. LALLU , AND H. R. POTA, *Aromatic Network: A Novel Structure for Power Distribution System* , The University of the South Pacific, Fiji & The University of New South Wales, Australia, October 2017
- [32] Οδηγία Διανομής Νο 48 : Προγραμματισμός, Μελέτη, Κατασκευή και Εκμετάλλευση Συνεπυγμένων Υπαίθριων Υποσταθμών Διανομής, Δεκέμβριος 1992
- [33] *The Electrician's Guide to the 17th Edition of the Iet Wiring Regulations BS 7671: 2008 Incorporating Amendment 3: 2015*, Σύγγραμμα .
- [34] *Electric Power Substations Engineering* , Second Edition », John D.McDonald
- [35] IEC 60865-1:2011 *Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods*
- [36] IEC TR 60865-2:2015 *Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation*
- [37] IEC 60909-0:2016 *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*
- [38] IEC TR 60909-1:2002 *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0*
- [39] IEC TR 60909-2:2008 *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations*
- [40] IEC 60909-3:2009 RLV *Short-circuit currents in three-phase AC systems - Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth*
- [41] IEC TR 60909-4:2021 *Short-circuit currents in three-phase AC systems - Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents*
- [42] IEC 61660-1:1997 *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations - Part 1: Calculation of short-circuit currents*
- [43] IEC 61660-2:1997 *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations - Part 2: Calculation of effects*
- [44] IEC TR 61660-3:2000 *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations - Part 3: Examples of calculations*