



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

Συστήματα γείωσης στο δίκτυο διανομής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Σ. Μεντζελοπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Α. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Συστήματα γείωσης στο δίκτυο διανομής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Σ. Μεντζελοπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Α. Χριστοδούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Φεβρουαρίου 2025

Χρήστος Α.
Χριστοδούλου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασιλική Θ.
Κονταργύρη
Επ. Καθηγήτρια
Π.Α.Δ.Α.

Ιωάννης Φ.
Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025

.....
Δέσποινα Σ. Μεντζελοπούλου

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

Copyright © Δέσποινα Σ. Μεντζελοπούλου, 2025.
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 γείωση είναι αναπόσπαστο στοιχείο κάθε ηλεκτρικής εγκατάστασης, καθώς διασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και του ανθρώπινου δυναμικού, παρέχοντας αγωγή διαδρομή κεραυνικών ρευμάτων και ρευμάτων σφάλματος προς τη γη. Για να υπηρετήσει τον σκοπό αυτό, ο γειωτής θα πρέπει να έχει χαμηλή αντίσταση γείωσης. Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως το βάθος έμψηξης και η ειδική αντίσταση του εδάφους, που με τη σειρά της εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, την υγρασία και την περιεκτικότητα σε άλατα και μέταλλα, τη θερμοκρασία, το χρησιμοποιούμενο μοντέλο εδάφους (ομογενές, διστρωματικό ή πολυστρωματικό) και τον ιονισμό. Για τον σχεδιασμό αξιόπιστου συστήματος γείωσης, καθίσταται απαραίτητη η μελέτη των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής και η αξιολόγηση της επικινδυνότητάς. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι συστημάτων γείωσης: το TT, το IT και το TN.

Λόγω του ενταφιασμού του στη γη, ο γειωτής αλληλεπιδρά με τον έμβιο και μη, περιβάλλοντα χώρο και διαβρώνεται. Η διάβρωση ταξινομείται σε οκτώ κατηγορίες: την ομοιόμορφη, την τοπική, τη γαλβανική, τη διάβρωση με σχισμές, τη βελονοειδή, την περικρυσταλλική, την εκλεκτική και τη μηχανική. Οι πιο ύπουλοι και επιβλαβείς τύποι είναι η βελονοειδής και η διάβρωση κόπωσης, που παρά τον μεγάλο χρόνο επώασης, δημιουργούν οπές, σπήλαια και τελικά κατάγματα σε ανύποπτο χρόνο. Η διάβρωση των γειωτών είναι κατά βάση ηλεκτροχημική και περιλαμβάνει δύο ταυτόχρονες διαδικασίες: μία οξειδωτική αντίδραση ανόδου και μία αναγωγική αντίδραση καθόδου, οι οποίες οδηγούν στη διάλυση του μετάλλου και την παραγωγή αδιάλυτων στερεών ενώσεων που εναποτίθενται σαν σκουριά στην εναπομείνσα μεταλλική μάζα και τον περιβάλλοντα χώρο. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, τα διαβρωτικά προϊόντα δημιουργούν ένα παθητικό φιλμ αυτοϊασης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό διάβρωσης είναι η υγρασία, το pH, η ειδική αντίσταση και η αλατότητα του εδάφους, η θερμοκρασία, η διάχυση του οξυγόνου, η συσσώρευση στο περιβάλλον μέσο αναερόβιων θειοαναγωγικών και σιδηροοξειδωτικών βακτηριδίων και τα παρασιτικά ρεύματα. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε χλωρίδια και τα dc παρασιτικά ρεύματα διαβρώνουν όλους τους γειωτές και προξενούν πολυάριθμες ρωγμές ή/και κάταγμα.

Στην παρούσα διπλωματική, εφαρμόστηκε το λογισμικό Ansys Electronics Desktop 2024 R2, που χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, βάσει της οποίας η γεωμετρία του μοντέλου διαιρείται σε επιμέρους στοιχεία, σχηματίζοντας ένα πλέγμα από τετράεδρα/εξάεδρα. Όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της λύσης που παρέχει το πρόγραμμα. Προσομοιώθηκε ακέραιο και διαβρωμένο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους και: α) διατηρώντας σταθερές τις ειδικές αντιστάσεις ανωτέρου και κατωτέρου στρώματος εδάφους, υπολογίστηκε η αντίσταση γείωσης τόσο για την περίπτωση αέraidου ηλεκτροδίου, όσο και για την περίπτωση ήπιας, μέτριας και σοβαρής διάβρωσης (dc-προσομοίωση), β) μεταβάλλοντας τις ειδικές αντιστάσεις των δύο στρωμάτων του εδάφους, υπολογίστηκε η αντίσταση γείωσης για αέraidio και ήπια διαβρωμένο ηλεκτρόδιο (dc-προσομοίωση), γ) διατηρώντας σταθερές τις ειδικές αντιστάσεις ανωτέρου και κατωτέρου στρώματος εδάφους, μελετήθηκε η συμπεριφορά του αέraidου και του ήπια διαβρωμένου ηλεκτροδίου σε συμμετρικό και ασύμμετρο βραχυκύκλωμα και κεραυνικό ρεύμα. Επιπλέον, μελετήθηκαν οι βηματικές τάσεις, η τάση επαφής και η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία σε αέraidio και ήπια διαβρωμένο ηλεκτρόδιο σε συνθήκες κεραυνικού πλήγματος, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της διάβρωσης στην αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του ηλεκτροδίου.

Λέξεις κλειδιά:

Σύστημα γείωσης, Βηματικές τάσεις, Τάσεις επαφής, Αντίσταση γείωσης, Ειδική αντίσταση, Διάβρωση, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Προσομοίωση, Ρεύμα σφάλματος, Κεραυνικό πλήγμα, Διστρωματικό μοντέλο

Abstract

Electrical earthing is crucial for every electrical facility because it safeguards equipment integrity and human safety since it provides a conductive path for lightning and fault currents to earth. Thus, its grounding resistance should be minimal. Grounding resistance depends on burying depth and soil resistivity. The latter depends on soil type and grain size as well as soil moisture, soluble salt and mineral content, temperature, ionization and applied soil model (homogeneous, two-layer, multi-layer). The design of a reliable grounding system requires the study of step and touch voltages and subsequent risk assessment. There are three major types of grounding systems: TT, IT and TN.

Due to underground placement, earthing systems interact with the surrounding environment and its living or abiotic compounds and become corroded. Corrosion is classified into eight forms: uniform, galvanic, crevice, pitting, intergranular, selective leaching, impact and mechanical. Pitting and stress mechanical corrosion are the most devious and hazardous forms. Despite their big incubation time, they abruptly cause metal dissolution, holes, tubercles and cracks. Grounding system corrosion is basically electrochemical and includes two simultaneous processes, an anodic oxidative reaction and a cathodic reductive reaction. As a result, the metal dissolves and insoluble solid corrosion products are deposited in the form of rust on the metal surface as well as the surrounding media. Under certain conditions, corrosion products form a self-healing passive film. Corrosion rate is affected by several factors such as soil moisture, pH, resistivity, salt and oxygen content, temperature, soil contamination with sulfate-reducing and iron-oxidizing bacteria and stray currents. Increased chlorinated content and stray currents corrode all grounding conductors and cause multiple cracks and/or rupture.

In the present diploma thesis, Ansys Electronics Desktop 2024 R2 was used. This software uses the Finite Element Method which divides a model's geometry into tetrahedral or hexahedral elements thus forming a mesh. Tighter meshes increase computational accuracy. Both intact and corroded rod were simulated using a two-layer soil model under the following conditions: a) while keeping the resistivities of upper and lower soil layer constant, the grounding resistances of intact as well as mildly, moderately and severely corroded rods were computed (dc-simulation), b) while changing the resistivities of upper and lower soil layers, the grounding resistances of intact and mildly corroded rod were computed (dc-simulation), c) while keeping the resistivities of upper and lower soil layer constant, the behaviour of both pure and mildly corroded rod during symmetrical and asymmetrical fault and thunder strike was studied. The course of evolving temperature, as well as step and touch voltages were also evaluated, under simulated thunderstrike conditions for both intact and mildly corroded rod. The results of the latter tests could help ascertain the efficacy of both electrodes.

Key words:

Grounding system, Step voltages, Touch voltages, Grounding resistance, Resistivity, Corrosion, Finite Element Method, Simulation, Fault current, Thunder strike, Two-layer model

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Χρήστο Α. Χριστοδούλου για την ανάθεση της εργασίας, την επίβλεψη και την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Ευχαριστώ, επίσης, την κυρία Ελένη Νικολοπούλου για τις συμβουλές της. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και την υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	σελ. 12
Κατάλογος Πινάκων	σελ. 19
Κεφάλαιο 1: Γειώσεις	σελ. 21
1.1. Γείωση	σελ. 21
1.2. Είδη γειωτών	σελ. 22
1.2.1. Ημισφαιρικός γειωτής	σελ. 22
1.2.2. Ραβδοειδής γειωτής	σελ. 23
1.2.3. Γειωτής ταινίας	σελ. 23
1.2.4. Ακτινικός γειωτής	σελ. 23
1.2.5. Γειωτής πλάκας	σελ. 23
1.2.6. Γειωτής πλέγματος	σελ. 24
1.2.7. Θεμελειακή γείωση	σελ. 24
1.3. Αντίσταση γείωσης	σελ. 28
1.4. Ειδική αντίσταση του εδάφους	σελ. 30
1.5. Μοντέλα εδάφους	σελ. 33
1.6. Τρόποι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους	σελ. 38
1.6.1. Μέθοδος Wenner	σελ. 38
1.6.2. Μέθοδος Schlumberger	σελ. 39
1.6.3. Μέθοδος διπόλου – διπόλου	σελ. 39
1.6.4. Μέθοδος Lee (παραλλαγή της Wenner)	σελ. 40
1.6.5. Τετραγωνική διάταξη	σελ. 40
1.6.6. Παραλλαγές της μεθόδου των 4 σημείων	σελ. 41

1.7.	Ιονισμός του εδάφους	σελ. 42
1.8.	Συστήματα γείωσης	σελ. 46
1.8.1.	Σύστημα γείωσης TT	σελ. 47
1.8.2.	Σύστημα γείωσης IT	σελ. 48
1.8.3.	Σύστημα γείωσης TN	σελ. 52
Κεφάλαιο 2:	Διάβρωση	σελ. 55
2.1.	Δυναμικό διάβρωσης	σελ. 55
2.1.1.	Διάγραμμα Pourbaix	σελ. 57
2.1.2.	Διαγράμματα πόλωσης	σελ. 59
2.2.	Είδη διάβρωσης	σελ. 62
2.2.1.	Ομοιόμορφη διάβρωση (Uniform corrosion)	σελ. 62
2.2.2.	Τοπική διάβρωση (Localized corrosion)	σελ. 62
2.2.3.	Γαλβανική διάβρωση ή διάβρωση επαφής (Galvanic corrosion)	σελ. 63
2.2.4.	Διάβρωση με σχισμές ή διάβρωση διαφορικού αερισμού (Crevice corrosion)	σελ. 64
2.2.5.	Βελονοειδής διάβρωση ή διάβρωση με μορφή στιγμάτων/ οπών (Pitting corrosion)	σελ. 65
2.2.6.	Εκλεκτική ή επιλεκτική διάβρωση	σελ. 66
2.2.7	Περικρυσταλλική διάβρωση ή αποσάθρωση των ορίων των κόκκων (Intergranular corrosion)	σελ. 66
2.2.8.	Διάβρωση λόγω μηχανικής καταπόνησης (Stress corrosion)	σελ. 67
2.3.	Υλικό κατασκευής των γειωτών και διάβρωση	σελ. 67
2.3.1.	Χαλκός (Copper)	σελ. 68
2.3.2.	Ανθρακούχος χάλυβας (Carbon steel)	σελ. 68

2.3.3.	Γαλβανισμένος χάλυβας (Galvanized steel)	σελ. 69
2.3.4.	Επιχαλκωμένος χάλυβας (copper-plated steel)	σελ. 70
2.3.5.	Ανοξείδωτος χάλυβας	σελ. 70
2.4.	Ηλεκτροχημική διάβρωση	σελ. 71
2.5.	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των υπογείων συστημάτων γείωσης	σελ. 74
2.5.1.	Υγρασία	σελ. 74
2.5.2.	pH εδάφους	σελ. 75
2.5.3.	Ειδική αντίσταση του εδάφους	σελ. 75
2.5.4.	Αλατότητα εδάφους	σελ. 75
2.5.5.	Θερμοκρασία	σελ. 78
2.5.6.	Περιεκτικότητα του εδάφους σε O ₂	σελ. 78
2.5.7.	Μεταβολισμός μικροβίων	σελ. 79
2.6.	Παρασιτικά ρεύματα (stray currents)	σελ. 80
Κεφάλαιο 3:	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) για τη μελέτη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του συστήματος γείωσης	σελ. 83
3.1.	Εξισώσεις Maxwell	σελ. 83
3.2.	Εξισώσεις A–V	σελ. 84
3.3.	Γενική περιγραφή της μεθόδου FEM	σελ. 85
3.4.	Εκτέλεση FEM με υπολογιστικό λογισμικό	σελ. 86
Κεφάλαιο 4:	Προσομοιώσεις ηλεκτροδίου γείωσης σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους με λογισμικό Ansys	σελ. 90
4.1.	Διστρωματικό μοντέλο με διάβρωση – προσομοιώσεις σταθερής διέγερσης (dc)	σελ. 90

4.1.1.	Θεωρητικό υπόβαθρο	σελ. 93
4.1.2.	Πρώτο σετ προσομοιώσεων	σελ. 93
4.1.3.	Δεύτερο σετ προσομοιώσεων	σελ. 96
4.1.4.	Τρίτο σετ προσομοιώσεων	σελ. 98
4.2.	Διστρωματικό μοντέλο με διάβρωση – συμμετρικό & ασύμμετρο βραχυκύκλωμα	σελ. 100
4.2.1.	Πρώτο σετ προσομοιώσεων: Συμμετρικό βραχυκύκλωμα σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm	σελ. 101
4.2.2.	Δεύτερο σετ προσομοιώσεων: Ασύμμετρο βραχυκύκλωμα σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm	σελ. 102
4.2.3.	Τρίτο σετ προσομοιώσεων: Συμμετρικό βραχυκύκλωμα σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm	σελ. 104
4.2.4.	Τέταρτο σετ προσομοιώσεων: Ασύμμετρο βραχυκύκλωμα σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm	σελ. 105
4.3.	Διστρωματικό μοντέλο με διάβρωση – κεραυνικό κρουστικό ρεύμα και θερμοκρασία	σελ. 108
4.3.1.	Πρώτο σετ προσομοιώσεων: Ακέραιο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm	σελ. 108
4.3.2.	Δεύτερο σετ προσομοιώσεων: Διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm	σελ. 112
4.3.3.	Τρίτο σετ προσομοιώσεων: Ωμικές απώλειες μη διαβρωμένου ηλεκτροδίου αρχικής ακτίνας 10 mm	σελ. 116
4.3.4.	Τέταρτο σετ προσομοιώσεων: Ωμικές απώλειες διαβρωμένου ηλεκτροδίου με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm	σελ. 117
Κεφάλαιο 5:	Συζήτηση	σελ. 119

5.1.	Συμπεράσματα Διπλωματικής	σελ. 119
5.2.	Επόμενα βήματα	σελ. 120
	Βιβλιογραφία	σελ. 121

Κατάλογος Σχημάτων:

Σχήμα 1.2.1 (α) ημισφαιρικός γειωτής (β) γειωτής ταινίας (γ) γειωτής πλάκας (δ) ραβδοειδής γειωτής (ε) ακτινικός γειωτής (στ) γειωτής πλέγματος (ζ) θεμελειακή γείωση.	σελ. 22
Σχήμα 1.3.1. Η R_g αποτελείται από (α) την αντίσταση του αγωγού σύνδεσης του ηλεκτροδίου γείωσης με το κύκλωμα ($R_{main\ protective\ conductor}$), (β) την αντίσταση επαφής επιφάνειας ηλεκτροδίου και εδάφους ($R_{ηλεκτροδίου}$) και (γ) την αντίσταση του όγκου του περιβάλλοντος εδάφους (που στο Σχήμα είναι η αντίσταση του τσιμέντου).	σελ. 28
Σχήμα 1.3.2. Διάταξη μεθόδου πτώσης δυναμικού, όπου X το ηλεκτρόδιο γείωσης, C το βοηθητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος και P το βοηθητικό ηλεκτρόδιο δυναμικού.	σελ. 29
Σχήμα 1.3.3. Μέθοδος πτώσης δυναμικού με μετακίνησης του ηλεκτροδίου P κατά μήκος του άξονα XC.	σελ. 29
Σχήμα 1.4.1. Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης ρ συναρτήσει του λογαρίθμου του μεγέθους των κόκκων. Το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται κατά τη διαδοχική μετάβαση από το στρώμα ιλώδους αργίλου (clay silt) στον ιλώδη αργιλοπηλό (silty clay), την άμμο και τελικά το χαλίκι. Η ειδική αντίσταση ρ αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τον λογάριθμο του μεγέθους των κόκκων.	σελ. 30
Σχήμα 1.4.2. (α) δίοδοι ρεύματος σε έδαφος μεγάλων κόκκων, (β) δίοδοι ρεύματος σε λεπτόκοκκο έδαφος (γ) διεπαφή κόκκων. Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι του χρησιμοποιούμενου εδάφους, τόσο πιο εύκολο είναι να καλύψει τα κενά το νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας στα κενά και τη μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.	σελ. 30
Σχήμα 1.4.3. Εξάρτηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους από την υγρασία και τη συγκέντρωση του άλατος KCl. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους και με την αύξηση της συγκέντρωσης στο άλας KCl. Για ίδια συγκέντρωση KCl, όταν η υγρασία υπερβαίνει το 22%, η ειδική αντίσταση δεν εμφανίζει αξιόλογη μεταβολή.	σελ. 31
Σχήμα 1.4.4. (α) θερμοκρασία συναρτήσει του βάθους σε μία διετία, (β) δεκαδικός λογάριθμος της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει του βάθους του στρώματος του εδάφους σε μία διετία. Για θερμοκρασία -20 °C (που σημειώθηκε στον έκτο μήνα της μελέτης), η ειδική αντίσταση του εδάφους έφτασε τα $10^{6.32} \Omega \cdot m$, ενώ για θερμοκρασία 9 °C (που σημειώθηκε στον δέκατο τρίτο μήνα της μελέτης), η ειδική αντίσταση έπεσε στα $10^{4.65} \Omega \cdot m$. Επίσης διαπιστώνουμε ότι όσο μειώνεται το βάθος, τόσο πιο έντονη είναι η εποχιακή μεταβολή της ρ (κόκκινη γραμμή Σχήματος 1.4.4.).	σελ. 32

Σχήμα 1.5.1 Ανάλυση της μεταβολής της αντίστασης του εδάφους με το βάθος στο οποίο τοποθετείται κάθετο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιώντας (α) ομογενές μοντέλο εδάφους, (β) διστρωματικό μοντέλο εδάφους.	σελ. 33
Σχήμα 1.5.2. Κάθετο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους με ανομοιογενή κατανομή ρευμάτων, όπου ρ_1 η ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος, h το βάθος του άνω στρώματος και ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος.	σελ. 34
Σχήμα 1.5.3 Κάθετο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους με ομοιογενή κατανομή ρευμάτων, όπου ρ_1 η ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος, h το βάθος του άνω στρώματος και ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος.	σελ. 34
Σχήμα 1.5.4. Διάγραμμα γραφικής μεθόδου Sunde.	σελ. 35
Σχήμα 1.5.5. Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς για κατακόρυφο ηλεκτρόδιο τοποθετημένο σε ομογενές έδαφος, όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους και l το μήκος του ηλεκτροδίου (<i>TL model</i>).	σελ. 35
Σχήμα 1.5.6. Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς για κατακόρυφο ηλεκτρόδιο εμπεγμένο σε διστρωματικό έδαφος, όπου ρ_1 και ε_{r1} είναι η ειδική αντίσταση εδάφους και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα αντίστοιχα του άνω στρώματος και ρ_2 και ε_{r2} είναι η ειδική αντίσταση εδάφους και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα αντίστοιχα του κάτω στρώματος (<i>TL model</i>).	σελ. 36
Σχήμα 1.5.7. Το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.5.6.	σελ. 36
Σχήμα 1.5.8. το ισοδύναμο κύκλωμα της Z_T του κατακόρυφου ηλεκτροδίου σε πολυστρωματικό έδαφος n στρωμάτων.	σελ. 37
Σχήμα 1.6.1. Μέθοδος Wenner.	σελ. 38
Σχήμα 1.6.2. Μέθοδος Schlumberger.	σελ. 39
Σχήμα 1.6.3. Μέθοδος διπόλου διπόλου.	σελ. 39
Σχήμα 1.6.4 Μέθοδος Lee.	σελ. 40
Σχήμα 1.6.5 Τετραγωνική διάταξη.	σελ. 40
Σχήμα 1.7.1. Υφή του εδάφους.	σελ. 42
Σχήμα 1.7.2. (α) Ιονισμός του εδάφους, (β) Μερικές εκκενώσεις και σχηματισμός καναλιών εκφόρτισης με χρήση τεσσάρων φίλμ ακτίνων X, τοποθετημένων κάθετα και σε διαφορετικά επίπεδα του ηλεκτροδίου γείωσης, έτσι ώστε να μην επηρεάζουν αφενός το ηλεκτρικό πεδίο και να επιτρέπουν αφετέρου την απρόσκοπτη ροή του ρεύματος ιονισμού. Ο ιονισμός που αποτυπώθηκε στο ανώτερο φίλμ ήταν μόνο λίγο μεγαλύτερος απ'ότι στα υπόλοιπα, λόγω του μικρού μεγέθους του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκαν.	σελ. 43
Σχήμα 1.7.3 Χρονικές καμπύλες α) ρεύματος $i(t)$, (β) τάσης $u(t)$ και γ) σύνθετης αντίστασης $z(t) = u(t) / i(t)$.	σελ. 45

Σχήμα 1.7.4 Δυναμικό μοντέλο Liew για την ειδική αντίσταση του εδάφους.

σελ. 45

Σχήμα 1.8.1. Οι κίνδυνοι ενός ρεύματος σφάλματος για τον άνθρωπο: (α) κίνδυνος ηλεκτροπληξίας: το άτομο έρχεται σε επαφή με το μεταλλικό περίβλημα γειωμένης ηλεκτρικής συσκευής που διαρρέεται από ρεύμα σφάλματος, οπότε $R_{\text{ανθρώπου}} = R_{\text{πυρήνα}} + R_{\text{δέρματος}}$ (όπου $R_{\text{πυρήνα}} \approx 500 \Omega$ και $R_{\text{δέρματος}} = 1-100 \text{ k}\Omega$ με την $R_{\text{δέρματος}}$ να αυξάνεται όσο πιο υγρό είναι το δέρμα). Η συνολική αντίσταση είναι $R_{\text{ολ}} = R_{\text{ηλ. συσκευής}} + R_{\text{γείωσης}}$, ενώ από το ισodύναμο κύκλωμα προκύπτει ότι για $R_{\text{ολ}} \ll R_{\text{ανθρώπου}}$, έχουμε $i_{\gamma} \gg i_{\alpha}$, (όπου i_{γ} , i_{α} : το ρεύμα που διαρρέει το σύστημα γείωσης και τον άνθρωπο αντίστοιχα). Για τη βέλτιστη προστασία του ατόμου, η αντίσταση γείωσης του συστήματος προστασίας πρέπει να τείνει στο μηδέν. Αν δεν πληρούται η προϋπόθεση αυτή, ο άνθρωπος κινδυνεύει από ηλεκτροπληξία, η βαρύτητα της οποίας εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος, την τιμή της τάσης, τη συχνότητα, τη χρονική διάρκεια του ηλεκτροφυσικού φαινομένου και την υγρασία του εδάφους, (β) κίνδυνος από τάση επαφής: στην περίπτωση αυτή αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του ανθρωπίνου σώματος, τα οποία γεφυρώνουν ένα μεταλλικό αντικείμενο με το έδαφος ή δύο μεταλλικά αντικείμενα μεταξύ τους. Για άτομο το οποίο βρίσκεται εντός του πεδίου ροής ενός ρεύματος σφάλματος, θα αναπτυχθεί τάση επαφής είτε μεταξύ χεριού και ποδιού είτε μεταξύ των δύο χεριών, (γ) κίνδυνος από βηματική τάση. Πρόκειται για τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου (με τυπικό άνοιγμα ποδιών 1m), όταν αυτό βρεθεί κοντά σε ένα γειωμένο αντικείμενο το οποίο εκείνη ακριβώς τη στιγμή διαρρέεται από κάποιο ρεύμα σφάλματος.

σελ. 46

Σχήμα 1.8.2. Σύστημα γείωσης TT. Ph (= phase): η φάση, 3: συντομογραφία των τριών φάσεων, N (= Neutral): ο γειωμένος ουδέτερος, HV (= High Voltage): υψηλή τάση, LV (= Low Voltage): χαμηλή τάση.

σελ. 47

Σχήμα 1.8.3. Συμπεριφορά του TT-συστήματος γείωσης σε σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. PhA, PhB, PhC: οι τρεις φάσεις, I_d , U_d , R_d : κατ' αντιστοιχία το ρεύμα, η τάση και η αντίσταση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου, R_a , R_b : αντιστάσεις γείωσης, U_o : τάση φάσης προς ουδέτερο, ΔΔΡ: οι διακόπτες διαφυγής έντασης, N (= Neutral): ο γειωμένος ουδέτερος, HV (= High Voltage): υψηλή τάση και LV (= Low Voltage): χαμηλή τάση.

σελ. 48

Σχήμα 1.8.4. Σύστημα γείωσης IT με απομονωμένο ουδέτερο. Ph (= phase): η φάση, 3: συντομογραφία των τριών φάσεων, N (= Neutral): ο γειωμένος ουδέτερος, HV (= High Voltage): υψηλή τάση, LV (= Low Voltage): χαμηλή τάση.

σελ. 49

Σχήμα 1.8.5. Συμπεριφορά του συστήματος γείωσης IT στο πρώτο σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. R_d , U_d : η αντίστοιχη αντίσταση και τάση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου, Insulation monitoring device – IMD: η συσκευή ελέγχου απομόνωσης, surge arrester (surge limiter): το καθοδικό αλεξικέραυνο.

σελ. 51

Σχήμα 1.8.6. Συμπεριφορά του συστήματος γείωσης IT στο δεύτερο σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. R_d , U_d : η αντίστοιχη αντίσταση και τάση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου, surge arrester (surge limiter): το καθοδικό αλεξικέραυνο.

σελ. 51

Σχήμα 1.8.7. Συστήματα γείωσης TN: (α) TN-C, (β) TN-S και (γ) TN-C-S.	σελ. 53
Σχήμα 1.8.8. Συμπεριφορά του συστήματος γείωσης TN σε σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. R_d , U_d : η αντίστοιχη αντίσταση και η τάση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου.	σελ. 53
Σχήμα 2.1.1. Στοιχείο Daniel.	σελ. 55
Σχήμα 2.1.2. Γράφημα Pourbaix για τον σίδηρο. Η μπλε και η φούξια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχούν στο ηλεκτρόδιο υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα. Βλέπουμε τρεις διακριτές περιοχές: τη ζώνη διάβρωσης (corrosion), την ζώνη ανοχής στη διάβρωση (immune) και τη ζώνη παθητικοποίησης (passive).	σελ. 57
Σχήμα 2.1.3. Διάγραμμα πόλωσης λόγω της ενεργούς διάβρωσης του Fe σε διάλυμα HCl. Η μεταφορά φορτισμένων σωματιδίων στην διεπιφάνεια μετάλλου-οξέος είναι ο παράγοντας που καθορίζει τον ρυθμό διάβρωσης στο όξινο περιβάλλον.	σελ. 60
Σχήμα 2.1.4. Διάγραμμα πόλωσης σε ουδέτερο περιβάλλον. Η διάβρωση επάγεται από την αναγωγή του οξυγόνου που φτάνει με διάχυση στην επιφάνεια του μετάλλου. Το OH^- που παράγεται θα προκαλέσει τις οξειδωτικές αντιδράσεις παραγωγής διαβρωτικών προϊόντων. Ο ρυθμός διάβρωσης σε αυτή την περίπτωση καθορίζεται από την ποσότητα του διαχεόμενου οξυγόνου και όχι από το είδος του μετάλλου.	σελ. 60
Σχήμα 2.1.5. Η επίδραση δεύτερης αναγωγικής αντίδρασης στην κάθοδο. Αν ο αγωγός βρεθεί σε όξινο περιβάλλον που εμπλουτίστηκε με οξυγόνο, τότε στην διεπιφάνεια μετάλλου-διαλύματος θα συμβούν δύο αναγωγικές αντιδράσεις που θα αυξήσουν το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} , ενώ ταυτόχρονα θα προσφέρουν στον σίδηρο της ανόδου πολλαπλούς οξειδωτικούς παράγοντες.	σελ. 61
Σχήμα 2.2.1. Ομοιόμορφη διάβρωση με τα καθοδικά και τα ανοδικά ρεύματα να διανέμονται ομοιόμορφα πάνω στην μεταλλική επιφάνεια.	σελ. 62
Σχήμα 2.2.2. Τοπική διάβρωση σε 316L ανοξείδωτο ατσάλι.	σελ. 62
Σχήμα 2.2.3. Γαλβανική διάβρωση. Επιψευδαργύρωση χαλυβδόφυλλου. Η άνοδος του αγενέστερου Zn προστατεύει την κάθοδο του ευγενέστερου Fe. Τα προϊόντα της διάβρωσης του Zn, δηλ. ZnO και $\text{Zn}(\text{OH})_2$, συσσωρεύονται στην περιοχή ρωγμής στον χάλυβα δημιουργώντας μια επίστρωση αυτοϊάσης (self healing).	σελ. 63
Σχήμα 2.2.4.(α) μεγάλος λόγος ευγενούς μετάλλου/αγενούς μετάλλου που συνεπάγεται ταχύτατη διάβρωση, (β) μεγάλη επιφάνεια επαφής αγενούς μετάλλου με αποτέλεσμα μικρή ταχύτητα διάβρωσης.	σελ. 63
Σχήμα 2.2.5. Διάβρωση σε σχισμή: (α) ανοδικές και καθοδικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε όλη την επιφάνεια αλλά και στις οπές των δύο μετάλλων (διαγραμμισμένα τμήματα) και (β) η έλλειψη οξυγόνου και η συνένωση ιόντων των μετάλλων με ιόντα χλωρίου στον περιβάλλοντα χώρο των οπών επεκτείνει τοπικά τη διάβρωση στη σχισμή.	σελ. 64
Σχήμα 2.2.6. Βελονοειδής διάβρωση ανθρακούχου χάλυβα με το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων.	σελ. 65
Σχήμα 2.2.7. Επιλεκτική διάβρωση.	σελ. 66
Σχήμα 2.2.8. Περικρυσταλλική διάβρωση ανθρακούχου χάλυβα	σελ. 66

Σχήμα 2.2.9. (a) Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση, (b) Διάβρωση κόπωσης.	σελ. 67
Σχήμα 2.3.1. Μηχανισμός τοπικής διάβρωσης στον ανθρακούχο χάλυβα.	σελ. 69
Σχήμα 2.3.2. Μηχανισμός τοπικής διάβρωσης στον γαλβανισμένο χάλυβα.	σελ. 69
Σχήμα 2.4.1. Σχηματισμός σπηλαίου (tubercle). Διακρίνονται: I. ένας εύθραυστος εξωτερικός φλοιός αιματίτη $\text{Fe}(\text{OH})_3$, καρβονικών και θειϊκών ενώσεων, ακαθαρσιών και χρώματος, II. ένα εύθρυπτο μαύρο εσωτερικό λεπτό στρώμα μαγνητίτη Fe_3O_4 , III. ένας εύθραυστος πυρήνας από $\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeCO_3 , θειϊκές και φωσφορικές ενώσεις, IV. μια κοιλότητα γεμάτη με υγρό απ' την οποία απουσιάζει εντελώς το οξυγόνο, ενώ επικρατεί όξινο περιβάλλον από ιόντα Cl^- , που αντιδρώντας με το διαλυμένο Fe^{2+} οδηγεί στο σχηματισμό δυσδιάλυτου FeCl_2 και HCl . Τα ιόντα Cl^- αποτρέπουν την επικάλυψη του φιλμ αιματίτη και μαγνητίτη πάνω στην μεταλλική επιφάνεια, IV: η περιοχή ανόδου όπου ο σίδηρος διαλύεται σε Fe^{2+} .	σελ. 72
Σχήμα 2.5.1. Καμπύλες πόλωσης του χαλύβδινου αγωγού Q235, εμβυθισμένου σε άργιλο Bentonite με διαφορετικές περιεκτικότητες σε νερό για 240h (a), 720h (b) και 1080h (c), υπό διαφορετικές συνθήκες υγρασίας. Η καμπύλη (d) αποτελεί την γραφική παράσταση του ρυθμού διάβρωσης συναρτήσει του ποσοστού του εδάφους σε υγρασία. Διαπιστώνουμε, ότι όσο αυξάνεται η υγρασία, το δυναμικό διάβρωσης μειώνεται, ενώ η πυκνότητα του ρεύματος αυξάνεται. Επίσης, όσο η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία παραμένει κάτω από το 30% (κρίσιμη τιμή), η αύξηση της υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Για ποσοστά υγρασίας μεγαλύτερα του 30%, ο ρυθμός διάβρωσης ελαττώνεται.	σελ. 74
Σχήμα 2.5.2. Αυτοπαθητικοποίηση μετάλλου με προσρόφηση O_2 και δημιουργία φιλμ από οξείδιο του μετάλλου.	σελ. 76
Σχήμα 2.5.3. Διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα κατά την έκθεσή του σε διάφορες συγκεντρώσεις Cl^- για μία, τρεις, πέντε, επτά και δώδεκα εβδομάδες.	σελ. 77
Σχήμα 2.5.4. Διαταραχές της μορφολογίας του χάλυβα X80 σε όξινο έδαφος και διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλελυμένου οξυγόνου (DO): (a) pH = 3.0 και DO = 0.25 ppm, (b) pH = 3.0 και DO = 4.30 ppm, (c) pH = 3.0 και DO = 20.2 ppm, (d) pH = 4.5 και DO ≈ 0.25 ppm, (e) pH = 4.5 και DO = 4.30 ppm, (f) pH = 4.5 και DO = 20.2 ppm, (g) pH = 5.5 και DO = 0.25 ppm, (h) pH = 5.5 και DO = 4.30 ppm και (i) pH = 5.5 και DO = 20.2 ppm.	σελ. 79
Σχήμα 2.5.5. Μηχανισμός διάβρωσης των θειοαναγωγικών βακτηρίων.	σελ. 80
Σχήμα 2.6.1. Παρασιτικό ρεύμα.	σελ. 80
Σχήμα 2.6.2. Διάβρωση του χάλυβα X80 κατά την έκθεσή του σε διάφορες πυκνότητες DC-παρασιτικού ρεύματος. Σε πυκνότητα 0 mA/cm ² , η διάβρωση γίνεται με βραδύ ρυθμό, εμφανίζοντας κοκκώδη σύσταση (a). Καθώς η πυκνότητα του DC-ρεύματος αυξάνει (0.25-0.5 mA/cm ²) το διαβρωτικό στρώμα γίνεται πιο παχύ με περισσότερες και μεγαλύτερες διαβρωτικές εναποθέσεις (b-c). Σε μεγάλες εντάσεις αναπτύσσονται ρωγμές (d) ή/και κατάγματα (e) πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα.	σελ. 81
Σχήμα 2.6.3. Διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα μετά την έκθεση σε AC-παρασιτικό ρεύμα με διαφορετικές πυκνότητες έντασης σε αλκαλικό (a-c) και όξινο(d-f) περιβάλλον.	σελ. 82

Σχήμα 2.6.4. Διαβρωτικό εξωτερικό (a,c,e) και εσωτερικό (b,d,f) φιλμ από την επίδραση AC-παρασιτικού ρεύματος πυκνότητας 0, 100 και 500 A/m ² σε αλκαλικό περιβάλλον. Διαβρωτική επικάλυψη σε μονό στρώμα υπό την επίδραση AC-παρασιτικού ρεύματος 0 A/m ² (g), 100 A/m ² (h) και 500 A/m ² (i) σε όξινο περιβάλλον.	σελ.82
Σχήμα 3.3.1. Τμηματοποίηση του χώρου: (α) σε τρίγωνα (2D) και (β) σε τετράεδρα (3D).	σελ. 85
Σχήμα 3.4.1. Πλέγμα N μονοδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων (Mesh of N-one dimensional Finite Elements) με μέθοδο FEM. Στο πάνω μέρος του Σχήματος, η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την πραγματική λύση (πραγματική συνάρτηση ηλεκτροστατικού δυναμικού, true solution), ενώ η συνεχής γραμμή την προσεγγιστική λύση της μεθόδου FEM (προσεγγιστική συνάρτηση ηλεκτροστατικού δυναμικού που απαρτίζεται από το σύνολο των προσεγγιστικών για κάθε στοιχείο συναρτήσεων, approximating functions). Η αληθινή λύση απεικονίστηκε μόνο για λόγους πληρότητας στην επεξήγηση της μεθόδου FEM. Στην πράξη, το λογισμικό δίνει μόνο την προσεγγιστική λύση.	σελ. 86
Σχήμα 3.4.2. Γραμμική δοκιμαστική συνάρτηση κατά μήκος του στοιχείου 1-2.	σελ. 87
Σχήμα 3.4.3. Γραμμικές συναρτήσεις σχήματος.	σελ. 88
Σχήμα 3.4.4. Τοπικές συντεταγμένες στοιχείου i-(i+1).	σελ. 88
Σχήμα 4.1.1. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model.	σελ. 90
Σχήμα 4.1.2. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model: Ο διστρωματικός κύλινδρος άμεσης γης σε μεγέθυνση.	σελ. 91
Σχήμα 4.1.3. Διατομή διαβρωμένου ηλεκτροδίου.	σελ. 91
Σχήμα 4.1.4. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model: Το διαβρωμένο ηλεκτρόδιο σε μεγέθυνση.	σελ. 92
Σχήμα 4.1.5. Το πλέγμα (mesh) του two layer Desp Mentzelopoulou soil model.	σελ. 92
Σχήμα 4.1.6. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για severe corrosion με $r = 2.5 \text{ mm}$.	σελ. 95
Σχήμα 4.1.7. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για moderate corrosion με $r = 5 \text{ mm}$.	σελ. 95
Σχήμα 4.1.8. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για mild corrosion με $r = 7.5 \text{ mm}$.	σελ. 95
Σχήμα 4.1.9. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για intact rod με $r_0 = 10 \text{ mm}$.	σελ. 96
Σχήμα 4.1.10. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για intact rod με $r_0 = 10 \text{ mm}$ και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 < \sigma_1$.	σελ. 96
Σχήμα 4.1.11. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για intact rod με $r_0 = 10 \text{ mm}$ και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 > \sigma_1$.	σελ. 97

Σχήμα 4.1.12. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για mild corrosion με $r = 7.5 \text{ mm}$ και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 < \sigma_1$.	σελ. 98
Σχήμα 4.1.13. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για mild corrosion με $r = 7.5 \text{ mm}$ και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 > \sigma_1$.	σελ. 99
Σχήμα 4.2.1. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσει του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 101
Σχήμα 4.2.2. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 101
Σχήμα 4.2.3. Καμπύλη σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 102
Σχήμα 4.2.4. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσει του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 102
Σχήμα 4.2.5. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 103
Σχήμα 4.2.6. Καμπύλη σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 103
Σχήμα 4.2.7. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσει του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm .	σελ. 104
Σχήμα 4.2.8. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm .	σελ. 104
Σχήμα 4.2.9. Καμπύλες σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm .	σελ. 105
Σχήμα 4.2.10. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσει του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm .	σελ. 105
Σχήμα 4.2.11. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm .	σελ. 106
Σχήμα 4.2.12. Καμπύλη σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm .	σελ. 106
Σχήμα 4.3.1. Καμπύλη κεραυνικού ρεύματος συναρτήσει του χρόνου σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 108
Σχήμα 4.3.2. Κρουστική τάση συναρτήσει του χρόνου σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm .	σελ. 109

Σχήμα 4.3.3. Χοάνη δυναμικού για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 10 mm για χρόνους από τα 0 ως τα 500 μ s.	σελ. 110
Σχήμα 4.3.4. Η τάση στο σημείο κεραυνικού πλήγματος για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.	σελ. 110
Σχήμα 4.3.5. Η χοάνη δυναμικού με το μεγαλύτερο overshoot για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.	σελ. 111
Σχήμα 4.3.6. Καμπύλη κεραυνικού ρεύματος συναρτήσει του χρόνου σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.	σελ. 112
Σχήμα 4.3.7. Καμπύλη κρουστικής τάσης συναρτήσει του χρόνου σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.	σελ. 112
Σχήμα 4.3.8. Χοάνη δυναμικού για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm για χρόνους από τα 0 ως τα 500 μ s.	σελ. 113
Σχήμα 4.3.9. Η τάση στο σημείο κεραυνικού πλήγματος για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.	σελ. 114
Σχήμα 4.3.10. Η χοάνη δυναμικού με το μεγαλύτερο overshoot για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.	σελ. 114
Σχήμα 4.3.11. Ωμικές απώλειες για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.	σελ. 116
Σχήμα 4.3.12. scaling factor και διάγραμμα θερμοκρασίας για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.	σελ. 116
Σχήμα 4.3.13. Ωμικές απώλειες για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.	σελ. 117
Σχήμα 4.3.14. Scaling factor και διάγραμμα θερμοκρασίας για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.	σελ. 117

Κατάλογος πινάκων:

Πίνακας 1.2.1. Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης στους διαφόρους τύπους γειωτών (ρ : ειδική αντίσταση του εδάφους).	σελ. 27
Πίνακας 1.5.1. Τρόποι υπολογισμού της ρ με χρήση διστρωματικού μοντέλου.	σελ. 35
Πίνακας 1.5.2. Υπολογισμοί της σύνθετης κρουστικής αντίστασης κατακόρυφου ηλεκτροδίου τοποθετούμενου σε μονοστρωματικό, διστρωματικό και πολυστρωματικό έδαφος.	σελ. 37
Πίνακας 1.8.1. Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του TT-συστήματος γείωσης.	σελ. 48
Πίνακας 1.8.2. Υπολογισμός του ρεύματος και της τάσης σφάλματος σε διαφόρους τύπους IT-συστήματος γείωσης (ω : η βιομηχανική γωνιακή συχνότητα 50 Hz).	σελ. 50

Πίνακας 1.8.3. Περιορισμοί (ρεύμα διακοπής καθοδικού αλεξικεραύνου I_a) για τα SPD σε διαφορετικά IT συστήματα γείωσης. Το ρεύμα διακοπής I_a , μειώνεται όταν τα δύο σφάλματα συμβαίνουν σε αγωγούς με όμοια χαρακτηριστικά (μήκος, διατομή). Στις σχέσεις, τα Z και U_0 αντιστοιχούν στη συνολική ισοδύναμη αντίσταση του συστήματος γείωσης και στην τάση φάσης-ουδετέρου.	σελ. 52
Πίνακας 1.8.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του TN- συστήματος γείωσης.	σελ. 54
Πίνακας 2.1.1. Ηλεκτροχημική σειρά στοιχείων βάση των οξειδωτικών/αναγωγικών δυναμικών στους 25 °C. Τα δυναμικά αυτά μετρήθηκαν έχοντας ως αναφορά το πρότυπο δυναμικό του υδρογόνου (normal hydrogen potential, NHE).	σελ. 56
Πίνακας 2.3.1. Σύγκριση μεταξύ των κυριότερων υλικών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γείωσης αναφορικά με την απόδοση, το κόστος των και το χρόνο ζωής τους.	σελ. 70
Πίνακας 2.5.1. Σχέση μεταξύ ειδικής αντίστασης του εδάφους και διάβρωσης για την περίπτωση του ανοξιδώτου χάλυβα.	σελ. 75
Πίνακας 3.1.1. Οι εξισώσεις Maxwell για την περιγραφή του ψευδοσταθερού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπου $\vec{B}$: η μαγνητική επαγωγή, $\vec{A}$: το διανυσματικό δυναμικό, $\vec{E}$: η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, V : το βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό, $\vec{H}$: η ένταση του μαγνητικού πεδίου, v : η αντίστροφη μαγνητική διαπερατότητα και σ : η ειδική αγωγιμότητα (πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος).	σελ. 83
Πίνακας 3.2.1. Εξισώσεις A-V , όπου w είναι το διάνυσμα βάρους του βαθμωτού δυναμικού για ένα στοιχείο του πλέγματος και $\vec{W}$ είναι το διάνυσμα βάρους του διανυσματικού δυναμικού για ένα στοιχείο του πλέγματος.	σελ. 84
Πίνακας 3.3.1. Εξισώσεις Poisson και Laplace, όπου Φ : το συνολικό ηλεκτροστατικό δυναμικό, $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$: η διηλεκτρική σταθερά (ή αλλιώς επιτρεπτότητα) του υλικού που εξαρτάται από το είδος του υλικού και τη στατικότητα των ανομοιογενειών του, ϵ_r : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού, ϵ_0 : η διηλεκτρική σταθερά του κενού και ρ : η χωρική πυκνότητα.	σελ. 85
Πίνακας 4.1.1. Συντελεστής χ για τις τρεις δοκιμές διαβρωμένου ηλεκτροδίου.	σελ. 94
Πίνακας 4.1.2. Αντιστάσεις γείωσης για σταθερές ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους και μεταβαλλόμενη ακτίνα χάλκινου ηλεκτροδίου.	σελ. 95
Πίνακας 4.1.3. Αντιστάσεις γείωσης για μη διαβρωμένο χάλκινο ηλεκτρόδιο 10 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, όπου $\sigma_2 < \sigma_1$.	σελ. 96
Πίνακας 4.1.4. Αντιστάσεις γείωσης για μη διαβρωμένο χάλκινο ηλεκτρόδιο 10 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 > \sigma_1$.	σελ. 97
Πίνακας 4.1.5. Αντιστάσεις γείωσης για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με ακτίνα εναπομείνοντος χαλκού 7.5 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, όπου $\sigma_2 < \sigma_1$.	σελ. 98
Πίνακας 4.1.6. Αντιστάσεις γείωσης για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με ακτίνα εναπομείνοντος χαλκού 7.5 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, όπου $\sigma_2 > \sigma_1$.	σελ. 99

Κεφάλαιο 1: Γειώσεις

1.1. Γείωση

Γείωση ονομάζεται η αγώγιμη σύνδεση με τη γη των μη ρευματοφόρων μεταλλικών μερών μίας εγκατάστασης ή του ουδετέρου κόμβου μετασχηματιστών και γεννητριών, προκειμένου το αγώγιμο σώμα των αγωγών να διατηρείται στο δυναμικό της γης που συμβατικά θεωρείται ίσο με το μηδέν. Σκοπός της γείωσης είναι η διασφάλιση της ακεραιότητας του εξοπλισμού και του ανθρώπινου δυναμικού, σε περίπτωση εμφάνισης ρεύματος σφάλματος, καθώς παρέχει αγώγιμη διαδρομή προς την εκτόνωση του ρεύματος αυτού προς τη γη [1].

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες γειώσεων: α) η λειτουργική γείωση, β) η γείωση προστασίας ή γείωση μεταλλικών και γ) η γείωση αντικεραυνικής προστασίας [2]:

Η *λειτουργική γείωση* είναι η σύνδεση ενός τμήματος της εγκατάστασης που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας με τη γη και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: α) την άμεση, η οποία περιλαμβάνει μόνο την αντίσταση γείωσης και β) την έμμεση, η οποία εκτός της αντίστασης γείωσης περιλαμβάνει ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα λειτουργικής γείωσης αποτελεί η αγώγιμη σύνδεση του ουδετέρου αγωγού (ή του ουδετέρου κόμβου μετασχηματιστών/γεννητριών) με ένα σύστημα ουδετερογείωσης. Αντίθετα, οι ανοιχτές γειώσεις δεν ανήκουν στις γειώσεις λειτουργίας.

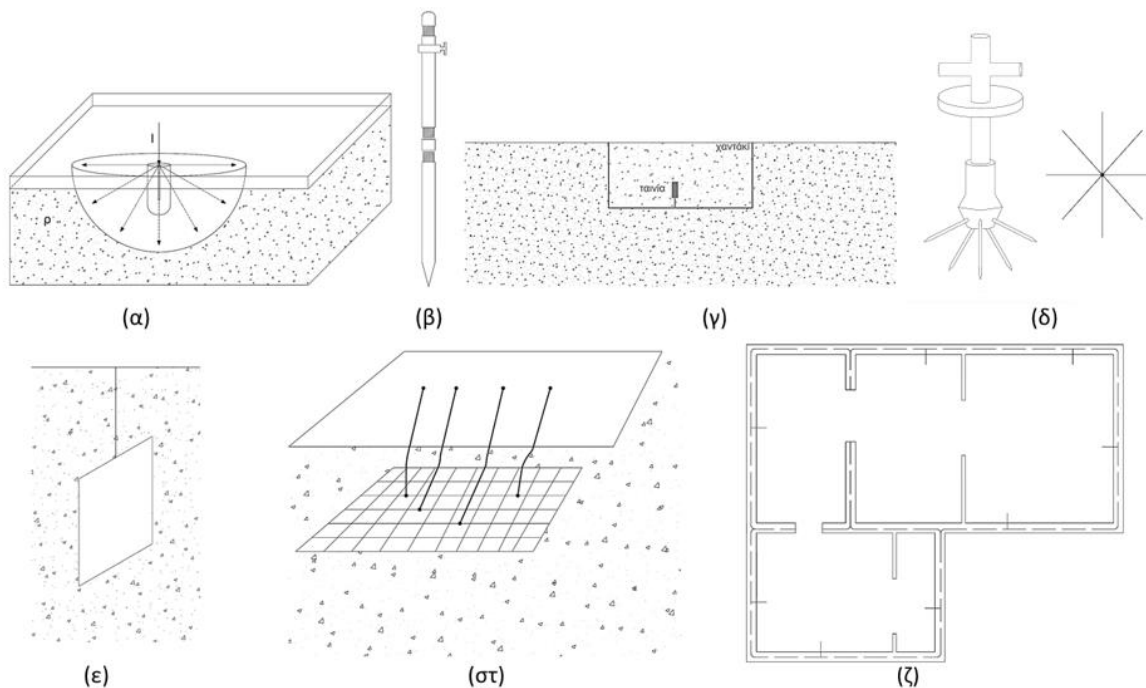
Η *γείωση προστασίας ή γείωση μεταλλικών* είναι η αγώγιμη σύνδεση με τη γη όλων των μεταλλικών μερών μίας εγκατάστασης που δε διαρρέονται από ρεύμα (π.χ. το μεταλλικό πλαίσιο μίας ηλεκτρικής συσκευής), προκειμένου να αποκτήσουν το συμβατικό μηδενικό δυναμικό της γης, ώστε να επιτευχθεί η μείωση των τάσεων επαφής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα γείωσης προστασίας αποτελούν η γείωση των μεταλλικών μερών ενός υποσταθμού μέσης τάσης, καθώς και η γείωση όλων των μεταλλικών μερών μίας εγκατάστασης (π.χ. μεταλλικό περίβλημα θερμοσίφωνα, καμπίνα ανελκυστήρα κ.ά.).

Η *γείωση αντικεραυνικής προστασίας* είναι η σύνδεση των προστατευτικών αντικεραυνικών εγκαταστάσεων (π.χ. του αλεξικεραύνου) με τη γη, προκειμένου να εκτονωθούν σε αυτή τα υψηλής έντασης κεραυνικά ρεύματα.

1.2. Είδη γειωτών

Ο γειωτής αποτελεί ένα σύστημα ενός ή περισσότερων ηλεκτροδίων, απλής ή συγκεκριμένης γεωμετρίας, τα οποία ενταφιάζονται σε κάποιο βάθος μέσα στη γη, προκειμένου να επιτευχθεί η αποτελεσματική διοχέτευση ενός ρεύματος σφάλματος (κεραυνικής ή εσωτερικής υπέρτασης) προς τη γη.

Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το ηλεκτρόδιο γείωσης διακρίνεται στις εξής κατηγορίες: στον ημισφαιρικό γειωτή, στον γειωτή ταινίας, στον γειωτή πλάκας, στον ραβδοειδή γειωτή, στον ακτινικό γειωτή, στον γειωτή πλέγματος και στη θεμελειακή γείωση (Σχήμα 1.2.1) [2,3] .



Σχήμα 1.2.1 (α) ησφαιρικός γειωτής (β) ραβδοειδής γειωτής (γ) γειωτής ταινίας (δ) ακτινικός γειωτής (ε) γειωτής πλάκας (στ) γειωτής πλέγματος (ζ) θεμελειακή γείωση (σχέδιο σε Autocad από Δέσποινα Μεντζελοπούλου κατόπιν τροποποίησης από [3]).

1.2.1. Ημισφαιρικός γειωτής

Πρόκειται για ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο που τοποθετείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Δεν χρησιμοποιείται στην καθημερινή πρακτική, αλλά μόνο για ακαδημαϊκούς σκοπούς. Η απλή γεωμετρία του ηλεκτροδίου και η παραδοχή ότι το έδαφος ενταφιασμού είναι ομογενές και αποτελούμενο από ομόκεντρες ιδίου πάχους επιφάνειες, παρέχει έναν προσιτό τρόπο υπολογισμού της αντίστασης γείωσης με τις εξισώσεις Maxwell. Το μοντέλο του ημισφαιρικού ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται και ως πρότυπο για την εκτίμηση της ακρίβειας λογισμικών προσομοίωσης των συστημάτων γείωσης [4]. Η αντίσταση γείωσης σε ημισφαιρικό γειωτή είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας του ηλεκτροδίου (Πίνακας 1.2.1.).

1.2.2. Ραβδοειδής γειωτής

Είναι ο απλούστερος και οικονομικότερος τύπος γειωτή. Διατίθεται στο εμπόριο σε διάφορα μήκη και με διατομή σταυρού ή κυκλική. Εμπήγνυται το έδαφος κάθετα ή υπό γωνία $15^\circ - 20^\circ$ ως προς την κατακόρυφο. Η ακίδα στο κάτω μέρος του γειωτή διευκολύνει την εισχώρησή του στο έδαφος, ενώ ο ορειχάλκινος σύνδεσμος που συνδέει τα σπειρώματα που βρίσκονται στο άνω και κάτω μέρους της ράβδου, επιτρέπει τη δυναμική επιμήκυνση της, άρα και την αύξηση του βάθους έμπηξης. Η ράβδος κατασκευάζεται από χαλκό ή επιχαλκωμένο/ θερμά επιψευδαργυρωμένο χάλυβα, ώστε να αντέχει στη διάβρωση. Η αντίσταση γείωσης μειώνεται όσο αυξάνεται το μήκος της ράβδου, αλλά δεν επηρεάζεται ούτε από το πάχος ούτε από τη διατομή του γειωτή [2,3].

1.2.3. Γειωτής ταινίας

Πρόκειται για ταινία χαλκού διαστάσεων $30 \times 2 \text{ mm}^2/30 \times 3 \text{ mm}^2/40 \times 3 \text{ mm}^2$ ή γαλβανισμένου/ επιχαλκωμένου/ επιμολυβδομένου χάλυβα διαστάσεων $30 \times 2 \text{ mm}^2/30 \times 3.5 \text{ mm}^2/40 \times 4 \text{ mm}^2$, συνολικής επιφάνειας $300 - 500 \text{ g/m}^2$. Η ταινία ενταφιάζεται κάθετα σε χαντάκι βάθους $0.7-1.0 \text{ m}$ και επί υγρού εδάφους. Τοποθετείται ευθύγραμμα ή εναλλακτικά σε κυκλική περίμετρο γύρω από την εγκατάσταση (γειωτής βρόγχου). Μειονέκτημα των χάλκινων /επιχαλκωμένων ταινιών είναι η εκτενής διάβρωση που υφίστανται όταν τοποθετηθούν πλησίον ήδη εγκατεστημένων χαλύβδινων σωλήνων, γι' αυτό και στην περίπτωση αυτή πρέπει να αποφεύγονται. Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι στην περίπτωση που απαιτείται αντικατάσταση της ταινίας, δεν θα χρησιμοποιηθούν συρματόσκοινα, λόγω της υψηλής ταχύτητας διάβρωσής που εμφανίζουν σε περιβάλλον με υψηλή υγρασία. Η αντίσταση γείωσης της ταινίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της. Για ίδιο μήκος ταινίας, ένα κυκλικό ηλεκτρόδιο έχει μεγαλύτερη αντίσταση γείωσης συγκριτικά με τον ευθύγραμμο γειωτή [2,3].

1.2.4. Ακτινικός γειωτής

Πρόκειται για ράβδο ή ταινία με απόληξη σε μορφή αστέρα πολλαπλών ακτίνων, ο οποίος εμπήγνυται οριζοντίως και σε βάθος τουλάχιστον 0.8 m από την επιφάνεια του εδάφους. Τα υλικά κατασκευής του ακτινικού ηλεκτροδίου είναι ίδια με αυτά του γειωτή ταινίας.

Στον Πίνακα 1.2.1 παρατίθενται οι τύποι υπολογισμού της αντίστασης γείωσης για την περίπτωση αστέρα 4 ή 6 ακτίνων [3].

1.2.5. Γειωτής πλάκας

Πρόκειται για πλάκα διαφόρων διαστάσεων σε σχήμα τετραγώνου, παραλληλογράμμου ή κυκλικού δίσκου κατασκευασμένη από χαλκό ελαχίστου πάχους 2 mm ή από γαλβανισμένο/ επιχαλκωμένο/ επιμολυβδωμένο χάλυβα ελαχίστου πάχους 3 mm . Εμφυτεύεται στο έδαφος, με την επιφάνειά της κατακόρυφα (ενίοτε και οριζόντια), έτσι ώστε η άνω πλευρά να βρίσκεται σε βάθος τουλάχιστον 1 m . Οι τύποι υπολογισμού της αντίστασης γείωσης για κατακόρυφα τοποθετημένη τετράγωνη/ κυκλική πλάκα, αλλά και για οριζόντια τοποθετημένη κυκλική πλάκα παρατίθενται στον Πίνακα 1.2.1.

Στην πράξη, χρησιμοποιούνται πολλές πλάκες ιδίου υλικού προκειμένου να επιτευχθεί μικρότερη αντίσταση γείωσης και να αποφευχθεί η ηλεκτροχημική διάβρωση. Συνήθως πρόκειται για παραλληλόγραμμες πλάκες $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$, τοποθετημένες σε απόσταση τουλάχιστον 3 m μεταξύ τους. Ο αγωγός σύνδεσης στην περίπτωση χάλκινων πλακών, είναι επίσης χάλκινος με διατομή 50 mm^2 , ενώ στις χαλύβδινες πλάκες, η σύνδεση γίνεται με χαλύβδινο θερμά επιψευδαργυρωμένο αγωγό διατομής $\Phi 10$ [2,3].

1.2.6. Γειωτής πλέγματος

Στην περίπτωση αυτή, γειωτές ταινίας συγκροτούν ένα πλέγμα με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 0.7-2.0 m, το οποίο ενταφιάζεται οριζόντια σε βάθος 0.5-1.0 m. Μεγάλο πλεονέκτημα του γειωτή πλέγματος είναι η εξάλειψη των βηματικών τάσεων στο υπερκείμενο έδαφος. Μικρότερα ανοίγματα στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το πλέγμα αντιστοιχούν σε μικρότερες βηματικές τάσεις [3].

Για την αντίσταση γείωσης ισχύουν οι τύποι του Πίνακα 1.2.1.

1.2.7. Θεμελειακή γείωση

Είναι υποχρεωτική κατά τη θεμελίωση όλων των νέων οικοδομών, στις οποίες υφίστανται ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλην των λυόμενων και προκατασκευασμένων. Αποτελεί τη βασική γείωση προστασίας, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί για την αντικεραυνική και την ισοδυναμική προστασία.

Το ηλεκτρόδιο γείωσης είναι ταινία γαλβανισμένου εν θερμό χάλυβα, διαστάσεων τουλάχιστον 30 mm x 3.5 mm ή 25 mm x 4 mm, ώστε να πληροί την προϋπόθεση ελάχιστης διατομής 90 mm². Πιο σπάνια, πρόκειται για αγωγό κυκλικής διατομής Φ10 ή Φ12. Σε μεγάλα κτήρια, τα ηλεκτρόδια επεκτείνονται και πέραν του σκυροδέματος ώστε να μπορέσουν να συνδεθούν με τον αγωγό γείωσης. Γι' αυτό και κατασκευάζονται από χαλκό και ανοξείδωτο χάλυβα που αντέχουν στη διάβρωση.

Το ηλεκτρόδιο εμφωλεύεται, εν είδει κλειστού βρόγχου, εντός του σκυροδέματος Β 225 (περιεκτικότητας τουλάχιστον 300 kg/cm³ σε τσιμέντο) που τοποθετείται εντός των πεδιλοδοκών των θεμελίων ή στα περιμετρικά τοιχία. Για να επιτευχθεί όμως η αντοχή στη διάβρωση και τις μηχανικές καταπονήσεις, η ταινία πρέπει να τοποθετείται με τη μεγάλη της πλευρά κάθετα και σε βάθος τουλάχιστον 5 cm εντός του σκυροδέματος.

Στην περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος, η θεμελειακή γείωση διασφαλίζεται με ένα και μόνο βρόγχο περιμετρικά της εγκατάστασης. Ο οπλισμός συνδέεται ανά 2 m με τους αγωγούς γείωσης, γι' αυτό και αποτελεί στοιχείο του θεμελειακού ηλεκτροδίου ικανό να μειώσει ταυτόχρονα και την αντίσταση γείωσης. Αν το σκυρόδεμα δεν είναι οπλισμένο, απαιτούνται περισσότεροι βρόγχοι (διαστάσεων έως 20 m) που συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ορθογώνιο ή κυκλικό δακτύλιο.

Ειδικά για μεγάλα κτήρια, κρίνονται απαραίτητες και οι εγκάρσιες συνδέσεις στον περιμετρικό βρόγχο, ώστε οι αποστάσεις του ηλεκτροδίου από οποιοδήποτε σημείο του χώρου να μην υπερβαίνουν τα 10 m. Τόσο οι συνδέσεις μεταξύ των βρόγχων όσο και η σύνδεση με τον οπλισμό του σκυροδέματος πρέπει να γίνονται με κατάλληλο τρόπο (εξωθερμική συγκόληση, πριτσίνια, σφιγκτήρες κ.λπ.), ώστε να αποφεύγεται η παραμόρφωση των ηλεκτροδίων [3,5].

Ο προσεγγιστικός τύπος υπολογισμού της αντίστασης θεμελειακής γείωσης δίνεται στον Πίνακα 1.2.1, στον οποίο γίνεται η παραδοχή ότι ο ταινιοειδής βρόγχος περιγράφει κυκλικό δίσκο διαμέτρου D και επιφάνειας ίσης με το εμβαδόν κάτοψης S των θεμελίων του νεοανεγερθέντος κτηρίου. Η παράμετρος ρ αντιστοιχεί στην ειδική αντίσταση του εδάφους όπου ενταφιάστηκε ο γειωτής και όχι στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος.

Τα πλεονεκτήματα της θεμελειακής γείωσης έναντι άλλων τύπων γειώσεων είναι [2,3,5]:

α) η χαμηλή τιμή της αντίστασης γείωσης. Η θεμελειακή γείωση έχει αντίσταση μικρότερη από 10 Ω, γιατί α) το ηλεκτρόδιο τοποθετείται στη βάση των θεμελίων, όπου το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (άρα και υψηλή αγωγιμότητα) καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και β) η σύνδεση των αγωγών γείωσης στον

οπλισμό των συνδετηρίων πεδιλοδοκών ή τοιχίων, αυξάνει τη συνολική επιφάνεια επαφής του γειωτή με τον περιβάλλοντα χώρο.

β) αντοχή στη διάβρωση και τις μηχανικές καταπονήσεις. Το σκυρόδεμα περιβρογχίζει το ηλεκτρόδιο, αποτρέποντας τη δημιουργία κοιλιοτήτων οξυγόνου γύρω ή κάτω από αυτό, ικανών να προξενήσουν διάβρωση του μετάλλου κατασκευής. Επιπλέον τον σκυρόδεμα διαφυλάσσει τον γειωτή από τυχόν μηχανικές καταπονήσεις που προκύπτουν λόγω εργασιών συντήρησης, εκσκαφών, κηπουρικών εργασιών, πιέσεων από βαριά οχήματα κ.λπ.

γ) εξάλειψη βηματικών τάσεων. Το μεγάλο βάθος στο οποίο εδράζονται τα θεμέλια (εντός των οποίων ενταφιάζεται ο θεμελιακός γειωτής), ο περιβρογχισμός μεγάλου μήκους του θεμελιακού ηλεκτροδίου από το σκυρόδεμα και η μεγάλη επιφάνεια στην οποία εκτείνεται ο θεμελιακός βρόγχος συνεπάγονται την ανάπτυξη αμελητέων βηματικών τάσεων.

δ) ισοδυναμικές συνδέσεις. Η ηλεκτρική εγκατάσταση κάθε νεοανεγερθέντος κτηρίου ενέχει τον κίνδυνο ανάπτυξης τάσεων επαφής, ικανών να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στους εργαζόμενους ή σε οποιοδήποτε άτομο βρεθεί εντός της οικοδομής. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη δημιουργία ισοδυναμικών συνδέσεων στο σύνολο της οικοδομής, η οποία γίνεται εφικτή με τη σύνδεση όλων των μεταλλικών μερών του κτηρίου (σωλήνες νερού, θέρμανσης, φυσικού αερίου και κλιματιστικών, θερμοσίφωνα, μεταλλική μπανιέρα, οπλισμός του κτηρίου, μεταλλικές επενδύσεις του κτηρίου, μεταλλικοί μανδύες των καλωδίων, ερμάρια ηλεκτρικών πινάκων, μεταλλικό κουβούκλιο ασανσέρ κ.λπ.) πάνω στην θεμελιακή γείωση. Επομένως, η θεμελιακή γείωση αποτελεί μια μεγάλη μεταλλική επιφάνεια, η οποία παρέχει προστασία τόσο στο ανθρώπινο δυναμικό μιας οικοδομής όσο και στον ηλεκτρολογικό/ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

ε) η ταυτόχρονη χρήση της ως ηλεκτρική/αντικεραυνική γείωση. Η εγκατάσταση του συλλεκτηρίου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας κατά την ανέγερση (και όχι μετά την αποπεράτωση) του κτηρίου, μειώνει το κόστος κατασκευής. Με τη χρήση υπογείων εγκιβωτισμένων αγωγών καθόδου ενισχύεται η αντοχή τους στη διάβρωση και τις μηχανικές καταπονήσεις, ενώ αποφεύγονται οι δυσκολίες που προκύπτουν κατά την εναλλακτική τοποθέτηση της αντικεραυνικής γείωσης στην εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου (μπαλκόνια, όψεις γυαλιού κ.λπ.)

στ) χαμηλό κόστος. Για την ίδια τιμή αντίστασης γείωσης, η πιο φθηνή επιλογή από όλους τους τύπους ηλεκτροδίων γείωσης, είναι η θεμελιακή και αυτό γιατί οι εργασίες τοποθέτησης γίνονται κατά το στάδιο της θεμελίωσης του κτηρίου χωρίς επιπρόσθετο κόστος.

Προαπαιτούμενο χαρακτηριστικό για κάθε τύπο γειωτή είναι η ελάχιστη δυνατή αντίσταση, έτσι ώστε το δυναμικό που θα αναπτυχθεί στο έδαφος κατά την εκτόνωση των εξωτερικών κεραυνικών υπερτάσεων, να είναι χαμηλό και να μην προκαλέσει βλάβες.

Είδος γειωτή	Αντίσταση γείωσης
Ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο ακτίνας r	- ένταση του ηλεκτρικού πεδίου: $E = \rho \cdot J$, (1.2.1) - διαφορά δυναμικού $V = - \int_r^\infty E dr = - \int_r^\infty \rho \cdot J dr$ (1.2.2) επειδή έχουμε επιφάνεια $S = 2 \cdot \pi \cdot r^2$, - ένταση ρεύματος $I = \int J dS$ - χωρική πυκνότητα ρεύματος $J = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2}$ (1.2.3) οπότε η V ημισφαιρικών είναι $V = - \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \int \frac{1}{r^2} dr = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r}$ (1.2.4) από ορισμό της αντίστασης $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r}$ (1.2.5) (1.2.6)
Ραβδοειδής γειωτής τύπου ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, με κύριο άξονα διπλάσιο του μήκους ℓ της ράβδου και δευτερεύοντα άξονα τη διάμετρο του ελλειψοειδούς d	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot \ell} \ln \left(\frac{4\ell}{d} \right)$ (1.2.7)
Ραβδοειδής κυλινδρικός γειωτής μήκους ℓ , που διαθέτει ημισφαιρικό άκρο διαμέτρου d	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot \ell} \ln \left(\frac{2\ell}{d} \right)$ (1.2.8)
Ραβδοειδής γειωτής μήκους ℓ , με ομοιόμορφη κατανομή αγόμενου ρεύματος	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot \ell} \ln \left[\left(\frac{8\ell}{d} \right) - 1 \right]$ (1.2.9)
Γειωτής ταινίας μήκους ℓ , πλάτους d και κάθετα ενταφιασμένη τη μεγάλη επιφάνεια	$R = \frac{\rho}{\pi \cdot \ell} \ln \left(\frac{2\ell}{d} \right) \cong \frac{2\rho}{\ell}$ (1.2.10)
Τετράγωνος γειωτής πλάκας πλευράς a , σε κατακόρυφη θέση στο έδαφος	$R = \frac{\rho}{4.5 a}$ (1.2.11)
Γειωτής πλάκας με μορφή κυκλικού δίσκου διαμέτρου D , ενταφιασμένου οριζόντια σε βάθος h	$R = \frac{\rho}{4D} + \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot h} \left[1 - 0.036 \frac{D}{h^2} \right]$ (1.2.12)
Γειωτής πλάκας με μορφή κυκλικού δίσκου διαμέτρου D , ενταφιασμένου καθέτως σε βάθος h	$R = \frac{\rho}{4D} + \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot h} \left[1 + 0.018 \frac{D}{h^2} \right]$ (1.2.13)

$$\text{Ακτινικός γειωτής 4 ακτίνων στον αστέρα, μήκους } \ell \text{ ενταφιασμένου σε βάθος } h \quad R = \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot \ell} \left[\ln \left(\frac{4\ell^2}{dh} + 2.9 - 2.14 \frac{h}{\ell} + 2.6 \frac{h^2}{\ell^2} \right) \right] \quad (1.2.14)$$

$$\text{Ακτινικός γειωτής 6 ακτίνων στον αστέρα, μήκους } \ell, \text{ ενταφιασμένου σε βάθος } h \quad R = \frac{\rho}{12 \cdot \pi \cdot \ell} \left[\ln \left(\frac{4\ell^2}{dh} + 6.85 - 6.26 \frac{h}{\ell} + 7 \frac{h^2}{\ell^2} \right) \right] \quad (1.2.15)$$

$$\text{Γειωτής πλέγματος μήκους } \ell \text{ και πλάτους } d \quad R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{\ell_{tot}} \cong \frac{\rho}{2D} \quad (1.2.16)$$

$$D = \sqrt{\frac{4b\ell}{\pi}} \quad (1.2.17)$$

ℓ_{tot} : ολικό μήκος αγωγού που χρησιμοποιήθηκε

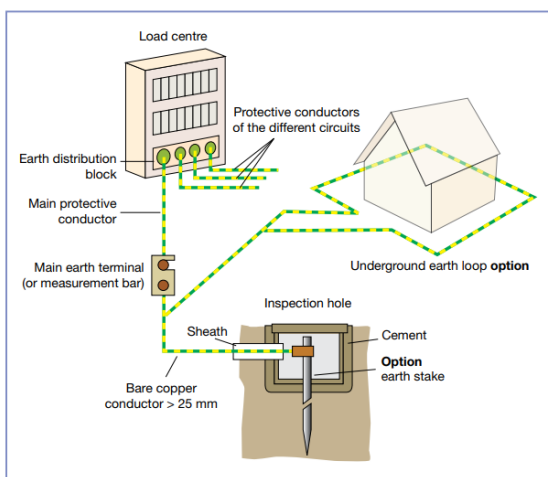
$$\text{Θεμελειακή γείωση συνολικού επιφάνειας } S \quad R = \frac{2\rho}{\pi D} \quad (1.2.18)$$

$$\mu\epsilon \quad D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (1.2.19)$$

Πίνακας 1.2.1. Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης στους διαφόρους τύπους γειωτών (ρ : ειδική αντίσταση του εδάφους) [3].

1.3. Αντίσταση γείωσης

Ως αντίσταση γείωσης R_g ορίζεται η αντίσταση του προς εξέταση ηλεκτροδίου γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Η άπειρη γη είναι ένα σημείο σε απόσταση θεωρητικά άπειρη και πρακτικά 5-10 φορές τη μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή, όπου το δυναμικό έχει τιμή ίση με το μηδέν. Εναλλακτικά, η αντίσταση γείωσης ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού U μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και της άπειρης γης προς την ένταση του εγγεόμενου ρεύματος I ($R_g = U/I$) [5].



Σχήμα 1.3.1. Η R_g αποτελείται από (α) την αντίσταση του αγωγού σύνδεσης του ηλεκτροδίου γείωσης με το κύκλωμα ($R_{main\ protective\ conductor}$), (β) την αντίσταση επαφής επιφάνειας ηλεκτροδίου και εδάφους ($R_{ηλεκτροδίου}$) και (γ) την αντίσταση του όγκου του περιβάλλοντος εδάφους (που στο Σχήμα είναι η αντίσταση του τσιμέντου) (αναπαραγωγή από https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/dc_earth-ground_measurement_ed1.pdf)

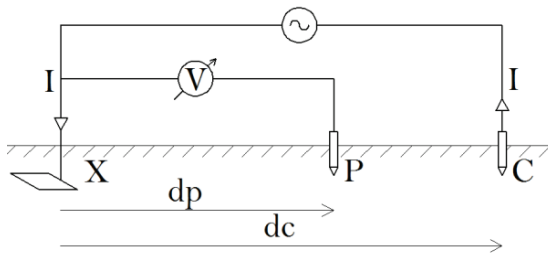
Η R_g σε ρεύματα βιομηχανικής συχνότητας είναι ωμική. Όμως, στην περίπτωση πτώσεως κεραυνικών ρευμάτων και συστημάτων μεγάλων διαστάσεων πακτωμένων σε εδάφη χαμηλής ειδικής αντίστασης ρ , η R_g έχει σημαντική επαγωγική συνιστώσα.

Η R_g εξαρτάται από το είδος του γειωτή και από διάφορες παραμέτρους του εδάφους που τον περιβάλλει (όπως το βάθος έμπτυξης και η ειδική αντίσταση των στρωμάτων του εδάφους).

Στον όγκο των πραγματικών εδαφών, η R_g εμφανίζει διακυμάνσεις, γι' αυτό και δεν υπάρχει κάποιο καθολικό μοντέλο μελέτης της R_g που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε τύπο εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι: α) κάθε έδαφος αποτελείται από ετερογενή στρώματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (γεωμετρία, αγωγιμότητα, τιμή της ειδικής αντίστασης ρ), β) η σύσταση των στρωμάτων του εδάφους είναι ανομοιογενής, εξαιτίας των διαφορετικών υλικών και στοιχείων που τα αποτελούν (π.χ. άμμος, άργιλος, πηλός, κόκκοι διαφορετικού πάχους, χαλίκια, νερό, αέρας, μεταλλικά, οργανικά και ανόργανα στοιχεία), γ) η περιεκτικότητα σε υγρασία και η κατανομή της θερμοκρασίας στο έδαφος είναι ανομοιόμορφη, ενώ παρατηρούνται και εποχιακές μεταβολές, δ) όταν εμφανίζονται κρουστικές τάσεις λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους και ε) η ειδική αντίσταση ρ μεταβάλλεται εποχιακά αλλά και με το βάθος [6].

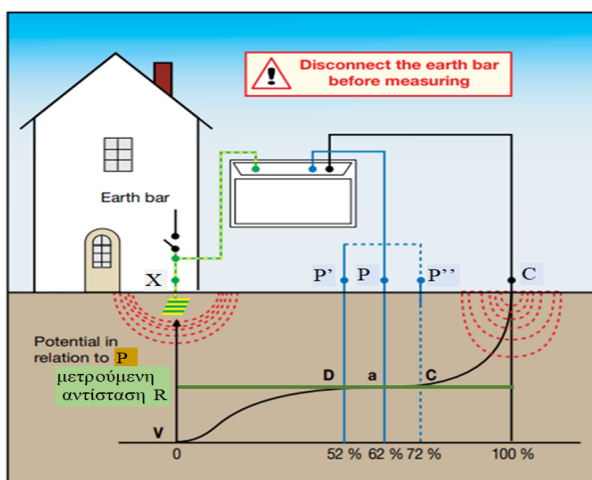
Η μέτρηση της R_g γίνεται με υπολογιστικές και επιτόπιες μεθόδους, όπως είναι (α) η μέθοδος των δύο σημείων, (β) η μέθοδος των τριών σημείων και (γ) η μέθοδος της πτώσης δυναμικού.

Η μέθοδος πτώσης δυναμικού αποτελεί και τη συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη τεχνική μέτρησης της R_g τόσο για τις σημειακές (π.χ. κατακόρυφη ράβδος, πλάκα γείωσης) όσο και για τις εκτεταμένες (π.χ. θεμελειακή) γειώσεις.



Σχήμα 1.3.2. Διάταξη μεθόδου πτώσης δυναμικού, όπου X το ηλεκτρόδιο γείωσης, C το βοηθητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος και P το βοηθητικό ηλεκτρόδιο δυναμικού [7].

Χρησιμοποιεί δύο βοηθητικά ηλεκτρόδια, που βρίσκονται στην ίδια ευθεία με το ηλεκτρόδιο γείωσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, έχουμε έγχυση και ροή ρεύματος μέσα στο έδαφος μέσω του ηλεκτροδίου X και του βοηθητικού ηλεκτροδίου C και εν συνεχεία μέτρηση της έντασης του ρεύματος αυτού με παράλληλη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου X και του βοηθητικού ηλεκτροδίου P που προσανατολίζεται στην ίδια ή αντίθετη κατεύθυνση με το ηλεκτρόδιο C. Για ίδιο προσανατολισμό, όταν η απόσταση dc μεταξύ X και C γίνει μεγάλη (τουλάχιστον πενταπλάσια της μεγαλύτερης διάστασης του ηλεκτροδίου) και το P βρεθεί στην ίδια κατεύθυνση με το C και σε απόσταση dp από το X ίσης με 61.8% dc, τότε οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτροδίων εξαιτίας αμοιβαίων αντιστάσεων ελαχιστοποιούνται, (αρχή Tagg), οπότε η R_g ορίζεται από το λόγο της διαφοράς δυναμικού U_{X-P} και του ρεύματος I ($R_g = \frac{U_{X-P}}{I}$). Σε πάρα πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ X και P, η αμοιβαία αντίσταση είναι αμελητέα, το δυναμικό στο σημείο P είναι μηδέν και ο κανόνας του Tagg δεν είναι πλέον απαραίτητος, αφού για μεγάλο εύρος θέσεων του P παίρνουμε ακριβείς μετρήσεις R_g . Τα παραπάνω ισχύουν για ομοιογενές έδαφος (σταθερής ρ). Για ανομοιογενές έδαφος, μετακινώντας το P πάνω στην ευθεία των τριών ηλεκτροδίων, παίρνουμε 2-3 διαδοχικές μετρήσεις R_g , στις θέσεις όπου το P βρίσκεται και σε απόσταση 5-10% dc, εκατέρωθεν της αρχικής του θέσης (Σχήμα 1.3.3.) [5,7].



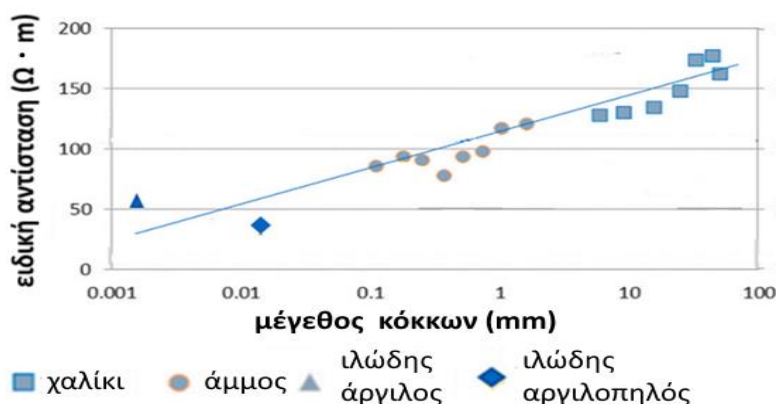
Σχήμα 1.3.3. Μέθοδος πτώσης δυναμικού με μετακίνησης του ηλεκτροδίου P κατά μήκος του άξονα XC (τροποποιημένο σχήμα από https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/dc_earth-ground_measurement_ed1.pdf)

1.4. Ειδική αντίσταση του εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ , ορίζεται ως η αντίσταση μοναδιαίου κύβου του εδάφους ($1 \times 1 \times 1$) m^3 , όταν στις απέναντι πλευρές του κύβου τοποθετηθούν ηλεκτρόδια και εκφράζει την ιδιότητα του υλικού να αντιστέκεται στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Μονάδα μέτρησης της ρ στο SI είναι το $\Omega \cdot m$. Η ρ εξαρτάται από χαρακτηριστικά του εδάφους, δηλαδή από α) τον τύπο και το μέγεθος των κόκκων του, β) την περιεκτικότητα σε υγρασία, οργανικά στοιχεία και άλατα, γ) τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση), δ) το χρησιμοποιούμενο μοντέλο εδάφους και ε) τον ιονισμό του εδάφους [5].

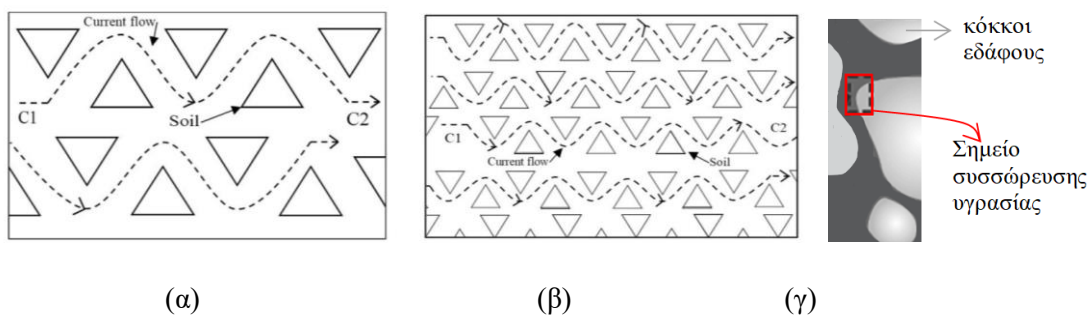
α) Επίδραση τύπου και μεγέθους κόκκων εδάφους [8,9]

Όσο αυξάνεται το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, τόσο αυξάνεται η ρ (Σχήμα 1.4.1.).



Σχήμα 1.4.1. Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης ρ συναρτήσει του λογαρίθμου του μεγέθους των κόκκων. Το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται κατά τη διαδοχική μετάβαση από το στρώμα ιλώδους αργίλου (clay silt) στον ιλώδη αργιλοπηλό (silty clay), την άμμο και τελικά το χαλίκι. Η ειδική αντίσταση ρ αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τον λογάριθμο του μεγέθους των κόκκων (τροποποιημένο Σχήμα από [8])

Αυτό συμβαίνει, διότι το μέγεθος των κόκκων του εδάφους σχετίζεται με το πόσο πορώδες είναι το έδαφος, δηλαδή με την ιδιότητά του να κατακρατά νερό. Συγκεκριμένα, όσο πιο πορώδες είναι το έδαφος, τόσο περισσότερο νερό μπορεί να συγκρατήσει. Όμως, μεγαλύτερη υγρασία συνεπάγεται μεγαλύτερη αγωγιμότητα, άρα και μικρότερη ρ (Σχήμα 1.4.2).

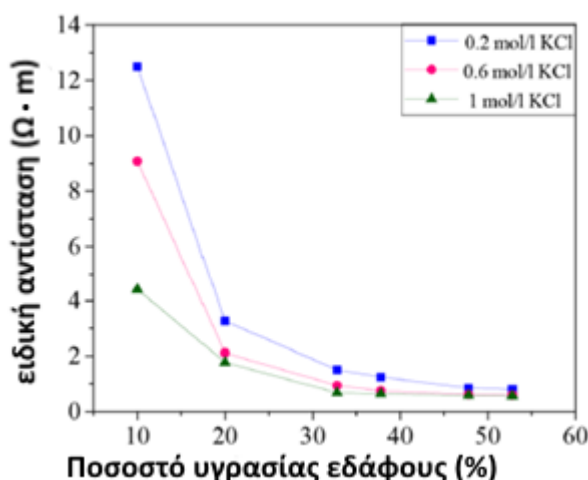


Σχήμα 1.4.2. (α) δίοδοι ρεύματος σε έδαφος μεγάλων κόκκων, (β) δίοδοι ρεύματος σε λεπτόκοκκο έδαφος (γ) διεπαφή κόκκων. Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι του χρησιμοποιούμενου εδάφους, τόσο πιο εύκολο

είναι να καλύψει τα κενά το νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας στα κενά και τη μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. (τροποποιημένο από [8,9]).

β) Επίδραση υγρασίας, άλατος και μεταλλικών στοιχείων

Η υγρασία που προσκολλάται στην επιφάνεια των κόκκων περιέχει εκτός από νερό και άλλα στοιχεία (π.χ. μεταλλικά στοιχεία και άλατα), με αποτέλεσμα την αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς στην επιφάνεια των κόκκων, την τοπική μείωση της ακτίνας καμπυλότητας του αναπτυσσόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τη μείωση του μήκους ερπυσμού στη διεπαφή των κόκκων και κατά συνέπεια τη μείωση της ρ (Σχήμα 1.4.3.). Για τον λόγο αυτό, παλαιότερα το έδαφος εμπλουτιζόταν με άλατα, όπως χλωριούχο νάτριο, χλωριούχο ασβέστιο, θειικό μαγνήσιο και θειικός χαλκός, σε μια προσπάθεια να μειωθεί η ρ . Αργότερα, η τεχνική αυτή εγκαταλείφθηκε λόγω της υποβάθμισης που προκαλεί στο περιβάλλον έδαφος, αλλά και λόγω του υψηλού κινδύνου διάβρωσης των γειωτών [10,11].



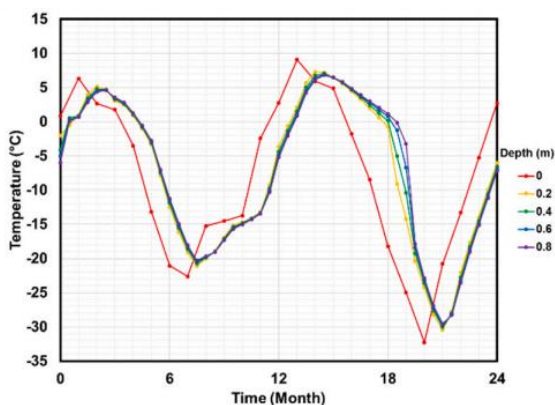
Σχήμα 1.4.3. Εξάρτηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους από την υγρασία και τη συγκέντρωση του άλατος KCl. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους και με την αύξηση της συγκέντρωσης στο άλας KCl. Για ίδια συγκέντρωση KCl, όταν η υγρασία υπερβαίνει το 22%, η ειδική αντίσταση δεν εμφανίζει αξιόλογη μεταβολή [11].

Στο πολυστρωματικό μοντέλο, η ποσότητα της υγρασίας θεωρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους στα κατώτερα στρώματα εδάφους αν και στα ανώτερα (βάθους 1-2m) εμφανίζεται εποχιακή μεταβολή της υγρασίας, άρα και της ειδικής αντίστασης. Για το σωστό σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις στις δυσμενέστερες συνθήκες εδάφους, δηλαδή στις αρχές Σεπτεμβρίου και σε ξηρό χώμα [10].

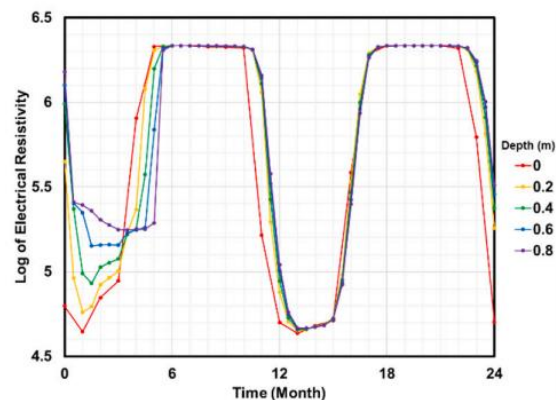
γ) Επίδραση θερμοκρασίας

Για θερμοκρασίες μικρότερες των 0 °C, το έδαφος παγώνει και το νερό που έχει εγκλωβιστεί στο έδαφος (είτε ως συστατικό είτε στην διεπιφάνεια των κόκκων) γίνεται πάγος, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος του αλλά και η ειδική του αντίσταση (από την τιμή υγρής κατάστασης των 10-10² Ω·m, στη τιμή στερεής κατάστασης των 10⁷-10⁸ Ω·m). Αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν στον σχεδιασμό συστημάτων γείωσης σε περιοχές με μεγάλο T_d (ημέρες καταιγίδας ανά έτος), όπου αναμένεται πτώση θερμοκρασίας κάτω από τους 0 °C μέσα στο έτος. Όπως και στην περίπτωση της υγρασίας, η θερμοκρασία μεταβάλλεται εποχιακά και οι εποχιακές αλλαγές στην ειδική αντίσταση λόγω πτώσης της θερμοκρασίας επηρεάζουν

περισσότερο τα ανώτερα στρώματα του εδάφους, καθώς στα κατώτερα βάθη (Σχήμα 1.4.4.α.) η θερμοκρασία διατηρείται διαρκώς σε χαμηλότερα επίπεδα [12].



(α)



(β)

Σχήμα 1.4.4. (α) θερμοκρασία συναρτήσει του βάθους σε μία διετία, (β) δεκαδικός λογάριθμος της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει του βάθους του στρώματος του εδάφους σε μία διετία. Για θερμοκρασία $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (που σημειώθηκε στον έκτο μήνα της μελέτης), η ειδικής αντίσταση του εδάφους έφτασε τα $10^{6.32}\text{ }\Omega \cdot \text{m}$, ενώ για θερμοκρασία $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (που σημειώθηκε στον δέκατο τρίτο μήνα της μελέτης), η ειδική αντίσταση έπεσε στα $10^{4.65}\text{ }\Omega \cdot \text{m}$. Επίσης διαπιστώνουμε ότι όσο μειώνεται το βάθος, τόσο πιο έντονη είναι η εποχιακή μεταβολή της ρ (κόκκινη γραμμή Σχήματος 1.4.4.) [12].

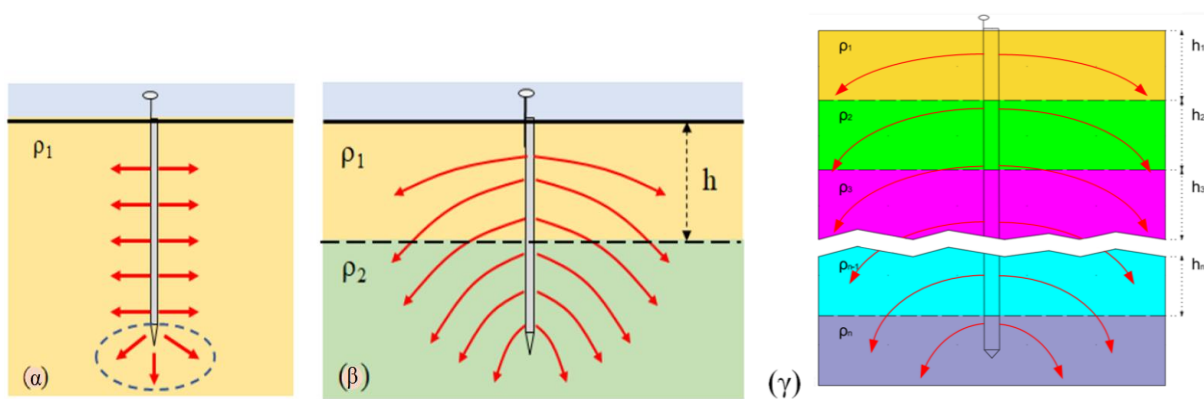
δ,ε) Η επίδραση του χρησιμοποιούμενου μοντέλου εδάφους στην ειδική αντίσταση του εδάφους και το φαινόμενο του ιονισμού αναλύονται στις παραγράφους 1.5. και 1.7. αντίστοιχα.

1.5. Μοντέλα εδάφους

Η ρ εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου μοντέλου του εδάφους.

Όταν θέλουμε να μετρήσουμε την ειδική αντίσταση του εδάφους και να προσομοιώσουμε το έδαφος σε ένα υπολογιστικό εργαλείο, χρησιμοποιούμε το ομογενές, το διστρωματικό ή το πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους. Υπάρχουν δύο δυνατότητες μέτρησης της ειδικής αντίστασης: α) η προσομοίωση του εδάφους σε κατάλληλο λογισμικό που να επιλύει εξισώσεις συναρτήσεων των παραμέτρων του χρησιμοποιούμενου μοντέλου εδάφους και β) η εκτίμηση της ρ με έτοιμες σχέσεις ή καμπύλες (όπως οι καμπύλες της μεθόδου Sunde σε συνδυασμό με τη μέθοδο τεσσάρων σημείων).

Υπάρχουν τρία μοντέλα εδάφους: α) το ομογενές, β) το διστρωματικό και γ) το πολυστρωματικό [13].



Σχήμα 1.5.1 Ανάλυση της μεταβολής της αντίστασης του εδάφους με το βάθος στο οποίο τοποθετείται κάθετο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιώντας (α) ομογενές μοντέλο εδάφους [13], (β) διστρωματικό μοντέλο εδάφους [13] (γ) πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους (σχέδιο σε Autocad Μεντζελοπούλου, Δ.)

α) Ομογενές μοντέλο εδάφους

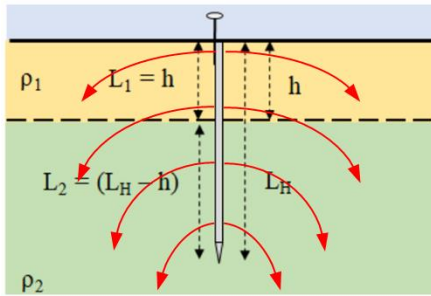
Το ομογενές μοντέλο του εδάφους χρησιμοποιεί μία παράμετρο, την ειδική αντίσταση του εδάφους ρ_1 , που θεωρεί σταθερή σε άπειρο βάθος εδάφους (Σχήμα 1.5.1.α.). Πρόκειται για ένα προσεγγιστικό μοντέλο και εφαρμόζεται μόνο όταν η διακύμανση της ρ συναρτήσει του βάθους μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα [13,14].

Σε αυτήν την περίπτωση, η παράμετρος ρ_1 αποτελεί τον μέσο όρο των μετρούμενων ρ , ή στην περίπτωση που δεν πρόκειται για πλέγμα γείωσης, τον μέσο όρο της μέγιστης και της ελάχιστης μετρούμενης ρ [13,15].

β) Διστρωματικό μοντέλο εδάφους

Το διστρωματικό μοντέλο του εδάφους χρησιμοποιεί τρεις παραμέτρους, την ειδική αντίσταση του άνω στρώματος του εδάφους ρ_1 , την ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους ρ_2 και το βάθος h του άνω στρώματος του εδάφους. Το κάτω στρώμα θεωρείται πως εκτείνεται σε άπειρο βάθος (Σχήμα 1.5.1.β.) [13,14].

Υπάρχουν πολλοί τρόποι εκτίμησης της ρ όταν εισάγουμε κάθετο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό έδαφος κάποιος από τους οποίους αναλύονται στον Πίνακα 1.5.1. που ακολουθεί.



Σχήμα 1.5.2. Κάθετο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους με ανομοιογενή κατανομή ρευμάτων, όπου ρ_1 η ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος, h το βάθος του άνω στρώματος και ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος [τροποποιημένο από [13]]

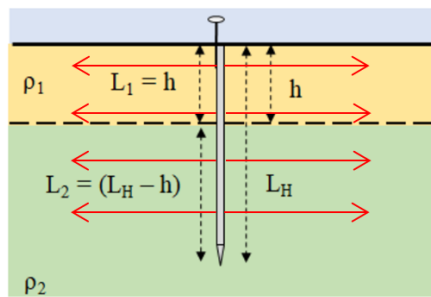
Η ισοδύναμη αντίσταση ρ_{Eq} , ο συντελεστής ανάκλασης k στην διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων και ο συντελεστής διόρθωσης B δίνονται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\rho_{Eq} = \frac{L_H \rho_1 \rho_2}{\rho_2 h + \rho_1 (L_H - h)} (1 + B) \quad (1.5.1)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1.5.2)$$

$$B = \left[\ln \left(\frac{4L_H}{r} \right) - 1 \right]^{-1} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left[\frac{2nh + L_H}{(2n-2)h + L_H} \right] \right\} \quad (1.5.3)$$

όπου L_H είναι το μήκος του χρησιμοποιούμενου ηλεκτροδίου και r η ακτίνα του. Ο k κυμαίνεται μεταξύ -0.9 και 0.9 και οφείλεται στην απότομη αλλαγή από την ρ_1 στη ρ_2 . Η επίδραση του B μειώνεται καθώς αυξάνεται η διεύθυνση του ηλεκτροδίου στο κατώτερο στρώμα.



Σχήμα 1.5.3 Κάθετο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους με ομοιογενή κατανομή ρευμάτων, όπου ρ_1 η ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος, h το βάθος του άνω στρώματος και ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος [τροποποιημένο από [13]]

Η ισοδύναμη αντίσταση ρ_{Eq} προκύπτει από την σχέση 1.5.1 αν αγνοήσουμε τον συντελεστή διόρθωσης B .

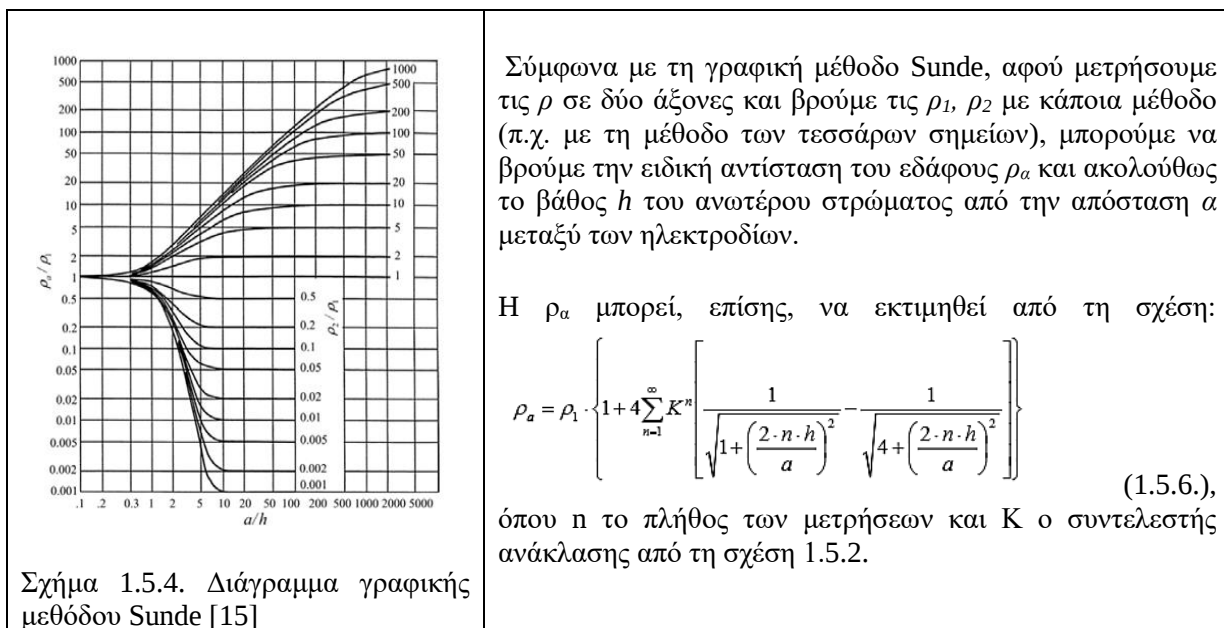
$$\rho_{Eq} = \frac{L_H \rho_1 \rho_2}{\rho_2 h + \rho_1 (L_H - h)} \quad (1.5.3)$$

Από τη σχέση 1.5.3 προκύπτει ότι η αντίσταση του ηλεκτροδίου R_{Eq} μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν την παράλληλη συνδεσμολογία ενός κάθετου ηλεκτροδίου αντίστασης R_1 και μήκους L_1 στο άνω στρώμα ειδικής αντίστασης ρ_1 και ενός κάθετου ηλεκτροδίου αντίστασης R_2 και μήκους L_2 στο στρώμα ειδικής αντίστασης ρ_2 . Οι σχέσεις που προκύπτουν έχουν ως εξής:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{2\pi h} \left[\ln \left(\frac{4h}{r} \right) - 1 \right] \quad (1.5.3)$$

$$R_2 = \frac{\rho_2}{2\pi (L_H - h)} \left[\ln \left(\frac{4(L_H - h)}{r} \right) - 1 \right] \quad (1.5.4)$$

$$R_{Eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{\rho_{Eq}}{2\pi L_H} \left[\ln \left(\frac{4L_H}{r} \right) - 1 \right] \quad (1.5.5)$$

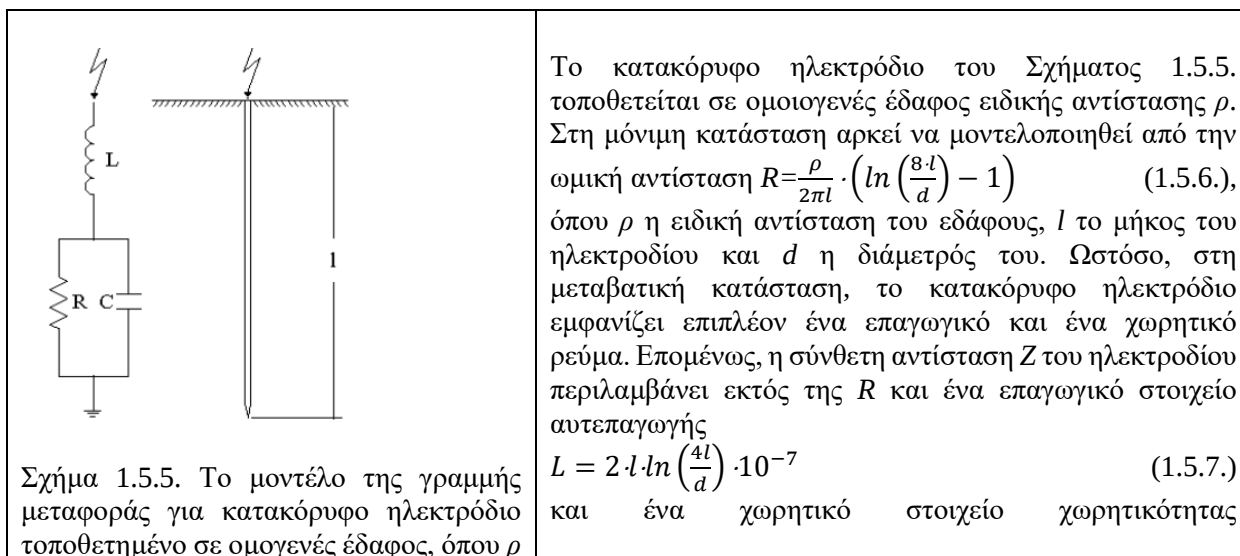


Πίνακας 1.5.1. Τρόποι υπολογισμού της ρ με χρήση διστρωματικού μοντέλου [13,15]

γ) Πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους

Το πολυστρωματικό μοντέλο του εδάφους n στρωμάτων θεωρεί $2n-1$ παραμέτρους, συνολικά n τιμές ειδικής αντίστασης εδάφους (ρ_1 έως ρ_n) και συνολικά $n-1$ τιμές βάθους του εδάφους από το ανώτερο ως το προτελευταίο στρώμα (h_1 έως h_{n-1}). Το κατώτερο στρώμα θεωρείται απείρου βάθους (Σχήμα 1.5.1.γ.) [13,14].

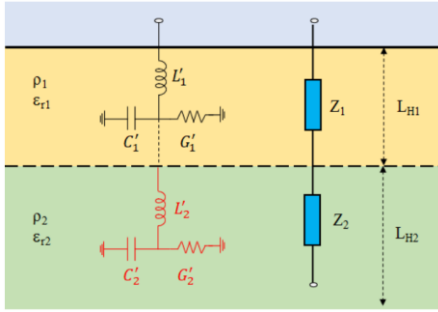
Η σημασία διαφοροποίησης των μοντέλων σε μονοστρωματικό, διστρωματικό και πολυστρωματικό μπορεί να αναδειχθεί από το απλό παράδειγμα υπολογισμού της σύνθετης κρουστικής αντίστασης κατακόρυφου ηλεκτροδίου τοποθετούμενου σε μονοστρωματικό, διστρωματικό και πολυστρωματικό έδαφος.



είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους και l το μήκος του ηλεκτροδίου (*TL model*) [16]

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot l}{18 \cdot \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \cdot 10^{-9} \quad (1.5.8),$$

όπου ε_r η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους.



Σχήμα 1.5.6. Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς για κατακόρυφο ηλεκτρόδιο εμπεγμένο σε διστρωματικό έδαφος, όπου ρ_1 και ε_{r1} είναι η ειδική αντίσταση εδάφους και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα αντίστοιχα του άνω στρώματος και ρ_2 και ε_{r2} είναι η ειδική αντίσταση εδάφους και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα αντίστοιχα του κάτω στρώματος (*TL model*) [13].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.6., όταν ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο τοποθετείται σε διστρωματικό έδαφος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δύο εν σειρά σύνθετες αντιστάσεις.

Για κάθε στρώμα i του εδάφους, το ηλεκτρόδιο ισοδυναμεί με μία σύνθετη αντίσταση Z_i αποτελούμενη (α) από ένα ωμικό στοιχείο αγωγιμότητας

$$G_i = R_i^{-1}, \text{ όπου } R_i = \frac{\rho_i}{2\pi L_{Hi}} \left[\ln\left(\frac{4L_{Hi}}{r}\right) - 1 \right] \quad (1.5.6.) \text{ όπου}$$

R_i η αντίσταση του ηλεκτροδίου στο στρώμα i και L_{Hi} το μήκος του ηλεκτροδίου στο στρώμα i ,

(β) από ένα χωρητικό στοιχείο χωρητικότητας C_i , όπου
$$C_i = \frac{\rho_i \varepsilon_0 \varepsilon_{ri}}{R_i} \quad (1.5.7.)$$

και (γ) από ένα επαγωγικό στοιχείο αυτεπαγωγής
$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot L_{Hi}}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2L_{Hi}}{r}\right) - 1 \right] \quad (1.5.8.),$$

όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους κάθε Z_i είναι
$$G_i' = (R_i L_{Hi})^{-1} \quad (1.5.9.)$$

Η χωρητικότητα και η αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους είναι αντίστοιχα $C_i' = \frac{C_i}{L_{Hi}}$ και $L_i' = \frac{L_i}{L_{Hi}}$ (1.5.10.).

Αν η ηλεκτρική επιτρεπτότητα ε_r και η μαγνητική διαπερατότητα μ είναι η ίδια και στα δύο στρώματα, τότε το χωρητικό και το επαγωγικό στοιχείο της κάθε σύνθετης αντίστασης θα είναι επίσης ίδιας τιμής.

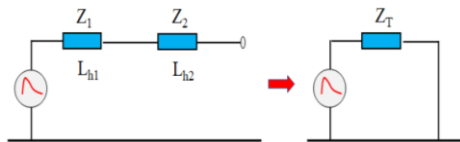
Η σύνθετη αντίσταση Z_i του τμήματος του κατακόρυφου ηλεκτροδίου που βρίσκεται σε κάθε στρώμα i δίνεται:
$$Z_i = \sqrt{\frac{j\omega L_i'}{G_i' + j\omega C_i'}} \quad (1.5.11.),$$

όπου ω η γωνιακή συχνότητα.

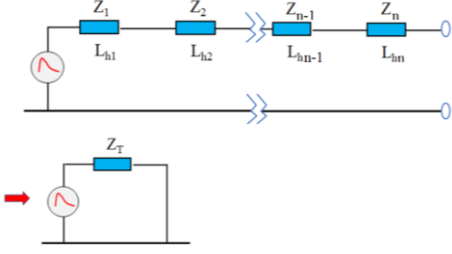
Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Z_T του ηλεκτροδίου δίνεται από την εν σειρά σύνδεση των Z_1 και Z_2 , δηλαδή,

$$Z_T = Z_1 \cdot \frac{Z_{L2} + Z_1 \cdot \tanh(\gamma_1 \cdot L_{H1})}{Z_1 + Z_{L2} \cdot \tanh(\gamma_1 \cdot L_{H1})} \quad (1.5.12.),$$

όπου $\gamma = \sqrt{j\omega L_i' \cdot (G_i' + j\omega C_i')}$ είναι ο συντελεστής διάδοσης



Σχήμα 1.5.7. Το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.5.6 [13]

	και $Z_{L2}=Z_2 \cdot \coth(\gamma_2 \cdot L_{H2})$ (Σχήμα 1.5.7.). Οι 1.5.6 ως 1.5.12 λέγονται εκφράσεις Sunde.
 Σχήμα 1.5.8. το ισοδύναμο κύκλωμα της Z_T του κατακόρυφου ηλεκτροδίου σε πολυστρωματικό έδαφος η στρωμάτων [τροποποιημένο από 13]	Η διαδικασία εξαγωγής της Z_T που περιγράψαμε μπορεί να επεκταθεί στο τριστρωματικό και στο πολυστρωματικό μοντέλο με εν σειρά σύνδεση αντίστοιχων αντιστάσεων.

Πίνακας 1.5.2. Υπολογισμοί της σύνθετης κρουστικής αντίστασης κατακόρυφου ηλεκτροδίου τοποθετούμενου σε μονοστρωματικό, διστρωματικό και πολυστρωματικό έδαφος [13].

1.6. Τρόποι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Μετά την ανάλυση των μοντέλων του εδάφους, θα μελετήσουμε τους τρόπους μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

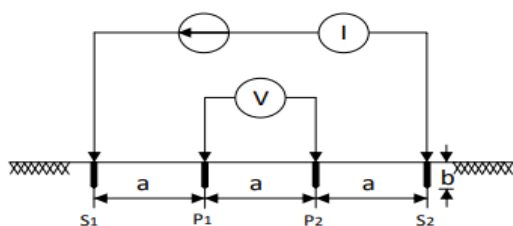
Η ειδική αντίσταση μετριέται είτε εργαστηριακά είτε επιτόπια. Με την εργαστηριακή μέθοδο τοποθετείται δείγμα εδάφους σε κουτί και μετά εφαρμόζεται κάποια από τις μεθόδους μέτρησης που θα αναπτύξουμε. Σε αυτή τη μέθοδο δεν λαμβάνεται υπόψιν η ανομοιογένεια του εδάφους, γι' αυτό και θεωρείται λιγότερο αξιόπιστη από την επιτόπια μέθοδο όπου λαμβάνονται μετρήσεις στον πραγματικό χώρο της εγκατάστασης, όπου οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας δεν επιβάλλονται τεχνητά, αλλά από το φυσικό περιβάλλον [10].

Σε ομοιογενές υπέδαφος, η φαινόμενη ταυτίζεται με την πραγματική ειδική αντίσταση του εδάφους. Σε ανομοιογενές υπέδαφος, επειδή η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται τόσο με το βάθος όσο και με την κατεύθυνση, η ακρίβεια επιτυγχάνεται αν οι μετρήσεις διεξαχθούν σε πολλαπλούς άξονες και κατευθύνσεις, αλλά και μακριά από μεταλλικά αντικείμενα [10].

Το όργανο που χρησιμοποιείται είναι το γειωσόμετρο τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων (τα S1, S2 που είναι τα ηλεκτρόδια μέτρησης ρεύματος και τα P1, P2 που είναι τα ηλεκτρόδια μέτρησης τάσης- Σχήματα 1.6.1. ως 1.6.5.). Η μεταβολή των αποστάσεων μεταξύ των τεσσάρων ηλεκτροδίων συνεπάγεται διείσδυση του ρεύματος της συσκευής μέτρησης σε μεγαλύτερο βάθος, κατά την οριζόντια αλλά και κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε διαφορετικά βάθη.

Οι κύριες μέθοδοι μέτρησης είναι (1) η μέθοδος Wenner, (2) η μέθοδος Schlumberger-Palmer, (3) η μέθοδος διπόλου-διπόλου, (4) μέθοδος Lee, (5) η τετραγωνική διάταξη, (6) η μέθοδος της ηλεκτροτομογραφίας και (7) παραλλαγές της μεθόδου των τεσσάρων σημείων [5].

1.6.1. Μέθοδος Wenner



Σχήμα 1.6.1. Μέθοδος Wenner [15]

Τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια ρεύματος (όπου το ρεύμα μεταφέρεται από το ένα ηλεκτρόδιο στη γη και μετά επιστρέφει στο άλλο) και τα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια τάσης (όπου η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων αντιστοιχεί στην άνοδο του δυναμικού της γης) ισαπέχουν απόσταση a , είναι συνευθειακά και συμμετρικά ως προς το μέσο της διάταξης. Ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα είναι η φαινόμενη αντίσταση R που εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την αντίσταση του εδάφους. Αν a είναι η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων και b είναι το βάθος τοποθέτησής τους, επειδή τα ηλεκτρόδια είναι συνήθως ράβδοι μικρού μήκους με $a \gg b$, η ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση

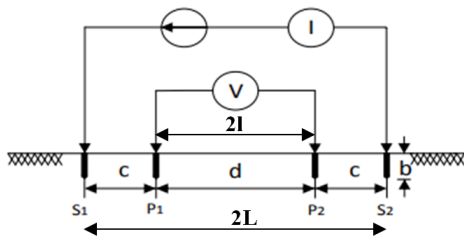
$$\rho_a = 2\pi aR \quad (1.6.1.),$$

$$\text{που αποτελεί απλοποίηση της σχέσης } \rho_a = 4\pi aR / (a + 2a/\sqrt{a^2 + 4b^2} - a/\sqrt{a^2 + b^2}) \quad (1.6.2.),$$

η οποία ισχύει για ημισφαιρικά ηλεκτρόδια ακτίνας b .

Μεταβάλλοντας την απόσταση a και διατηρώντας τη συμμετρία των ηλεκτροδίων ως προς το κέντρο, παίρνουμε διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης. Από το γράφημα της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων που προκύπτει ανιχνεύουμε διακριτά στρώματα διαφορετικής σύνθεσης μέσα στο έδαφος.

1.6.2. Μέθοδος Schlumberger

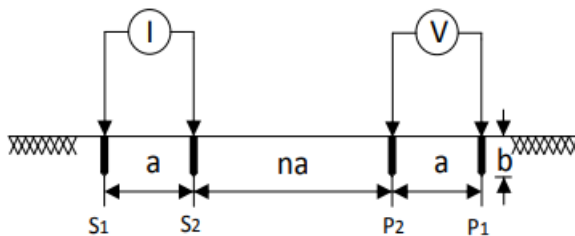


Σχήμα 1.6.2. Μέθοδος Schlumberger (τροποποιημένο Σχήμα από [15])

Συγκριτικά με την μέθοδο Wenner, στη μέθοδο Schlumberger: α) η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού ($2l$) είναι μικρότερη του 40% της απόστασης των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος ($2L$), ενώ η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση $\rho_a = (\pi \cdot L \cdot 2\Delta U) / 2l \cdot I$ (1.6.3.),

β) οι τιμές της ειδικής αντίστασης στα διάφορα βάθη λαμβάνονται μόνο με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, ενώ διατηρούνται σταθερά τόσο τα ηλεκτρόδια δυναμικού όσο και η συμμετρία ως προς κέντρο της διάταξης (ταχύτερη και ευκολότερη εκτέλεση) και γ) οι μετρήσεις είναι ακριβέστερες σε επαγωγική σύζευξη, αλλά επηρεάζονται αισθητά από το θόρυβο. Ειδικά γι' αυτό το λόγο προτιμητέα είναι σήμερα η μέθοδος Wenner.

1.6.3. Μέθοδος διπόλου – διπόλου

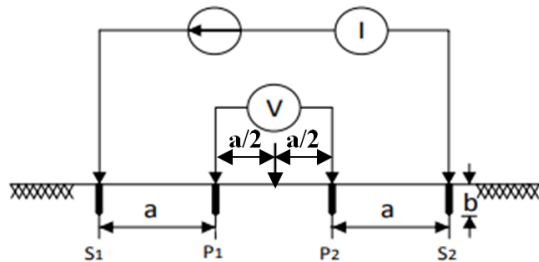


Σχήμα 1.6.3. Μέθοδος διπόλου διπόλου [15]

Εδώ, η απόσταση τόσο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος όσο και μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού είναι a , ενώ η απόσταση μεταξύ των ζευγών είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της a , δηλαδή $n \cdot a$. Η δε φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο

$$\rho_a = [\pi \cdot a \cdot \Delta U \cdot n(n+1)(n+2)] / I \quad (1.6.4.)$$

1.6.4. Μέθοδος Lee (παραλλαγή της Wenner)

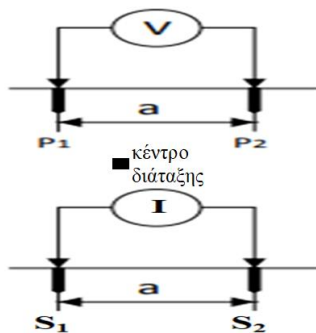


Σχήμα 1.6.4 Μέθοδος Lee (τροποποιημένο Σχήμα από [15])

Εκτός των τεσσάρων ηλεκτροδίων στο μέσο της διάταξης υπάρχει ακόμη ένα επιπλέον ηλεκτρόδιο που επιτρέπει μία μέτρηση για το δεξιό και μία για το αριστερό τμήμα της διάταξης χωρίς μετακίνηση των ηλεκτροδίων ρεύματος. Η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τον τύπο

$$\rho_a = 4\pi \cdot a \cdot \Delta U_{\text{κεντρικού-ηλεκτροδίου μέτρησης τάσης}} / I \quad (1.6.5.)$$

1.6.5. Τετραγωνική διάταξη



Σχήμα 1.6.5 Τετραγωνική διάταξη (τροποποιημένο Σχήμα από [15])

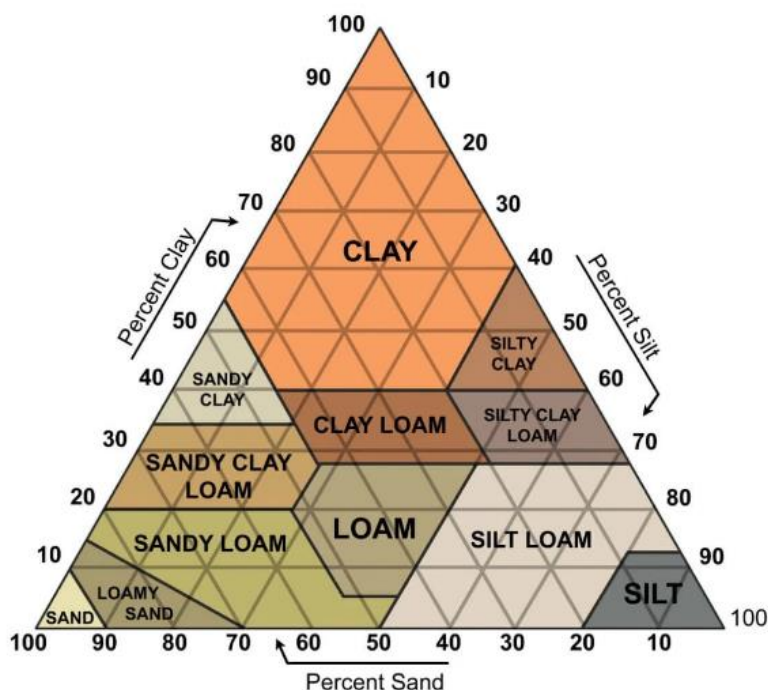
Με την τοποθέτηση των τεσσάρων ηλεκτροδίων στις κορυφές τετραγώνου, εξομαλύνονται οι τιμές από αξιμουθιακές μεταβολές της ειδικής αντίστασης πάνω από επαφές ή απότομα κεκλιμένα στρώματα. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο $\rho_a = (2\pi \cdot a \cdot \Delta U) / I(2 - \sqrt{2})$, όπου a , η πλευρά τετραγώνου.

1.6.6. Παραλλαγές της μεθόδου των 4 σημείων

Σε διάταξη Wenner, αλλαγή της θέσης των ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος, δεν επηρεάζει την τιμή της μετρούμενης αντίστασης. Με τα τέσσερα ηλεκτρόδια προκύπτουν έξι διαφορετικές πιθανές διατάξεις και τρεις πιθανές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης, οι οποίες ταυτίζονται στα ομοιογενή αλλά διαφέρουν μεταξύ τους στα ανομοιογενή εδάφη.

1.7. Ιονισμός εδάφους

Το έδαφος αποτελείται από κόκκους άμμου, αργίλου, πηλού ή κάποιου συνδυασμού τους.



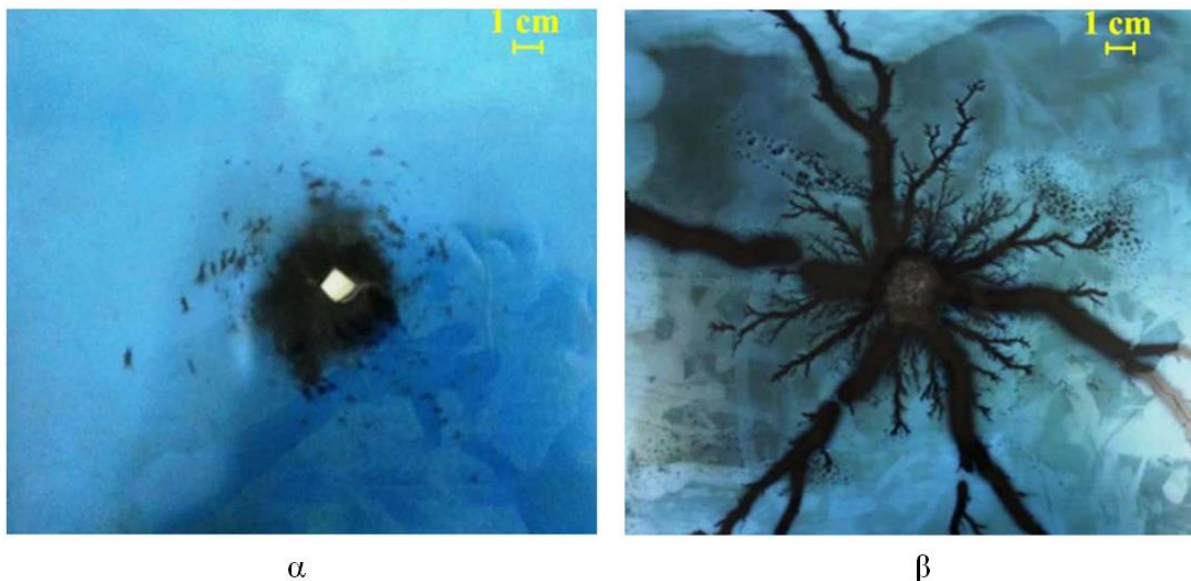
Σχήμα 1.7.1. Υφή του εδάφους. (αναπαραγωγή από <https://soilsensor.com/articles/soil-textures>)

Σε ανισοτροπικά εδάφη, οι κόκκοι δεν είναι ομοιόμορφοι, αλλά εμφανίζουν διαφορετικές διαστάσεις, γεωμετρία και διηλεκτρική σταθερά. Στην επιφάνεια των κόκκων προσκολλώνται διάφορα ξένα στοιχεία (π.χ., υγρασία, σωματίδια αέρα, μεταλλικά οργανικά και ανόργανα στοιχεία), τα οποία δημιουργούν αιχμές και τοπική μείωση της ακτίνας καμπυλότητας των κόκκων. Έτσι, όταν ένα ισχυρό κεραυνικό κρουστικό ρεύμα εκτονωθεί στη γη, αναπτύσσει ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος, το οποίο αυξάνεται τοπικά εκεί όπου τα ξένα σωματίδια βρίσκονται προσκολλημένα πάνω στους κόκκους. Αυτό συνεπάγεται την τοπική μείωση του μήκους ερπυσμού και την αύξηση της αγωγιμότητας στην επιφάνεια των κόκκων. Σε περίπτωση που η προκαλούμενη υπέρταση υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή, που ονομάζεται τάση έναρξης του ιονισμού (V_i – *ionization onset voltage*), θα ακολουθήσουν έρπουσες εκκενώσεις-σπινθήρες που θα οδεύουν στην διεπαφή, δηλαδή στα κενά αέρος των κόκκων του εδάφους (Σχήμα 1.7.2.α.). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ιονισμός του εδάφους [6,18].

Ο ιονισμός του εδάφους εξαρτάται α) από το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί η υπέρταση που αναπτύσσεται στο έδαφος και β) από την αύξηση της θερμότητας του νερού που είναι εγκλωβισμένο στο έδαφος λόγω του υψηλού κρουστικού ρεύματος που εκτονώνεται στη γη.

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο είναι: α) η τάση έναρξης του ιονισμού (V_i – *ionization onset voltage*) που αποτελεί την ελάχιστη τιμή υπέρτασης που απαιτείται για να ξεκινήσει ο ιονισμός, β) η αντίστοιχη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου για την έναρξη του ιονισμού, που ονομάζεται πεδίο έναρξης του ιονισμού ή κρίσιμη κλίση ιονισμού (E_i – *onset electric field*) και (γ) η τάση κατάρρευσης του εδάφους (V_c – *critical breakdown voltage*), για την οποία ισχύει $V_c > V_i$. Η τάση κατάρρευσης αποτελεί την ελάχιστη τιμή υπέρτασης, για την οποία ο ιονισμός του εδάφους κορυφώνεται ακαριαία. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από την επιμήκυνση των έρπουσών εκκενώσεων (που στην έναρξη του φαινομένου αναπτύσσονται τοπικά στη

διεπαφή των κόκκων του εδάφους περίξ του γειωτή), αναπτύσσονται επίσης ασθενείς μερικές εκκενώσεις κατά μήκος της διεπαφής των κόκκων, ικανές να δημιουργήσουν κανάλια εκφόρτισης (*discharge channels*) με τη μορφή δενδριτών μέσα στο έδαφος (Σχήμα 1.3.2β). Όσο πιο ομοιογενές είναι το ηλεκτρικό πεδίο, τόσο μικρότερη είναι η διαφορά V_i και V_c [18].



Σχήμα 1.7.2. (α) Ιονισμός του εδάφους, (β) Μερικές εκκενώσεις και σχηματισμός καναλιών εκφόρτισης με χρήση τεσσάρων φιλμ ακτίνων X, τοποθετημένων κάθετα και σε διαφορετικά επίπεδα του ηλεκτροδίου γείωσης, έτσι ώστε να μην επηρεάζουν αφενός το ηλεκτρικό πεδίο και να επιτρέπουν αφετέρου την απρόσκοπτη ροή του ρεύματος ιονισμού. Ο ιονισμός που αποτυπώθηκε στο ανώτερο φιλμ ήταν μόνο λίγο μεγαλύτερος απ'ότι στα υπόλοιπα, λόγω του μικρού μεγέθους του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκαν [18].

Ο ιονισμός του εδάφους είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζει την ειδική αντίσταση γείωσης. Αυτό συμβαίνει, διότι οι αγωγίμες διαδρομές των οδυνόντων σπινθήρων που σχηματίζονται κατά τον ιονισμό του εδάφους έχουν ειδική αντίσταση σημαντικά μικρότερη από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Αυτή η μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους που περιβάλλει τον γειωτή προκαλεί μείωση της αντίστασης γείωσης. Εντούτοις, σε μια προσπάθεια μαθηματικής προσέγγισης του ιονισμού, ανακύπτει ένα μεγάλο πρόβλημα. Παρότι οι επιμέρους διηλεκτρικές σταθερές και τα επιμέρους χαρακτηριστικά των υγρών, αέριων και στερεών συστατικών του εδάφους είναι γνωστά, εντούτοις δεν υπάρχει μέχρι στιγμής ένα καθολικό μοντέλο που να περιγράφει τα χαρακτηριστικά μεγέθη κατάρρευσης και να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους σύνθετων εδαφών. Ωστόσο, για πολύ συγκεκριμένα εδάφη και σε συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες, έχουν διατυπωθεί εμπειρικές σχέσεις εξάρτησης της κρίσιμης κλίσης ιονισμού E_i από την αντίσταση γείωσης και το μέγεθος των ηλεκτροδίων. Εντούτοις, η οριακή τιμή της κλίσης ιονισμού που προκύπτει πειραματικά είναι διαφορετική από την πραγματική τιμή. Για να εξηγηθεί η απόκλιση αυτή πρέπει να ληφθούν υπόψιν δύο σημαντικοί παράγοντες:

- η εξάρτηση της κρίσιμης κλίσης ιονισμού E_i από την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Η προσκόλληση του νερού στην επιφάνεια των κόκκων αυξάνει τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους και διευκολύνει το φαινόμενο ερπυσμού. Επομένως, αύξηση της υγρασίας συνεπάγεται μείωση της E_i [6,18] και
- η εξάρτηση της κρίσιμης κλίσης ιονισμού E_i από την υφή του εδάφους. Για το ίδιο επίπεδο υγρασίας, τα τεχνητά κοσκινισμένα – λεπτόκοκκα εδάφη έχουν μεγαλύτερη E_i απ'ότι τα εδάφη με μεσαίο

μέγεθος κόκκων κι αυτό γιατί οι κενοί χώροι που θα μπορούσαν να πληρωθούν με αέρα είναι σαφώς λιγότεροι στα λεπτόκοκκα εδάφη [19].

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η αναξιοπιστία των εμπειρικών σχέσεων οφείλεται σε σφάλματα που προκύπτουν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Συγκεκριμένα, τα πειραματικά δείγματα προέρχονται από τεχνητά κοσκινισμένο και συμπυκνωμένο έδαφος με κατάλληλη περιεκτικότητα σε υγρασία και μικρή συγκέντρωση ανεπιθύμητων συστατικών (π.χ. αλάτων), γεγονός που τα καθιστά λιγότερο ετερογενή από ένα πραγματικό έδαφος. Επιπλέον, οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας είναι συγκεκριμένες και επιβάλλονται στο δείγμα από τον εκάστοτε ερευνητή και όχι από τη φύση [19,20].

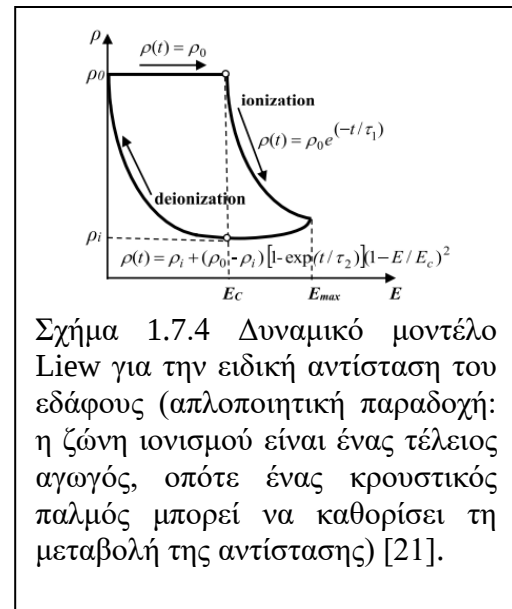
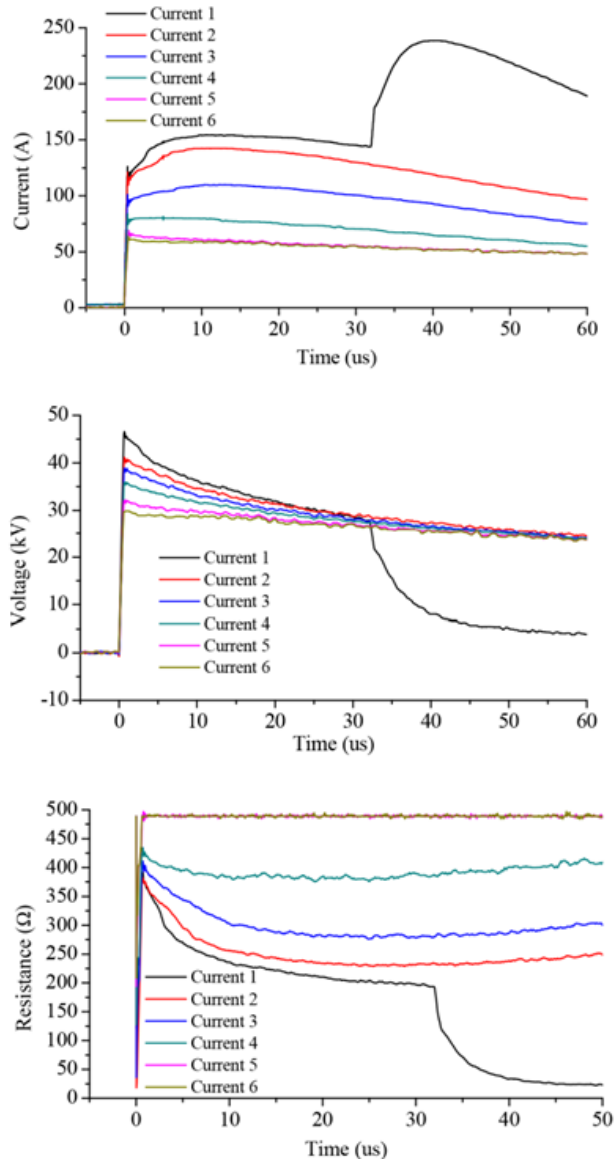
Επίσης, ο ιονισμός εξαρτάται επίσης από την τάση και το ρεύμα. Μεγάλες τιμές εφαρμοζόμενης τάσης και ρεύματος αυξάνουν τον ιονισμό, εξαιτίας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου και αύξησης της θερμότητας (κυρίως των σωματιδίων νερού που εγκλείονται στο έδαφος), αντίστοιχα. Όσον αφορά τη μείωση της μεταβατικής αντίστασης z , αυτή φαίνεται να εξαρτάται περισσότερο στην αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου και δευτερευόντως στην αύξηση της θερμότητας [6,18].

Πρόσφατη μελέτη σε ηλεκτρόδιο μικρών διαστάσεων και σε κοσκινισμένο αμμώδες δείγμα με ελεγχόμενη υγρασία και ειδική αντίσταση, αποκάλυψε τρία είδη μεταβατικών καμπυλών για το ρεύμα, την τάση και τη σύνθετη αντίσταση συναρτήσει του χρόνου, αναλόγως με το πόσο ισχυρό ήταν το κρουστικό ρεύμα που εγχύθηκε (Σχήμα 1.7.3.) [18].

Η πρώτη οικογένεια καμπυλών ρεύματος αφορά εγχόμενα ρεύματα ανίκανα να προκαλέσουν ιονισμό (Current 5,6 του Σχήματος 1.7.3.), με αποτέλεσμα να βρίσκμαστε στο επίπεδο τμήμα της καμπύλης του δυναμικού μοντέλου του Liew (Σχήμα 1.7.4.)

Η δεύτερη οικογένεια καμπυλών αφορούν τα ρεύματα Current 2,3,4 του Σχήματος 1.7.3. Στην περίπτωση αυτή, όταν η τάση φτάσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο, θα ξεκινήσει ο ιονισμός κοντά στο ηλεκτρόδιο. Μετά, παρόλο που η τάση μειώνεται, εντούτοις το ρεύμα εξακολουθεί να αυξάνεται εξαιτίας του ιονισμού, ενώ η αντίσταση z μειώνεται. Αυτή η συμπεριφορά αντιστοιχεί στο τμήμα "ionization" της καμπύλης του Liew. Στη συνέχεια, καθώς μειώνεται η τάση, ο ιονισμός του εδάφους μειώνεται και τελικά εξαφανίζεται, ενώ η αντίσταση z αυξάνεται και τελικά τείνει να επανέρθει στην τιμή που είχε πριν συμβεί ο ιονισμός. Η συμπεριφορά αυτή αντιστοιχεί στο τμήμα "deionization" της καμπύλης του Liew [21].

Η τρίτη οικογένεια καμπυλών αντιστοιχεί σε ρεύμα τόσο ισχυρό, που τελικά εξαναγκάζει την τάση να ξεπεράσει το κρίσιμο σημείο κατάρρευσης (Current 1 του Σχήματος 1.7.3). Στο πρώτο τμήμα της καμπύλης, καθώς μειώνεται η τάση, το ρεύμα αυξάνεται, ενώ η μεταβατική αντίσταση z και μειώνεται. Στο σημείο αλλαγής της κλίσης της καμπύλης έχει επέρθει κατάρρευση – breakdown του εδάφους με αποτέλεσμα την ανάπτυξη καναλιών εκφόρτισης (Σχήματος 1.7.2.β.) και τη δραματική μείωση της αντίστασης γείωσης χωρίς όμως να εμφανίζεται κάποια τάση για αποϊονισμό (άρα δεν μπορούμε να παραλληλίσουμε αυτή τη συμπεριφορά με την καμπύλη του Liew).



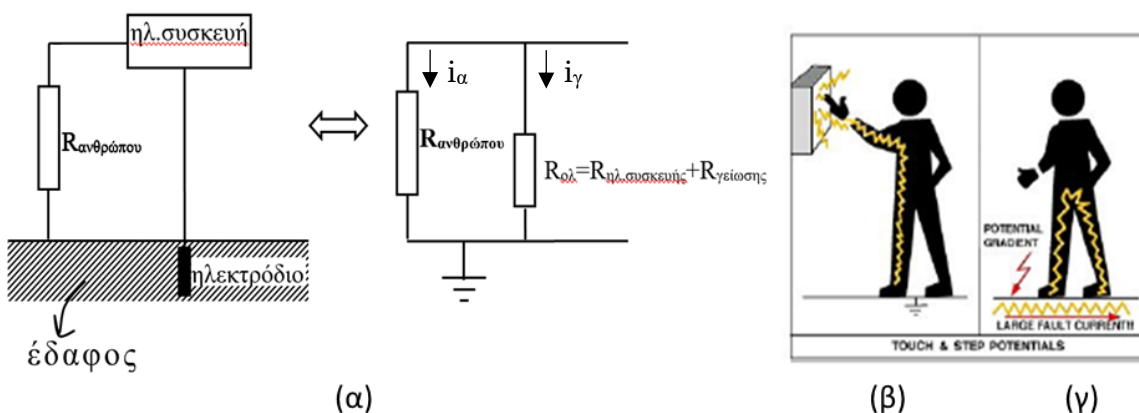
Σχήμα 1.7.3 Χρονικές καμπύλες α) ρεύματος $i(t)$, (β) τάσης $u(t)$ και γ) σύνθετης αντίστασης $z(t) = u(t) / i(t)$ [18].

Η μείωση της αντίστασης του εδάφους λόγω ιονισμού είναι ο λόγος για τον οποίο ο σχεδιασμός ενός οικονομικού συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψιν αφενός μεν τη μελέτη ιονισμού σε εδάφη υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα, αφετέρου δε τον μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης της κρίσιμης κλίσης ιονισμού που έχει το υγρό συγκριτικά με το στεγνό έδαφος. Προτείνεται μάλιστα να μην αξιοποιείται μόνο η τιμή του πεδίου έναρξης του ιονισμού, αλλά ένα εύρος αυτής. Ωστόσο, παρά τη χρησιμότητά του, πολλές μελέτες αγνοούν τον ιονισμό του εδάφους χάριν ευκολίας στους υπολογισμούς των παραμέτρων [6,20].

1.8. Συστήματα γείωσης

Το σύστημα γείωσης είναι απαραίτητο στοιχείο για οποιαδήποτε ηλεκτρική εγκατάσταση σε όλο το σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς παρέχει την αγωγή οδό διοχέτευσης του κεραυνικού, αλλά και οποιουδήποτε άλλου ρεύματος σφάλματος προς τη γη. Στην περίπτωση διαρροής ρεύματος σφάλματος, μόνο ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα γείωσης δύναται να διασφαλίσει τη διατήρηση της ακεραιότητας του άψυχου υλικού (π.χ. κτηρίων, υποσταθμών, γραμμών μεταφοράς και διανομής, ευαίσθητων τηλεπικοινωνιακών συσκευών όπως PLC κ.λπ.), αλλά κυρίως την προστασία του έμψυχου υλικού (π.χ. προσωπικό εγκατάστασης και καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας) από ηλεκτροπληξία, τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις (Σχήμα 1.8.1.) [22].

Επομένως, για τον σχεδιασμό ενός αξιόπιστου συστήματος γείωσης καθίσταται απαραίτητη τη μελέτη του δυναμικού που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εδάφους λόγω έγχυσης ρεύματος σφάλματος προς τη γη. Τα συμπεράσματα της μελέτης αναφορικά με τον επικινδυνότητα των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής θα βοηθήσουν στην επιλογή και στη βελτίωση του κατάλληλου μοντέλου γείωσης [23].



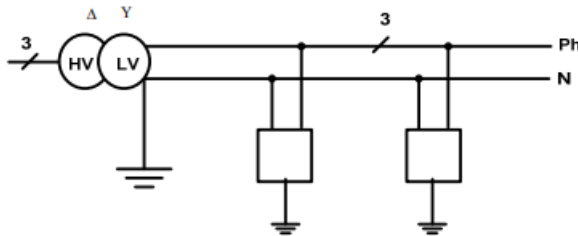
Σχήμα 1.8.1. Οι κίνδυνοι ενός ρεύματος σφάλματος για τον άνθρωπο: (α) κίνδυνος ηλεκτροπληξίας: το άτομο έρχεται σε επαφή με το μεταλλικό περίβλημα γειωμένης ηλεκτρικής συσκευής που διαρρέεται από ρεύμα σφάλματος, οπότε $R_{\text{ανθρώπου}} = R_{\text{πυρήνα}} + R_{\text{δέρματος}}$ (όπου $R_{\text{πυρήνα}} \approx 500 \, \Omega$ και $R_{\text{δέρματος}} = 1-100 \, \text{k}\Omega$ με την $R_{\text{δέρματος}}$ να αυξάνεται όσο πιο υγρό είναι το δέρμα). Η συνολική αντίσταση είναι $R_{\text{ολ}} = R_{\text{ηλ. συσκευής}} + R_{\text{γείωσης}}$, ενώ από το ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει ότι για $R_{\text{ολ}} \ll R_{\text{ανθρώπου}}$, έχουμε $i_\gamma \gg i_a$, (όπου i_γ , i_a : το ρεύμα που διαρρέει το σύστημα γείωσης και τον άνθρωπο αντίστοιχα). Για τη βέλτιστη προστασία του ατόμου, η αντίσταση γείωσης του συστήματος προστασίας πρέπει να τείνει στο μηδέν. Αν δεν πληρούται η προϋπόθεση αυτή, ο άνθρωπος κινδυνεύει από ηλεκτροπληξία, η βαρύτητα της οποίας εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος, την τιμή της τάσης, τη συχνότητα, τη χρονική διάρκεια του ηλεκτροφυσικού φαινομένου και την υγρασία του εδάφους [24], (β) κίνδυνος από τάση επαφής: στην περίπτωση αυτή αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του ανθρωπίνου σώματος, τα οποία γεφυρώνουν ένα μεταλλικό αντικείμενο με το έδαφος ή δύο μεταλλικά αντικείμενα μεταξύ τους. Για άτομο το οποίο βρίσκεται εντός του πεδίου ροής ενός ρεύματος σφάλματος, θα αναπτυχθεί τάση επαφής είτε μεταξύ χεριού και ποδιού είτε μεταξύ των δύο χεριών [22], (γ) κίνδυνος από βηματική τάση. Πρόκειται για τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου (με τυπικό άνοιγμα ποδιών 1m), όταν αυτό βρεθεί κοντά σε ένα γειωμένο αντικείμενο το οποίο εκείνη ακριβώς τη στιγμή διαρρέεται από κάποιο ρεύμα σφάλματος [22].

Τα συστήματα γείωσης ορίζονται από δύο γράμματα. Το πρώτο γράμμα είναι T (= Terra), όταν υπάρχει απευθείας σύνδεση με τη γη ή I (= Isolate) για μόνωση από τη γη. Το δεύτερο γράμμα είναι T (= Terra), όταν η γείωση των αγωγίων μερών της εγκατάστασης είναι ανεξάρτητη από την πηγή ή N (= Neutral) όταν είναι συνδεδεμένη στη γείωση της πηγής (που συνήθως είναι ουδετερογείωση).

Οι βασικές κατηγορίες των συστημάτων γείωσης είναι α) το TT με γειωμένο ουδέτερο και γειωμένα μεταλλικά, β) το TN με γειωμένο ουδέτερο και μεταλλικά συνδεδεμένα στον ουδέτερο και γ) το IT με γειωμένα μεταλλικά και μονωμένο ουδέτερο. Το TN-σύστημα χωρίζεται σε τρία υποσυστήματα: το TN-C, το TN-S και το TN-C-S, όπου το γράμμα S (= Separate) δείχνει ότι ο ουδέτερος αγωγός (N) και ο αγωγός προστασίας (PE) χωρίζονται, ενώ το γράμμα C (= Combined) ότι συνδυάζονται σε έναν αγωγό (αγωγός-PEN).

1.8.1. Σύστημα γείωσης TT [25,26]

Το TT αποτελεί το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο σύστημα γείωσης. Στο TT-σύστημα, η πηγή τροφοδοσίας συνδέεται απευθείας στη γη, ενώ τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη συνδέονται σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης που είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητο από την πηγή (Σχήμα 1.8.2.).



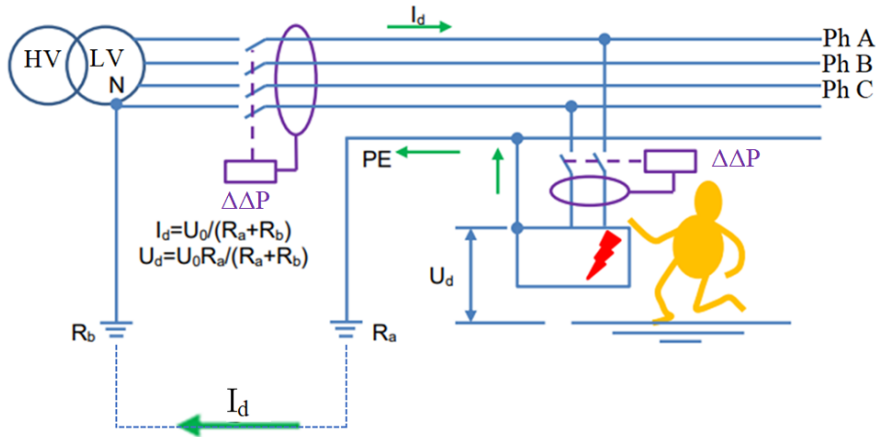
Σχήμα 1.8.2. Σύστημα γείωσης TT. Ph (= phase): η φάση, 3: συντομογραφία των τριών φάσεων, N (= Neutral): ο γειωμένος ουδέτερος, HV (= High Voltage): υψηλή τάση, LV (= Low Voltage): χαμηλή τάση [25].

Στην περίπτωση που συμβεί ένα σφάλμα μόνωσης, το ρεύμα σφάλματος I_d περιορίζεται από τις αντιστάσεις γείωσης R_a και R_b του Σχήματος 1.8.3.

Αν υποθέσουμε ότι $R_d=0$, το ρεύμα σφάλματος θα είναι $I_d = U_0/(R_a+R_b)$ (1.8.1.), όπου U_0 είναι η τάση φάσης-ουδετέρου τροφοδοσίας.

Το ρεύμα σφάλματος δημιουργεί τάση σφάλματος $U_d = R_a \cdot I_d = (U_0 \cdot I_d)/(R_a+R_b)$ (1.8.2.)

Εφόσον οι αντιστάσεις γείωσης είναι συνήθως χαμηλές και ίδιας τιμής, ακόμη και η τάση $U_0/2$ είναι επικίνδυνη, γι' αυτό και το μέρος της εγκατάστασης που έγινε το σφάλμα θα πρέπει να διακόπτεται. Το επικίνδυνο για τον άνθρωπο I_d σφάλματος είναι πολύ μικρότερο από το $I_{\text{ονομαστικό}}$ των συσκευών προστασίας από υπερένταση (overcurrent relays), για τον λόγο αυτό απαιτείται τουλάχιστον ένας διακόπτης διαφυγής έντασης (ΔΔΡ) στο τέλος της εγκατάστασης τροφοδοσίας. Διακόπτες διαφυγής έντασης μπορεί να τοποθετηθούν και σε άλλα σημεία του κυκλώματος. Ωστόσο η χρήση πολλαπλών ΔΔΡ αποφεύγεται, γιατί στην αντίθετη περίπτωση θα προκύψουν πολλές αντιστάσεις R_a στο κύκλωμα που θα προκαλέσουν αστάθεια στη λειτουργία του αγωγού προστασίας PE, αφού πλέον δε θα είναι το μοναδικό σημείο αναφοράς μηδενικού δυναμικού. Οι ΔΔΡ θα πρέπει να έχουν μικρό χρόνο απόκρισης (πρακτικά μικρότερο του ενός δευτερολέπτου), αλλά και ευαισθησία σε ρεύματα σφάλματος επικίνδυνα για τον άνθρωπο.



Σχήμα 1.8.3. Συμπεριφορά του TT-συστήματος γείωσης σε σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. PhA, PhB, PhC: οι τρεις φάσεις, I_d , U_d , R_d : κατ' αντιστοιχία το ρεύμα, η τάση και η αντίσταση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου, R_a , R_b : αντιστάσεις γείωσης, U_o : τάση φάσης προς ουδέτερο, $\Delta\Delta P$: οι διακόπτες διαφυγής έντασης, N (= Neutral): ο γειωμένος ουδέτερος, HV (= High Voltage): υψηλή τάση και LV (= Low Voltage): χαμηλή τάση (τροποποιημένο Σχήμα από[26]).

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του TT-συστήματος γείωσης αναγράφονται στον Πίνακα 1.8.1:

Πλεονεκτήματα TT-συστήματος γείωσης	Μειονεκτήματα TT-συστήματος γείωσης
- τοποθετείται εύκολα σε μια εγκατάσταση - δεν επηρεάζει το υπόλοιπο δίκτυο - σφάλματα σε εγκαταστάσεις χαμηλής και μέσης τάσης δεν μπορούν να διαδοθούν σε άλλους καταναλωτές χαμηλής τάσης - μια καλή πρακτική ασφάλειας αποτελεί ο περιορισμός της τάσης σφάλματος στα 50 V στο εσωτερικό της εγκατάστασης και στα 0 V σε σφάλματα δικτύου	- κάθε καταναλωτής θα πρέπει να εγκαταστήσει και να διατηρήσει το δικό του γειωτή. Έτσι όμως, δεν μπορεί να διασφαλισθεί πλήρης προστασία, αφού αυτή εξαρτάται από τον ίδιο τον καταναλωτή - μπορεί να συμβούν υπερτάσεις λόγω σφάλματος μεταξύ μεταλλικών στοιχείων ή μεταξύ μεταλλικών στοιχείων και του αγωγού προστασίας - οι υπερτάσεις που αναπτύσσονται γηράσκουν τις μονώσεις του εξοπλισμού

Πίνακας 1.8.1. Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του TT-συστήματος γείωσης [25].

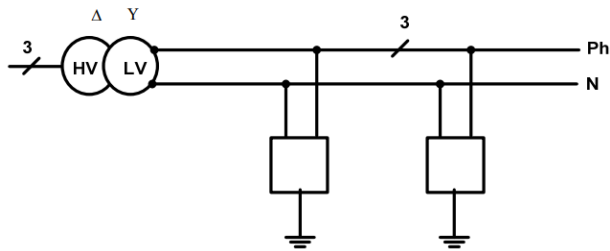
1.8.2. Σύστημα γείωσης IT

Το IT σύστημα γείωσης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: το απλό IT (IT neutral not distributed) και το IT με αντίσταση γείωσης στον ουδέτερο (IT impedance earthed neutral).

Στο απλό IT σύστημα (Σχήμα 1.8.4), η πηγή τροφοδοσίας είναι απομονωμένη από τη γη και ο ουδέτερος δεν συνδέεται με τον αγωγό προστασίας. Οπότε, σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, η γείωση του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της αντίστασης διαρροής του δικτύου. Η φυσική αντίσταση διαρροής ενός τριφασικού

καλωδίου μήκους 1 km έχει τυπική χωρητικότητα $C=1 \mu F/km$ και ωμική αντίσταση $R=1 M\Omega/km$. Οπότε, για βιομηχανική συχνότητα 50 Hz, θα υπάρχει η χωρητική συνιστώσα της αντίστασης σφάλματος: $Z_{cf} = 1/(jC\omega) = 2.652 \Omega$ εν παραλλήλω με την ωμική συνιστώσα αντίστασης σφάλματος $Z_{rf} = R_f = 1M\Omega$. Επομένως, η ολική αντίσταση σφάλματος θα είναι της τάξεως των 2.652 Ω .

Στο IT με αντίσταση γείωσης, ο ουδέτερος είναι συνδεδεμένος με τη γη μέσω μίας αντίστασης γείωσης της τάξεως των 1.5 Ω , ώστε να ρυθμίζεται κατάλληλα το δυναμικό του δικτύου.



Σχήμα 1.8.4. Σύστημα γείωσης IT με απομονωμένο ουδέτερο. Ph (= phase): η φάση, 3: συντομογραφία των τριών φάσεων, N (= Neutral): ο γειωμένος ουδέτερος, HV (= High Voltage): υψηλή τάση, LV (= Low Voltage): χαμηλή τάση [25].

Όλα τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη του πλαισίου της συσκευής είναι διασυνδεδεμένα σε ένα γειωμένο ηλεκτρόδιο, ώστε για κάθε κύκλωμα να ισχύει:

$$R_b \cdot I_d \leq 50 V \quad (1.8.3.),$$

όπου R_b η συνολική αντίσταση αγωγίμων μεταλλικών μερών – ηλεκτροδίου γείωσης και I_d το ρεύμα σφάλματος διαρροής που εξαρτάται από την συνολική αντίσταση γείωσης ολόκληρης της εγκατάστασης.

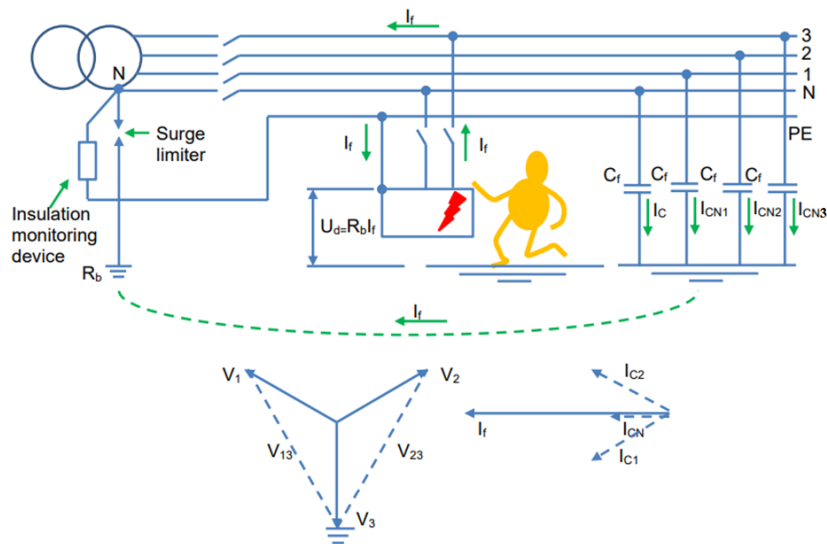
Ο Πίνακας 1.8.2. περιγράφει τις εξισώσεις υπολογισμού του ρεύματος και της τάσης σφάλματος για την περίπτωση (α) IT-συστήματος με απομονωμένο ουδέτερο στον οποίο δεν υπάρχει ροή ρεύματος (π.χ. μετασχηματιστές ή κινητήρες σε διάταξη δέλτα), (β) IT-συστήματος με απομονωμένο ουδέτερο στον οποίο υπάρχει ροή ρεύματος (π.χ. μετασχηματιστές ή κινητήρες σε διάταξη αστέρα) και (γ) IT-συστήματος με αντίσταση γείωσης στον ουδέτερο.

IT με απομονωμένο ουδέτερο στον οποίο δεν υπάρχει ροή ρεύματος	IT με απομονωμένο ουδέτερο στον οποίο υπάρχει ροή ρεύματος	IT με αντίσταση γείωσης στον ουδέτερο
Το ρεύμα σφάλματος I_f δίνεται από τη σχέση $I_f = I_{c1} + I_{c2}$ (1.8.4.), όπου $I_{c1} = jC_f \cdot \omega \cdot V_{13}$ (1.8.5.) και $I_{c2} = jC_f \cdot \omega \cdot V_{23}$ (1.8.6.). Το ρεύμα σφάλματος διαρροής δίνεται από τη σχέση $I_d = U_0 \cdot 3 \cdot C_f \cdot \omega$ (1.8.7.). Η τάση επαφής ενός καλωδίου χαμηλής τάσης μήκους 1km θα είναι $U_c = R_b \cdot I_d$ (1.8.8.).	Το ρεύμα σφάλματος δίνεται ως $I_f = I_{c1} + I_{c2} + I_{cn}$ (1.8.9.), όπου τα I_{c1} και I_{c2} δίνονται από τις σχέσεις 1.8.5. και 1.8.6. αντίστοιχα, ενώ $I_{cn} = U_0 \cdot C_f \cdot \omega$ (1.8.10.). Το ρεύμα σφάλματος διαρροής δίνεται ως $I_d = U_0 \cdot 4 \cdot C_f \cdot \omega$ (1.8.11.). Η τάση επαφής ενός καλωδίου χαμηλής τάσης μήκους 1km θα είναι $U_c = R_b \cdot I_d$ (1.8.12.).	Το ρεύμα σφάλματος διαρροής θα είναι $I_d = U / Z_{eq}$ (1.8.13.), όπου το $1/Z_{eq} = 1/Z_n + 3j \cdot C_f \cdot \omega$ (1.8.14.). Η τάση επαφής ενός καλωδίου χαμηλής τάσης μήκους 1km θα είναι $U_c = R_b \cdot I_d$ (1.8.15.).

Πίνακας 1.8.2. Υπολογισμός του ρεύματος και της τάσης σφάλματος σε διαφόρους τύπους IT-συστήματος γείωσης (ω : η βιομηχανική γωνιακή συχνότητα 50 Hz) [25].

Η συμπεριφορά του IT-συστήματος γείωσης στο πρώτο και δεύτερο σφάλμα μόνωσης περιγράφεται στις Σχήματα 1.8.5. και 1.8.6. αντίστοιχα.

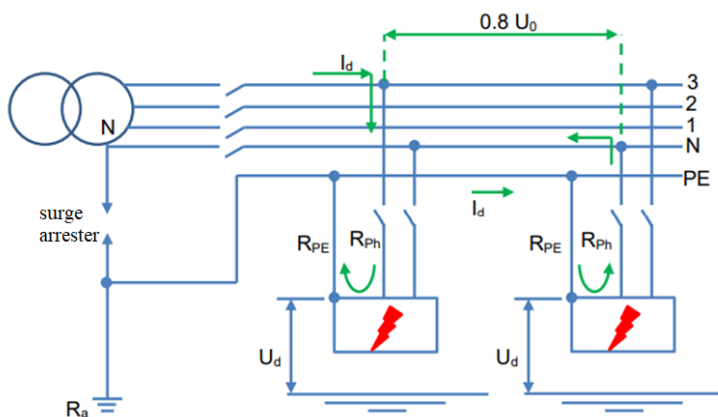
Συγκεκριμένα, όταν συμβεί το πρώτο σφάλμα μόνωσης, επειδή η τάση σφάλματος είναι χαμηλή άρα ακίνδυνη για τον καταναλωτή, δεν απαιτείται αποσύνδεση του σημείου σφάλματος από το κύκλωμα. Ωστόσο, είναι απαραίτητος ο εντοπισμός και ο κατάλληλος περιορισμός του σφάλματος με τους ανιχνευτές σφάλματος και τη συσκευή ελέγχου απομόνωσης (IMD) πριν συμβεί δεύτερο σφάλμα. Μάλιστα η IMD ελέγχει για σφάλμα όλους τους αγωγούς συμπεριλαμβανομένου και του ουδετέρου. (Σχήμα 1.8.5.)



Σχήμα 1.8.5. Συμπεριφορά του συστήματος γείωσης IT στο πρώτο σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. R_d , U_d : η αντίστοιχη αντίσταση και τάση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου, Insulation monitoring device – IMD: η συσκευή ελέγχου απομόνωσης, surge arrester (surge limiter): το καθοδικό αλεξικέραυνο [26].

Όταν συμβαίνει το δεύτερο σφάλμα (Σχήμα 1.8.6.), ενώ το πρώτο δεν έχει ακόμα εκκαθαριστεί, υπάρχουν τρεις περιπτώσεις:

1) το δεύτερο σφάλμα αφορά τον ίδιο αγωγό, οπότε τα όργανα εντοπισμού του σφάλματος δεν το λαμβάνουν ως ξεχωριστό σφάλμα και συνεχίζει κανονικά η λειτουργία του δικτύου,



Σχήμα 1.8.6. Συμπεριφορά του συστήματος γείωσης IT στο δεύτερο σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. R_d , U_d : η αντίστοιχη αντίσταση και τάση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου, surge arrester (surge limiter): το καθοδικό αλεξικέραυνο.

2) το δεύτερο σφάλμα αφορά διαφορετικό αγωγό από αυτόν του πρώτου σφάλματος, οπότε αν όλα τα μεταλλικά είναι διασυνδεδεμένα, τότε το σφάλμα είναι διφασικό ή φάσης-ουδέτερου προς γη

Τότε το ρεύμα διαρροής θα είναι $I_d \approx 0.8 \cdot U_0 / (2 \cdot (R_{PE} + R_{ph}))$ (1.8.16.),

ενώ η τάση σφάλματος θα είναι $U_d = 0.8 \cdot U_0 / 2$ (1.8.17.).

Για την προστασία του ανθρωπίνου δυναμικού και του εξοπλισμού από το επικίνδυνο I_d χρησιμοποιούνται καθοδικά αλεξικέραυνα (surge protection devices -SPDs) που τοποθετούνται στη διάταξη όπως φαίνεται στις Σχήματα 1.8.5. και 1.8.6. Για τα καθοδικά αλεξικέραυνα ισχύουν οι τύποι του Πίνακα 1.8.3.

IT με ουδέτερο, στον οποίο υπάρχει ροή ρεύματος και ο ένας από τους δύο αγωγούς σφάλματος είναι ο ουδέτερος	IT με ουδέτερο, στον οποίο δεν υπάρχει ροή ρεύματος
$I_a \leq 0.8 \cdot U_0 / (2Z)$ (1.8.18.)	$I_a \leq 0.8 \cdot \sqrt{3} \cdot U_0 / (2Z)$ (1.8.19.)

Πίνακας 1.8.3. Περιορισμοί (ρεύμα διακοπής καθοδικού αλεξικεραυνού I_a) για τα SPD σε διαφορετικά IT συστήματα γείωσης. Το ρεύμα διακοπής I_a , μειώνεται όταν τα δύο σφάλματα συμβαίνουν σε αγωγούς με όμοια χαρακτηριστικά (μήκος, διατομή). Στις σχέσεις, τα Z και U_0 αντιστοιχούν στη συνολική ισοδύναμη αντίσταση του συστήματος γείωσης και στην τάση φάσης-ουδετέρου.

Αν ένα από τα δύο σφάλματα συμβαίνει στον ουδέτερο, το ρεύμα διαρροής και η τάση σφάλματος είναι οι μισές από το αντίστοιχο ρεύμα διαρροής και τάση σφάλματος TN, γι' αυτό και τα SPD του TI συστήματος γείωσης έχουν μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης απ' αυτά που χρησιμοποιούνται στο TN σύστημα γείωσης.

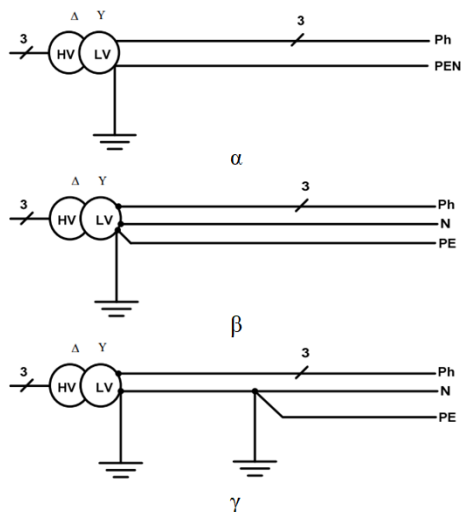
3) το δεύτερο σφάλμα αφορά διαφορετικό αγωγό από αυτόν του πρώτου σφάλματος, οπότε αν όλα τα μεταλλικά δεν είναι διασυνδεδεμένα, τότε κάθε κύκλωμα (ή ομάδα κυκλωμάτων) που συνδέεται σε ξεχωριστή γείωση θα πρέπει να προστατεύεται από έναν ΔΔΡ (Σχήμα 1.8.6.).

Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα σφάλματος ρέει στο έδαφος και χρησιμοποιούνται ΔΔΡ με $I_{dn} \leq \frac{U_L}{R_a}$, οι οποίοι συνδέονται όπως και στην περίπτωση του TT-συστήματος γείωσης. Είναι καλό οι ΔΔΡ να έχουν διακριτικότητα, ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια της λειτουργίας του υπολοίπου κυκλώματος που δεν εμφάνισε σφάλμα.

Προκειμένου να προστατευθούν τα απομονωμένα δίκτυα IT χαμηλής τάσης από την αυξημένη τάση που προκαλείται εξαιτίας σφαλμάτων μόνωσης, κεραυνικών υπερτάσεων στο δίκτυο μέσης τάσης και άλλων εξωτερικών ή εσωτερικών υπερτάσεων, τοποθετείται ένα καθοδικό αλεξικέραυνο μεταξύ του ουδετέρου σημείου του μετασχηματιστή μέσης τάσης/ χαμηλής τάσης και της γης (αντίσταση γείωσης R_b).

1.8.3. Σύστημα γείωσης TN

Η πηγή συνδέεται απευθείας στη γη και όλα τα μεταλλικά εκτεθειμένα μέρη συνδέονται στον ουδέτερο. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η ασφάλεια του προσωπικού, αλλά όχι του εξοπλισμού, καθώς δεν μπορεί να εξαλειφθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς και καταστροφής του εξοπλισμού. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες TN συστημάτων γείωσης, ο TN-C, ο TN-S και ο TN-C-S (Σχήμα 1.8.7.).

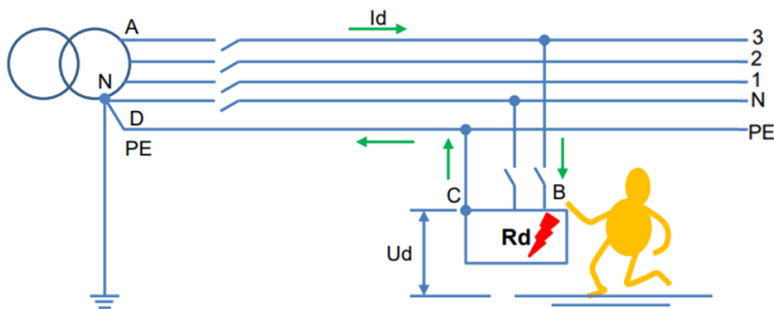


Σχήμα 1.8.7. Συστήματα γείωσης TN: (α) TN-C, (β) TN-S και (γ) TN-C-S [25].

Σε ένα TN-C σύστημα γείωσης, ο ουδέτερος αγωγός (N) και ο αγωγός προστασίας (PE) συνδυάζονται σε ενιαίο αγωγό (PEN), σε όλη την εγκατάσταση, η πηγή τροφοδοσίας είναι απευθείας συνδεδεμένη στη γη, ενώ όλα τα εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη της εγκατάστασης συνδέονται στον αγωγό PEN (Σχήμα 1.8.7.α.).

Σε ένα TN-S σύστημα γείωσης, ο ουδέτερος αγωγός (N) και ο αγωγός προστασίας (PE) είναι ξεχωριστοί σε όλη την εγκατάσταση, η πηγή τροφοδοσίας είναι απευθείας συνδεδεμένη στη γη (δηλαδή στον αγωγό PE) και όλα τα εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη της εγκατάστασης συνδέονται στον αγωγό προστασίας PE μέσω του κεντρικού τερματικού γείωσης της εγκατάστασης (Σχήμα 1.8.7.β.).

Σε ένα TN-C-S σύστημα γείωσης ο ουδέτερος αγωγός (N) και ο αγωγός προστασίας (PE) συνδέονται σε τον ενιαίο αγωγό PEN μέχρι ενός σημείου του συστήματος και έπειτα, διαχωρίζονται σε δύο ξεχωριστούς αγωγούς (αγωγός N και αγωγός PE) που παραμένουν ανεξάρτητοι μέχρι το τέλος της εγκατάστασης. Η γείωση της τροφοδοσίας είναι τύπου TN-C, ενώ τα εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη της εγκατάστασης συνδέονται στον αγωγό PEN, όπως και στην TN-S διάταξη (Σχήμα 1.8.7.γ.).



Σχήμα 1.8.8. Συμπεριφορά του συστήματος γείωσης TN σε σφάλμα μόνωσης του πλαισίου μίας συσκευής. R_d , U_d : η αντίστοιχη αντίσταση και η τάση σφάλματος του εκτεθειμένου μεταλλικού μέρους του πλαισίου [26].

Το ρεύμα σφάλματος διαρροής I_d καθορίζεται μόνο από την αντίσταση των καλωδίων όπου ρέει. Με βάση το Σχήμα 1.8.8. ισχύει ότι
 ρεύμα σφάλματος διαρροής: $I_d = \frac{U_0}{(R_{AB} + R_d + R_{CD})} \xrightarrow{R_d=0} 0.8 \cdot \frac{U_0}{(R_{ph} + R_{PE})}$ (1.8.20.)

και τάση σφάλματος: $U_d = R_{PE} \cdot I_d$ (1.8.21.)

Το σφάλμα μόνωσης σε ένα σύστημα TN, συνήθως μοιάζει με βραχυκύκλωμα φάσης-ουδέτερου. Έτσι, όταν $R_{PE} = R_{ph}$, τότε η τάση $U_0/2$ που αναπτύσσεται είναι επικίνδυνη, γι' αυτό και πρέπει να υπάρχει κάποιο SPD που να διακόπτει ακαριαία το σημείο σφάλματος για το οποίο ισχύει $I_d < I_d$. Επίσης, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί το μέγιστο μήκος γραμμής L_{max} που μπορεί να προστατευτεί από δεδομένο SPD με ρεύμα αποκοπής I_a . Σε περίπτωση που το μήκος γραμμής είναι μεγαλύτερο από το L_{max} , εκτός του SPD πρέπει να τοποθετηθεί κατά περίπτωση και ένας διακόπτης ισχύος ή ένας ΔΔΡ.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του TN-συστήματος γείωσης φαίνονται στον Πίνακα 1.8.4.

Πλεονεκτήματα του TN συστήματος γείωσης	Μειονεκτήματα του TN συστήματος γείωσης
- παρέχει πάντα έναν δρόμο επιστροφής σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης - το σύστημα γείωσης είναι ενιαίο για όλους τους καταναλωτές, οπότε δεν τίθεται θέμα ασφάλειας και αξιοπιστίας, όπως συμβαίνει με το TT- σύστημα - ο αγωγός PEN έχει χαμηλότερη αντίσταση γείωσης - στην περίπτωση σφάλματος μόνωσης, το TN-σύστημα αναπτύσσει χαμηλότερη τάση επαφής απ' ότι το TT-σύστημα γιατί στο TN-σύστημα ο PEN έχει χαμηλότερη σύνθετη αντίσταση και η πτώση τάσης συμβαίνει στην γραμμή φάσης - οι υπερτάσεις δεν στρεσάρουν τη μόνωση του εξοπλισμού - μπορεί να σχεδιαστεί για να λειτουργεί με απλή προστασία υπερέντασης, υψηλής ευαισθησίας και αξιοπιστίας (σε περίπτωση επικίνδυνου ρεύματος σφάλματος ενεργοποιούνται άμεσα οι προστασίες υπερέντασης)	- σφάλματα στη μέση/υψηλή τάση μπορεί να μεταδοθούν στο σύστημα γείωσης χαμηλής τάσης προκαλώντας τάσεις επαφής στους καταναλωτές της χαμηλής - σφάλματα στο σύστημα ενός καταναλωτή χαμηλής τάσης μπορούν να προκαλέσει τάσεις επαφής και σε άλλους καταναλωτές χαμηλής - αν συμβεί σφάλμα φάσης σε ουδέτερο ή σφάλμα φάσης σε γη και έχει διακοπεί ο ουδέτερος, τότε η αύξηση του δυναμικού στα εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη μπορεί να αποβεί μοιραία για τον καταναλωτή (η τάση επαφής θα είναι πολύ πάνω από το όριο επιβίωσης)

Πίνακας 1.8.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του TN- συστήματος γείωσης [25].

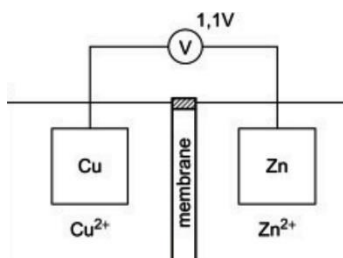
Κεφάλαιο 2: Διάβρωση

Διάβρωση είναι η υποβάθμιση της ποιότητας ενός υλικού (συνήθως μεταλλικού ή μείγματος μετάλλου με έτερο υλικό) λόγω της διαρκούς φυσικοχημικής ή ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασής του με τον έμβιο και μη περιβάλλοντα χώρο [27].

Μολονότι ο γειωτής αποτελεί το "σύστημα ασφαλείας" μια εγκατάστασης, είναι επιρρεπής στη διάβρωση. Έχει βρεθεί, μάλιστα, ότι η διάβρωση στα συστήματα γείωσης των υποσταθμών και των υπογείων γραμμών μεταφοράς είναι 8.6% και 17.1%, αντίστοιχα [28]. Η διάβρωση αφορά τα μεταλλικά στοιχεία των γειωτών και είναι κατά βάση ηλεκτροχημική.

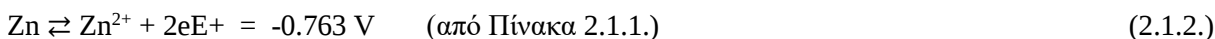
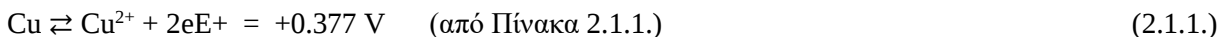
2.1. Δυναμικό Διάβρωσης [29]

Το δυναμικό διάβρωσης βασίζεται στην αρχή του στοιχείου Daniel, το οποίο αποτελείται από δύο επιμέρους ημιστοιχεία, τα οποία διαχωρίζονται από πορώδες διάφραγμα αργίλου (Σχήμα 2.1.1.). Το αριστερό στοιχείο αποτελείται από πλάκα Cu (ηλεκτρόδιο Cu) βυθισμένη σε αραιό διάλυμα CuSO₄ (1 mol/L) στους 25 °C, ενώ το δεξί στοιχείο από πλάκα Zn βυθισμένη σε αραιό διάλυμα ZnSO₄.



Σχήμα 2.1.1. Στοιχείο Daniel.

Αν το εξωτερικό κύκλωμα είναι ανοιχτό (οπότε τα δύο ημιστοιχεία δεν συνδέονται μεταξύ τους), τότε για κάθε ηλεκτρόδιο αναπτύσσεται ένα δυναμικό (δυναμικό ηλεκτροδίου είναι το δυναμικό πλάκας συγκριτικά με το πρότυπο δυναμικό του υδρογόνου που θεωρητικά είναι μηδέν).



Όταν το κύκλωμα κλείσει εξωτερικά μέσω ενός σύρματος, θα έχουμε ροή ηλεκτρονίων από τον Zn προς τον Cu.

Αυτό σημαίνει ότι στο ηλεκτρόδιο του Zn έχουμε:



Ενώ, στο ηλεκτρόδιο του Cu έχουμε:



Άρα, η μάζα του Zn-ηλεκτροδίου συνεχώς θα ελαττώνεται και του Cu-ηλεκτροδίου συνεχώς θα αυξάνεται.

Από τη μελέτη του στοιχείου Daniel προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- η οξείδωση του ημιστοιχείου με το χαμηλότερο δυναμικό και η ταυτόχρονη αναγωγή του ημιστοιχείου με το υψηλότερο δυναμικό αποτελούν το βασικό κανόνα της ηλεκτροχημικής διάβρωσης
- αν συνεχιστεί απρόσκοπτα η οξείδωση του μετάλλου στην άνοδο, το μέταλλο θα καταστραφεί ολοσχερώς

- λόγω της αλληλεξάρτησης των αντιδράσεων ανόδου και καθόδου, αν ανασταλεί η μία από τις δύο αντιδράσεις, τότε υποχρεωτικά θα ανασταλεί και η άλλη (μηχανισμός προστασίας)
- από τον Πίνακα ηλεκτροχημικής σειράς γίνεται κατανοητό ότι, αν δύο μέταλλα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους (είτε άμεσα είτε μέσω ηλεκτρολυτικού διαλύματος) τότε αυτό που θα διαλυθεί είναι το αγενέστερο μέταλλο. Συγκρίνοντας τα μέταλλα μεταξύ τους, διαπιστώνεται ότι η ταχύτητα με την οποία διαβρώνεται κάθε μέταλλο είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των προτύπων δυναμικών.

Γενικά το δυναμικό ενός ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο του Nerst

$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{|Ox|}{|Red|}$, όπου E^0 : το πρότυπο δυναμικό, R: η σταθερά των αερίων, T: η θερμοκρασία, n: το σθένος του μετάλλου και $\frac{|Ox|}{|Red|}$: ο λόγος της συγκέντρωσης των οξειδωτικών προς τα αναγωγικά μέρη (ενεργότητα).

Στοιχείο	Οξειδωτική δράση	Πρότυπο δυναμικό E
Au	$\rightarrow Au^{3+} + 3e^-$	+1.498
O₂ + 4H⁺ + 4e⁻	$\rightarrow 2H_2O$	+1.229
Pt	$\rightarrow Pt^{2+} + 2e^-$	+1.2
Pd	$\rightarrow Pd^{2+} + 2e^-$	+0.987
Ag	$\rightarrow Ag^+ + e^-$	+0.799
Hg	$\rightarrow Hg^{2+} + 2e^-$	+0.788
Fe³⁺ + e⁻	$\rightarrow Fe^{3+} + 0.771$	
O₂ + 2H₂O + 4e⁻	$\rightarrow 4OH^-$	+0.401
Cu	$\rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	+0.337
Sn⁴⁺ + 2e⁻	$\rightarrow Sn^{2+} + 0.15$	
2H⁺ + 2e⁻	$\rightarrow H_2$	0.000
Pb	$\rightarrow Pb^{2+} + 2e^-$	-0.126
Sn	$\rightarrow Sn^{2+} + 2e^-$	-0.136
Ni	$\rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$	-0.250
Co	$\rightarrow Co^{2+} + 2e^-$	-0.277
Cd	$\rightarrow Cd^{2+} + 2e^-$	-0.403
Fe	$\rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$	-0.440
Cr	$\rightarrow Cr^{3+} + 3e^-$	-0.744
Zn	$\rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	-0.763
Al	$\rightarrow Al^{3+} + 3e^-$	-1.662
Mg	$\rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$	-2.363
Na	$\rightarrow Na^+ + e^-$	-2.714
K	$\rightarrow K^+ + e^-$	-2.925

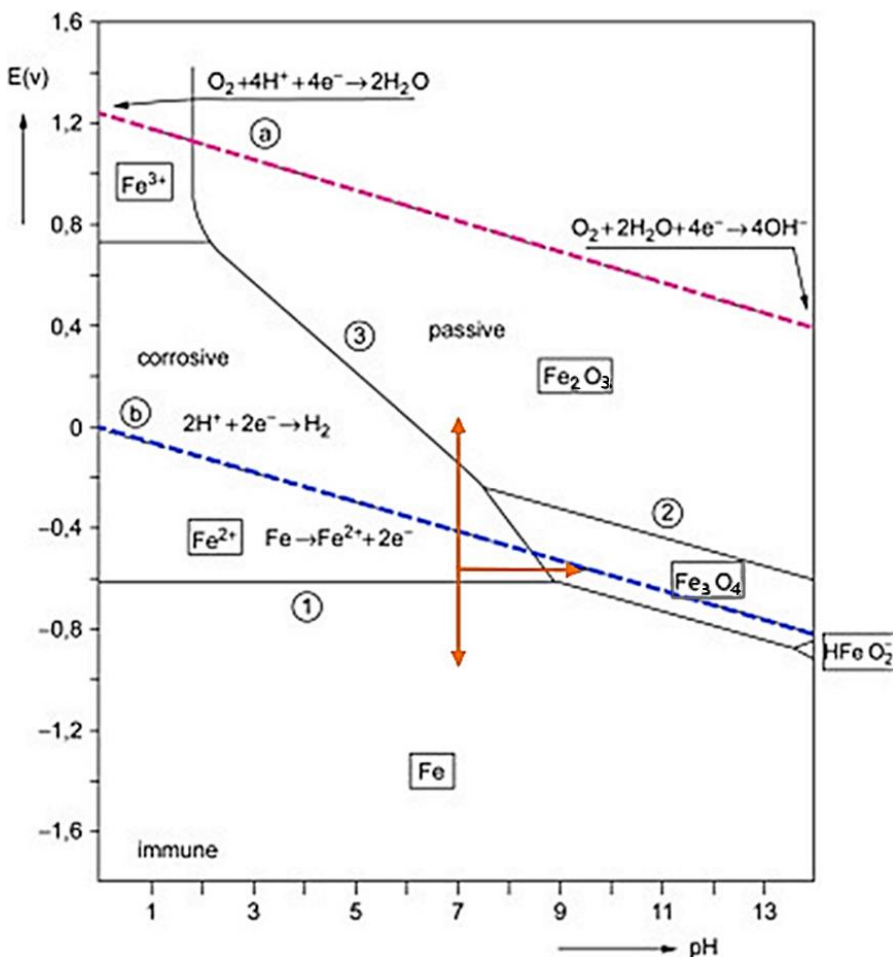
Πίνακας 2.1.1. Ηλεκτροχημική σειρά στοιχείων βάση των οξειδωτικών/αναγωγικών δυναμικών στους 25 °C. Τα δυναμικά αυτά μετρήθηκαν έχοντας ως αναφορά το πρότυπο δυναμικό του υδρογόνου (normal hydrogen potential, NHE) [29]

2.1.1. Διάγραμμα Pourbaix [29]

Η γραφική παράσταση των δυναμικών κάποιων μετάλλων συναρτήσει του pH του περιβάλλοντος μέσου, μας επιτρέπει να καθορίσουμε τη συμπεριφορά των μετάλλων και κυρίως την αντοχή τους στη διάβρωση.

Με βάση τα σχετικά μεγέθη του δυναμικού του μετάλλου και του pH του διαλύματος στο οποίο βρίσκεται βυθισμένο, το διάγραμμα Pourbaix χωρίζεται σε τρεις διακριτές ζώνες: α) στην ζώνη διάβρωσης (corrosion), β) στην ζώνη αντοχής στη διάβρωση (immune) και γ) στη ζώνη παθητικοποίησης, όπου τα οξειδωτικά προϊόντα της διάβρωσης επικάθονται στην επιφάνεια του μετάλλου δημιουργώντας ένα λεπτό φιλμ που προστατεύει τη μεταλλική μήτρα από περαιτέρω διάβρωση (passive) (Σχήμα 2.1.2). Επίσης, στο διάγραμμα χαράσσονται α) οι διακεκομμένες ευθείες των δυναμικών για τα ηλεκτρόδια υδρογόνου και οξυγόνου, προκειμένου να προβλεφθεί ο μηχανισμός της καθοδικής διάβρωσης, καθώς και β) οι συνεχείς ευθείες που καταδεικνύουν τις περιοχές σταθερότητας του μετάλλου και των διαβρωτικών προϊόντων του.

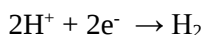
Στο Σχήμα 2.1.2. φαίνεται το διάγραμμα Pourbaix για τον σίδηρο.



Σχήμα 2.1.2. Γράφημα Pourbaix για τον σίδηρο. Η μπλε και η φούξια διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχούν στο ηλεκτρόδιο υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα. Βλέπουμε τρεις διακριτές περιοχές: τη ζώνη διάβρωσης (corrosion), την ζώνη αντοχής στη διάβρωση (immune) και τη ζώνη παθητικοποίησης (passive) [29].

Το γράφημα δείχνει ότι:

- στο ηλεκτρόδιο υδρογόνου παράγεται αέριο H_2 που απελευθερώνεται στο περιβάλλον μέσο, ενώ στο ηλεκτρόδιο οξυγόνου παράγεται νερό σε όξινο περιβάλλον και υδροξύλιο (OH^-) σε αλκαλικό περιβάλλον. Άρα η ζώνη σταθερότητας του νερού βρίσκεται πάνω από το ηλεκτρόδιο υδρογόνου και κάτω από το ηλεκτρόδιο οξυγόνου, το οποίο σημαίνει ότι ο σίδηρος διαβρώνεται στην περιοχή όπου υπάρχει επικάλυψη μεταξύ της ζώνης σταθερότητας του νερού και της περιοχής σταθερότητας του σιδήρου.
- για $pH < 9$, το δυναμικό ισορροπίας της $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (ευθεία 1) είναι μικρότερο από το αντίστοιχο δυναμικό της αναγωγικής αντίδρασης σχηματισμού αερίου υδρογόνου $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ (ευθεία b). Οπότε σε αυτήν την περιοχή του pH, ο Fe διαλύεται



- σε ουδέτερο διάλυμα ($pH = 7$) ο σίδηρος μπορεί να βρεθεί σε οποιαδήποτε από τις τρεις ζώνες. Όμως, υπό φυσιολογικές συνθήκες, το δυναμικό βρίσκεται στη ζώνη διάβρωσης, γι' αυτό ο Fe διαλύεται. Για να μειωθεί η διάβρωση υπάρχουν τρεις πιθανές λύσεις (πορτοκαλί βέλη)
 - να μειωθεί το δυναμικό διάβρωσης σε τιμές που αντιστοιχούν στη ζώνη αντοχής, όπου ο σίδηρος βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση (δεν οξειδώνεται). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν επιβληθεί εξωτερικά ένα αρνητικό δυναμικό, ώστε να προστατευθεί η κάθοδος
 - να αυξηθεί το δυναμικό διάβρωσης σε τιμές που αντιστοιχούν στη ζώνη παθητικοποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξωτερική επιβολή ενός θετικού δυναμικού ή τον εμπλουτισμό του περιβάλλοντος μέσου με έναν παράγοντα που αντιδρώντας με τον χάλυβα να οδηγήσει στην παραγωγή προστατευτικής επικάλυψης από το παραγόμενο οξειδίου του σιδήρου.
 - να αλκαλοποιηθεί το περιβάλλον μέσο, ώστε να παραχθεί ένα παθητικό στρώμα από Fe_3O_4 .

Διαγράμματα Pourbaix έχουν σχεδιαστεί για πολλά μέταλλα, προκειμένου να καταδειχθεί το εύρος των συνθηκών στις οποίες είναι σταθερά. Όμως παρά την ευρεία χρήση τους, αδυνατούν να εντοπίσουν τον ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιείται η διαβρωτική διαδικασία.

2.1.2. Διαγράμματα πόλωσης [29]

Επειδή η διάβρωση στα μέταλλα είναι κατά βάση ηλεκτροχημική, ο ρυθμός διάβρωσης εκφράζεται μέσω της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης (corroded current density $I_{corr}t$). Σύμφωνα με το νόμο του Faraday:

$$I_{corr}t = \frac{nFw}{M}, \quad (2.1.6.)$$

όπου I_{corr} : το ρεύμα διάβρωσης (σε Ampere), t : ο χρόνος στον οποίο το ρεύμα διάβρωσης διαρρέει το μέταλλο του αγωγού (σε second), nF : το φορτίο που απαιτείται για να μετασχηματιστεί 1 mol μετάλλου σε διαβρωτικό προϊόν (σε Coulombs), n : το σθένος του μετάλλου, F : η σταθερά του Faraday = 96,480 C/mol και M : το μοριακό βάρος του μετάλλου (σε γραμμάρια).

Ο ρυθμός διάβρωσης απεικονίζεται στα διαγράμματα πόλωσης, όπου καταγράφεται η σχέση της πυκνότητας του ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού.

Στο δυναμικό διάβρωσης E_{corr} , το ρεύμα οξείδωσης (I_{ox}) είναι κατ'απόλυτη τιμή ίσο με το ρεύμα αναγωγής (I_{red}), οπότε ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις

$$I_{ox} = |I_{red}| \quad (2.1.7.)$$

$$I_{ox} + I_{red} = 0 \quad (2.1.8.)$$

$$I_{corr} = I_{ox} = I_{red} = 0, \quad \text{όπου } I_{corr} : \text{ το ρεύμα διάβρωσης} \quad (2.1.9.)$$

Επειδή το I_{corr} είναι μηδέν, η άμεση μέτρηση του ρεύματος διάβρωσης δεν είναι εφικτή. Για να επιτευχθεί η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης χρησιμοποιείται ένα ηλεκτροστατικό σύστημα που αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο εργασίας (δοκίμιο), ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς και ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο από γραφίτη. Στο σύστημα επιβάλλεται εξωτερικό δυναμικό E , έτσι ώστε να εξαναγκαστεί να βρεθεί εκτός του E_{corr} ισορροπίας. Το δυναμικό αυτό ρυθμίζεται κατά βούληση σε διάφορες τιμές από έναν ποτενσιοστάτη και ταυτόχρονα υπολογίζεται η αντίστοιχη ένταση ρεύματος. Από τις τιμές αυτές κατασκευάζεται η καμπύλη πόλωσης $E = f(I)$.

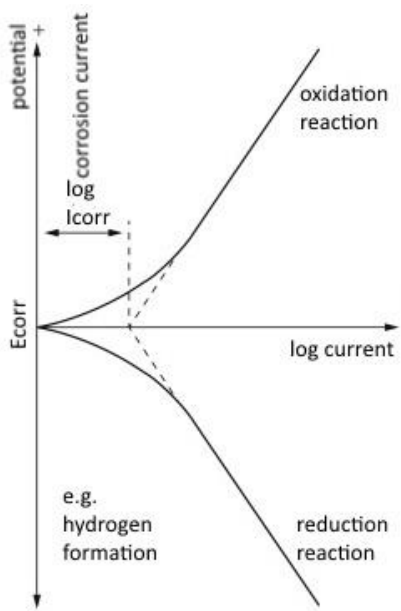
Όταν το επιβαλλόμενο δυναμικό είναι θετικό συγκριτικά με το E_{corr} , το ρεύμα οξείδωσης είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα αναγωγής ($I_{ox} > I_{red}$). Αντίθετα όταν το επιβαλλόμενο δυναμικό είναι αρνητικό, τότε $I_{red} > I_{ox}$. Η τυπική καμπύλη πόλωσης φαίνεται στο Σχήμα 2.1.3.

Από τη μελέτη της καμπύλης διαπιστώνουμε ότι:

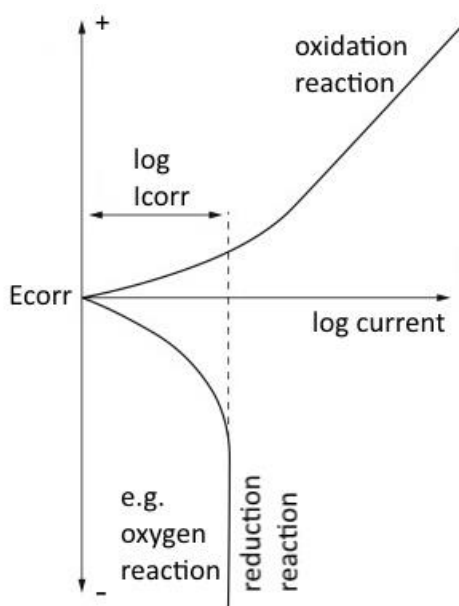
- μπορεί να υπολογιστεί άμεσα το αλγεβρικό άθροισμα οξειδωτικού και αναγωγικού ρεύματος ($I_{ox} + I_{red}$)
- σε πολύ υψηλή πόλωση, πάνω από ± 50 mV, μετριέται μόνο το οξειδωτικό ή το αναγωγικό ρεύμα
- η σχέση μεταξύ έντασης ρεύματος και δυναμικού κοντά E_{corr} είναι γραμμική, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές γίνεται λογαριθμική.

Η εναλλακτική και συνηθέστερη διαμόρφωση του διαγράμματος πόλωσης φαίνεται στο Σχήμα 2.1.3. Πρόκειται για ημιλογαριθμικό διάγραμμα με τεταγμένη το δυναμικό σε σχέση με το E_{corr} και τετμημένη τον λογάριθμο της έντασης του ρεύματος. Επειδή το οξειδωτικό και αναγωγικό ρεύμα τοποθετούνται προς την ίδια πλευρά σε σχέση με τον άξονα δυναμικού, παίρνουμε δύο καμπύλες: την οξειδωτική (ανοδική) και την αναγωγική (καθοδική). Η γραμμική περιοχή του οξειδωτικού και του αναγωγικού κλάδου αποτελεί τις περιοχές TAFEL. Επίσης, από την προβολή της τομής των δύο κλάδων, υπολογίζεται απ'ευθείας το ρεύμα διάβρωσης I_{corr} .

Τα διαγράμματα πόλωσης του σιδήρου σε όξινο και ουδέτερο περιβάλλον φαίνονται στις Σχήματα 2.1.3. και 2.1.4. αντίστοιχα.

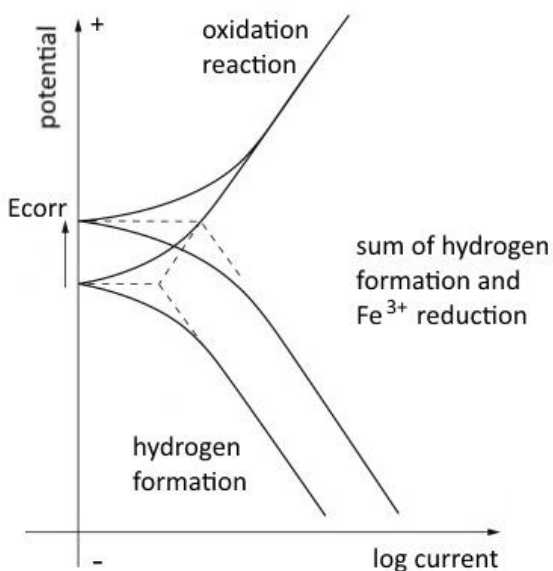


Σχήμα 2.1.3. Διάγραμμα πόλωσης λόγω της ενεργούς διάβρωσης του Fe σε διάλυμα HCl. Η μεταφορά φορτισμένων σωματιδίων στην διεπιφάνεια μετάλλου-οξέος είναι ο παράγοντας που καθορίζει τον ρυθμό διάβρωσης στο όξινο περιβάλλον [29].



Σχήμα 2.1.4. Διάγραμμα πόλωσης σε ουδέτερο περιβάλλον. Η διάβρωση επάγεται από την αναγωγή του οξυγόνου που φτάνει με διάχυση στην επιφάνεια του μετάλλου. Το OH^- που παράγεται θα προκαλέσει τις οξειδωτικές αντιδράσεις παραγωγής διαβρωτικών προϊόντων. Ο ρυθμός διάβρωσης σε αυτή την περίπτωση καθορίζεται από την ποσότητα του διαχεόμενου οξυγόνου και όχι από το είδος του μετάλλου [29].

Αν σε όξινο περιβάλλον αυξηθεί και το διαχεόμενο οξυγόνο, τότε στη διεπιφάνεια θα λάβουν χώρα δύο καθοδικές αντιδράσεις (η αναγωγή του υδρογόνου και του οξυγόνου), γεγονός το οποίο θα αυξήσει τόσο το E_{corr} , όσο και τον ρυθμό διάβρωσης (Σχήμα 2.1.5.)



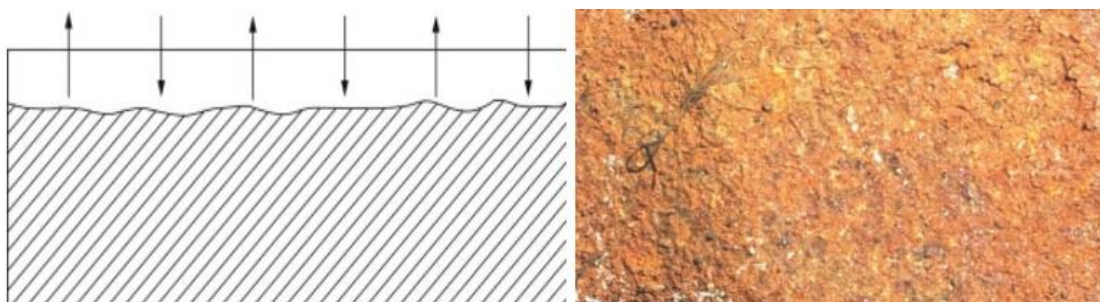
Σχήμα 2.1.5. Η επίδραση δεύτερης αναγωγικής αντίδρασης στην κάθοδο. Αν ο αγωγός βρεθεί σε όξινο περιβάλλον που εμπλουτίστηκε με οξυγόνο, τότε στην διεπιφάνεια μετάλλου-διαλύματος θα συμβούν δύο αναγωγικές αντιδράσεις που θα αυξήσουν το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} , ενώ ταυτόχρονα θα προσφέρουν στον σίδηρο της ανόδου πολλαπλούς οξειδωτικούς παράγοντες [29].

2.2. Είδη διάβρωσης

Σύμφωνα με τους Fontana και Green, η διάβρωση ταξινομείται σε 8 κατηγορίες: την ομοιόμορφη, την τοπική, τη γαλβανική, τη διάβρωση με σχισμές, τη βελονοειδή, την περικρυσταλλική, την εκλεκτική και τη μηχανική.

2.2.1. Ομοιόμορφη διάβρωση (Uniform corrosion)

Πρόκειται για γενικευμένη διάβρωση όλης της μεταλλικής επιφάνειας, λόγω της ομοιόμορφης κατανομής ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων πάνω σε αυτή. Αποτελεί τον συνηθέστερο και τον σημαντικότερο από πλευράς απώλειας βάρους, τύπο διάβρωσης. Η εκτίμηση της γενικευμένης διάβρωσης δεν δημιουργεί τεχνικές δυσκολίες, αφού μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια τόσο ο ρυθμός διάβρωσης της μεταλλικής επιφάνειας, όσο και ο χρόνος ζωής του μεταλλικού αγωγού (Σχήμα 2.2.1.).

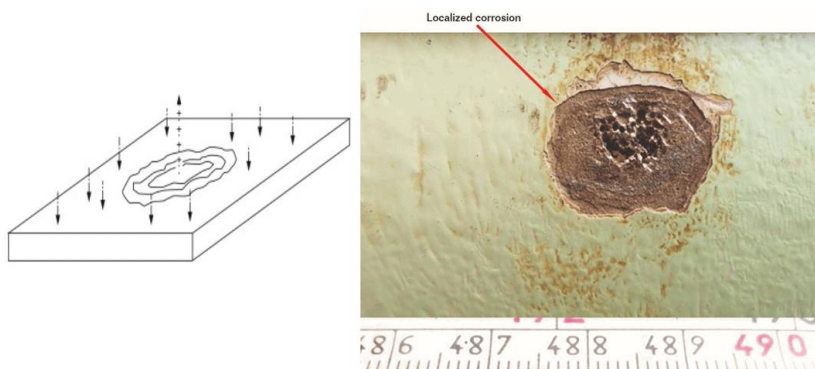


Σχήμα 2.2.1. Ομοιόμορφη διάβρωση με τα καθοδικά και τα ανοδικά ρεύματα να διανέμονται ομοιόμορφα πάνω στην μεταλλική επιφάνεια [29,30]

2.2.2. Τοπική διάβρωση (Localized corrosion)

Η προσβολή εντοπίζεται μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές της μεταλλικής επιφάνειας και σχετίζεται με τις διαφορετικές ταχύτητες διάβρωσης που επικρατούν πάνω στην επιφάνεια. Επομένως, μόνο αυτές οι πολύ συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας του μετάλλου όπου κυριαρχεί η οξείδωση (άνοδοι), περιβάλλονται από καθοδικές ζώνες αναγωγικών αντιδράσεων (Σχήμα 2.2.2.).

Σε αντίθεση με την ομοιόμορφη διάβρωση, ο ρυθμός της τοπικής διάβρωσης δεν μπορεί να προβλεφθεί. Γι' αυτό, μια τοπική προσβολή είναι ουσιαστικά μια ύπουλη διαδικασία, η οποία εξελίσσεται σε σοβαρές βλάβες (ρωγμές ή οπές) που αχρηστεύουν το αγωγίμο υλικό, άρα και τον ίδιο τον γειωτή [29]. Τα έξοδα αντικατάστασης του κατεστραμμένου γειωτή είναι μεγάλα, γιατί εκτός από το κόστος αντικατάστασης πρέπει να ληφθούν υπόψη οι επιπλέον δαπάνες εκσκαφής, τοποθέτησης, ενταφίασης αλλά και η απώλεια παραγωγικού χρόνου (αν για παράδειγμα πρόκειται για μεγάλη βιομηχανική εγκατάσταση) [31].



Σχήμα 2.2.2. Τοπική διάβρωση σε 316L ανοξείδωτο ατσάλι [29,32].

2.2.3. Γαλβανική διάβρωση ή διάβρωση επαφής (Galvanic corrosion)

Κατά την αγώγιμη επαφή δύο διαφορετικών μετάλλων σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, η διάβρωση θα αφορά αποκλειστικά και μόνο το αγενέστερο μέταλλο (Πίνακας 2.1.1.). Η ηλεκτροχημική αυτή διάβρωση ονομάζεται γαλβανική ή διάβρωση επαφής.

Η ανοδική αντίδραση λαμβάνει χώρα στο αγενέστερο μέταλλο, οπότε αυτό μετασχηματίζεται σε ιόν: $M \rightarrow M^{2+} + 2e^-$ (για δισθενές μέταλλο). (2.2.1.)

Μετά σχηματίζονται προϊόντα διάβρωσης MO ή $M(OH)_2$ που επικάθονται στην επιφάνεια του ευγενούς μετάλλου, σχηματίζοντας φιλμ παθητικοποίησης, που το προστατεύει από τη διάβρωση.

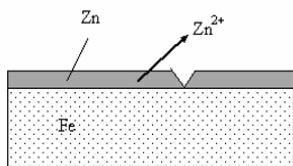
Στην ευγενή κάθοδο και σε περιβάλλον καλά αεριζόμενο με ουδέτερο ή αλκαλικό pH, τα ηλεκτρόνια που προέκυψαν από την ανοδική αντίδραση καταναλώνονται από το οξυγόνο ή το νερό της υγρασίας ως εξής:



Αν το περιβάλλον είναι όξινο τότε έχουμε σχηματισμό μόνο αερίου υδρογόνου:

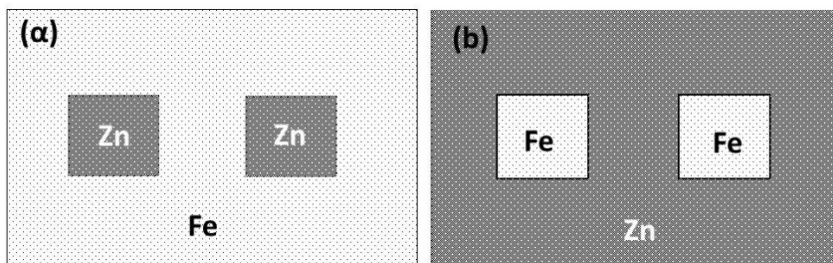


Αν και πρόκειται για διάβρωση, εντούτοις αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για την προστασία του χάλυβα πάνω στον οποίο έχει για κάποιο λόγο δημιουργηθεί ρωγμή (επιψευδαργύρωση χάλυβα-galvanized steel) (Σχήμα 2.2.3.). Θυσιάζεται δηλαδή ο Zn για να προστατευτεί ο Fe του χάλυβα.



Σχήμα 2.2.3. Γαλβανική διάβρωση. Επιψευδαργύρωση χαλβδόφυλλου. Η άνοδος του αγενέστερου Zn προστατεύει την κάθοδο του ευγενέστερου Fe. Τα προϊόντα της διάβρωσης του Zn, δηλ. ZnO και $Zn(OH)_2$, συσσωρεύονται στην περιοχή ρωγμής στον χάλυβα δημιουργώντας μια επίστρωση αυτοΐασης (self healing) [31].

Καθοριστικός παράγοντας κατά τη γαλβανική διάβρωση είναι ο λόγος επιφανείας μεταξύ ευγενούς και ενεργού αγενούς μετάλλου. Αν η επιφάνεια του δραστικού αγενούς μετάλλου είναι μικρή τότε το αγενές μέταλλο θα διαβρωθεί γρήγορα. Το αντίθετο θα συμβεί αν το αγενές μέταλλο έχει πολύ μεγάλη επιφάνεια επαφής. Η εξήγηση του φαινομένου βασίζεται στην μεγαλύτερη ή μικρότερη ανοδική πυκνότητα του ρεύματος (ένταση ανά μονάδα επιφανείας) που αναπτύσσεται κατά περίπτωση, η οποία οδηγεί αντίστοιχα σε μεγάλη ή μικρή ταχύτητα διάβρωσης (Σχήμα 2.2.4.)

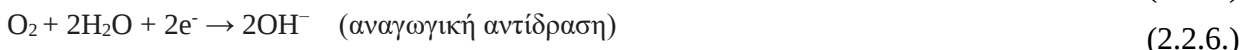
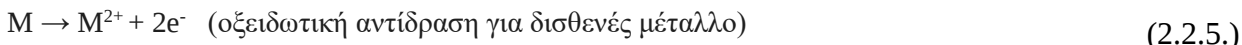


Σχήμα 2.2.4.(α) μεγάλος λόγος ευγενούς μετάλλου/αγενούς μετάλλου που συνεπάγεται ταχύτατη διάβρωση, (b) μεγάλη επιφάνεια επαφής αγενούς μετάλλου με αποτέλεσμα μικρή ταχύτητα διάβρωσης (τροποποιημένο Σχήμα από [31]).

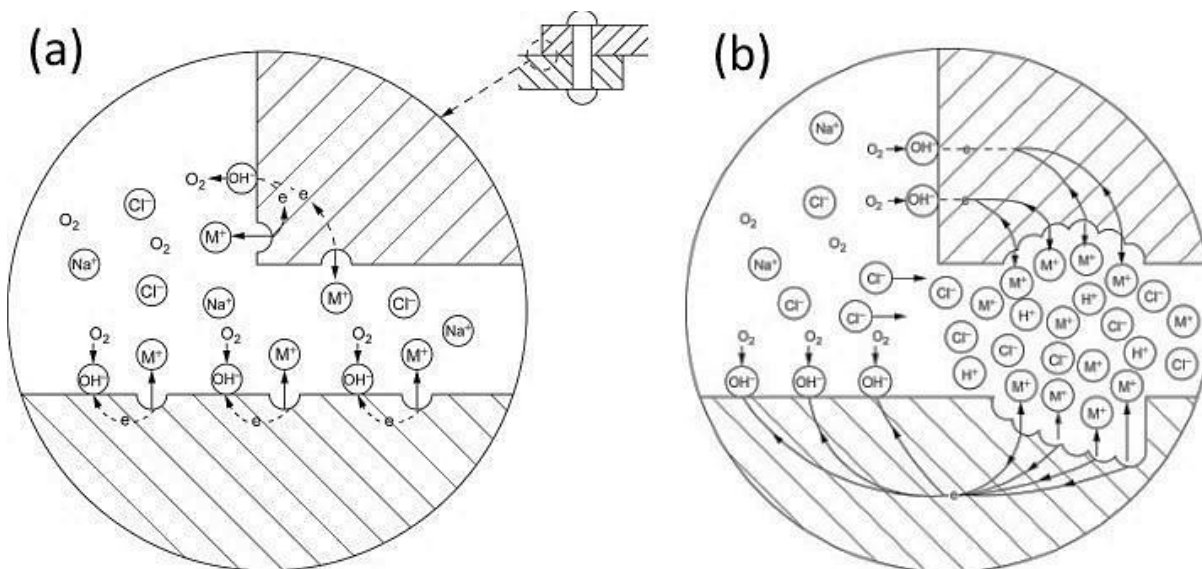
2.2.4. Διάβρωση με σχισμές ή διάβρωση διαφορικού αερισμού (Crevice corrosion) [29]

Προϋποθέσεις για την εμφάνιση αυτού του τύπου διάβρωσης είναι α) το έδαφος να έχει μεγάλη αλατότητα (π.χ. υφάλμυρο ή θαλασσινό νερό) και β) η σχισμή να είναι αρκετά φαρδιά, ώστε να μπορεί να υποδεχθεί υγρασία, αλλά και αρκετά στενή, ώστε να διασφαλίσει ένα σταθερό μέσο.

Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός με τον οποίο αναπτύσσεται η διάβρωση σε σχισμές, θεωρούμε δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια που καθλώνονται σε καλά αεριζόμενο περιβάλλον πλούσιο σε θαλασσινό νερό (pH=7). Ταυτόχρονα, λαμβάνουν χώρα δύο αντιδράσεις



Η ανοδική και καθοδική αντίδραση πραγματοποιούνται σε όλη την μεταλλική επιφάνεια των δυο ραβδών, αλλά και στις οπές που σχηματίζονται από την διάλυση του μετάλλου (Σχήμα 2.2.5.α.). Μετά από κάποιο διάστημα, επειδή το οξυγόνο που βρίσκεται βαθιά μέσα στην σχισμή δεν ανανεώνεται αλλά τελικά καταναλώνεται πλήρως, η κάθοδος παύει να παράγει υδροξύλιο. Εντούτοις, το μέταλλο συνεχίζει να διαλύεται στη σχισμή, δημιουργώντας έτσι ένα θετικά φορτισμένο περιβάλλοντα χώρο, μέσα στον οποίο εισχωρούν ιόντα Cl^- , που δημιουργήθηκαν από τη διάσπαση του $NaCl$ του θαλασσινού νερού ($NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$) (Σχήμα 2.2.5.β.).



Σχήμα 2.2.5. Διάβρωση σε σχισμή: (α) ανοδικές και καθοδικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε όλη την επιφάνεια αλλά και στις οπές των δύο μετάλλων (διαγραμμισμένα τμήματα) και (β) η έλλειψη οξυγόνου και η συνένωση ιόντων των μετάλλων με ιόντα χλωρίου στον περιβάλλοντα χώρο των οπών επεκτείνει τοπικά τη διάβρωση στη σχισμή [29].

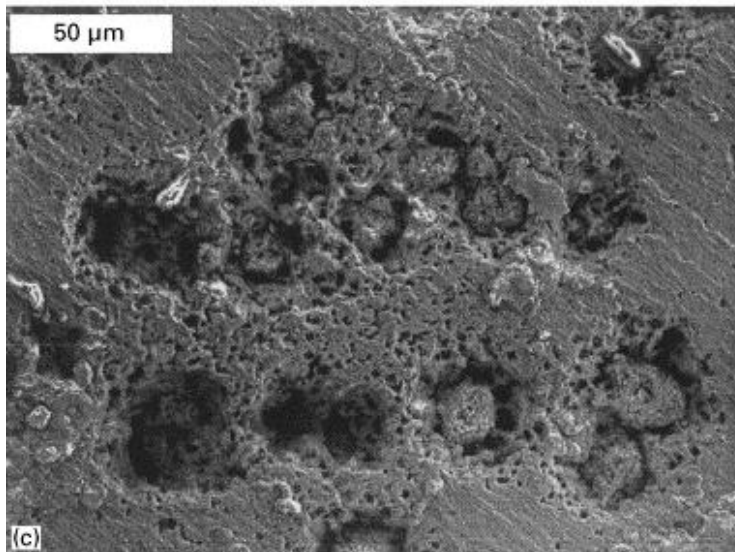
Η αντίδραση ιόντων μετάλλου και χλωρίου στη σχισμή οδηγεί σε ίζημα υδροξειδίου του μετάλλου και υδροχλωρικό οξύ



Η διάβρωση σε σχισμή είναι επομένως μια αυτοκαταλυτική διαδικασία που επεκτείνει τη βλάβη. Για άγνωστους λόγους, τα ιόντα Cl^- και H^+ επιταχύνουν το ρυθμό ανοδικής διάλυσης στα μέταλλα και τα κράματα. Συμπερασματικά, οι θέσεις της μεταλλικής επιφάνειας με πτωχή προσφορά οξυγόνου καθίστανται άνοδοι και διαβρώνονται. Για το λόγο αυτό, στις θέσεις όπου η μεταλλική επιφάνεια του αγωγού καλύπτεται από λάσπη, λύματα, άλγη ή και διαβρωτικά προϊόντα, παρεμποδίζεται η διάχυση οξυγόνου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τοπικής αλλά και επεκτεινόμενης διάβρωσης.

2.2.5. Βελονοειδής διάβρωση ή διάβρωση με μορφή στιγμάτων/οπών (Pitting corrosion) [29]

Αποτελεί την πιο επιβλαβή μορφή τοπικής διάβρωσης, λόγω της ιδιότητάς της να προκαλεί οπές στο μέταλλο. Οι οπές αυτές δύσκολα γίνονται αντιληπτές επειδή συνήθως έχουν μικρή διάμετρο και συχνά καλύπτονται από διαβρωτικά προϊόντα (Σχήμα 2.2.6.). Πρακτικά, ο γειωτής που παρουσιάζει βελονοειδή διάβρωση, θα εμφανίσει κάποια στιγμή ρήξη εν αιθρία. Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι η αδυναμία προσομοίωσης μιας βελονοειδούς διάβρωσης στο εργαστήριο λόγω του μεγάλου χρόνου επώασης (χρονικό διάστημα από την έναρξη της καταπόνησης μέχρι τη στιγμή που γίνεται ορατή η οπή).

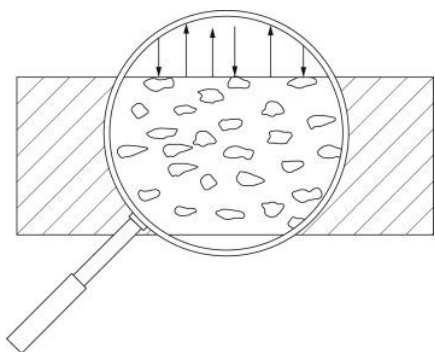


Σχήμα 2.2.6. Βελονοειδής διάβρωση ανθρακούχου χάλυβα με το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων [33].

Ειδικά για τους γειωτές έχουμε:

- τη βελονοειδή διάβρωση του ανοξειδωτού χάλυβα από διαβρωτικά ιόντα (halide ions), κυρίως χλωρίδια. Περιβάλλον υψηλής περιεκτικότητας σε ιόντα χλωρίου (π.χ. μέσο με υφάλμυρο ή θαλασσινό νερό) έχει την τάση να δημιουργεί και να επεκτείνει τις οπές σε αγωγό από ανοξειδωτό χάλυβα. Συγκεκριμένα, το θετικό φορτίο της ανόδου που δημιουργείται από τη διάλυση του μετάλλου προσελκύει ιόντα χλωρίου από το περιβάλλον μέσο. Ακολουθεί η ίδια αυτοκαταλυτική διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως στην διάβρωση σε σχισμή. Μολονότι τα διαβρωτικά προϊόντα δημιουργούν ένα προστατευτικό φιλμ στην επιφάνεια του χάλυβα σε μια προσπάθεια αυτοϊασης από την προσβολή, εντούτοις τα ιόντα χλωρίου μπορούν να διεισδύσουν μέσα από την προστατευτική στιβάδα και να παρεμποδίσουν την δημιουργία της επικάλυψης (οι εξισώσεις που διέπουν τη διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα περιγράφονται αναλυτικά στο Σχήμα 2.3.1.)
- τη βελονοειδή διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα λόγω της καθοδικής αναγωγής του οξυγόνου. Εδώ, το αίτιο είναι η πλούσια περιεκτικότητα του περιβάλλοντος μέσου σε οξυγόνο. Η επιφάνεια του ανθρακούχου χάλυβα παρουσιάζει περιοχικές δομικές μικροδιαφορές, λόγω α) της διαφορετικής περιεκτικότητας σε άνθρακα, β) της θερμικής επεξεργασίας του υλικού και γ) τυχόν μηχανικών παραμορφώσεων. Συνέπεια αυτών είναι η δημιουργία μικρών ανοδικών και καθοδικών περιοχών που μέσα από μια σειρά αντιδράσεων οδηγούν στη δημιουργία σκουριάς, σπηλαίων και τελικά οπών (οι εξισώσεις που διέπουν τη διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα περιγράφονται αναλυτικά στο Σχήμα 2.3.1.)

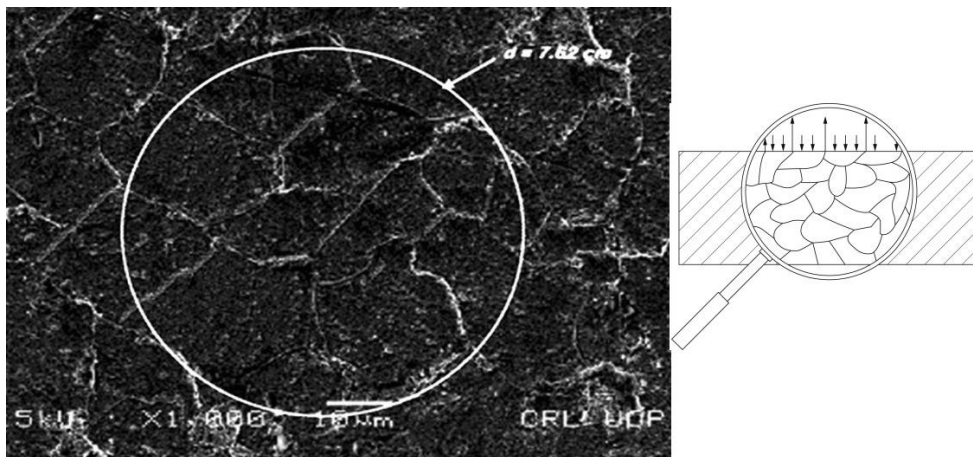
2.2.6. Εκλεκτική ή επιλεκτική διάβρωση [29]



Σχήμα 2.2.7. Επιλεκτική διάβρωση [29].

Σε ορισμένα κράματα μετάλλων και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, το αγενέστερο συστατικό υφίσταται επιλεκτική διάβρωση, εν αντιθέσει με το ευγενέστερο στοιχείο, το οποίο εμφανίζεται ως μια πορώδης, μηχανικά εξασθενημένη μάζα. Αυτή η διάβρωση μπορεί να μην γίνει αντιληπτή με γυμνό μάτι, είναι όμως ιδιαίτερος επιβλαβής γιατί μπορεί να προκαλέσει διάτρηση ή και κάταγμα του υλικού. Ένας ιδιαίτερος τύπος εκλεκτικής προσβολής είναι η περικρυσταλλική διάβρωση.

2.2.7. Περικρυσταλλική διάβρωση ή αποσάθρωση των ορίων των κόκκων (Intergranular corrosion)



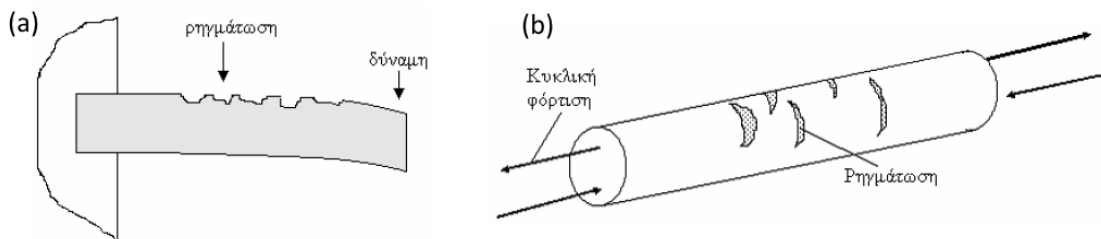
Σχήμα 2.2.8. Περικρυσταλλική διάβρωση ανθρακούχου χάλυβα [29,34]

Όλα τα μέταλλα και τα κράματα αποτελούνται από πολλούς μικρούς κρυστάλλους που ανάλογα με το μέγεθός τους διακρίνονται στους κρυσταλλίτες (διαμέτρου 0.1–10 μm) και στους κόκκους (διαμέτρου 10^{-3} – 1 cm). Ο αγωγός δομείται στην πραγματικότητα από κόκκους (grains), τοποθετημένους ο ένας δίπλα στον άλλον. Μικρές περιοχές στα όρια των κόκκων γίνονται πιο ενεργές συγκριτικά με το εσωτερικό σώμα των κόκκων. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση χάλυβα χρωμίου-νικελίου, όπου η μικρότερη συγκέντρωση του χρωμίου στα όρια συγκριτικά με το σώμα των κόκκων, δημιουργεί ανόδους που προκαλούν τη διάλυση του υλικού στα όρια [31]. Παρότι η προσβολή είναι μικρής έκτασης, εντούτοις η απώλεια της συνοχής των κρυστάλλων προκαλεί επιφανειακή αποσάθρωση. Περικρυσταλλική διάβρωση απαντάται σε γειωτές με συγκολλούμενα μέρη (π.χ. πλέγματα). Έχει βρεθεί ότι περιοχές έως και 5 mm από το σημείο της συγκόλλησης υφίστανται περικρυσταλλική διάβρωση [29].

2.2.8. Διάβρωση λόγω μηχανικής καταπόνησης (Stress corrosion)

Η διάβρωση από μηχανική καταπόνηση οφείλεται στον συνδυασμό δύο μηχανισμών: α) της ηλεκτροχημικής διάβρωσης λόγω αλληλεπίδρασης μετάλλου και περιβάλλοντος μέσου και β) της εφαρμογής πάνω στο υλικό μιας σταθερής προϋπάρχουσας ή εξωτερικής μηχανικής τάσης (Σχήμα 2.2.9.a.). Οποιοσδήποτε από τους δύο μηχανισμούς μπορεί να προηγηθεί. Σε κάθε περίπτωση, πάνω στο υλικό αναπτύσσονται ρήγματα (cracks) κάθετα προς τη διεύθυνση των μηχανικών τάσεων. Σημαντικά παραδείγματα μηχανικής καταπόνησης είναι: α) η καυστική διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα, β) η ρηγματώση του ανοξείδωτου χάλυβα κατόπιν καταπόνησης σε περιβάλλον υψηλής αλατότητας (χλωριδιακό stress), γ) η εποχιακή ρηγματώση (season cracking) κραμάτων (συνήθως Cu-Zn) εξαιτίας εποχιακής αύξησης της υγρασίας στο περιβάλλον μέσο, δ) η ψαθυρή θραύση ενός ηλεκτροδίου γείωσης ενταφιασμένου σε περιβάλλον με υγρασία και H_2S , που ταυτόχρονα υφίσταται εφελκυσμό (κατάσταση μηχανικής καταπόνησης, όπου στον άξονα του αγωγού ασκούνται δύο ίσες και αντίρροπες δυνάμεις, ικανές να προκαλέσουν αξονικές παραμορφώσεις, δηλαδή επιμηκύνσεις, βραχύνσεις και μείωση της αρχικής διατομής) [29,31].

Μια σημαντική υποκατηγορία μηχανικής διάβρωσης είναι η διάβρωση κόπωσης, όπου η μηχανική φόρτιση επιβάλλεται κυκλικά (Σχήμα 2.2.9.b.). Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα της κυκλικής κόπωσης τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός διάβρωσης και τόσο πιο σοβαρή η ρηγματώση. Αν μια τέτοια κατάσταση συμβεί σε διαβρωτικό περιβάλλον, μειώνεται η αντοχή του υλικού. Οι ρωγμές δεν είναι διακλαδιζόμενες, αλλά ενδοκρυσταλλικές και όταν τελικά ο αγωγός υποστεί ρήξη, η καταγματική επιφάνεια εμφανίζει μία τραχιά επιφάνεια στο ψαθυρό ελεύθερο άκρο και μια λεία περιοχή παθητικού φιλμ από διαβρωτικά προϊόντα. Αν η θραύση του αγωγού οφείλεται αμιγώς σε κόπωση, η λεία επιφάνεια γυαλίζει [29].



Σχήμα 2.2.9. (a) Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση, (b) Διάβρωση κόπωσης [31].

2.3. Υλικό κατασκευής των γειωτών και διάβρωση

Επειδή ο γειωτής εμφολεύεται συχνά σε τραχύ έδαφος πολύπλοκης σύστασης, προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός λειτουργίας του πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες [35]:

1. Αγωγιμότητα: Το ηλεκτρόδιο γείωσης πρέπει να έχει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ώστε να επιτευχθεί η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό αλλά και η εξισορρόπηση τάσης (voltage equalization).
2. Ανθεκτικότητα στη διάβρωση: Ο γειωτής τοποθετείται για μεγάλο χρονικό διάστημα κάτω από το έδαφος σε περιβάλλον με πολύπλοκες φυσικοχημικές ιδιότητες, οπότε η διάβρωση που υφίσταται σε αυτές τις συνθήκες επηρεάζει άμεσα την επάρκειά του αλλά και το χρόνο ζωής του.
3. Μηχανικές ιδιότητες. Οι αγωγοί γείωσης είναι οριζόντιοι ή κάθετοι. Όταν ένας οριζόντιος αγωγός θαφτεί μέσα στο έδαφος, υφίσταται πίεση από τα υπερκείμενα στρώματα. Οι κάθετοι αγωγοί υφίστανται πλήξη όταν εμπύκνυνται βαθιά στο χώμα. Γι' αυτό ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης απαιτεί ένα υλικό μεγάλης μηχανικής αντοχής, ικανής να διατηρήσει το σχήμα και τη δομή του.
4. Θερμική σταθερότητα: Όταν το ηλεκτρόδιο γείωσης πληγεί από κεραυνό ή όταν συμβεί κάποιο σοβαρό βραχυκύκλωμα, ένα υπερβολικά μεγάλο ρεύμα περνά ακαριαία μέσα από αυτό, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του. Επομένως μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική η

οποία διαχέεται στον περιβάλλοντα χώρο του αγωγού. Γι' αυτό η θερμική σταθερότητα αποτελεί καίριο χαρακτηριστικό του υλικού κατασκευής.

2.3.1. Χαλκός (Copper)

Αποτελεί υλικό εκλογής των αγωγών γείωσης λόγω της υψηλής ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και της υψηλής αντίστασης στη διάβρωση. Συγκεκριμένα, η ειδική του χαλκού είναι $1.75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, δηλ. το 1/8 της ειδικής αντίστασης του χάλυβα, διασφαλίζοντας έτσι την επιτυχή εκφόρτιση του ρεύματος σφάλματος προς τη γη. Επιπλέον σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο και νερό, η επιφάνεια του χαλκού διαβρώνεται ομοιόμορφα, ενώ τα προϊόντα της διάβρωσης CuO , Cu_2O , and $Cu_2(OH)_2CO_3$ εμφανίζουν υψηλή ειδική αντίσταση [35]. Ειδικά ο $Cu_2(OH)_2CO_3$ προσροφάται ισχυρά στην επιφάνεια του χαλκού σχηματίζοντας ένα πυκνό στρώμα στην άνω επιφάνεια του χάλκινου αγωγού που αποτρέπει τόσο τη διάχυση ιόντων από το έδαφος προς το υπόστρωμα, όσο και την διάχυση των διαβρωτικών προϊόντων προς το έδαφος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η περαιτέρω διάβρωση του εσωτερικού χάλκινου αγωγού, γεγονός που του διασφαλίζει και μεγάλο χρόνο ζωής. Ο ρυθμός διάβρωσης του χαλκού στο έδαφος είναι 0.03-0.2 mm/έτος, τιμή 10-30 φορές κάτω από αυτή του ανθρακούχου χάλυβα και 3 φορές κάτω από αυτή του γαλβανισμένου χάλυβα [28]. Επιπλέον, επειδή το σημείο τήξης του χαλκού είναι 1085 °C, ο χαλκός διασφαλίζει εξαιρετική θερμική σταθερότητα.

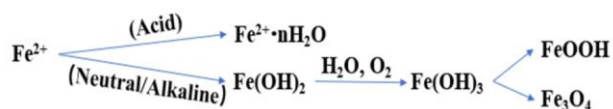
Παρά τα πολύ σημαντικά του πλεονεκτήματα, δεν αποτελεί την ιδανική λύση στα συστήματα γείωσης. Τα κοινά χαλκού είναι λίγα και η εξόρυξή του δαπανηρή, το οποίο μεταφράζεται σε υψηλό αγοραστικό κόστος (ακόμη και 6 φορές πιο πάνω από το χάλυβα). Επιπλέον, βρέθηκε ότι η υπεροχή του χαλκού έναντι του ανθρακούχου και του γαλβανισμένου χάλυβα όσον αφορά την αντίσταση στην διάβρωση ισχύει για ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη. Όμως σε όξινα εδάφη που περιέχουν θειούχες ενώσεις, παρατηρήθηκε ότι όχι μόνο μειώθηκε η αντίσταση του χαλκού στη διάβρωση αλλά και ότι επιταχύνθηκαν οι διαδικασίες διάβρωσης [36]. Επίσης, ο χάλκινος γειωτής έρχεται κάποιες φορές σε επαφή με υπόγειες χαλύβδινες κατασκευές και εξαιτίας του φαινομένου της γαλβανικής διάβρωσης (Κεφάλαιο 2.2.3) μπορεί να προκαλέσει ο ίδιος ανεπιθύμητη διάβρωση/καταστροφή των χαλύβδινων στοιχείων. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η μόλυνση του περιβάλλοντος. Κατά τη διάβρωση του χαλκού στο υπέδαφος, απελευθερώνονται ιόντα από ένα βαρύ μέταλλο στο χώμα όσο και τον υδροφόρο ορίζοντα, γεγονός που καθίστανται επιζήμιο για τη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής αλλά και για τον άνθρωπο μέσω της τροφικής αλυσίδας.

2.3.2. Ανθρακούχος χάλυβας (Carbon steel)

Χρησιμοποιείται ως υλικό συστημάτων γείωσης εξαιτίας των πολλαπλών πλεονεκτημάτων του όπως είναι α) η καλή του απόδοση, β) η μεγάλη του αντοχή κατά τον εφελκυσμό (tensile strength) όπου υφίσταται πολλές φορές υψηλές δυνάμεις και πιέσεις, γ) η ευκολία κατασκευής και συγκόλλησης προς σχηματισμό αγωγών διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, δ) η υψηλή επάρκεια στα υλικά παρασκευής του και ε) η οικονομικότερη τιμή του σε σχέση με το χαλκό.

Εντούτοις δεν αποτελεί ιδανική λύση στα συστήματα γείωσης γιατί α) είναι λιγότερο ανθεκτικό στη διάβρωση συγκριτικά με τον χαλκό και τον γαλβανισμένο χάλυβα [37], β) παρουσιάζει υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση (electrical resistivity), η οποία αυξάνει την αντίσταση γείωσης (grounding resistance), παρεμποδίζοντας έτσι τη βέλτιστη εκφόρτιση του ρεύματος σφάλματος προς τη γη, γ) εμφανίζει μικρότερη θερμική σταθερότητα σε σχέση με τον χαλκό, αφού η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του υλικού είναι γύρω στους 400 °C και δ) η διαδικασία διάβρωσης επηρεάζεται από διάφορες εδαφικές παραμέτρους, όπως είναι τα ευδιάλυτα άλατα, το pH, η περιεκτικότητα του νερού, η συγκέντρωση του οξυγόνου και η ειδική αντίσταση [38]. Σε συνθήκες χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο, μικροβιακοί παράγοντες φαίνεται ότι επιταχύνουν περισσότερο την φθορά του υλικού. Επιπλέον, αν το σύστημα γείωσης αποτελείται από συγκολλημένα τμήματα, τότε το σημείο της συγκόλλησης είναι περισσότερο επιρρεπές στην διάβρωση λόγω της ανομοιογένειας του υλικού σε αυτή την περιοχή.

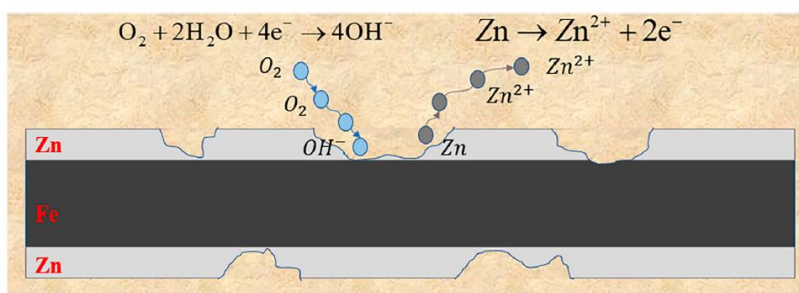
Κύριο χαρακτηριστικό του ανθρακούχου χάλυβα είναι η δημιουργία εστιών τοπικής διάβρωσης εν είδει μικροκυψελών (corrosion microcells) πάνω στο σώμα του γειωτή, οι οποίες καθιστούν εύθραυστο το υλικό. Ο αγωγός μπορεί να σπάσει στα σημεία όπου υπάρχουν οι εστίες αυτές, καθιστώντας τη γείωση ανενεργή, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας από μεγάλα ρεύματα σφάλματος.



Σχήμα 2.3.1. Μηχανισμός τοπικής διάβρωσης στον ανθρακούχο χάλυβα [28].

2.3.3. Γαλβανισμένος χάλυβας (Galvanized steel)

Στην πραγματικότητα πρόκειται για ανθρακούχο χάλυβα, επικαλυπτόμενο από στρώμα ψευδαργύρου. Η απλή παρασκευή του, η άριστη αγωγιμότητα και το χαμηλό κόστος, το καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλές ως υλικό των συστημάτων γείωσης. Τα δύο μέταλλα βρίσκονται σε αγωγή επαφή, οπότε εξαιτίας της γαλβανικής διάβρωσης, θα διαβρωθεί αποκλειστικά το αγενές μέταλλο-Zn (άνοδος), προστατεύοντας το ευγενέστερο μέταλλο-Fe (κάθοδος). Στον ψευδάργυρο τα προϊόντα της διάβρωσης ZnO , Zn(OH)_2 συσσωρεύονται στην περιοχή της προσβολής. Γι'αυτό η επιψευδαργύρωση χαρακτηρίζεται ως αυτοεπουλώμενη επικάλυψη (self healing) (Σχήμα 2.3.2.) [31]. Όμως, η προστασία που παρέχει η επιψευδαργύρωση εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες. Σε ισχυρώς όξινα ή αλκαλικά εδάφη φαίνεται ότι η αντοχή του γαλβανισμένου χάλυβα είναι μικρότερη και από τον χαλκό και από τον ανθρακούχο χάλυβα [35]. Επειδή το στρώμα του Zn που περιβάλλει τον χάλυβα είναι συνήθως λεπτό (από 0.05 ως 0.08 mm), η διέλευση ενός ισχυρού ρεύματος σφάλματος μέσα από τον γειωτή και ενός ρεύματος διαφυγής (stray current) στο έδαφος θα το διαβρώσει ακόμη περισσότερο. Με την πάροδο του χρόνου αγωγός απογυμνώνεται από την Zn-επικάλυψη και μετατρέπεται σε γειωτή ανθρακούχου χάλυβα με τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 2.3.2. Μηχανισμός τοπικής διάβρωσης στον γαλβανισμένο χάλυβα [28].

2.3.4. Επιχαλκωμένος χάλυβας (copper-plated steel)

Με ειδική επεξεργασία λαμβάνει χώρα η επίστρωση συρμάτων χάλυβα με ένα λεπτό στρώμα χαλκού. Ο αγωγός αυτός αποτελεί μια εναλλακτική λύση του αμιγώς χάλκινου αγωγού, ο οποίος συνδυάζει το χαμηλότερο κόστος με τα πλεονεκτήματα του χαλκού. Για το λόγο αυτό, ένα ηλεκτρόδιο από επιχαλκωμένο χάλυβα έχει ανώτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα και μηχανική αντοχή (αντοχή εφελκυσμού πάνω από 600 MPa) σε σχέση με τον ανθρακούχο και τον γαλβανισμένο χάλυβα. Επιπλέον, σε εδάφη με αλκαλικό χαρακτήρα, τα διαβρωτικά προϊόντα του χαλκού και κυρίως το στρώμα $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ δημιουργούν ένα παθητικό φιλμ που προσροφάται ισχυρά στην επιφάνεια του χαλύβδινου υποστρώματος, προσδίδοντάς του μηχανική αντοχή και υψηλή αντίσταση στη διάβρωση.

2.3.5. Ανοξειδωτος χάλυβας

Σπάνια χρησιμοποιούνται γειωτές από ανοξειδωτο χάλυβα. Λόγω της ύπαρξης χρωμίου στο υλικό, το δυναμικό του ηλεκτροδίου μπορεί να μεταβληθεί από αρνητικό σε θετικό, γεγονός το οποίο προσδίδει στον αγωγό μια καλή αντίσταση στη διάβρωση. Εντούτοις, σε εδάφη με κακή διαπερατότητα στον αέρα, εμφανίζει εστιακές διαβρώσεις, που επιδεινώνονται σε εδάφη πλούσια σε Cl^- , SO_4^{2-} και αποικίες μικροβίων [35].

Για να αυξηθεί η αντοχή του υλικού χρησιμοποιείται ανοξειδωτος χάλυβας υψηλού κράματος που εκτός από το χρώμιο εμπεριέχει νικέλιο και κοβάλτιο, γεγονός που αυξάνει το κόστος έναντι άλλων τύπων χάλυβα, αλλά αυξάνει και την ειδική ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζοντας έτσι την απόδοση στην εκφόρτιση ενός ρεύματος σφάλματος.

Στον Πίνακα 2.3.1. απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των κυριότερων υλικών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γείωσης αναφορικά με την απόδοση, το κόστος των και το χρόνο ζωής τους.

Υλικό	Κόστος (Κινεζικό Γουανγκ/τόνο) 1 CNY = 0.13 €	Αντίσταση διάβρωσης	Χρόνος ζωής (έτη)
Ανθρακούχος χάλυβας	0.35	Χαμηλή	< 10
Γαλβανισμένος χάλυβας	0.5	Χαμηλή	10 - 15
Επιχαλκωμένος χάλυβας	2.5	Καλή σε ουδέτερο/αλκαλικό περιβάλλον, πτωχή σε όξινο περιβάλλον	30-50
Χαλκός περιεκτικότητας άνω των 99.9%	6.0	Εξαιρετική σε ουδέτερο/αλκαλικό περιβάλλον, μειωμένη σε όξινο περιβάλλον	50

Πίνακας 2.3.1. Σύγκριση μεταξύ των κυριότερων υλικών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα γείωσης αναφορικά με την απόδοση, το κόστος των και το χρόνο ζωής τους.

2.4. Ηλεκτροχημική διάβρωση [28]

Αποτελεί τον σημαντικότερο μηχανισμό διάβρωσης. Λόγω των περίπλοκων φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους, το δυναμικό κάθε τμήματος του υλικού γείωσης που είναι θαμμένο μέσα στο έδαφος είναι διαφορετικό, δημιουργώντας διαφορά δυναμικού. Τα μέρη του γειωτή με τα διαφορετικά δυναμικά σχηματίζουν έναν αγώγιμο βρόγχο μέσα στο διαβρωτικό μέσο. Η διάβρωση των μετάλλων είναι κυρίως μια ηλεκτροχημική διαδικασία που αφορά δράσεις μεταξύ ιόντων και ηλεκτρονίων και περιλαμβάνει μία οξειδωτική αντίδραση (αντίδραση ανόδου) και μια αναγωγική αντίδραση (αντίδραση καθόδου) που συμβαίνουν πάντα ταυτόχρονα και με τον ίδιο ρυθμό, ώστε να μην συσσωρεύεται φορτίο πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου.

Ανοδική αντίδραση

Αφορά τη διάλυση μετάλλου του αγωγού με ταυτόχρονη απελευθέρωση ηλεκτρονίων ή/και την μετατροπή του σε αδιάλυτες στερεές ενώσεις που εναποτίθενται στην επιφάνεια του μετάλλου και δημιουργούν τη διάβρωση.

Ανθρακούχος χάλυβας

Η ανοδική αντίδραση είναι η τυπική αντίδραση οξείδωσης του σιδήρου



Σε ισχυρώς όξινο έδαφος, ο σίδηρος διαλύεται στην υγρασία σχηματίζοντας δισθενή και τρισθενή ιόντα Fe^{2+} και Fe^{3+} , αντίστοιχα. Όμως, σε ουδέτερο και αλκαλικό έδαφος, ο Fe^{2+} αντιδρά με το OH^- και το O_2 του εδάφους προς σχηματισμό αδιάλυτων υδροξειδίων:



Το $\text{Fe}(\text{OH})_3$ είναι ασταθές και στα περισσότερα εδάφη μετασχηματίζεται σε σταθερά διαβρωτικά προϊόντα σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:

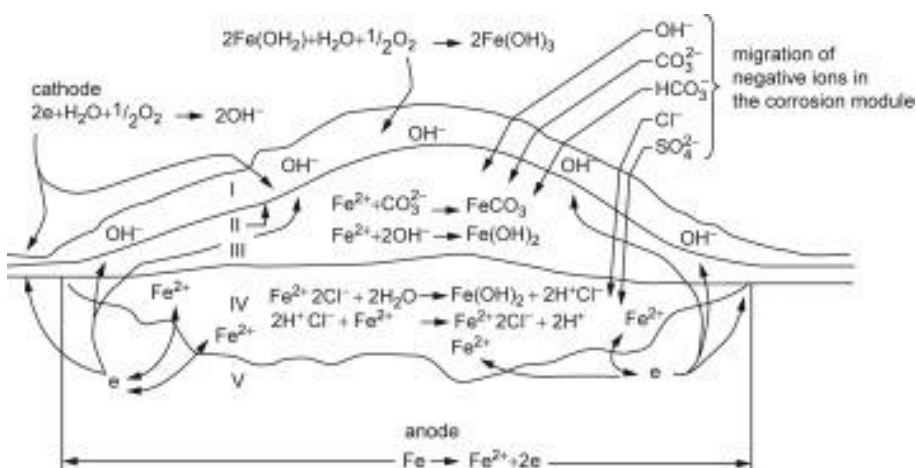


Τελικά, πάνω στον ανθρακούχο χάλυβα σχηματίζεται ένα στρώμα σκουριάς από $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_2$ (χρώματος ανοιχτό πράσινο-μαύρο) και ένα επιπλέον στρώμα σκουριάς από $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3$ (χρώματος κόκκινο-καφέ). Μεταξύ των δύο βρίσκεται μια περιοχή από μαύρο ένυδρο μαγνητίτη ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Τα σύμπλοκα του πολυστρωματικού αυτού φιλμ σκουριάς είναι δυσδιάλυτα και δρουν προστατευτικά, αφού παρεμποδίζοντας τη διάχυση του οξυγόνου στην εσωτερική μήτρα του Fe μειώνουν τον ρυθμό διάβρωσης (παθητικότητα).

Το δισθενές κατιόν του σιδήρου αντιδρά πολλές φορές με ανιόντα του εδάφους όπως είναι το HCO_3^- , το CO_3^{2-} , το Cl^- , το SO_4^{2-} και το S_2^- προς σχηματισμό αδιάλυτων διαβρωτικών προϊόντων:



Κάτω από τη σκουριά θα δημιουργηθούν περιοχές, όπου το οξυγόνο απουσιάζει εντελώς. Ελλείψει οξυγόνου ξεκινάει μια νέα διαβρωτική διαδικασία τύπου διαφορικού αερισμού, όπου το θετικό φορτίο από τη συνεχιζόμενη διάλυση του Fe προσελκύει τα αρνητικά ιόντα του περιβάλλοντος μέσου, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό σπηλαίων (tubercles) και τελικά οπών (βελονοειδής διάβρωση) (Σχήμα 2.4.1.).



Σχήμα 2.4.1. Σχηματισμός σπηλαίου (tubercle). Διακρίνονται: I. ένας εύθραυστος εξωτερικός φλοιός αιματίτη $\text{Fe}(\text{OH})_3$, καρβονικών και θειικών ενώσεων, ακαθαρσιών και χώματος, II. ένα εύθρυπτο μαύρο εσωτερικό λεπτό στρώμα μαγνητίτη Fe_3O_4 , III. ένας εύθραυστος πυρήνας από $\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeCO_3 , θειικές και φωσφορικές ενώσεις, IV. μια κοιλότητα γεμάτη με υγρό απ' την οποία απουσιάζει εντελώς το οξυγόνο, ενώ επικρατεί όξινο περιβάλλον από ιόντα Cl^- , που αντιδρώντας με το διαλυμένο Fe^{2+} οδηγεί στο σχηματισμό δυσδιάλυτου FeCl_2 και HCl . Τα ιόντα Cl^- αποτρέπουν την επικάλυψη του φιλμ αιματίτη και μαγνητίτη πάνω στην μεταλλική επιφάνεια, V: η περιοχή ανόδου όπου ο σίδηρος διαλύεται σε Fe^{2+} [29].

Γαλβανισμένος χάλυβας

Η ανοδική αντίδραση αφορά την οξείδωση της ψευδαργυρικής επίστρωσης που επενδύει εξωτερικά τον χάλυβα:



Ο Zn^{2+} στη συνέχεια θα αντιδράσει με το OH^- του εδάφους προς σχηματισμό αδιάλυτων υδροξειδίων:



Χαλκός

Ο χαλκός υφίσταται ομοιόμορφη διάβρωση. Η ανοδική αντίδραση έχει ως εξής:



Πολλές φορές το Cu_2O αντιδρά με το O_2 , το H_2O και το CO_2 του περιβάλλοντος χώρου ως εξής:



Αν στο έδαφος υπάρχουν και ιόντα χλωρίου Cl^- θα λάβει χώρα και η αντίδραση:



Καθοδική αντίδραση

Η καθοδική αντίδραση είναι αντίδραση που αφορά το μέσο στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός. Πρόκειται για την αναγωγική αντίδραση, όπου δεσμεύονται τα ηλεκτρόνια που παρήχθησαν κατά την ανοδική διάλυση του μετάλλου.

Οι αναγωγικές αντιδράσεις συχνά είναι περισσότερες από μία και περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες:

- σε ισχυρά όξινο έδαφος, πρωτοστατεί η έκλυση αερίου υδρογόνου
$$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow \quad (2.4.16.)$$
- αναλόγως του pH του περιβάλλοντος χώρου, το οξυγόνο ανάγεται σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις
 - ο ουδέτερο και αλκαλικό pH: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^- \quad (2.4.17.)$
 - ο όξινο pH: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} \quad (2.4.18.)$

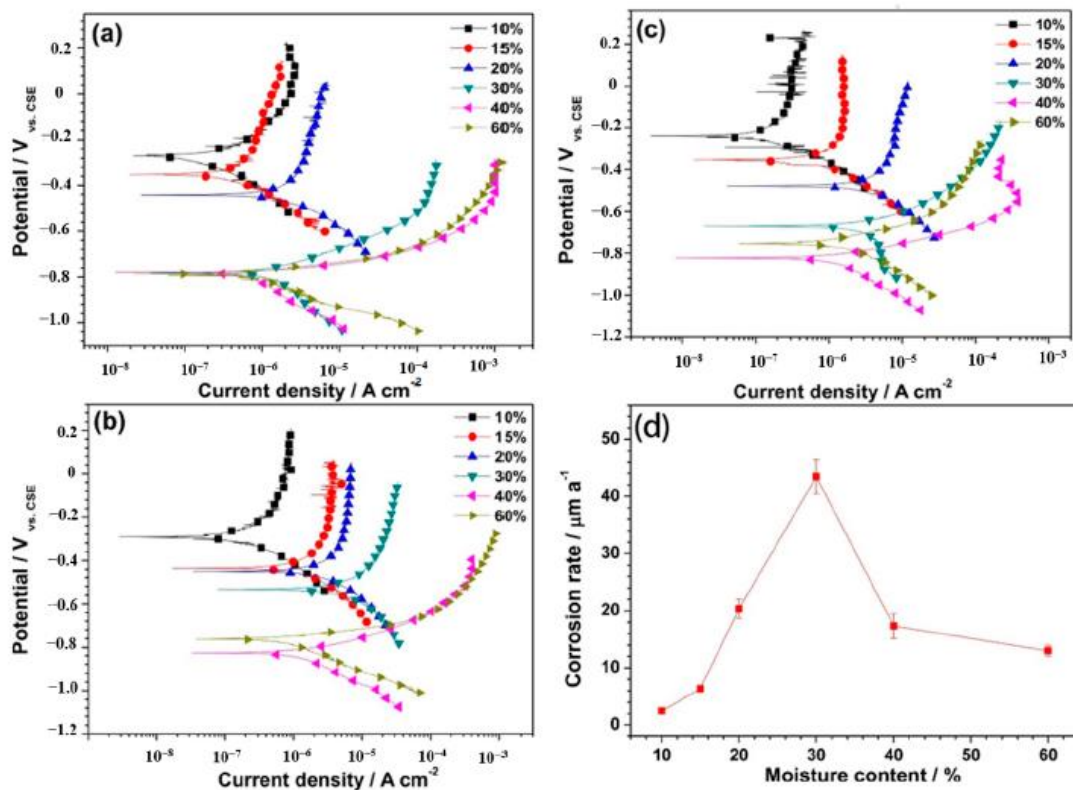
Πρέπει εδώ να τονιστεί, ότι καθώς προχωρά η διαβρωτική διαδικασία, ακόμη και το όξινο περιβάλλον τείνει να γίνει αλκαλικό, οπότε η σχέση (2.4.17.) αποτελεί ουσιαστικά τη μόνη αναγωγική διαβρωτική αντίδραση του O_2 .

- αντιδράσεις διάβρωσης από θειοαναγωγικά αναερόβια βακτήρια που ενδημούν στο χώμα που θάφτηκε το ηλεκτρόδιο:
$$\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 8\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{OH}^- \quad (2.4.19.)$$

2.5. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των υπογείων συστημάτων γείωσης [28]

2.5.1. Υγρασία

Η υγρασία παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην ηλεκτροχημική διάβρωση ενός γειωτή, αφού προσφέρει το ηλεκτρολυτικό αγωγίμο περιβάλλον που χρειάζεται το γαλβανικό στοιχείο διάβρωσης. Η μεταβολή της περιεκτικότητας του εδάφους στο νερό επηρεάζει τις φυσικοχημικές του ιδιότητες, γεγονός άμεσα συνυφασμένο με τον ρυθμό διάβρωσης του αγωγού. Έχει βρεθεί, ότι ο ρυθμός της διάβρωσης του αγωγού γείωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται και το ποσοστό υγρασίας του εδάφους. Όταν όμως, η υγρασία φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή, κάθε περαιτέρω αύξησή της, θα οδηγήσει σε μείωση του ρυθμού διάβρωσης. Αυτό συμβαίνει, γιατί στην κρίσιμη τιμή, όπου μεγιστοποιείται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό έχουμε ταυτόχρονα και βελτιστοποίηση της διάχυσης του O_2 προς την μεταλλική επιφάνεια. Από εκεί και πέρα, ευδιάλυτα άλατα κορρένουν το έδαφος, ενώ ταυτόχρονα η συγκέντρωση του διαθέσιμου O_2 του εδάφους που θα έρθει σε επαφή με την μεταλλική επιφάνεια διαρκώς φθίνει (Σχήμα 2.5.1.).



Σχήμα 2.5.1. Καμπύλες πόλωσης του χαλύβδινου αγωγού Q235, εμβυθισμένου σε άργιλο Bentonite με διαφορετικές περιεκτικότητες σε νερό για 240h (a), 720h (b) και 1080h (c), υπό διαφορετικές συνθήκες υγρασίας. Η καμπύλη (d) αποτελεί την γραφική παράσταση του ρυθμού διάβρωσης συναρτήσει του ποσοστού του εδάφους σε υγρασία. Διαπιστώνουμε, ότι όσο αυξάνεται η υγρασία, το δυναμικό διάβρωσης μειώνεται, ενώ η πυκνότητα του ρεύματος αυξάνεται. Επίσης, όσο η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία παραμένει κάτω από το 30% (κρίσιμη τιμή), η αύξηση της υγρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Για ποσοστά υγρασίας μεγαλύτερα του 30%, ο ρυθμός διάβρωσης ελαττώνεται [28].

2.5.2. pH εδάφους

Το pH του εδάφους επηρεάζει το δυναμικό του αγώγιμου ηλεκτροδίου, αφού μεταβάλλει τη συγκέντρωση του ιόντων H^+ . Κύριες πηγές του H^+ στο έδαφος είναι α) το H_2CO_3 που παράγεται κατά τη διάλυση του CO_2 στο νερό, β) τα οργανικά οξέα που παράγονται κατά την αποσύνθεση της οργανικής ύλης στο χώμα και γ) το H_2SO_4 που παράγεται από την οξείδωση θειούχων ενώσεων. Σε όξινο περιβάλλον, κύριος αναγωγικός μηχανισμός είναι η πρόσληψη των ηλεκτρονίων που δημιουργήθηκαν από τη διάλυση των μετάλλων (Fe, Zn ή Cu) στην άνοδο από τα ιόντα H^+ , με αποτέλεσμα την έκλυση αερίου υδρογόνου. Σε ουδέτερα και αλκαλικά περιβάλλοντα, κύρια αναγωγική αντίδραση στην κάθοδο αποτελεί ο μετασχηματισμός του O_2 σε OH^- , που με τη σειρά του θα χρησιμοποιηθεί από το ιόν του μετάλλου στην άνοδο προς σχηματισμό οξειδίων και άλλων διαβρωτικών προϊόντων (βλ. κεφάλαιο 2.4.).

2.5.3. Ειδική αντίσταση του εδάφους

Η ειδική αντίσταση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η αλατότητα, η υγρασία, η θερμοκρασία και η δομή του εδάφους. Όταν το έδαφος είναι ξηρό ή έχει εξαιρετικά χαμηλό ποσοστό υγρασίας η ειδική αντίσταση δεν επηρεάζει τη διάβρωση. Αντίθετα, όταν αυξηθεί η περιεκτικότητα του εδάφους σε αγώγιμα ιόντα και νερό, η ειδική αντίσταση μειώνεται, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας του γειωτή αλλά και τη μετακίνηση των φορτίων στην άνοδο και την κάθοδο, επιταχύνοντας έτσι τις αντιδράσεις διάβρωσης. Γι' αυτό, η ειδική αντίσταση του εδάφους χρησιμοποιείται σήμερα ως κριτήριο αξιολόγησης της διάβρωσης των μεταλλικών γειωτών (Πίνακας 2.5.1.).

Ειδική αντίσταση του εδάφους ($\Omega \cdot m$)	Αγωγιμότητα εδάφους	Μέσος ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα ($mm \cdot a^{-1}$)
0 - 5	Πολύ υψηλή	>1
5 - 20	Υψηλή	0.2 - 1
20 - 100	Μέτρια	0.05 - 0.2
>100	Χαμηλή	<0.05

Πίνακας 2.5.1. Σχέση μεταξύ ειδικής αντίστασης του εδάφους και διάβρωσης για την περίπτωση του ανοξειδωτού χάλυβα [28].

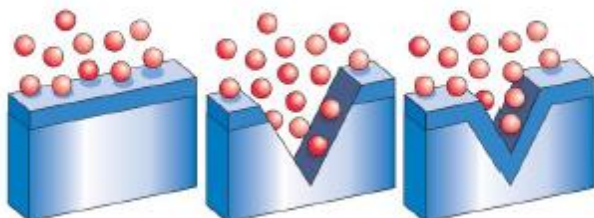
2.5.4. Αλατότητα εδάφους

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε ευδιάλυτα άλατα επηρεάζει άμεσα τις φυσικοχημικές του ιδιότητες. Όμως, τα άλατα αποτελούν και πηγή ηλεκτρολυτών. Αύξηση της αλατότητας του εδάφους σημαίνει και αύξηση της συγκέντρωσης των φορτισμένων ιόντων, η οποία συνεπάγεται μείωση της ειδικής αντίστασης και αύξηση της αγωγιμότητας με ταυτόχρονη μείωση της διαλυτότητας του οξυγόνου (DO) στο έδαφος. Επίσης, τα άλατα παρέχουν ιόντα, τα οποία με ποικίλους τρόπους επηρεάζουν τον ρυθμό διάβρωσης των μεταλλικών αγωγών-γειωτών.

Ιόντα Cl^-

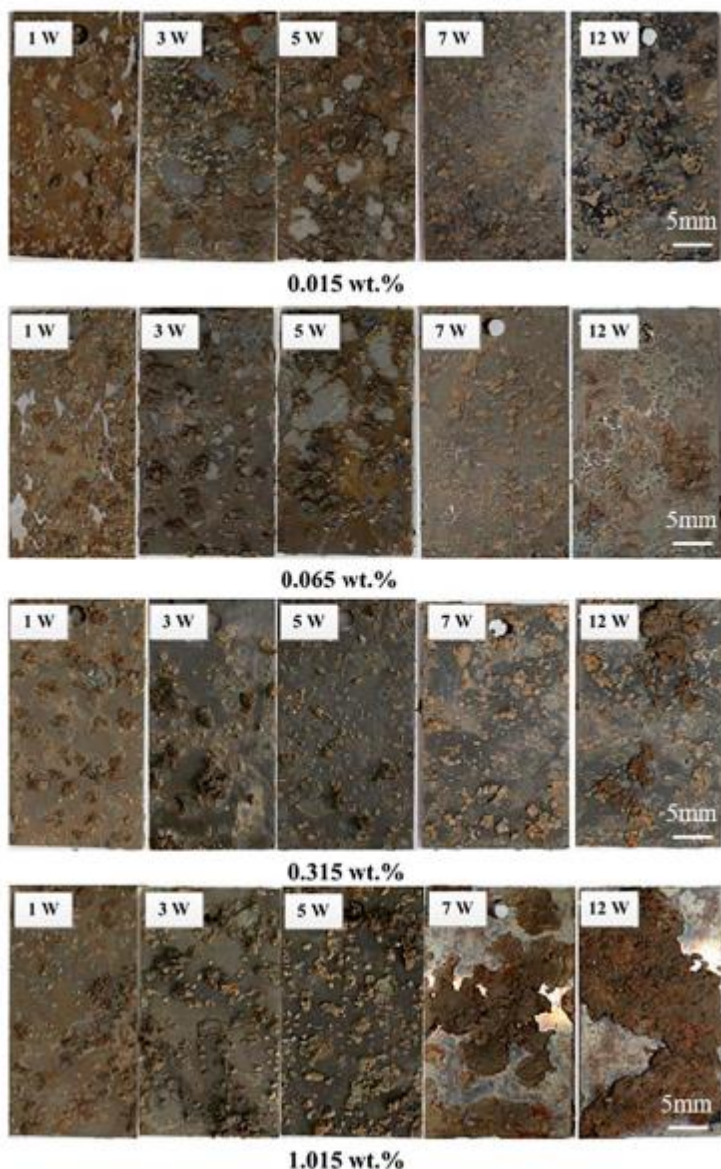
Το Cl^- είναι ένα από τα πιο διαβρωτικά ιόντα. Δρα καταστρέφοντας το παθητικό φιλμ. Η παθητικοποίηση αφορά τη δημιουργία και εναπόθεση ενός προστατευτικού στρώματος οξειδίου του μετάλλου πάνω στην μεταλλική επιφάνεια, με σκοπό να διατηρήσει το ρεύμα διάβρωσης που τη διαρρέει σε αρκετά χαμηλή τιμή, προκειμένου να ανασταλεί η ανοδική αντίδραση διάλυσης του μετάλλου, άρα και η διαβρωτική διαδικασία. Προϋπόθεση για να ξεκινήσει αυτή η διαδικασία αυτοϊασης είναι η αύξηση του δυναμικού επιφανείας πάνω

από μια κρίσιμη τιμή (δυναμικό Flade). Από εκεί και πέρα έχουν προταθεί οι εξής τρόποι σχηματισμού του παθητικού στρώματος: α) η προσρόφηση O_2 απευθείας στο μέταλλο οδηγεί στον σχηματισμό ενός πυκνού συμπαγούς φιλμ οξειδίου του μετάλλου στο υπόστρωμα (Σχήμα 2.5.2.) και β) τα μεταλλικά ιόντα της ανοδικής διάλυσης εναποτίθενται στην μεταλλική επιφάνεια και εν συνεχεία ερχόμενα σε επαφή με O_2 δημιουργούν ένα παθητικό φιλμ οξειδίου του μετάλλου (διάλυση-επικάθιση).



Σχήμα 2.5.2. Αυτοπαθητικοποίηση μετάλλου με προσρόφηση O_2 και δημιουργία φιλμ από οξείδιο του μετάλλου. (αναπαραγωγή από https://ps.inoxstyle.gr/wp-content/uploads/2019/09/The_Passivation_in_Stainless_Steel_Equipment.pdf).

Τα ιόντα Cl^- δημιουργούν ρωγμές ή πλήρη καταστροφή του παθητικού φιλμ, διεισδύοντας μέσα στη μεταλλική μήτρα και συμμετέχοντας σε μια σειρά αντιδράσεων προς σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης στην άνοδο. Επίσης, το δυναμικό διάβρωσης αποτελεί γραμμική συνάρτηση του λογαρίθμου της συγκέντρωσης των Cl^- [39]. Ειδικά για τον ανοξείδωτο και τον ανθρακούχο χάλυβα, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των Cl^- στο χώμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διάβρωση που υφίσταται το υλικό. Μάλιστα, η έκθεση ανθρακούχου χάλυβα σε διαφορετικές περιεκτικότητες Cl^- ανέδειξε α) βελονοειδείς διαβρώσεις σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις Cl^- και β) σοβαρότερη διάβρωση σε υψηλές συγκεντρώσεις, γεγονός που καθιστά τον ανθρακούχο χάλυβα εξαιρετικά ευαίσθητο στο Cl^- (Σχήμα 2.5.3.) [40].



Σχήμα 2.5.3. Διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα κατά την έκθεσή του σε διάφορες συγκεντρώσεις Cl- για μία, τρεις, πέντε, επτά και δώδεκα εβδομάδες [40].

Ιόντα SO_4^{2-}

Διαβρώνουν τα μέταλλα με διάφορους μηχανισμούς: α) μειώνουν το pH προκαλώντας με έμμεσο τρόπο ανοδική διάβρωση και β) καταλύει την οξείδωση του Fe στην άνοδο.

Ιόντα CO_3^{2-} και HCO_3^-

Και τα δύο ιόντα παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα. Το CO_3^{2-} αντιδρά με το Ca^{2+} προς σχηματισμό $CaCO_3$, το οποίο σε αμμώδες έδαφος σχηματίζει ένα προστατευτικό παθητικό φιλμ. Προστατευτικό φιλμ δημιουργήθηκε και κατά την έκθεση ανοξείδωτου χάλυβα (Q235 και X70) σε περιβάλλον με CO_3^{2-} . Αντίθετα, η έκθεση ανοξείδωτου και ανθρακούχου χάλυβα σε περιβάλλον πλούσιο σε HCO_3^- αυξάνει το ρεύμα διάβρωσης και δε δημιουργεί παθητικοποίηση.

Κατιόντα

Τα κατιόντα Na^+ , K^+ και Al^{3+} δεν επηρεάζουν τη διάβρωση. Όμως, τα Ca^{2+} και Mg^{3+} δημιουργούν αδιάλυτα οξείδια και ανθρακούχα άλατα τα οποία επικάθονται πάνω στη μεταλλική επιφάνεια του ανθρακούχου χάλυβα δημιουργώντας ένα προστατευτικό παθητικό φιλμ.

2.5.5. Θερμοκρασία

Στις χαμηλές θερμοκρασίες το μέταλλο παθητικοποιείται. Όμως, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η μείωση της ειδικής αντίστασης αυξάνει την αγωγιμότητα και την πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης. Επιπλέον, τα προϊόντα διάβρωσης που παράγονται κατά τις ανοδικές αντιδράσεις επικάθονται ανομοιογενώς πάνω στη μεταλλική επιφάνεια, βλάπτοντας έτσι την παθητικοποίηση. Όσον αφορά τις αναγωγικές αντιδράσεις του O_2 στην κάθοδο, η κατάσταση είναι πιο σύνθετη, αφού η αυξημένη θερμοκρασία αυξάνει τη διάχυση O_2 , αλλά συγχρόνως μειώνει τη διαλυτότητά του στο έδαφος. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας εντός κάποιων ορίων, ευοδώνει τον μεταβολισμό αναερόβιων μικροοργανισμών του εδάφους και την παραγωγή προϊόντων που επιταχύνουν τη διάβρωση.

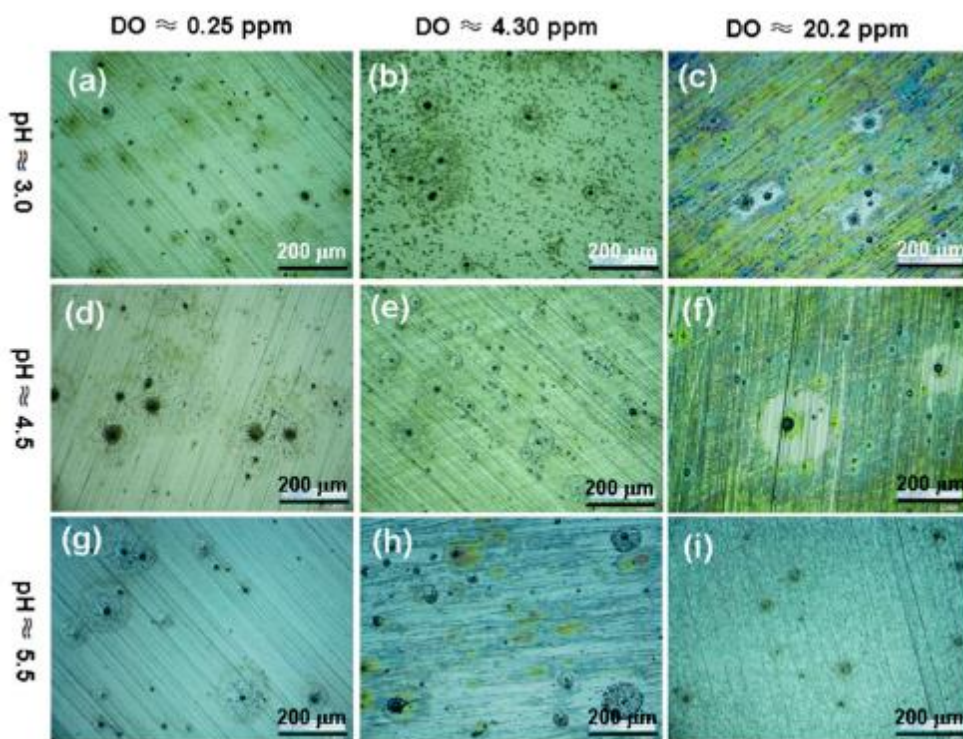
2.5.6. Περιεκτικότητα του εδάφους σε O_2

Το οξυγόνο επηρεάζει τη διάβρωση σε συνδυασμό και με άλλους παράγοντες όπως είναι ο τύπος και η δομή του εδάφους, η υγρασία, το pH κ.α. Βρίσκεται στο έδαφος σε αέρια μορφή μεταξύ των στερεών κόκκων, αλλά και σε διαλυμένη μορφή όπου υπάρχει υγρασία. Τα ξηρά εδάφη έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε O_2 σε σχέση με τα εδάφη που είναι πλούσια σε υγρασία. Στην πράξη, επειδή το έδαφος εμφανίζει μεγάλη ετερογένεια ακόμη και στην ίδια περιοχή, το περιεχόμενο O_2 παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ τα τμήματα των υπογείων αγωγών που γειτνιάζουν με κυψέλες υψηλής συγκέντρωσης σε O_2 εμφανίζουν και τη μεγαλύτερη διάβρωση. Αν υπάρχουν επιχωματώσεις με χαλίκια ή υπολείμματα από οικοδομικά υλικά, η διαπερατότητα του εδάφους στο O_2 ελαττώνεται. Μάλιστα, έχει βρεθεί ότι έκθεση του χάλυβα X70 σε υγρό περιβάλλον με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένο O_2 (DO) παρουσιάζει πολλαπλές βελονοειδείς διαβρωτικές εστίες με μεγάλο βάθος [41].

Ο τύπος του εδάφους και το μέγεθος των στερεών κόκκων του επηρεάζει σημαντικά το περιεχόμενο O_2 . Σε αργιλώδες έδαφος με μέγεθος κόκκων 0.0012-0.055 mm, η διείσδυση αερίου O_2 είναι μεγάλη. Επειδή όμως και η υγρασία είναι σημαντική (20-25%), υπάρχει και σημαντική ποσότητα DO. Σε υλιώδη (silty) εδάφη που απαντώνται συνήθως 5-6 m κάτω από την επιφάνεια της γης, το O_2 διεισδύει με δυσκολία, οπότε η διάλυση του μετάλλου εξαρτάται κυρίως από την αλατότητα. Τα αμμώδη εδάφη, με μέγεθος κόκκων 0.0625-2 mm, αποτελούν ένα εξαιρετικά πορώδες υλικό ποικίλης περιεκτικότητας σε O_2 . Μάλιστα στις περιοχές όπου οι κόκκοι είναι εξαιρετικά μικροί (0.0625 mm) και η διείσδυση του αερίου O_2 μεγάλη, είναι σαφώς μεγαλύτερος ο αριθμός και το μέγεθος των βελονοειδών διαβρώσεων του ανθρακούχου χάλυβα [42].

Επιπλέον, κατά τη μελέτη της μορφολογίας του χάλυβα X80 σε διαφορετικούς συνδυασμούς όξινων συνθηκών και DO, διαπιστώθηκε ότι α) για χαμηλές τιμές DO (0.25 ppm) και ανεξαρτήτως της οξύτητας του περιβάλλοντος χώρου, το μεγαλύτερο μέρος της μεταλλικής επιφάνειας εμφάνισε βελονοειδή διάβρωση. Επιπλέον, η τιμή του pH επηρέασε τόσο τον αριθμό όσο και το μέγεθος των δημιουργούμενων οπών. Για pH = 3.0, οι ρωγμές ήταν μικρές και διάσπαρτες (Σχήμα 2.5.4.α.), καθώς όμως το pH γινόταν λιγότερο όξινο, αν και μειώθηκε ο αριθμός τους, αυξήθηκε το μέγεθος και το βάθος τους (Σχήματα 2.5.4.β. και γ.), β) για την ίδια τιμή pH, η διάβρωση επιδεινώθηκε καθώς αυξήθηκε το DO. Για DO = 4.30 ppm, σχηματίστηκαν δακτυλοειδείς βλάβες, είτε μεμονωμένες είτε σε συναθροίσεις, γ) σε περιβάλλοντα κορεσμένα με οξυγόνο (DO = 20.2 ppm) το μέταλλο παρουσίασε τάσεις αυτοπαθητικοποίησης, η αποτελεσματικότητα της οποίας εμφάνισε ισχυρή εξάρτηση από το pH. Συγκεκριμένα, σε εντόνως όξινες συνθήκες (pH = 3.0), το παθητικό φιλμ ήταν πολύ λεπτό και αποκολλώνταν εύκολα από τη μεταλλική μήτρα, με αποτέλεσμα να

παρατηρούνται όχι μόνο οι δακτυλιοειδείς ρωγμές αλλά και κίτρινες περιοχές νεοσχηματισμένης διάβρωσης (Σχήμα 2.5.4.c.). Αντίθετα, σε pH = 5.5, το προστατευτικό φιλμ ήταν πιο πυκνό και πιο ομοιογενές (Σχήμα 2.5.4.i.) [43].

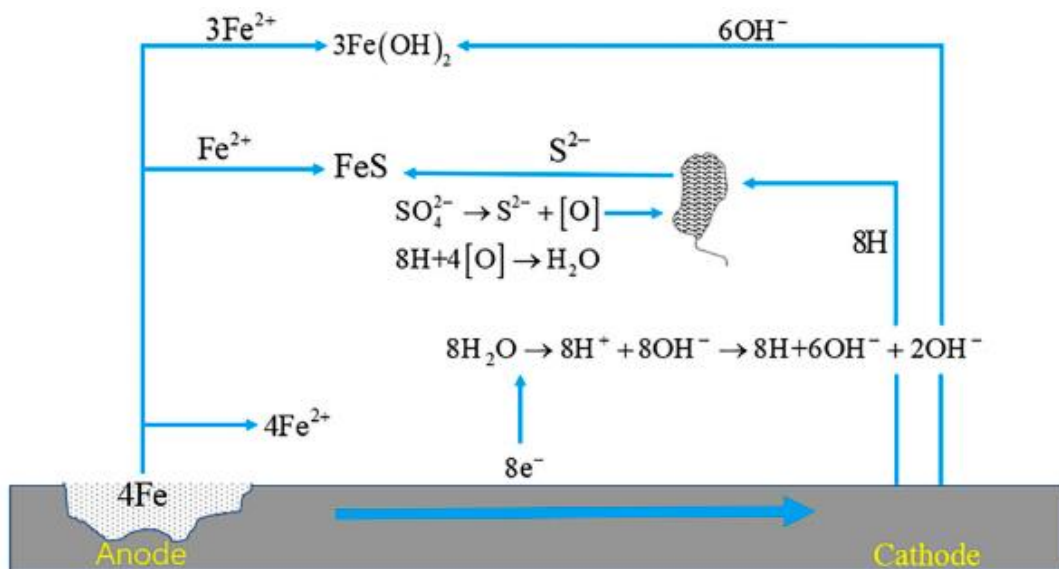


Σχήμα 2.5.4. Διαταραχές της μορφολογίας του χάλυβα X80 σε όξινο έδαφος και διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου (DO): (a) pH = 3.0 και DO = 0.25 ppm, (b) pH = 3.0 και DO = 4.30 ppm, (c) pH = 3.0 και DO = 20.2 ppm, (d) pH = 4.5 και DO ≈ 0.25 ppm, (e) pH = 4.5 και DO = 4.30 ppm, (f) pH = 4.5 και DO = 20.2 ppm, (g) pH = 5.5 και DO = 0.25 ppm, (h) pH = 5.5 και DO = 4.30 ppm και (i) pH = 5.5 και DO = 20.2 ppm [43].

2.5.7. Μεταβολισμός μικροβίων

Τα πιο σημαντικά αναερόβια βακτήρια που ευθύνονται για τη διάβρωση των γειωτών είναι τα θειοαναγωγικά (sulfate reducing bacteria) και τα σιδηροοξειδωτικά (iron-oxidizing bacteria). Σε ανοξικό περιβάλλον, τα θειοαναγωγικά βακτήρια πολλαπλασιάζονται με ραγδαίο ρυθμό και παράγουν ενέργεια ανάγοντας το SO_4^{2-} σε S_2 στην κάθοδο. Η αντίδραση αυτή παρέχει το έναυσμα για την πραγματοποίηση αντίστοιχων οξειδωτικών αντιδράσεων στην άνοδο προς σχηματισμό $\text{Fe}(\text{OH})_2$ και FeS (Σχήμα 2.5.5.). Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι τα αναερόβια αυτά βακτήρια εμφανίζουν έντονη διαβρωτική δράση σε πληθώρα μετάλλων όπως είναι ο σίδηρος, ο ανθρακούχος χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός και το νικέλιο. Έχει βρεθεί ότι, τα θειοαναγωγικά βακτήρια έχουν την τάση να συσσωρεύονται πάνω στην επιφάνεια του ανθρακούχο χάλυβα, δημιουργώντας μικροβιακό φιλμ, το οποίο επιδεινώνει τη διάβρωση σε τέτοιο βαθμό, που τελικά προκαλείται κάταγμα του υλικού [44].

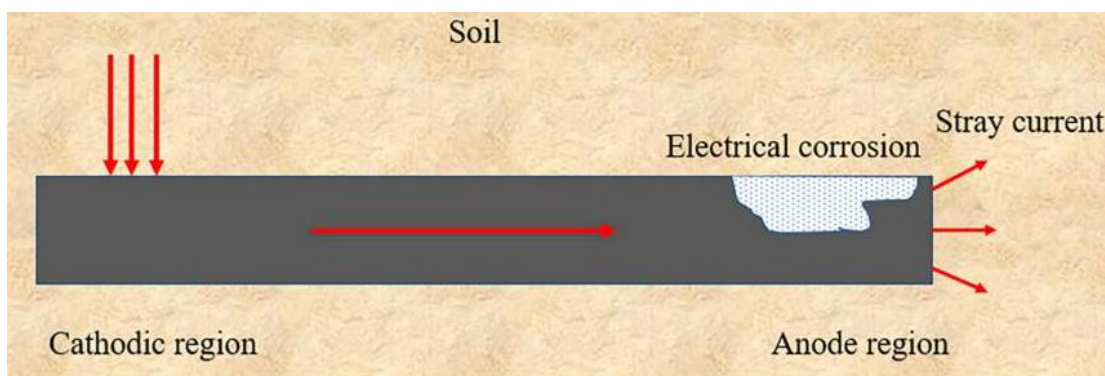
Επιπλέον, τα σιδηροοξειδωτικά μικρόβια δρουν συνεργικά με τα θειοαναγωγικά, αφού καταναλώνουν το οξυγόνο του περιβάλλοντος χώρου, προσφέροντας έτσι τις συνθήκες που ευνοούν τόσο τον πολλαπλασιασμό των θειοαναγωγικών, όσο και τις μεταβολικές αναγωγικές διαβρωτικές αντιδράσεις.



Σχήμα 2.5.5. Μηχανισμός διάβρωσης των θειοαναγωγικών βακτηρίων (αναπαραγωγή από [28]).

2.6. Παρασιτικά ρεύματα (stray currents)

Κύριες λειτουργίες των γειωτών είναι: α) η διασφάλιση ασφαλούς διόδου στα ρεύματα διαρροής (leakage currents), ώστε να μπορέσουν να διαφύγουν από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό της εγκατάστασης προς τη γη, αλλά και β) η εκτόνωση του κεραυνικού ρεύματος στο έδαφος. Για το λόγο αυτό, στον χώρο πέριξ ενός γειωτή, μπορεί να υπάρχουν DC ή AC παρασιτικά ρεύματα (ή ρεύματα διαφυγής). Ο μηχανισμός με τον οποίο ένα παρασιτικό ρεύμα προκαλεί διάβρωση φαίνεται στο Σχήμα 2.6.1. Η περιοχή του αγωγού, απ' όπου το παρασιτικό ρεύμα εισέρχεται στον γειωτή αποτελεί την κάθοδο, ενώ η περιοχή απ' όπου εξέρχεται το ρεύμα αποτελεί την άνοδο, στην οποία λαμβάνει χώρα η εναπόθεση των προϊόντων διάβρωσης.



Σχήμα 2.6.1. Παρασιτικό ρεύμα

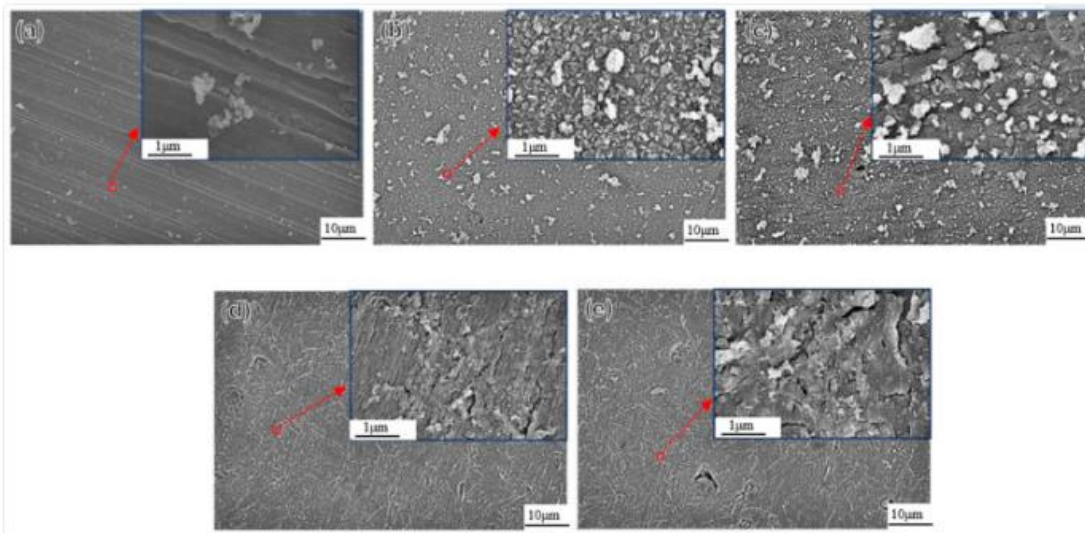
Η διάβρωση από DC-παρασιτικά ρεύματα είναι πολύ σοβαρή και εξαρτάται τόσο από τη διάρκεια όσο και από την ένταση του παρασιτικού ρεύματος. Η απώλεια μάζας του μετάλλου εξαιτίας ενός ρεύματος διαφυγής εκφράζεται με τη σχέση

$$\Delta W = k \cdot I \cdot t + v_i \cdot S \cdot t, \text{ με } k = A \cdot n \cdot F \quad (2.6.1.),$$

όπου ΔW : η μάζα που χάθηκε λόγω διάβρωσης, k : το ηλεκτροχημικό ισοδύναμο του μετάλλου, I : η ένταση του ρεύματος που διέρχεται μέσα από το γειωμένο ηλεκτρόδιο, t : ο χρόνος διάβρωσης, v_i : ο ρυθμός της

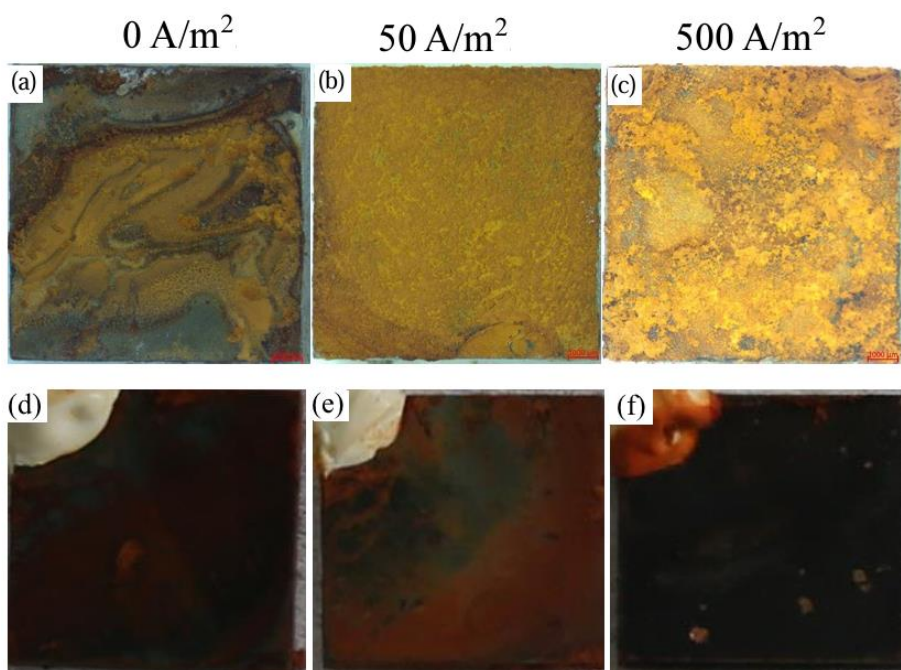
φυσικής αυτο-διάβρωσης του μετάλλου χωρίς την επίδραση ρεύματος, S : η επιφάνεια του μετάλλου που βρίσκεται εμπεπλεγμένη στο έδαφος, A : το ατομικό βάρος του μετάλλου, n : το σθένος του μετάλλου και F : η σταθερά του Faraday = 96,480 C/mol.

Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ενός DC-παρασιτικού ρεύματος, τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός διάβρωσης (Σχήμα 2.6.2.).

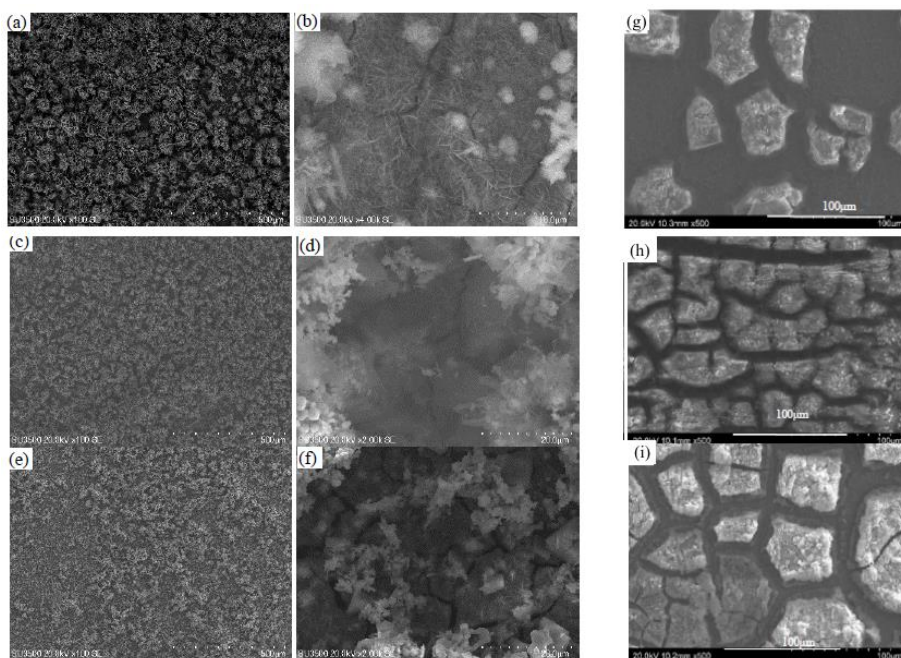


Σχήμα 2.6.2. Διάβρωση του χάλυβα X80 κατά την έκθεσή του σε διάφορες πυκνότητες DC-παρασιτικού ρεύματος. Σε πυκνότητα 0 mA/cm², η διάβρωση γίνεται με βραδύ ρυθμό, εμφανίζοντας κοκκώδη σύσταση (a). Καθώς η πυκνότητα του DC-ρεύματος αυξάνει (0.25-0.5 mA/cm²) το διαβρωτικό στρώμα γίνεται πιο παχύ με περισσότερες και μεγαλύτερες διαβρωτικές εναποθέσεις (b-c). Σε μεγάλες εντάσεις αναπτύσσονται ρωγμές (d) ή/και κατάγματα (e) πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα [45].

Τα DC-παρασιτικά ρεύματα είναι πολύ ισχυρά και διαβρώνουν όλους τους γειωτές (ανθρακούχο χάλυβα, ανοξείδωτο χάλυβα, χαλκό, σίδηρο κ.λπ.) [28]. Αντίθετα, οι επιδράσεις ενός παρασιτικού AC-ρεύματος αφορούν κυρίως τον ανθρακούχο χάλυβα. Κατά τη μελέτη ενός AC παρασιτικού ρεύματος σε αλκαλικό και όξινο περιβάλλον βρέθηκε ότι: α) ανεξαρτήτως pH, τα προϊόντα διάβρωσης αποτελούνταν από οξείδια του Fe, η ποσότητα των οποίων αυξήθηκε με την αύξηση της πυκνότητας του παρασιτικού AC-ρεύματος, επιδεινώνοντας τη διάβρωση (Σχήμα 2.6.3.), β) για ίδιας έντασης παρασιτικό ρεύμα, ο ρυθμός διάβρωσης ήταν μεγαλύτερος στο όξινο περιβάλλον, γ) στο αλκαλικό περιβάλλον, τα διαβρωτικά προϊόντα δημιούργησαν ένα αραιό φιλμ, ασθενώς προσκολλημένο στη μεταλλική επιφάνεια και ένα πυκνότερο εσωτερικό στρώμα με πολλές ρωγμές. Αντίθετα, σε όξινο περιβάλλον, σχηματίστηκε ένα και μόνο λεπτό στρώμα διαβρωτικών προϊόντων με πολυάριθμες ρωγμές (Σχήμα 2.6.4.), και (δ) τα μικρά παρασιτικά ρεύματα, δημιούργησαν ομοιόμορφη διάβρωση και στις δύο περιπτώσεις. Τοπικές διαβρωτικές εστίες δημιουργήθηκαν από μεγάλα ρεύματα (>100 A/m² για το αλκαλικό και >200 A/m² για το όξινο περιβάλλον), αλλά ήταν περισσότερο εμφανείς σε αλκαλικό pH [46].



Σχήμα 2.6.3. Διάβρωση του ανθρακούχου χάλυβα μετά την έκθεση σε AC-παρασιτικό ρεύμα με διαφορετικές πυκνότητες έντασης σε αλκαλικό (a-c) και όξινο(d-f) περιβάλλον[46].



Σχήμα 2.6.4. Διαβρωτικό εξωτερικό (a,c,e) και εσωτερικό (b,d,f) φιλμ από την επίδραση AC-παρασιτικού ρεύματος πυκνότητας 0, 100 και 500 A/m² σε αλκαλικό περιβάλλον. Διαβρωτική επικάλυψη σε μονό στρώμα υπό την επίδραση AC-παρασιτικού ρεύματος 0 A/m² (g), 100 A/m² (h) και 500 A/m² (i) σε όξινο περιβάλλον [46].

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η αναγκαιότητα λήψης μέτρων για την αντιμετώπιση των καταστροφικών συνεπειών των DC-/AC-παρασιτικών ρευμάτων κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης.

Κεφάλαιο 3: Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) για τη μελέτη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του συστήματος γείωσης

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι ανάλυσης των συστημάτων γείωσης. Η πρώτη είναι η κυκλωματική ανάλυση, όπου κάθε αγωγός αντιστοιχίζεται σε ένα επιμέρους ηλεκτρικό κύκλωμα, ενώ η δεύτερη είναι η πεδιακή που χρησιμοποιεί τις εξισώσεις Maxwell. Η πεδιακή ανάλυση υπερτερεί της κυκλωματικής ως προς την ακρίβεια, την ευελιξία και τη μοντελοποίηση, ενώ απαιτεί τη χρήση υπολογιστικού λογισμικού [47].

3.1. Εξισώσεις Maxwell

Όταν θέλουμε να μελετήσουμε ένα Σύστημα Γείωσης, μας ενδιαφέρουν

- η μη αγωγίμη περιοχή: αέρας και
- η αγωγίμη περιοχή: έδαφος ειδικής αγωγιμότητας σ και γειωτής σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας μ

Θεωρούμε κατά σύμβαση, ότι το αναπτυσσόμενο πεδίο είναι ψευδοσταθερό, δηλαδή αγνοούμε το ρεύμα μετατόπισης.

Εξισώσεις Maxwell για τη μη αγωγίμη περιοχή του αέρα	Εξισώσεις Maxwell για την αγωγίμη περιοχή εδάφους – γειωτή
$\nabla \times \bar{H} = 0$ (3.1.1)	$\nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \bar{J}_s$ (3.1.3)
$\nabla \cdot \bar{B} = 0$ (3.1.2)	$\nabla \times \bar{E} + \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0$ (3.1.4)
	$\nabla \cdot \bar{B} = 0$ (3.1.5)
όπου $\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$, $\nabla \cdot (\nabla \times \bar{A}) = 0$, $\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nabla V$, $\bar{H} = \nu \bar{B}$, $\bar{J}_s = \sigma \bar{E}$	

Πίνακας 3.1.1. Οι εξισώσεις Maxwell για την περιγραφή του ψευδοσταθερού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπου $\bar{B}$: η μαγνητική επαγωγή, $\bar{A}$: το διανυσματικό δυναμικό, $\bar{E}$: η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, V : το βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό, $\bar{H}$: η ένταση του μαγνητικού πεδίου, ν : η αντίστροφη μαγνητική διαπερατότητα και σ : η ειδική αγωγιμότητα (πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος)[48].

Για τις πολύπλοκες γεωμετρίες των πεδίων των συστημάτων γείωσης είναι αδύνατος ο ακριβής υπολογισμός της συνάρτησης δυναμικού μέσω των εξισώσεων Maxwell. Για το λόγο αυτό, καταφεύγουμε στις αριθμητικές επαναληπτικές μεθόδους, οι οποίες διακρίνονται σε ολοκληρωτικές και διαφορικές [47].

Με τις ολοκληρωτικές μεθόδους μπορούμε να ολοκληρώσουμε το ρεύμα γραμμής εφαρμόζοντας γρήγορους υπολογισμούς, που δεν εξαρτώνται από τη διαμόρφωση του συστήματος γείωσης, γεγονός που καθιστά εφικτή την εκτίμηση πεδίων με όρια στο άπειρο. Όμως, στις διαφορικές μεθόδους, τα όρια του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει να ορίζονται αυστηρά και το ηλεκτρικό πεδίο να μην εκτείνεται στο άπειρο. Παρά τους περιορισμούς, η διαφορική προσέγγιση υπερτερεί της ολοκληρωτικής όταν χρειάζεται να προσομοιώσουμε ανισοτροπικά εδάφη με στρώματα διαφορετικών χαρακτηριστικών (π.χ. διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης, διαφορετική γεωμετρία και διαφορετική αγωγιμότητα των στρωμάτων του εδάφους) [23,49]. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές μεθόδους διαφορικής προσέγγισης είναι η

μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM), η οποία χρησιμοποιείται για τη μεταβατική ανάλυση συστημάτων γείωσης κατόπιν επίδρασης ενός ρεύματος σφάλματος (βραχυκυκλώματος ή κεραυνικό).

3.2. Εξισώσεις A-V

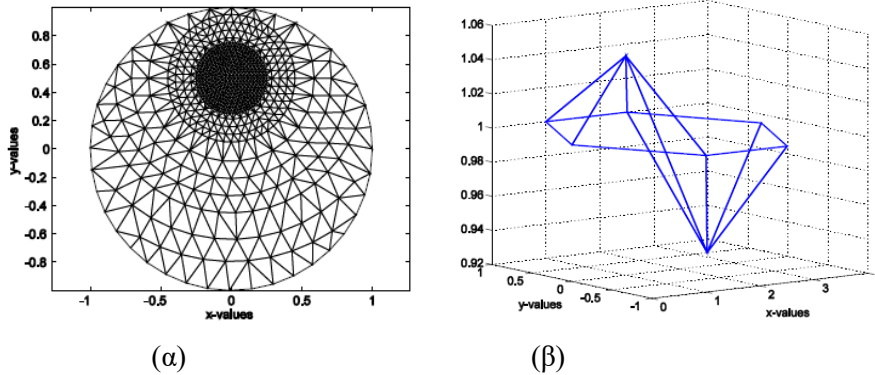
Η μέθοδος FEM αναπτύχθηκε από τους B. Nekhoul et al. το 1995 [50]. Το μοντέλο ξεκινά από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις του Maxwell του Πίνακα 3.1.1. Μετασχηματίζοντας τις εξισώσεις αυτές ως προς το διανυσματικό δυναμικό $\bar{A}$ και το βαθμωτό δυναμικό V , προκύπτουν οι A-V εξισώσεις του Πίνακα 3.2.1., οι οποίες χρησιμοποιούνται για την διαμέριση του συνολικού όγκου σε επιμέρους στοιχεία πλέγματος με τη μέθοδο FEM.

Εξισώσεις A-V για τη μη αγωγήμη περιοχή του αέρα	Εξισώσεις A-V για την αγωγήμη περιοχή εδάφους – γειωτή
$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} (\overline{rotW}) \cdot (\overline{rotA}) + \frac{1}{\mu} (\overline{divW}) \cdot (\overline{divA}) \right) d\Omega = 0$ (3.2.1.)	$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} (\overline{rotW}) \cdot (\overline{rotA}) + \frac{1}{\mu} (\overline{divW}) \cdot (\overline{divA}) + (\sigma_{soil} + j\omega\epsilon_{soil}) \cdot (j\omega\bar{W} \cdot \bar{A} + \bar{W} \cdot \nabla V) \right) d\Omega = 0$ (3.2.2.) $\int_{\Omega} ((\sigma_{soil} + j\omega\epsilon_{soil}) \nabla w \cdot (j\omega\bar{A} + \nabla V)) d\Omega = 0$ (3.2.3.)

Πίνακας 3.2.1. Εξισώσεις A-V , όπου w είναι το διάνυσμα βάρους του βαθμωτού δυναμικού για ένα στοιχείο του πλέγματος και $\bar{W}$ είναι το διάνυσμα βάρους του διανυσματικού δυναμικού για ένα στοιχείο του πλέγματος.

3.3. Γενική περιγραφή της μεθόδου FEM

Το πρώτο βήμα της μεθόδου FEM είναι η τμηματοποίηση του χώρου σε επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία. Αν ο προς μελέτη χώρος είναι μία επιφάνεια (2D απεικόνιση), τον διαιρούμε σε πεπερασμένο πλήθος τριγώνων, ενώ αν είναι όγκος (3D απεικόνιση), τον διαιρούμε σε πεπερασμένο πλήθος τετραέδρων και σπανιότερα εξαέδρων. Το αν θα μελετήσουμε επιφάνεια ή όγκο καθορίζεται από τη συμμετρία του συστήματος γείωσης [51].



Σχήμα 3.3.1. Τμηματοποίηση του χώρου: (α) σε τρίγωνα (2D) και (β) σε τετράεδρα (3D) [51].

Στην πράξη, το λογισμικό εκτελεί την τμηματοποίηση του χώρου σε πλέγμα, ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση Poisson, οι οριακές της συνθήκες που τη διέπουν και η συνάρτηση του χωρητικού φορτίου ρ . Αν δεν υπάρχει χωρητικό φορτίο ($\rho = 0$), θα πρέπει αντίστοιχα να ικανοποιείται η εξίσωση Laplace και οι οριακές της συνθήκες (Πίνακας 3.3.1.).

Εξίσωση Poisson για συνηθισμένα ισοτροπικά και γραμμικά υλικά	Εξίσωση Laplace για συνηθισμένα ισοτροπικά και γραμμικά υλικά
$\nabla(\epsilon \nabla \Phi) = -\rho$ για ομογενή υλικά με σταθερή επιτρεπτότητα ϵ ισχύει: $\nabla^2 \Phi = -\rho/\epsilon$	$\nabla(\epsilon \nabla \Phi) = 0$ για ομογενή υλικά με σταθερή επιτρεπτότητα ϵ ισχύει: $\nabla^2 \Phi = 0$
(3.3.1.)	(3.3.3.)
(3.3.2.)	(3.3.4.)

Πίνακας 3.3.1. Εξισώσεις Poisson και Laplace, όπου Φ : το συνολικό ηλεκτροστατικό δυναμικό, $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$: η διηλεκτρική σταθερά (ή αλλιώς επιτρεπτότητα) του υλικού που εξαρτάται από το είδος του υλικού και τη στατικότητα των ανομοιογενειών του, ϵ_r : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού, ϵ_0 : η διηλεκτρική σταθερά του κενού και ρ : η χωρική πυκνότητα [52].

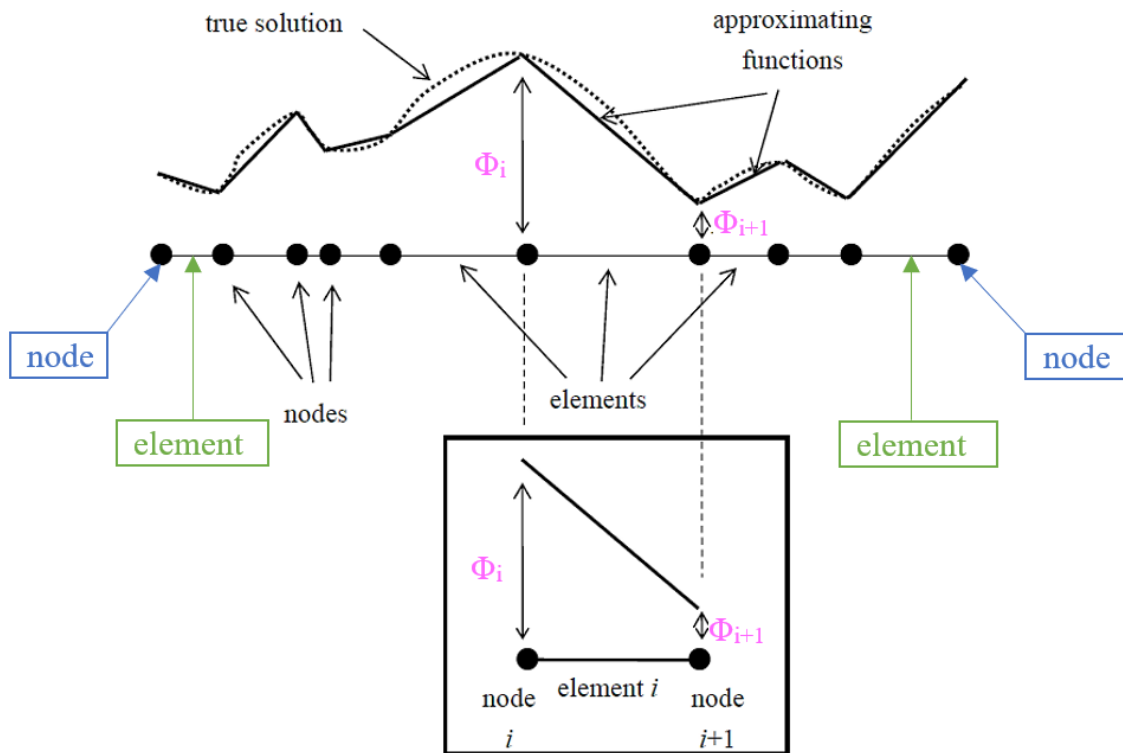
3.4. Εκτέλεση FEM με υπολογιστικό λογισμικό

Σε μονοδιάστατο χώρο (1-Dimensional space), η εξίσωση Poisson (σχέση 3.3.1.) απλοποιείται ως εξής

$$\nabla \varepsilon \nabla \Phi = \rho \quad (3.4.1.),$$

όπου τα ε, Φ έχουν οριστεί στο υπόμνημα του Πίνακα 3.3.1. και ρ είναι η γραμμική πυκνότητα φορτίου.

Ο χώρος εκφυλίζεται σε μία γραμμή. Το πλέγμα σχηματίζεται με διαίρεση της γραμμής σε N επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία (elements), μέσω $N+1$ κόμβων (nodes) (Σχήμα 3.4.1.). Η μέθοδος FEM είναι εξ' ορισμού επαναληπτική προσεγγιστική μέθοδος, παρέχει δηλαδή μία αρκετά καλή προσέγγιση της πραγματικής λύσης.



Σχήμα 3.4.1. Πλέγμα N μονοδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων (Mesh of N -one dimensional Finite Elements) με μέθοδο FEM. Στο πάνω μέρος του Σχήματος, η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την πραγματική λύση (πραγματική συνάρτηση ηλεκτροστατικού δυναμικού, true solution), ενώ η συνεχής γραμμή την προσεγγιστική λύση της μεθόδου FEM (προσεγγιστική συνάρτηση ηλεκτροστατικού δυναμικού που απαρτίζεται από το σύνολο των προσεγγιστικών για κάθε στοιχείο συναρτήσεων, approximating functions). Η αληθινή λύση απεικονίστηκε μόνο για λόγους πληρότητας στην επεξήγηση της μεθόδου FEM. Στην πράξη, το λογισμικό δίνει μόνο την προσεγγιστική λύση [53].

Η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η Φ που παριστά το άγνωστο ηλεκτροστατικό δυναμικό και οι άγνωστοι του προβλήματος είναι οι τιμές της Φ σε κάθε κόμβο i , δηλαδή οι τιμές Φ_i , με $i=1,2,\dots,N+1$, που σημειώνονται στα όρια καθενός από τα N στοιχεία.

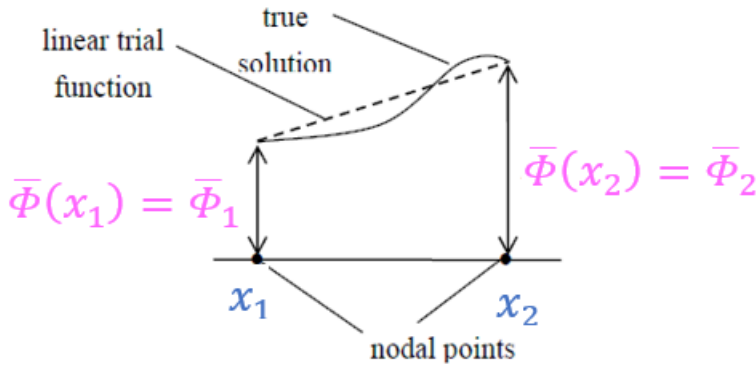
Σε κάθε στοιχείο αντιστοιχεί μία προσεγγιστική δοκιμαστική συνάρτηση (approximating trial function), που θα προσδιοριστεί, αφού πρώτα υπολογιστούν όλες οι τιμές των Φ_i .

Επίσης, πρέπει να οριστούν οι οριακές συνθήκες που είναι είτε της μορφής $\bar{\Phi}(x_i) = \dots$, είτε της μορφής $\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x}|_{x=x_i} = \dots$, όπου x_i η τετμημένη κάθε κόμβου i .

Στο παράδειγμα του Σχήματος 3.4.1., οι προσεγγιστικές δοκιμαστικές συναρτήσεις είναι πολυώνυμα πρώτου βαθμού, γι' αυτό και αναπαρίστανται ως ευθύγραμμα τμήματα. Επομένως, ισχύει:

$$\bar{\Phi}(x) = a + bx. \quad (3.4.2.)$$

Ωστόσο, στην πράξη χρησιμοποιούνται και άλλου τύπου δοκιμαστικές, όπως δευτεροβάθμια ή μεγαλύτερου βαθμού πολυώνυμα, εκθετικές ή διπλοεκθετικές συναρτήσεις κ.ά.



Σχήμα 3.4.2. Γραμμική δοκιμαστική συνάρτηση κατά μήκος του στοιχείου 1-2 [53].

Για το Σχήμα 3.4.2., θεωρούμε ότι οι οριακές συνθήκες του στοιχείου 1-2 είναι :

$$\begin{cases} \bar{\Phi}(x_1) = \bar{\Phi}_1 \\ \bar{\Phi}(x_2) = \bar{\Phi}_2 \end{cases} \quad (3.4.3.)$$

Τότε παίρνουμε τις δύο αλγεβρικές εξισώσεις:

$$\begin{cases} \bar{\Phi}(x_1) = a + bx_1 \\ \bar{\Phi}(x_2) = a + bx_2 \end{cases} \quad (3.4.4.)$$

Η επίλυση του συστήματος των δύο εξισώσεων δίνει: (3.4.5.)

$$a = \frac{\bar{\Phi}_1 x_2 - \bar{\Phi}_2 x_1}{x_2 - x_1} \text{ και } b = \frac{\bar{\Phi}_2 - \bar{\Phi}_1}{x_2 - x_1}.$$

Μετά από πράξεις προκύπτει ότι η ζητούμενη δοκιμαστική συνάρτηση του ευθυγράμμου τμήματος 1-2 είναι η

$$\bar{\Phi}(x) = N_1 \bar{\Phi}_1 + N_2 \bar{\Phi}_2, \text{ με } N_1(x) = \frac{x_2 - x}{L} \text{ και } N_2(x) = \frac{x - x_1}{L} \quad (3.4.6.)$$

όπου $L = x_2 - x_1$ το μήκος του στοιχείου 1-2.

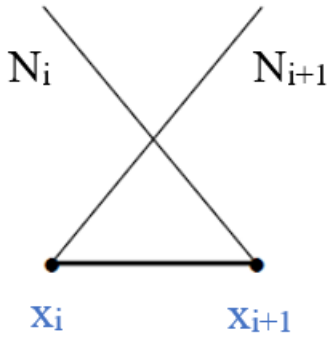
Αν όλα τα στοιχεία χρησιμοποιούν γραμμικές δοκιμαστικές συναρτήσεις τύπου $\bar{\Phi}(x) = a + bx$, με αντίστοιχες οριακές συνθήκες ανά στοιχείο, τότε η τελική προσεγγιστική συνάρτηση θα είναι η:

$$\bar{\Phi}(x) = \begin{cases} N_1(x)\bar{\Phi}_1 + N_2(x)\bar{\Phi}_2 & , x_1 < x < x_2 \\ N_2'(x)\bar{\Phi}_2 + N_3(x)\bar{\Phi}_3 & , x_2 < x < x_3 \\ \vdots & \vdots \\ N_N'(x)\bar{\Phi}_N + N_{N+1}(x)\bar{\Phi}_{N+1} & , x_N < x < x_{N+1} \end{cases} \quad (3.4.7.)$$

Η τελική συνάρτηση $\bar{\Phi}(x)$ του ηλεκτροστατικού δυναμικού είναι πάντα συνεχής, ακόμη και αν η παράγωγός της ή η διηλεκτρική σταθερά ϵ δεν είναι συνεχείς.

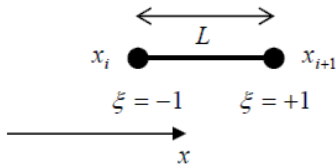
Οι συναρτήσεις N_i βασίζονται στη θεωρία των γραμμικών συναρτήσεων σχήματος (linear shape functions) που περιγράφεται στο Σχήμα 3.4.3. και έχουν δύο ιδιότητες:

$$N_i(x_k) = \begin{cases} 1, k = i \\ 0, k \neq i \end{cases} \text{ και } \sum_{i=1}^{i+1} N_i = 1. \quad (3.4.8.)$$



Σχήμα 3.4.3. Γραμμικές συναρτήσεις σχήματος [53].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκφράσεις των προσεγγιστικών δοκιμαστικών συναρτήσεων $\Phi(x) = N_i(x)\bar{\Phi}_i + N_{i+1}(x)\bar{\Phi}_{i+1}$ κάθε στοιχείου κανονικοποιούνται στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων $\xi = [-1, +1]$, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.4.4. για τυχαίο στοιχείο i -($i+1$).



Σχήμα 3.4.4. Τοπικές συντεταγμένες στοιχείου i -($i+1$) [53].

Τότε, για την τετμημένη x και τις συναρτήσεις N_1, N_2 θα ισχύουν οι σχέσεις 3.4.9., 3.4.10. και 3.4.11. αντίστοιχα στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων:

$$x = \frac{1}{2}(1 - \xi)x_i + \frac{1}{2}(1 + \xi)x_{i+1}, \text{ όπου } \xi = \frac{2(x-x_i)}{L} - 1 \quad (3.4.9.)$$

$$N_1(\xi) = \frac{1}{2}(1 - \xi) \quad (3.4.10.)$$

$$N_2(\xi) = \frac{1}{2}(1 + \xi) \quad (3.4.11.)$$

Βασιζόμενοι στη μεθοδολογία μελέτης των αναπτυσσόμενων δυναμικών και στη θεωρία των γραμμικών συναρτήσεων σχήματος N_i , μπορούμε να γενικεύσουμε και να εστιάσουμε σε περιπτώσεις, όπου ο χώρος έχει περισσότερες διαστάσεις και πιο πολύπλοκη γεωμετρία. Τότε όμως, οι δοκιμές πρέπει να γίνουν με μη γραμμικές προσεγγιστικές συναρτήσεις, όπως είναι: α) οι τετραγωνικές συναρτήσεις (quadratic trial functions) της μορφής $\Phi(x) = a + bx + cx^2$, για τις οποίες εκτός των N_i συναρτήσεων χρειάζεται να οριστούν και οι πρώτες παράγωγοι αυτών ως προς ξ , $\left(\frac{\partial N_i}{\partial \xi}\right)$ καθώς και β) οι κυβικές ερμιτιανές συναρτήσεις (cubic hermite trial functions) της μορφής $\Phi(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$, για τις οποίες εκτός από τις N_i συναρτήσεις, θα πρέπει να οριστούν και οι πρώτες και δεύτερες παράγωγοί τους ως προς ξ , $\left(\frac{\partial N_i}{\partial \xi}\right)$ και $\left(\frac{\partial^2 N_i}{\partial^2 \xi}\right)$. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται μέσα στο πρόγραμμα με κάποια επαναληπτική μέθοδο όπως αυτή του Newton-Raphson [53].

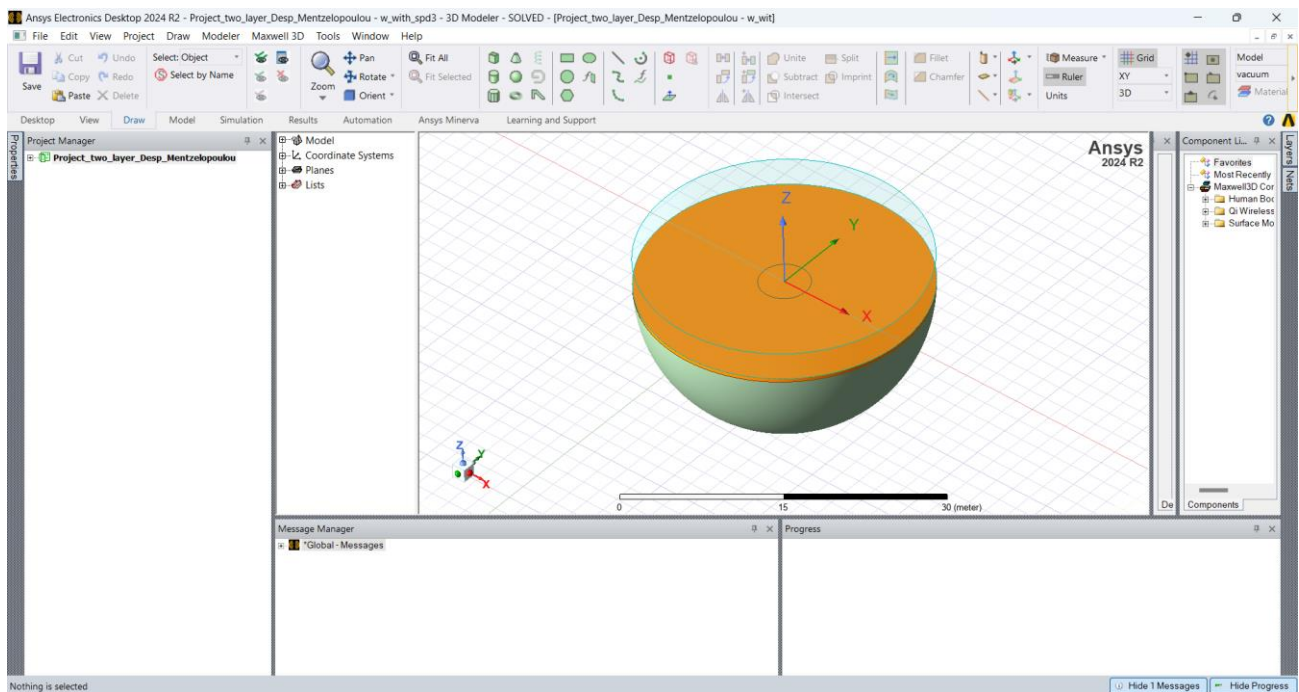
Συμπερασματικά, η FEM αποτελεί μία καινοτόμο μεθοδολογία, με την οποία το λογισμικό μπορεί μοντελοποιήσει ανισοτροπικά εδάφη με στρώματα διαφορετικών αγωγιμοτήτων διαιρώντας τα σε επιμέρους στοιχεία ενός μη ομοιόμορφου πλέγματος, το οποίο έχει τη δυνατότητα να γίνεται πιο πυκνό σε τμήματα του συστήματος γείωσης που απαιτούν και μεγαλύτερη ακρίβεια (π.χ. κοντά στους γειωτές που χαρακτηρίζονται από μεγάλη αγωγιμότητα και από τους οποίους το ρεύμα σφάλματος, βραχυκυκλώματος ή κεραυνικό, εκτονώνεται στη γη). Η μέθοδος FEM υπολογίζει την κατανομή του δυναμικού των συστημάτων γείωσης σε μικρότερο υπολογιστικό χρόνο, καθώς μετατρέπει τα διπλά και τριπλά ολοκληρώματα της δισδιάστατης και τρισδιάστατης εξίσωσης Poisson αντίστοιχα, σε σύστημα γραμμικών εξισώσεων, μειώνοντας έτσι την υπολογιστική πολυπλοκότητα και τον χρόνο εκτέλεσης. Για τον λόγο αυτό, η FEM αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη πολλών αξιόπιστων λογισμικών που μελετούν την κατανομή του δυναμικού σε Συστήματα Γείωσης, όπως το Ansys.

Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις ηλεκτροδίου γείωσης σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους με λογισμικό Ansys

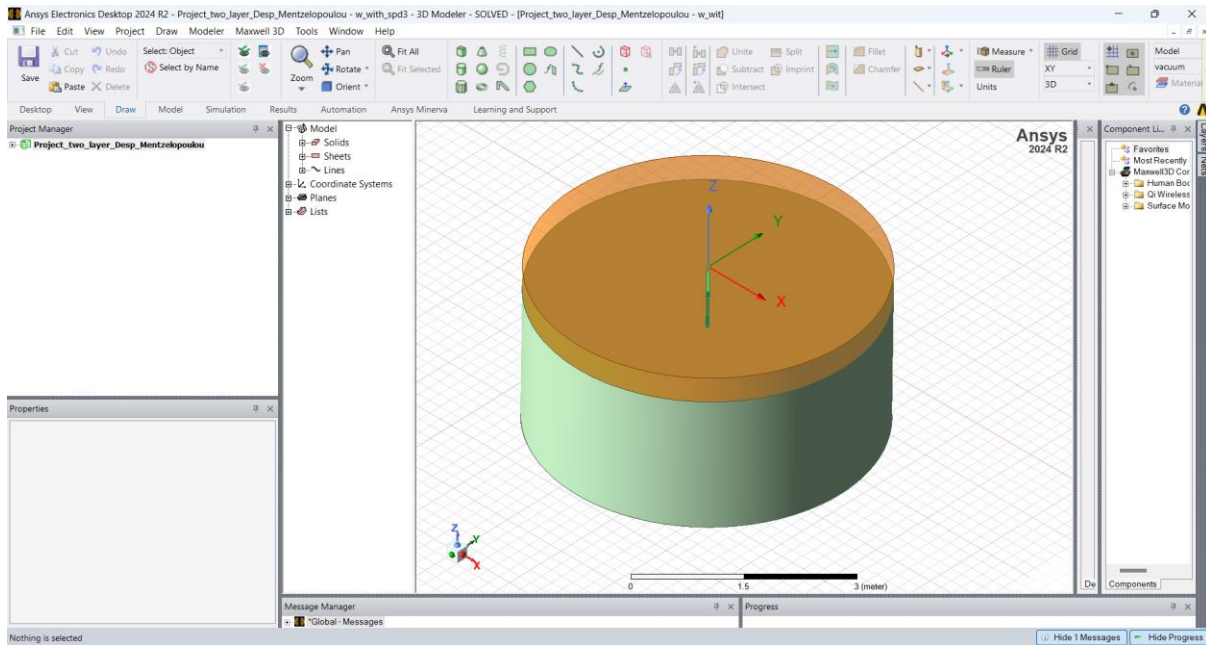
Στην παρούσα Διπλωματική, για όλες τις προσομοιώσεις, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Ansys Electronics Desktop 2024 R2 (Ansys Maxwell-Icepak).

4.1. Διστρωματικό μοντέλο με διάβρωση – προσομοιώσεις σταθερής διέγερσης (dc)

Η καινοτομία της παρούσας Διπλωματικής είναι η χρήση του Two layer Desp Mentzelopoulou soil model. Πρόκειται για ένα διστρωματικό υβριδικό γεωμετρικό μοντέλο. Διαβρωμένο ηλεκτρόδιο μήκους 1m τοποθετείται σε ένα διστρωματικό κύλινδρο (άμεση γη, effective area) με ακτίνα και ύψος δύομιση φορές το μήκος του ηλεκτροδίου (2.5 m). Ο κύλινδρος περικλείεται από την άπειρη γη που προσομοιώνεται με διστρωματικό ημισφαίριο, το οποίο έχει ακτίνα τέσσερις φορές τη διαγώνιο ενός τετραγώνου πλευράς 2.5 m ($4 \cdot 2.5 \cdot \sqrt{2} \cong 14.16$ m). Επειδή στο μοντέλο, το έδαφος είναι διστρωματικό, θεωρούμε ότι το πάνω στρώμα-"sandstone" (πορτοκαλί) έχει βάθος 0.4 m, ενώ το κάτω στρώμα-"limestone" (πράσινο) εκτείνεται ως την άπειρη γη (Σχήματα 4.1.1. και 4.1.2.). Πάνω από το έδαφος υπάρχει στρώμα αέρα ύψους 3m. Η επιλογή των διαστάσεων της άμεσης γης βασίστηκε στο μονοστρωματικό κυλινδρικό μοντέλο των Bouderballa, A et al [49], ενώ όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις των στοιχείων του μοντέλου ορίστηκαν από τη συγγραφέα της Διπλωματικής, Δέσποινα Μεντζελοπούλου.

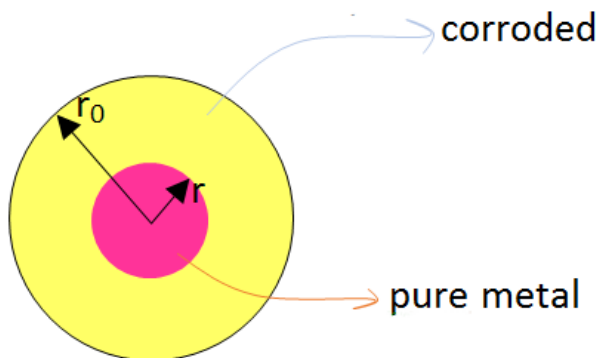


Σχήμα 4.1.1. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model.

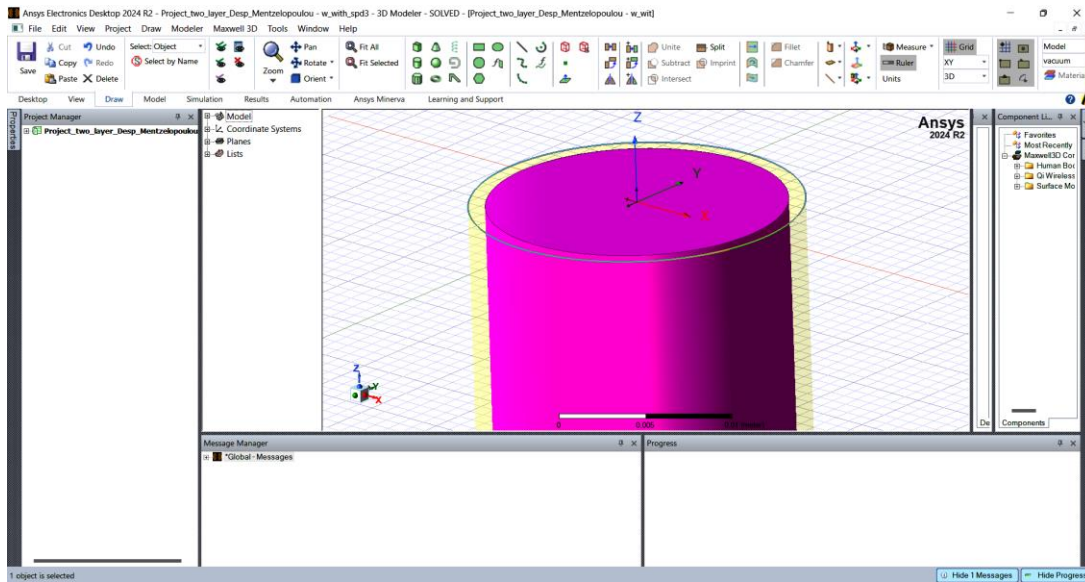


Σχήμα 4.1.2. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model: Ο διστρωματικός κύλινδρος άμεσης γης σε μεγέθυνση.

Το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλκινο ραβδοειδές ηλεκτρόδιο μήκους 1m και αρχικής ακτίνας $r_0 = 10\text{ mm}$. Θεωρούμε, ότι μετά τη διάβρωση, το ηλεκτρόδιο παύει να είναι ένας ομογενής χάλκινος κύλινδρος, αλλά αποτελείται από έναν εσωτερικό χάλκινο κύλινδρο ακτίνας r , ο οποίος περιβάλλεται από τον κύλινδρο ακτίνας r_0 . Ο εσωτερικός κύλινδρος αντιπροσωπεύει το τμήμα του ηλεκτροδίου που διατήρησε την ακεραιότητά του (*pure metal*), ενώ ο εξωτερικός κύλινδρος, το τμήμα που έχει υποστεί διάβρωση (*corroded*) (Σχήματα 4.1.3 και 4.1.4).



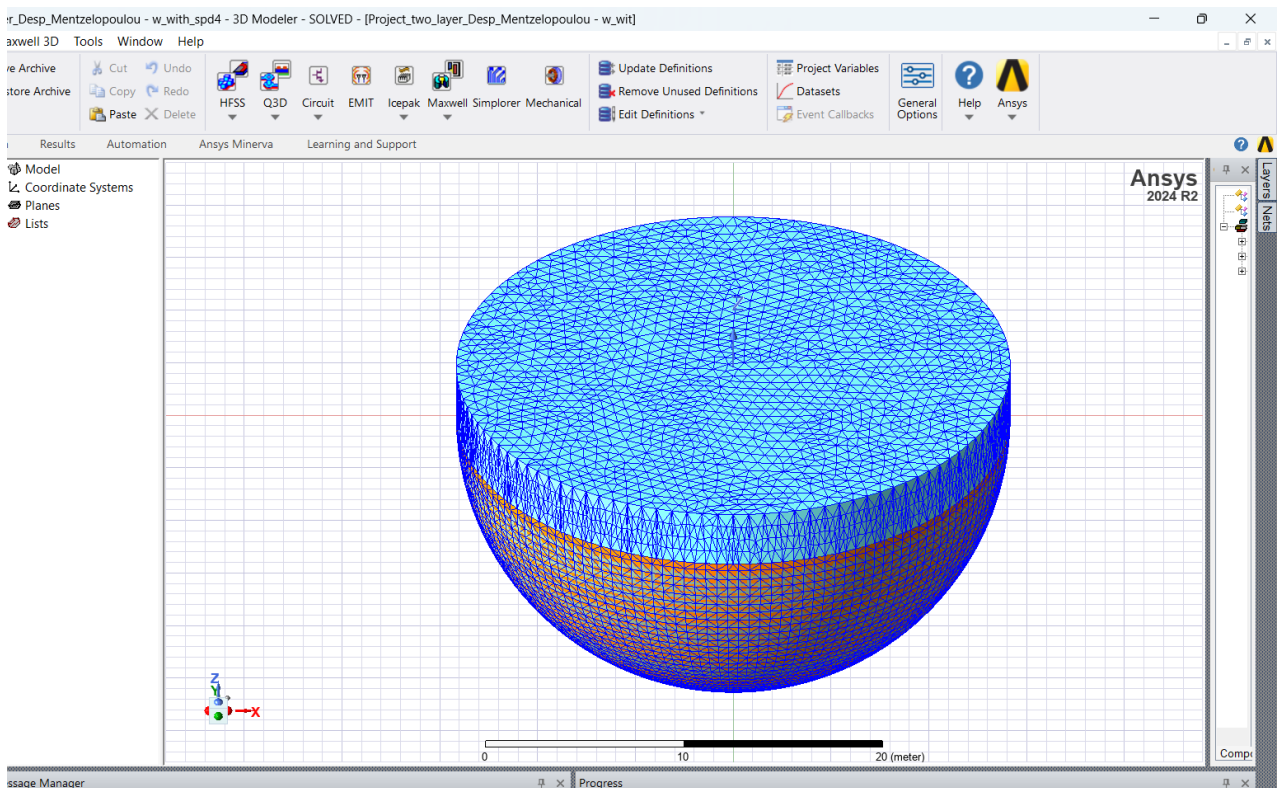
Σχήμα 4.1.3. Διατομή διαβρωμένου ηλεκτροδίου.



Σχήμα 4.1.4. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model: Το διαβρωμένο ηλεκτρόδιο σε μεγέθυνση.

Από το default του προγράμματος, η ειδική αγωγιμότητα για το ακέραιο "pure" εσωτερικό ηλεκτρόδιο λαμβάνει τιμή $5.9 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, ενώ για το "corroded" εξωτερικό τμήμα επιλέχθηκε ειδική αντίσταση $\rho_{corr} = 955 \Omega \cdot m$, με βάση τη μελέτη των Zhang et.al [54].

Το πλέγμα (mesh) που κατασκεύασε το πρόγραμμα εφαρμόζοντας τη μέθοδο FEM φαίνεται στο Σχήμα 4.1.5.



Σχήμα 4.1.5. Το πλέγμα (mesh) του two layer Desp Mentzelopoulou soil model.

4.1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Η αντίσταση γείωσης στο διστρωματικό μοντέλο διαβρωμένου ηλεκτροδίου μήκους l με αρχική και εναπομείνασα ακτίνα r_0 και r , αντίστοιχα δίνεται από τη σχέση [54,55]:

$$R_{ολ} = k\rho + b \quad (4.1.1.)$$

$$\text{όπου } b = \frac{\rho_{corr}}{2\pi l} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \quad (4.1.2.)$$

$$\text{και } k\rho = \frac{1}{2\pi l} \cdot \left[\ln\left(\frac{4l}{r_0}\right) - 1 \right] \cdot \rho \quad (4.1.3.)$$

Επειδή πρόκειται για διστρωματικό μοντέλο, για το ρ χρησιμοποιήθηκε η σχέση

$$\rho = \rho_{eq} = \frac{l \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2 \cdot h + \rho_1 \cdot (l - h)} \quad (4.1.4.)$$

όπου ρ_1 και ρ_2 : η ειδική αντίσταση του άνω και του κάτω στρώματος του εδάφους αντίστοιχα, h : το βάθος του άνω στρώματος του εδάφους και ρ_{corr} : η ειδική αντίσταση στο "corroded" τμήμα του ηλεκτροδίου.

Οι σχέσεις 4.1.1. ως 4.1.4. είναι οι προσεγγιστικές θεωρητικές σχέσεις υπολογισμού της αντίστασης γείωσης στην dc-κατάσταση και θα χρησιμοποιηθούν αργότερα, προκειμένου να επαληθευθούν με αυτές οι τιμές της αντίστασης γείωσης που υπολογίζει το Ansys.

Το Ansys Maxwell είναι ένα πρόγραμμα multiphysics, το οποίο επιλύει ηλεκτρομαγνητικά πεδία με τις εξισώσεις του Maxwell (βλ. Κεφάλαιο 3.1.). Για να υπολογιστεί η αντίσταση γείωσης με το λογισμικό του Ansys Maxwell, αναπροσάρμοσα τον τύπο $R = \frac{V_1^2}{\int_V E^2 dV \cdot \sigma}$ [56], ώστε να είναι

λειτουργικός για το διστρωματικό Two layer Desp Mentzelopoulou soil model ως εξής:

$$R = \frac{V_1^2}{\int_{V_{upper}} E^2 dV \cdot \sigma_1 + \int_{V_{lower}} E^2 dV \cdot \sigma_2} \quad (4.1.5.)$$

όπου R : η αντίσταση γείωσης, V_1 : η τάση που θέτουμε στο ηλεκτρόδιο (100 V), E : το διάνυσμα έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, σ_1 , σ_2 : οι ειδικές αγωγιμότητες του πάνω και του κάτω στρώματος εδάφους αντίστοιχα και V_{upper} , V_{lower} : οι όγκοι του πάνω και κάτω στρώματος εδάφους αντίστοιχα.

4.1.2. Πρώτο set προσομοιώσεων

Για το πρώτο σετ προσομοιώσεων θα χρησιμοποιηθούν τόσο το μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο, όσο και διαβρωμένα ηλεκτρόδια διαφορετικών ακτίνων r , οι οποίες επιλέχθηκαν, ούτως ώστε να αντιστοιχούν σε διάβρωση διαφορετικής βαρύτητας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν διαβρωμένα ηλεκτρόδια με εναπομείνασα ακτίνα 2.5 mm, 5.0 mm και 7.5 mm, δηλαδή διάβρωση ήπιας, μέτριας και σοβαρής προσβολής, αντίστοιχα.

Η εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης ενός ηλεκτροδίου γείωσης είναι πολύ σημαντική, προκειμένου να εκτιμηθεί η λειτουργική του κατάσταση. Η διάβρωση χαρακτηρίζεται "ήπια" (*mild*), όταν η προσβολή είναι μικρή και ο γειωτής εξακολουθεί και πληροί σε μεγάλο βαθμό τις τεχνικές του προδιαγραφές. Στη "μέτρια" (*moderate*) διάβρωση, η προσβολή είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη κατάσταση, αλλά το ηλεκτρόδιο παρέχει ικανοποιητική γείωση και μπορεί για κάποιο ακόμη χρονικό διάστημα να είναι λειτουργικό. Στη "σοβαρή" (*severe*) διάβρωση, η προσβολή είναι

πολύ εκτεταμένη σε βαθμό που ο γειωτής δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στον ρόλο του και πρέπει άμεσα να αντικατασταθεί.

Για τον προσδιορισμό του βαθμού διάβρωσης ελήφθη υπόψιν η θερμική σταθερότητα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αν η διάβρωση μειώσει υπερβολικά τη διάμετρο του ηλεκτροδίου γείωσης, η τεράστια θερμότητα που θα αναπτυχθεί εξαιτίας ενός κεραυνικού ρεύματος ή ενός υπερβολικά μεγάλου ρεύματος βλάβης θα λιώσει το ηλεκτρόδιο. Η θερμική σταθερότητα σχετίζεται κυρίως με την επιφάνεια διατομής του αγωγού. Θεωρώντας ως d_0 και d_m την αρχική και την εναπομείνασα διάμετρο του καθαρού χαλκού (pure metal), αντίστοιχα, και ως d_{min} την ελάχιστη ασφαλή διάμετρο με βάση τη θερμική σταθερότητα, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής χ με τον οποίο εκτιμάται ο βαθμός διάβρωσης σε κάθε δοκιμή [56]:

$$\chi = \frac{d_0 - d_m}{d_0 - d_{min}} \quad (4.1.6.)$$

Η d_{min} υπολογίζεται από το πρότυπο IEC 62305 – 1 [57]:

Η θερμική ενέργεια σε αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα (σε *Joules*) είναι

$$W = R \cdot \int i^2(t) dt \Leftrightarrow \frac{W}{R} = \int i^2(t) dt \quad (4.1.7.)$$

$$\begin{aligned} \text{Για ρεύμα 200 kA: } \frac{W}{R} = \int i^2(t) dt &= \int_0^\infty \left(\left(\frac{200 \cdot 1000}{0.93} \right) \cdot \frac{\left(\left(\frac{t}{19} \right)^{10} \right)}{\left(1 + \left(\frac{t}{19} \right)^{10} \right)} \cdot \exp \left(0 - \frac{t}{485} \right) \right)^2 dt = \\ 1.02753 \cdot 10^{13} \text{ A}^2 \cdot \mu\text{sec} &= 1.02753 \cdot 10^7 \text{ J}/\Omega = 10.2753 \text{ MJ}/\Omega \end{aligned} \quad (4.1.8.)$$

Από το πρότυπο, για αυτή την τιμή $\frac{W}{R}$, η ελάχιστη ασφαλής επιφάνεια διατομής για χάλκινο ηλεκτρόδιο είναι:

$$S_{min} = \frac{\pi \cdot d_{min}^2}{4} \geq 50 \text{ mm}^2, \text{ άρα } d_{min} = 7.98 \text{ mm}, \quad (4.1.9.)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η d_{min} για το χρησιμοποιούμενο στην προσομοίωση ηλεκτρόδιο είναι τα 7.98 mm. Στον Πίνακα 4.1.1. βλέπουμε τον συντελεστή χ για τις τρεις ακτίνες r (2.5 mm, 5mm και 7.5 mm), όπου: α) αν $\chi \in [0, 0.7)$, η διάβρωση είναι ήπια, β) αν $\chi \in [0.7, 1)$, η διάβρωση είναι μέτρια, ενώ γ) αν $\chi \in [1, \infty)$, η διάβρωση είναι σοβαρή.

r	2.5 mm		5 mm		7.5 mm	
	$d_0 = 20 \text{ mm}$ και $d_m = 5 \text{ mm}$		$d_0 = 20 \text{ mm}$ και $d_m = 10 \text{ mm}$		$d_0 = 20 \text{ mm}$ και $d_m = 15 \text{ mm}$	
χ	1.25	σοβαρή διάβρωση	0.83	μέτρια διάβρωση	0.42	ήπια διάβρωση

Πίνακας 4.1.1. Συντελεστής χ για τις τρεις δοκιμές διαβρωμένου ηλεκτροδίου.

Θεωρούμε διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση άνω στρώματος 100 $\Omega \cdot \text{m}$ και ειδική αντίσταση κάτω στρώματος 30 $\Omega \cdot \text{m}$. Για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο διαφορετικών r , αλλά και για

ακέραιο (μη διαβρωμένο) ηλεκτρόδιο, συγκρίνουμε την υπολογιζόμενη από τους θεωρητικούς τύπους ολική αντίσταση (σχέσεις 4.1.1. έως 4.1.4.) με την αντίσταση που υπολογίζει το Ansys (σχέση 4.1.5.), προς επαλήθευση της ορθότητας του μοντέλου.

Ακτίνα pure (mm)	Υπολογιζόμενη $R_{ολ}$ από τύπους σε Ω	$R_{ολ}$ από Ansys σε Ω	Σχήμα
2.5	243.81	235.97	Σχήμα 4.1.6.
5	138.45	132.82	Σχήμα 4.1.7.
7.5	76.83	72.16	Σχήμα 4.1.8.
10	33.10	31.05	Σχήμα 4.1.9.

Πίνακας 4.1.2. Αντιστάσεις γείωσης για σταθερές ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους και μεταβαλλόμενη ακτίνα χάλκινου ηλεκτροδίου.

radius_of_2.5_mm

	\$sigma [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive
1	10.000000	235.970528

Σχήμα 4.1.6. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για severe corrosion με $r = 2.5$ mm

radius_of_5_mm

	\$sigma [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive
1	10.000000	132.819757

Σχήμα 4.1.7. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για moderate corrosion με $r = 5$ mm

radius_of_7.5_mm

	\$sigma [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive
1	10.000000	72.161620

Σχήμα 4.1.8. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για mild corrosion με $r = 7.5$ mm

radius_of_10_mm

	\$sigma [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive
1	10.000000	31.045478

Σχήμα 4.1.9. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για intact rod με $r_0 = 10$ mm

4.1.3. Δεύτερο set προσομοιώσεων

Συγκρίνουμε την υπολογιζόμενη από τους θεωρητικούς τύπους ολική αντίσταση (σχέσεις 4.1.1. έως 4.1.4.) με την αντίσταση που υπολογίζει το Ansys (σχέση 4.1.5.), για την περίπτωση αέριου (μη διαβρωμένου) ηλεκτροδίου σταθερής ακτίνας 10 mm, όπου αλλάζουμε μόνο τις ειδικές αντιστάσεις ρ , άρα και τις ειδικές αγωγιμότητες σ των εδαφών αφού $\sigma = \frac{1}{\rho}$ (4.1.10.)

σ_2 (Siemens/m)	σ_1 (Siemens/m)	Υπολογιζόμενη $R_{ολ}$ από τύπους	$R_{ολ}$ από Ansys	
0.0005	0.00125	993.02	975.44	Σχήμα 4.1.10.
	0.0125	149.89	171.14	
	0.0333	58.27	69.77	
0.01	0.00125	122.22	109.10	
	0.0125	72.22	69.53	
	0.0333	41.09	42.52	

Πίνακας 4.1.3. Αντιστάσεις γείωσης για μη διαβρωμένο χάλκινο ηλεκτρόδιο 10 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, όπου $\sigma_2 < \sigma_1$.

different_soils_radius_of_10mm

	\$c [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma='0.00125S_per_m'	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma='0.0125S_per_m'	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma='0.03333333333S_per_m'
1	0.500000	975.442519	171.137506	69.773045
2	10.000000	109.101440	69.527078	42.517488

Σχήμα 4.1.10. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για intact rod με $r_0 = 10$ mm και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 < \sigma_1$.

σ_2 (Siemens/m)	σ_1 (Siemens/m)	Υπολογιζόμενη $R_{ολ}$ από τύπους	$R_{ολ}$ από Ansys	Σχήμα 4.1.11.
0.0125	0.0005	103.17	91.60	
	0.002	95.71	86.02	
	0.01	69.08	65.21	
0.0333	0.0005	39.33	35.74	
	0.002	38.19	34.90	
	0.01	33.10	31.05	

Πίνακας 4.1.4. Αντιστάσεις γείωσης για μη διαβρωμένο χάλκινο ηλεκτρόδιο 10 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 > \sigma_1$.

different_soils_radius_of_10mm

	\$c\$ [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma=0.0005S_per_m\$	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma=0.002S_per_m\$	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma=0.01S_per_m\$
1	12.500000	91.602527	86.021161	65.205393
2	33.333333	35.739233	34.898434	31.045478

Σχήμα 4.1.11. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για intact rod με $r_0 = 10$ mm και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 > \sigma_1$.

4.1.4. Τρίτο set προσομοιώσεων

Συγκρίνουμε την υπολογιζόμενη από τους θεωρητικούς τύπους ολική αντίσταση (σχέσεις 4.1.1. έως 4.1.4.) με την αντίσταση που υπολογίζει το Ansys (σχέση 4.1.5.), για την περίπτωση διαβρωμένου ηλεκτροδίου με ακτίνα εναπομένουτος χαλκού τα 7.5 mm (ήπια διάβρωση):

σ_2 (Siemens/m)	σ_1 (Siemens/m)	Υπολογιζόμενη $R_{ολ}$ από τύπους	$R_{ολ}$ από Ansys	Σχήμα 4.1.12.
0.0005	0.00125	1036.75	1018.42	
	0.0125	193,62	212.59	
	0.0333	101,96	111.00	
0.01	0.00125	165.94	150.28	
	0.0125	115.95	110.72	
	0.0333	84.82	83.69	

Πίνακας 4.1.5. Αντιστάσεις γείωσης για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με ακτίνα εναπομείνοντος χαλκού 7.5 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, όπου $\sigma_2 < \sigma_1$.

different_soils_radius_of_7.5_mm

	\$c\$ [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma='0.00125S_per_m'	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma='0.0125S_per_m'	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma='0.033333333333S_per_m'
1	0.500000	1018.419443	212.592228	110.998878
2	10.000000	150.282392	110.722304	83.686281

Σχήμα 4.1.12. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για mild corrosion με $r = 7.5$ mm και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 < \sigma_1$.

σ_2 (Siemens/m)	σ_1 (Siemens/m)	Υπολογιζόμενη $R_{ολ}$ από τύπους	$R_{ολ}$ από Ansys	Σχήμα 4.1.13.
0.0125	0.0005	146.90	132.76	
	0.002	139.44	127.18	
	0.01	112.81	106.38	
0.0333	0.0005	83.05	76.85	
	0.002	81.92	76.01	
	0.01	76.83	72.16	

Πίνακας 4.1.6. Αντιστάσεις γείωσης για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με ακτίνα εναπομείνοντος χαλκού 7.5 mm και ειδικές αγωγιμότητες άνω (σ_1) και κάτω (σ_2) στρώματος του εδάφους, όπου $\sigma_2 > \sigma_1$.

different_soils_radius_of_7.5_mm

	\$c\$ [mS_per_m]	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma\$='0.0005S_per_m'	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma\$='0.002S_per_m'	Rtot_with_corr Setup1 : LastAdaptive \$sigma\$='0.01S_per_m'
1	12.500000	132.759086	127.184586	106.380414
2	33.333333	76.850130	76.010491	72.161620

Σχήμα 4.1.13. Two layer Desp Mentzelopoulou soil model, για mild corrosion με $r = 7.5$ mm και διαφορετικές αγωγιμότητες άνω και κάτω στρώματος του εδάφους, με $\sigma_2 > \sigma_1$.

Παρατηρούμε ότι σε όλες τις δοκιμές, οι τιμές αντίστασης γείωσης που υπολογίζει το Ansys είναι πολύ κοντά στις θεωρητικά αναμενόμενες, γεγονός που επαληθεύει το μοντέλο.

Επιπλέον, όσο πιο σοβαρή είναι η διάβρωση, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η αντίσταση του γείωσης. Όμως, αύξηση της αντίστασης γείωσης, σημαίνει ότι για το ίδιο ρεύμα, αναπτύσσονται μεγαλύτερες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, οπότε αυξάνεται η επικινδυνότητα τόσο για το ανθρώπινο δυναμικό όσο και για τον εξοπλισμό. Με άλλα λόγια, η διάβρωση μειώνει την ικανότητα προστασίας του ηλεκτροδίου γείωσης.

4.2 Διστρωματικό μοντέλο με διάβρωση – συμμετρικό & ασύμμετρο βραχυκύκλωμα

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε η τυπική εξίσωση [58]:

$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{\left(0 - \frac{R}{L} \cdot t\right)} \right], \text{ όπου} \quad (4.2.1.)$$

α : η διαφορά φάσης μεταξύ έναρξης σφάλματος και μηδενικής τάσης, φ : η γωνία φάσης (γωνία τάσης-ρεύματος), t : ο χρόνος και R , L : η αντίσταση και η αυτεπαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος αντίστοιχα.

Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν έγιναν με το λογισμικό Ansys Maxwell, και χρησιμοποιήθηκε η σχέση 4.2.1. με τις εξής τροποποιήσεις:

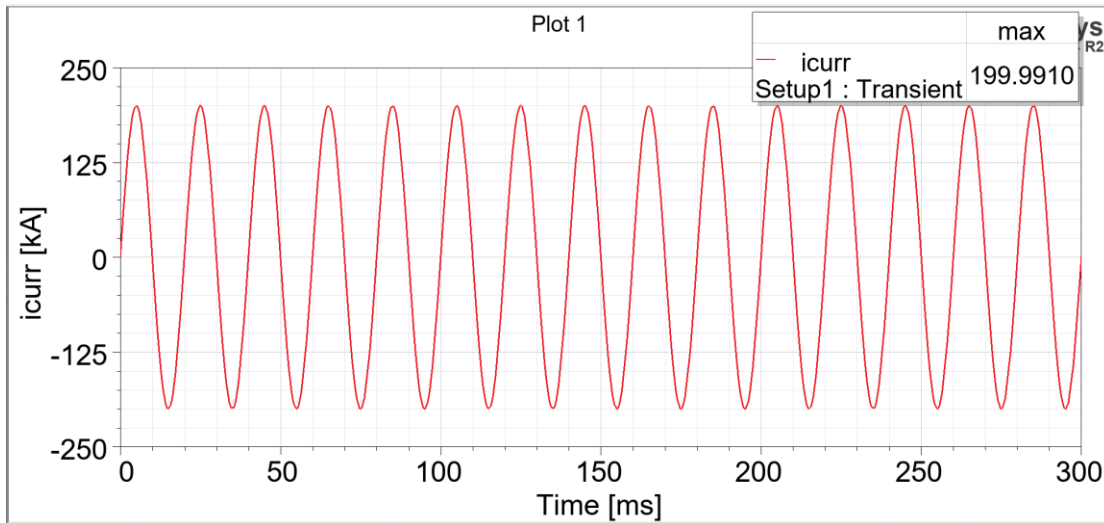
- $I \cdot \sqrt{2} = 200 \text{ kA}$
- $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/sec}$
- για τα α , φ
 - στο συμμετρικό βραχυκύκλωμα: $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$ και $\varphi = \pi/2 \text{ rad}$
 - ενώ, στο ασύμμετρο βραχυκύκλωμα: $\alpha=0 \text{ rad}$ και $\varphi = \pi/3 \text{ rad}$
- θεωρούμε ότι $R/L = 5$, επειδή δεν έχουμε όλα τα στοιχεία του κυκλώματος, ώστε να καταστεί ακριβής ο προσδιορισμός των R και L .

Σκοπός των προσομοιώσεων είναι η μελέτη του ρεύματος και της τάσης για συμμετρικό και ασύμμετρο βραχυκύκλωμα α) για ακέραιο (μη διαβρωμένο) ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm και β) για το ήπια διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνασα ακτίνα καθαρού χαλκού $r = 7.5 \text{ mm}$.

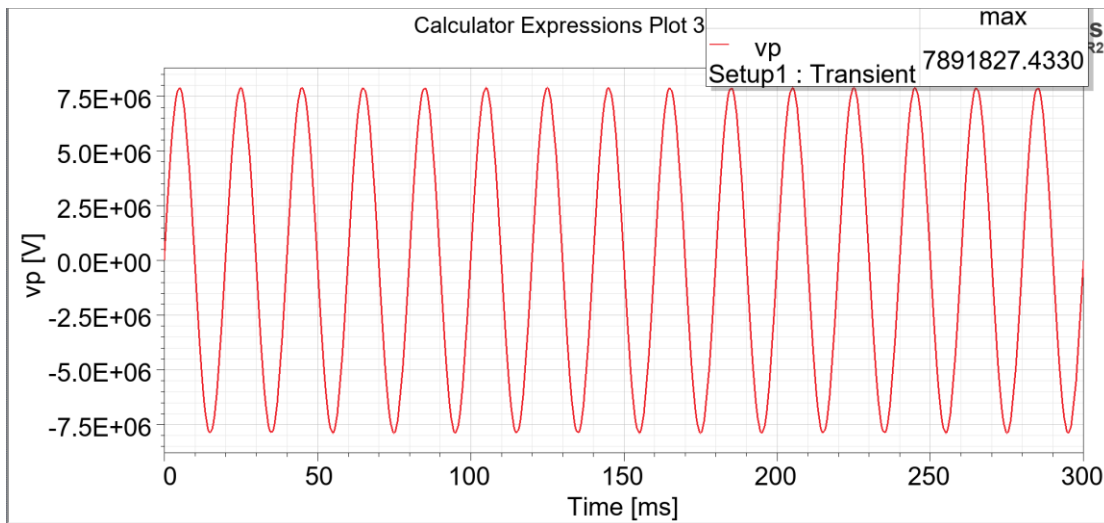
Σε όλες τις προσομοιώσεις συμμετρικού και ασύμμετρου βραχυκυκλώματος, στο άνω στρώμα του διστρωματικού εδάφους θεωρήσαμε ειδική αντίσταση $\rho_1 = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ και στο κάτω στρώμα ειδική αντίσταση $\rho_2 = 30 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$.

4.2.1. Πρώτο set προσομοιώσεων: Συμμετρικό βραχυκύκλωμα σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm

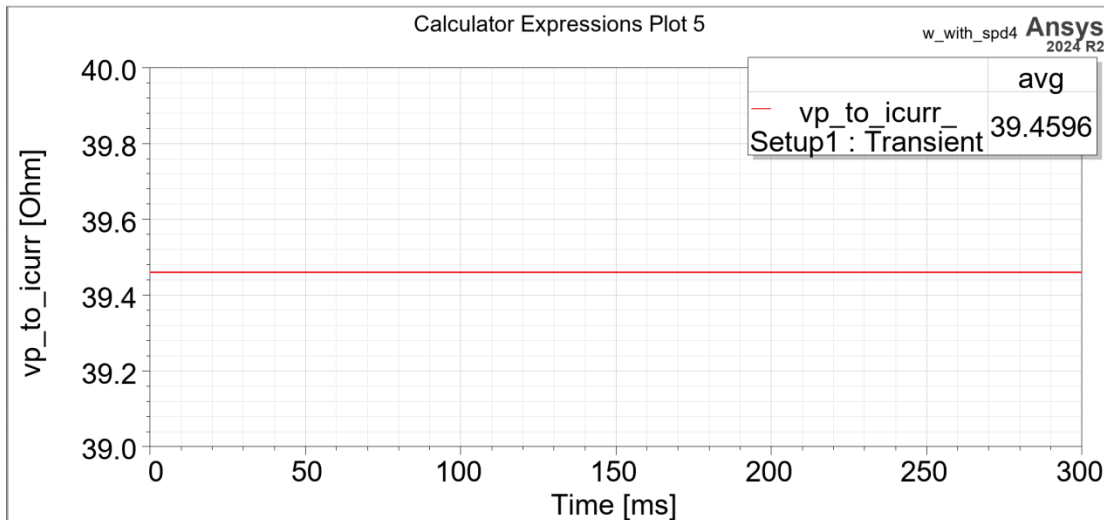
Για συμμετρικό βραχυκύκλωμα πλάτους 200 kA, οι καμπύλες $i(t)$, $u(t)$ και $u(t)/i(t)$ του ακέραιου ηλεκτροδίου έχουν ως εξής:



Σχήμα 4.2.1. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσει του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.



Σχήμα 4.2.2. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

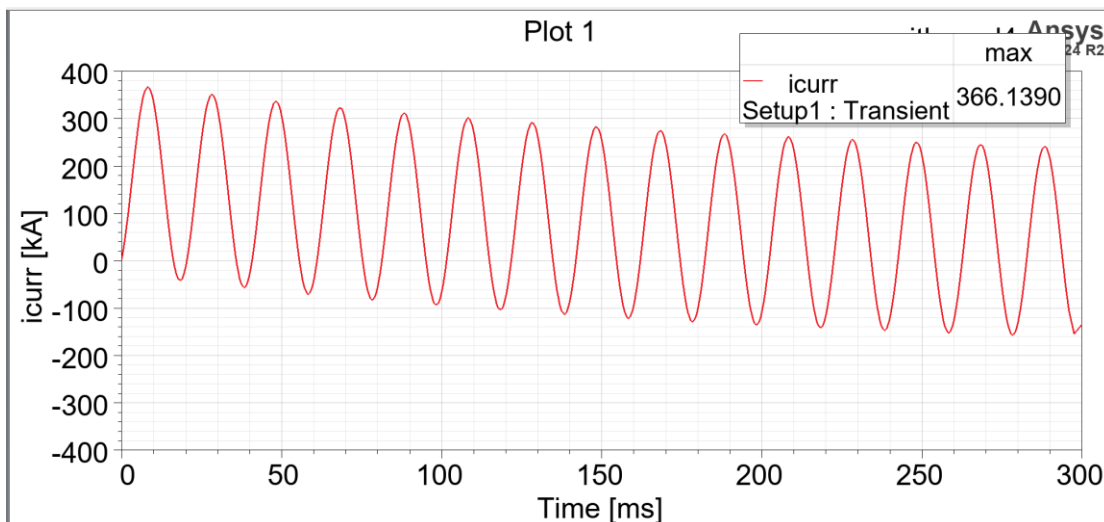


Σχήμα 4.2.3. Καμπύλη σύνθετης αντίστασης συναρτήσεως του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

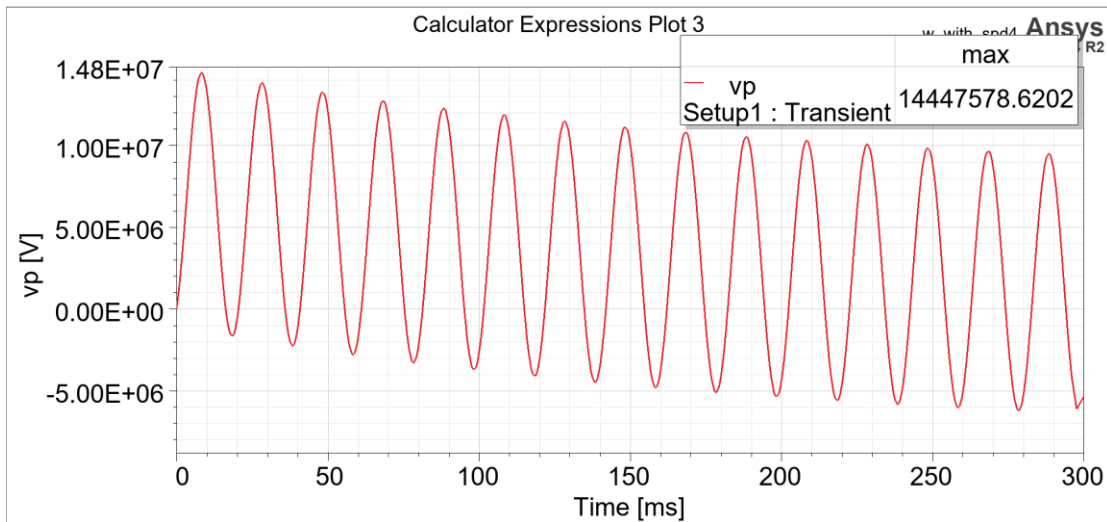
Για πλάτος συμμετρικού βραχυκυκλώματος 200 kA, η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι $Z = 39.5 \Omega$ (Σχήμα 4.2.3.). Από τις τιμές του $V_{\max}$ (Σχήμα 4.2.2.) και του $I_{\max}$ (Σχήμα 4.2.1.) επαληθεύουμε ότι $V_{\max}/I_{\max} = 7891827.43/200000 = 39.5 \Omega = Z$.

4.2.2. Δεύτερο set προσομοιώσεων: Ασύμμετρο βραχυκύκλωμα σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm

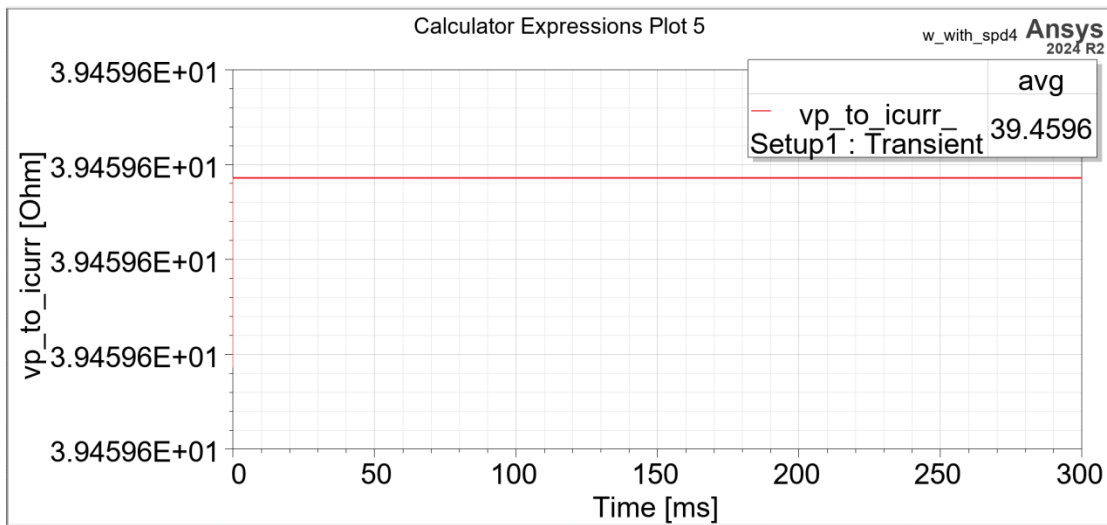
Για ασύμμετρο βραχυκύκλωμα πλάτους ημιτόνου 200 kA, οι καμπύλες $i(t)$, $u(t)$ και $u(t)/i(t)$ του ακέραιου ηλεκτροδίου έχουν ως εξής:



Σχήμα 4.2.4. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσεως του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.



Σχήμα 4.2.5. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.



Σχήμα 4.2.6. Καμπύλη σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

Για πλάτος ημιτόνου ασύμμετρου βραχυκυκλώματος 200 kA, η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι $Z = 39.5 \, \Omega$ (Σχήμα 4.2.6.). Από τις τιμές του $V_{\max}$ (Σχήμα 4.2.5.) και του $I_{\max}$ (Σχήμα 4.2.4.) επαληθεύουμε ότι $V_{\max}/I_{\max} = 14447578.62/366139 = 39.5 \, \Omega = Z$.

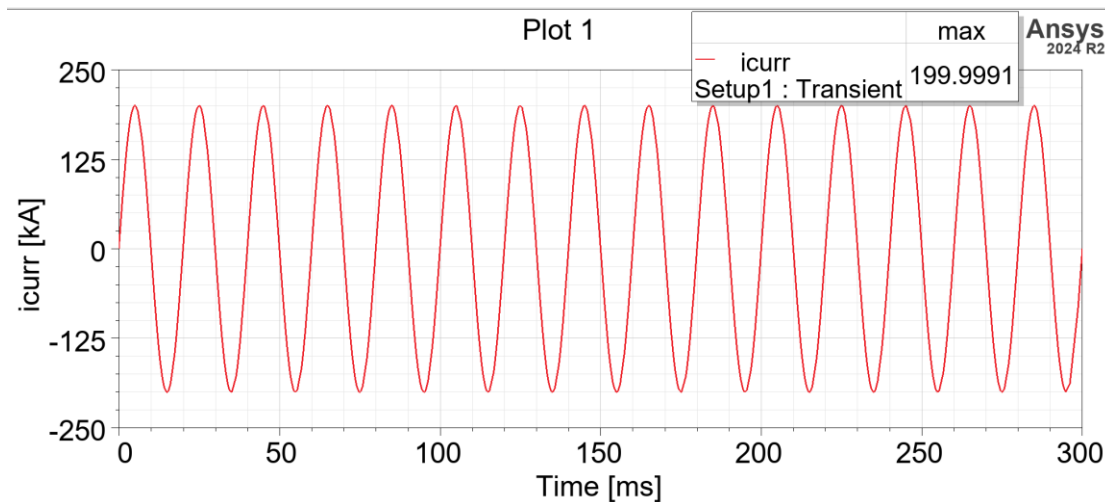
Για πλάτος συμμετρικού βραχυκυκλώματος 200 kA, η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι $Z = 39.5 \, \Omega$ (Σχήμα 4.2.3.).

Επειδή το πλάτος ημιτόνου του ρεύματος βραχυκυκλώματος ήταν ίδιο στο συμμετρικό και στο ασύμμετρο βραχυκύκλωμα (200 kA), η σύνθετη αντίσταση Z ήταν επίσης ίδια (δηλαδή 39.5 Ω).

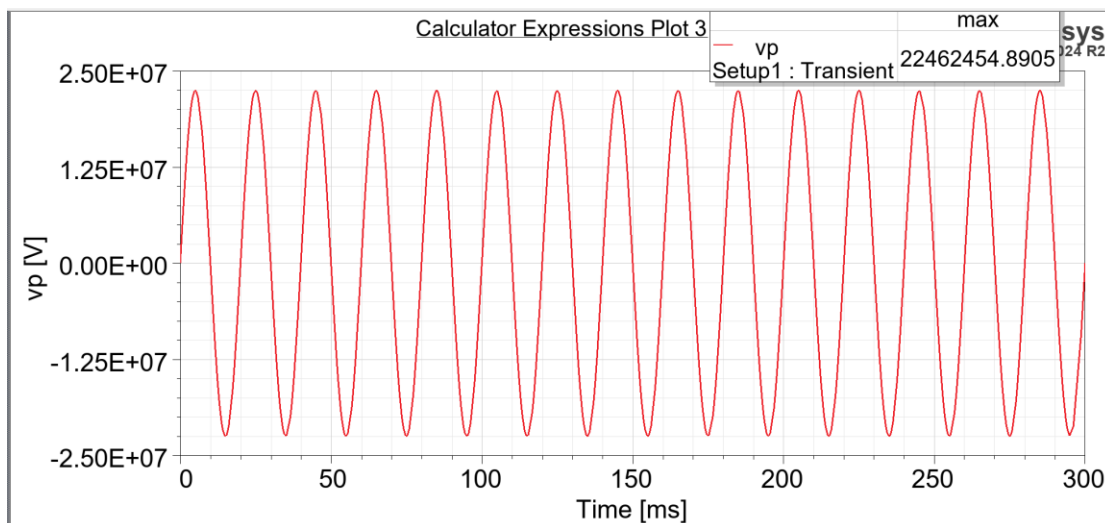
Επίσης, παρατηρούμε ότι η σύνθετη αντίσταση ήταν πολύ κοντά στα $31.05 \, \Omega$ της ωμικής αντίστασης στην dc-κατάσταση (Πίνακας 4.1.1.).

4.2.3. Τρίτο set προσομοιώσεων: Συμμετρικό βραχυκύκλωμα σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm

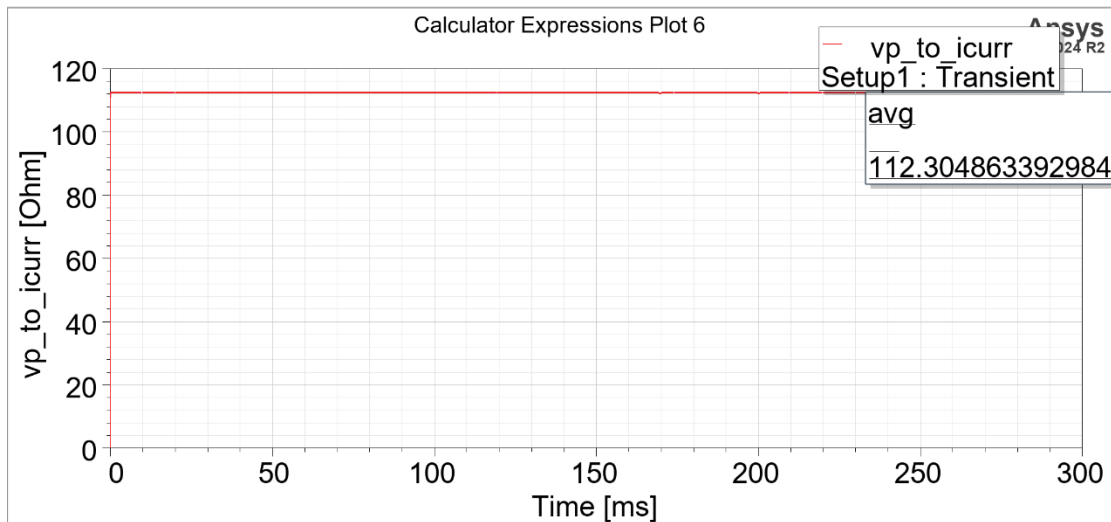
Για συμμετρικό βραχυκύκλωμα πλάτους 200 kA, οι καμπύλες $i(t)$, $u(t)$ και $u(t)/i(t)$ ενός διαβρωμένου ηλεκτροδίου με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm έχουν ως εξής:



Σχήμα 4.2.7. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσει του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.



Σχήμα 4.2.8. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.

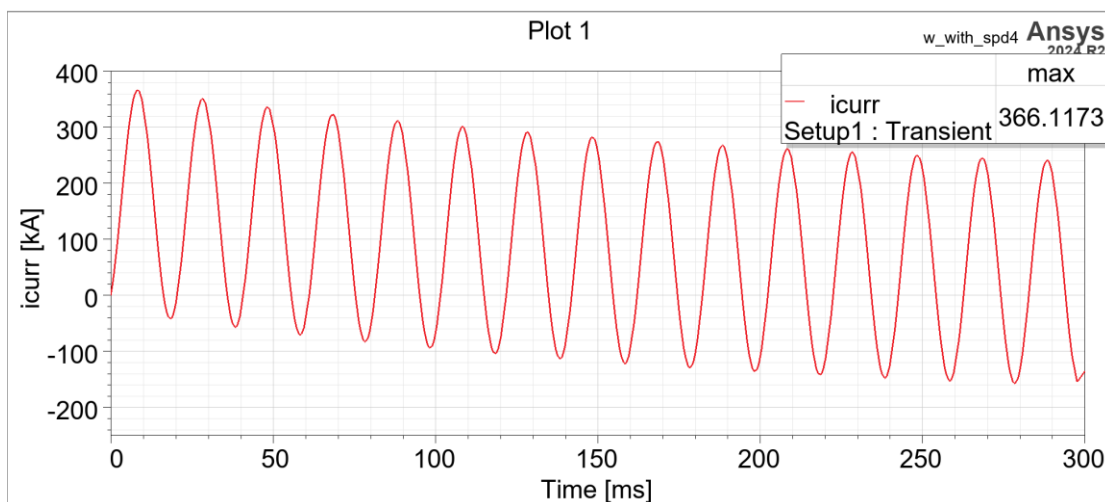


Σχήμα 4.2.9. Καμπύλες σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισμα ακτίνα 7.5 mm.

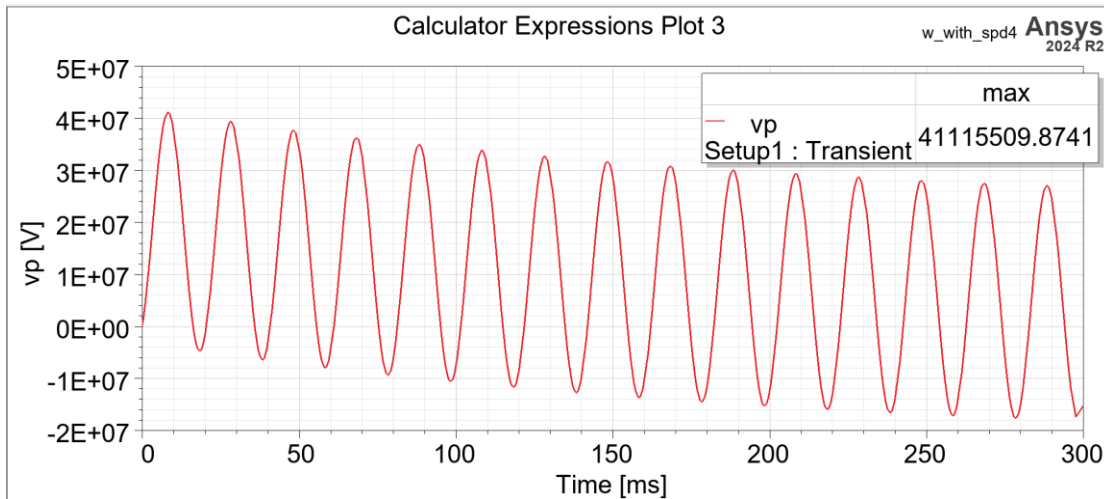
Για πλάτος ημιτόνου συμμετρικού βραχυκυκλώματος 200 kA, η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι $Z = 112.3 \, \Omega$ (Σχήμα 4.2.9.). Από τις τιμές του $V_{\max}$ (Σχήμα 4.2.8.) και του $I_{\max}$ (Σχήμα 4.2.7.) επαληθεύουμε ότι $V_{\max}/I_{\max} = 22462455/200000 = 112.3 \, \Omega = Z$.

4.2.4. Τέταρτο set προσομοιώσεων: Ασύμμετρο βραχυκύκλωμα σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισμα ακτίνα 7.5 mm

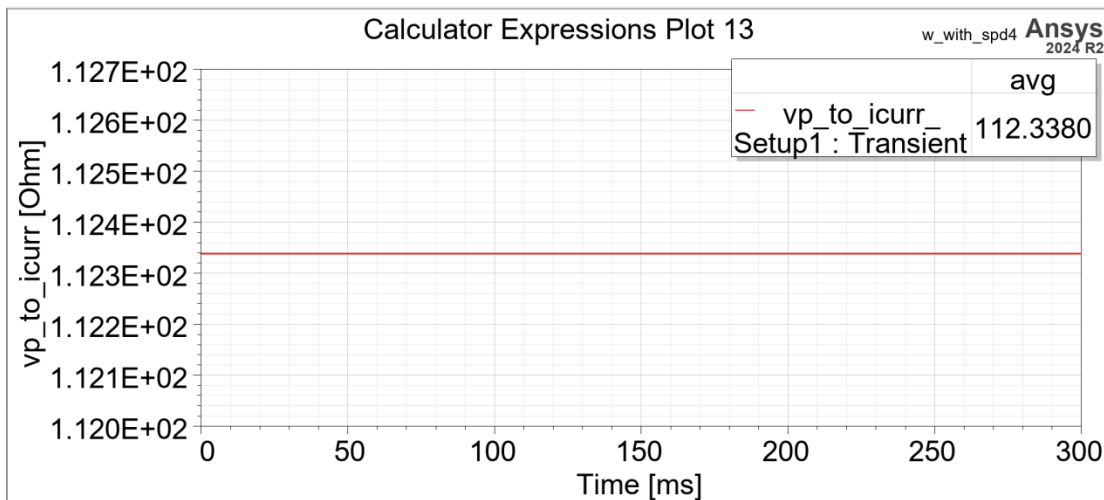
Για ασύμμετρο βραχυκύκλωμα με πλάτος ημιτόνου 200 kA, οι καμπύλες $i(t)$, $u(t)$ και $u(t)/i(t)$ ενός διαβρωμένου ηλεκτροδίου με εναπομείνισμα ακτίνα 7.5 mm έχουν ως εξής:



Σχήμα 4.2.10. Καμπύλη ρεύματος συναρτήσει του χρόνου $i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισμα ακτίνα 7.5 mm.



Σχήμα 4.2.11. Καμπύλη τάσης συναρτήσει του χρόνου $u(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.



Σχήμα 4.2.12. Καμπύλη σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του χρόνου $u(t)/i(t)$, για την περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.

Για πλάτος ημιτόνου ασύμμετρου βραχυκυκλώματος 200 kA, η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι $Z = 112.3 \, \Omega$ (4.2.12.). Από τις τιμές του $V_{\max}$ (Σχήμα 4.2.11.) και του $I_{\max}$ (Σχήμα 4.2.10.) επαληθεύουμε ότι $V_{\max}/I_{\max} = 41115509.9/366117.3 = 112.3 \, \Omega = Z$. Αυτή η τιμή σύνθετης αντίστασης είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή των 72.16 Ω της ωμικής αντίστασης στην dc-κατάσταση.

Όπως συνέβη και με τις δύο πρώτες προσομοιώσεις, επειδή το πλάτος ημιτόνου του ρεύματος συμμετρικού και ασύμμετρου βραχυκυκλώματος ήταν το ίδιο, η τιμή που υπολογίστηκε από το λογισμικό είναι ταυτόσημη και για τις δύο περιπτώσεις, όπως και ήταν.

Πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι η τιμή της σύνθετης αντίστασης για το διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ήταν σαφώς μεγαλύτερη από αυτή του ακέραιου ηλεκτροδίου ($112.3 \, \Omega$ έναντι $39.5 \, \Omega$). Επίσης, η ωμική αντίσταση είχε εμφανίσει αύξηση στο διαβρωμένο ηλεκτρόδιο και στην dc-ανάλυση, όχι όμως σε τόσο σημαντικό βαθμό.

4.3. Διστρωματικό μοντέλο με διάβρωση – κεραυνικό κρουστικό ρεύμα και θερμοκρασία

Για την προσομοίωση κεραυνικού κρουστικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του προτύπου IEC 62305-1 [57]:

$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (4.3.1)$$

όπου T_1 : χρόνος μετώπου, T_2 : χρόνος ημίσεως εύρους, k : συντελεστής διόρθωσης του ρεύματος κορυφής και t : χρόνος.

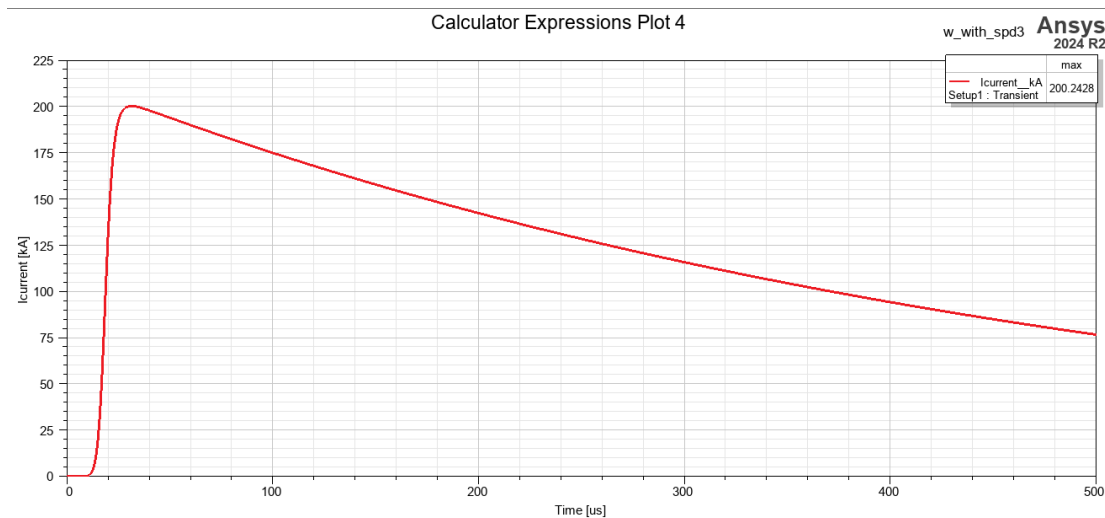
Με βάση το πρότυπο, επιλέγουμε αντικεραυνική προστασία πρώτης βαθμίδας με $I = 200 \text{ kA}$, $k=0.93$, $T_1 = 19 \text{ μs}$ και $T_2 = 485 \text{ μs}$

Μόλις ολοκληρωθεί το Ansys Maxwell, περνάμε στο λογισμικό Ansys Icepak τις ωμικές απώλειες που υπολογίστηκαν στο Maxwell. Το Ansys Maxwell κατασκευάζει mesh με τετράεδρα, ενώ το Icepak κατασκευάζει mesh με εξάεδρα. Από τον συντελεστή scaling factor φαίνεται η ακρίβεια μετάβασης από το ένα πρόγραμμα στο άλλο. Scaling factor 1 σημαίνει 100% ακρίβεια.

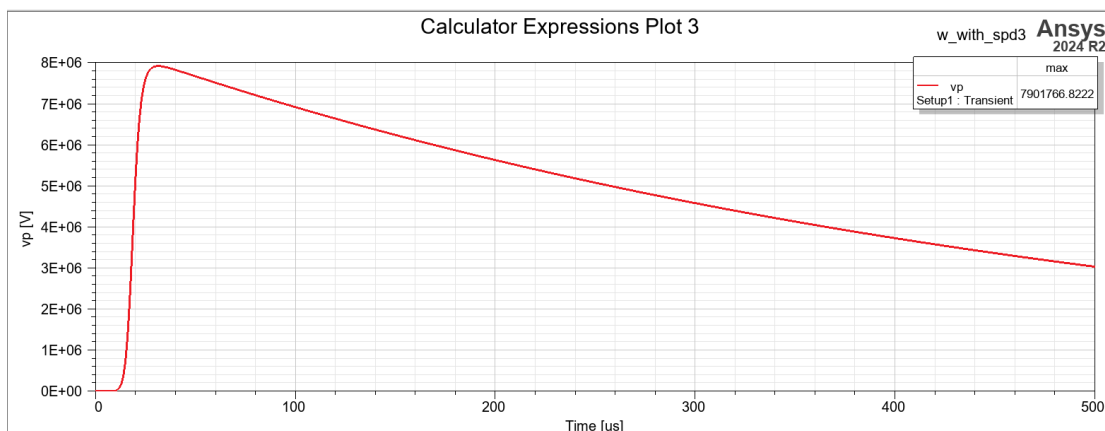
Ως αρχική θερμοκρασία εδάφους επιλέχθηκαν οι $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις, το έδαφος είναι διστρωματικό με ειδικές αντιστάσεις στο πάνω και το κάτω στρώμα τις $\rho_1 = 100 \text{ Ω}\cdot\text{m}$ και $\rho_2 = 30 \text{ Ω}\cdot\text{m}$, αντίστοιχα.

4.3.1. Πρώτο set προσομοιώσεων: Ακέραιο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm

Για πλήξη με κεραυνικό ρεύμα πλάτους 200 kA, σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm, οι γραφικές παραστάσεις του κεραυνικού κρουστικού ρεύματος και της αντίστοιχης κρουστικής τάσης συναρτήσει του χρόνου απεικονίζονται στις Σχήματα 4.3.1. και 4.3.2.



Σχήμα 4.3.1. Καμπύλη κεραυνικού ρεύματος συναρτήσει του χρόνου σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.



Σχήμα 4.3.2. Κρουστική τάση συναρτήσει του χρόνου σε μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

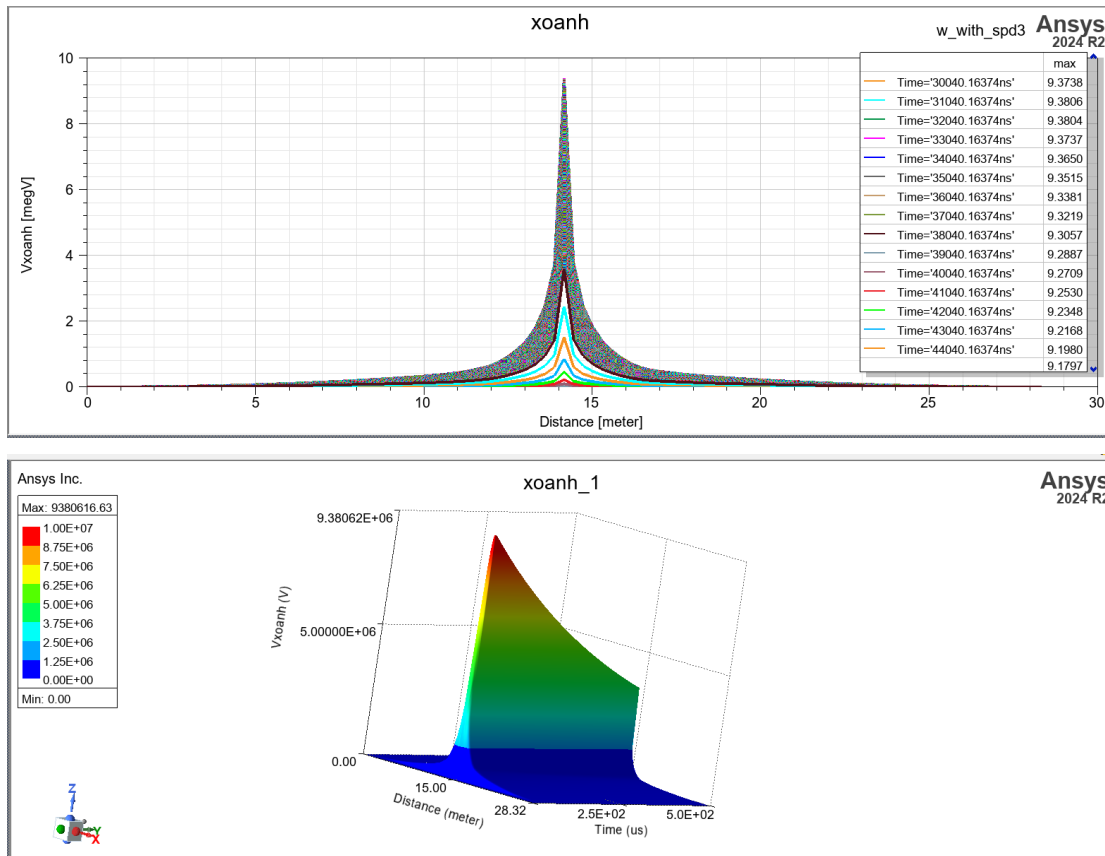
Η σύνθετη κρουστική αντίσταση Z χαρακτηρίζεται από τέσσερις παραμέτρους:

- τη Z_1 , που αποτελεί τη μέγιστη τιμή της παράστασης $V(t)/I(t)$,
- τη Z_2 , που αποτελεί τον λόγο της μέγιστης τιμής τάσης προς την τιμή του ρεύματος τη στιγμή κορύφωσης της τάσης ($V_{\max}/I_{tV\max}$),
- τη Z_3 , που αποτελεί τον λόγο της μέγιστης τάσης προς το μέγιστο ρεύμα ($V_{\max}/I_{\max}$) και
- τη Z_4 , που αποτελεί τον λόγο της τάσης τη στιγμή κορύφωσης του ρεύματος προς το μέγιστο ρεύμα ($V_{tI\max}/I_{\max}$).

Στις προσομοιώσεις υπολογίστηκε μόνο η Z_3 , γιατί θέλουμε να τη συγκρίνουμε με την αντίστοιχη σύνθετη αντίσταση που βρήκαμε κατά την εφαρμογή συμμετρικού και ασύμμετρου βραχυκυκλώματος [16].

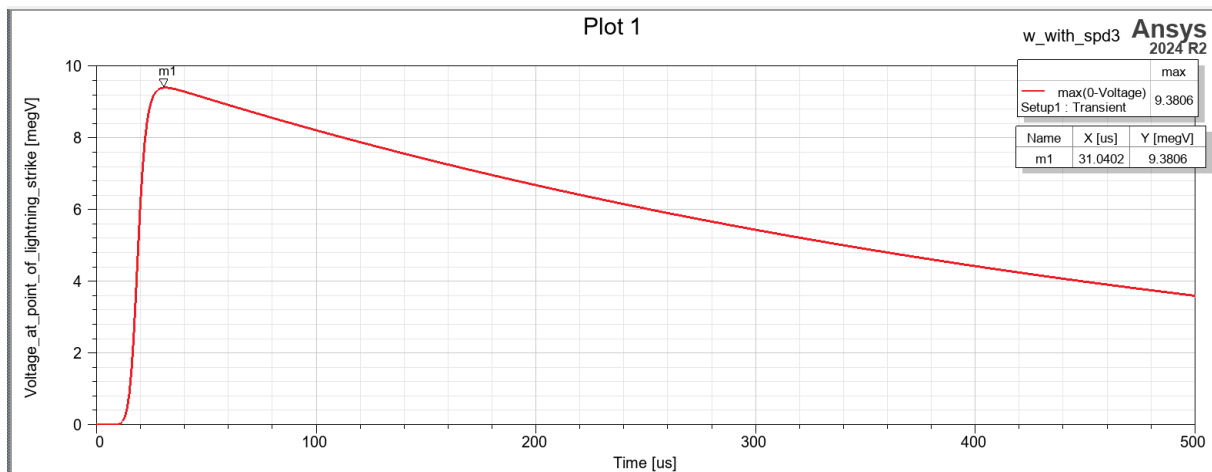
Από τις Σχήματα 4.3.1. και 4.3.2. λαμβάνονται αντίστοιχα τα $I_{\max}$ και $V_{\max}$, οπότε μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος $Z_3 = V_{\max}/I_{\max} = 7901766/200246 = 39.6 \Omega$. Παρατηρούμε ότι οι τιμές της σύνθετης αντίστασης για κεραυνικό ρεύμα πλάτους 200 kA, για συμμετρικό βραχυκύκλωμα πλάτους 200 kA, αλλά και για ασύμμετρο βραχυκύκλωμα πλάτους ημιτόνου 200 kA είναι ίσες.

Οι χοάνες δυναμικού για διάφορους χρόνους απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.3.:



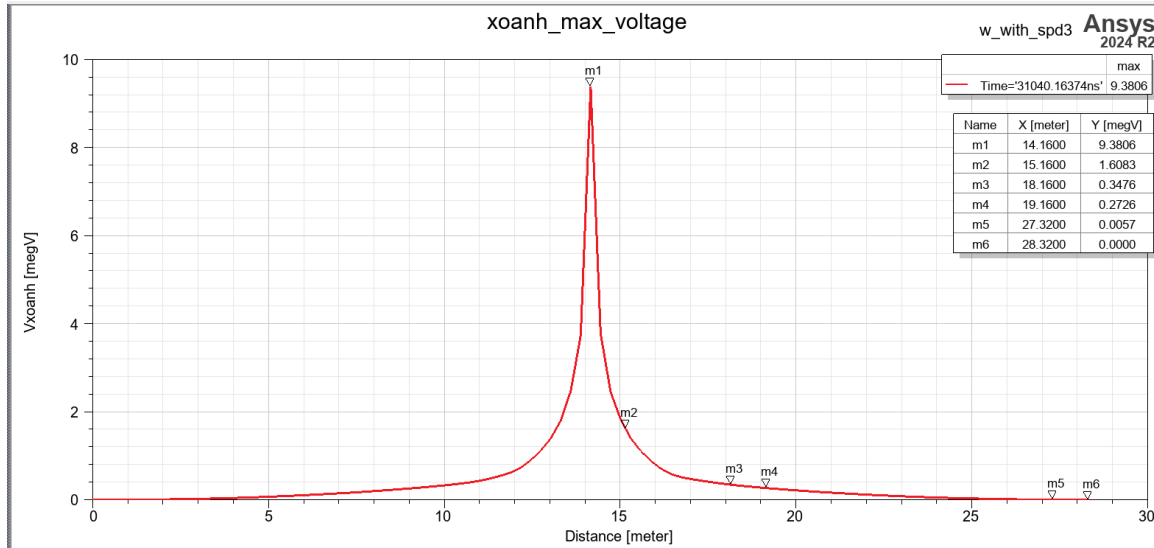
Σχήμα 4.3.3. Χοάνη δυναμικού για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 10 mm για χρόνους από 0 ως τα 500 μ s.

Στο σημείο κεραυνικού πλήγματος, η γραφική παράσταση της τάσης συναρτήσει του χρόνου είναι η εξής:



Σχήμα 4.3.4. Η τάση στο σημείο κεραυνικού πλήγματος για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

Για τη στιγμή με τη μέγιστη τάση (31.04 μ s), η χοάνη δυναμικού έχει την ακόλουθη κυματομορφή (Σχήμα 4.3.5.):



Σχήμα 4.3.5. Η χοάνη δυναμικού με το μεγαλύτερο overshoot για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

Από τη χοάνη δυναμικού τη στιγμή μέγιστης τάσης, υπολογίζουμε

- τη βηματική τάση για μηδενική απόσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης:
 $|V_{15.16\text{ m}} - V_{14.16\text{ m}}| = 9.3806 - 1.6083 = 7.8\text{ MV}$ (4.3.2.)

- τη βηματική τάση για απόσταση 4m από το ηλεκτρόδιο γείωσης:
 $|V_{19.16\text{ m}} - V_{18.16\text{ m}}| = 347.6 - 272.6 = 75\text{ kV}$ (4.3.3.)

- τη βηματική τάση για απόσταση 13m από το ηλεκτρόδιο γείωσης:
 $|V_{28.32\text{ m}} - V_{27.32\text{ m}}| = 5.7 - 0 = 5.7\text{ kV}$ (4.3.4.)

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std. 80-2013 [59], οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής για άτομο 50 kg δίνονται, αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$E_{\text{step}} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot k / \sqrt{t_s} \quad (4.3.5.)$$

$$E_{\text{touch}} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot k / \sqrt{t_s}, \quad (4.3.6.)$$

$$\text{όπου } C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 \cdot h_s + 0.09}, \quad (4.3.7.)$$

με $\rho = 30\text{ }\Omega\cdot\text{m}$: η ειδική αντίσταση του υλικού του κάτω στρώματος του εδάφους, $\rho_s = 100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$: η ειδική αντίσταση του υλικού του άνω στρώματος του εδάφους, $h_s = 0.4\text{ m}$: το βάθος του άνω στρώματος του εδάφους, $k = 0.116$: σταθερά για άτομο 50 kg και t_s ο χρόνος διαρροής του κεραυνικού ρεύματος (θα θεωρηθεί 0.001 s, δηλαδή δύο φορές ο χρόνος ημίσεως εύρους). Προκύπτουν:

$$E_{\text{step}} = 5713\text{ V} \quad (4.3.8.)$$

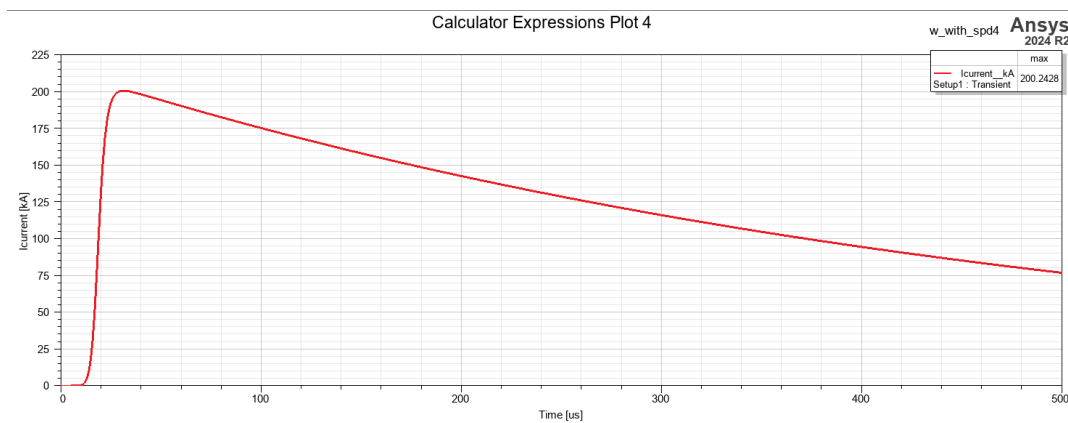
$$E_{\text{touch}} = 4180\text{ V} \quad (4.3.9.)$$

Από τα παραπάνω, διαπιστώνουμε ότι για κεραυνό 200 kA

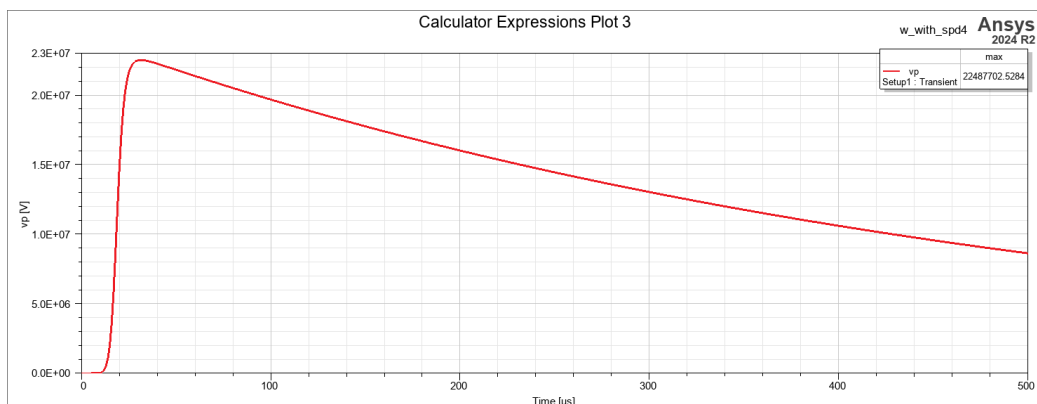
- α. η βηματική τάση των 5.7 kV που εξάγουμε από τη χοάνη δυναμικού για απόσταση ατόμου 1m από την άπειρη γη (σχέση 4.3.4.), συμπίπτει με αυτή του προτύπου (σχέση 4.3.8.) για άτομο 50 kg.
- β. οι τιμές των βηματικών τάσεων μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από το σημείο πτώσης του κεραυνού, ενώ μηδενίζονται μετά την άπειρη γη (αφού $V_{28.32\text{ m}} = 0\text{V}$) και
- γ. τα επίπεδα τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων είναι απαγορευτικά για τη ζωή. Επομένως, αν το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε περιοχή με υψηλό δείκτη T_d (ημέρες καταιγίδας ανά έτος) θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλα μέτρα ασφαλείας, ώστε να μην μπορούν οι άνθρωποι να πλησιάσουν το ηλεκτρόδιο σε ακτίνα μικρότερη από 14.16 m.
- δ. οι βηματικές τάσεις είναι μεγαλύτερες από τις τάσεις επαφής.

4.3.2. Δεύτερο set προσομοιώσεων: Διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm

Για πλήξη με κεραυνικό ρεύμα πλάτους 200 kA, σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm, οι γραφικές παραστάσεις του κεραυνικού κρουστικού ρεύματος και της αντίστοιχης κρουστικής τάσης συναρτήσεως του χρόνου απεικονίζονται στις Σχήματα 4.3.6. και 4.3.7.



Σχήμα 4.3.6. Καμπύλη κεραυνικού ρεύματος συναρτήσεως του χρόνου σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.

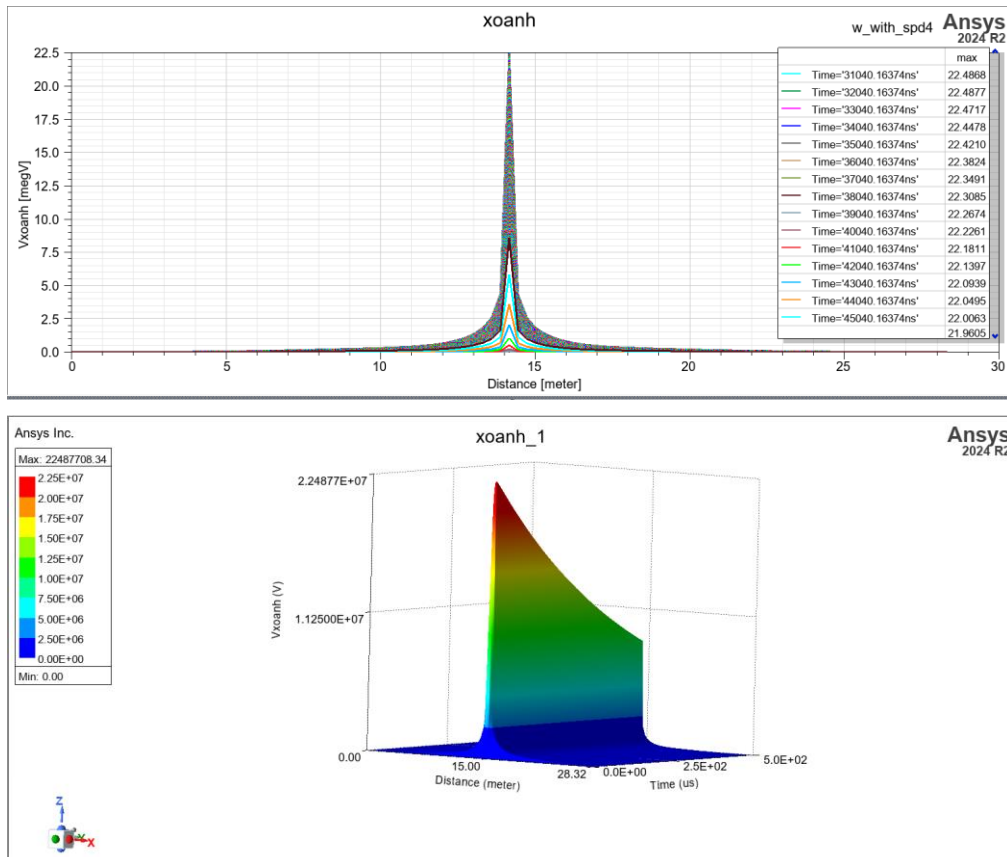


Σχήμα 4.3.7. Καμπύλη κρουστικής τάσης συναρτήσεως του χρόνου σε διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνισα ακτίνα 7.5 mm.

Από τις Σχήματα 4.3.6. και 4.3.7. λαμβάνονται αντίστοιχα τα $I_{\max}$ και $V_{\max}$, οπότε μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος $Z_3 = V_{\max}/I_{\max} = 22487702.5284/200000 = 112.4\ \Omega$. Όπως και με την

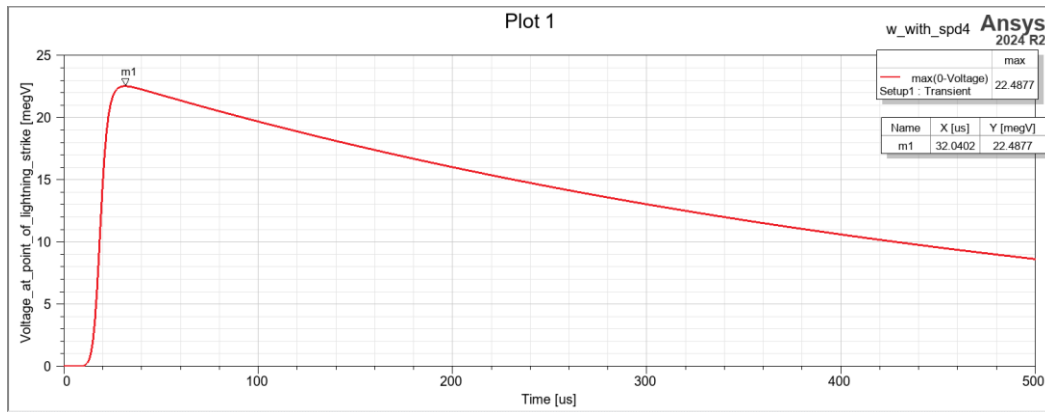
περίπτωση του αέρα ιου ηλεκτροδίου, η τιμή της σύνθετης αντίστασης στο διαβρωμένο ηλεκτρόδιο μετά από πλήξη με κεραυνικό ρεύμα πλάτους 200 kA είναι ίση με τις αντίστοιχες τιμές που παρατηρήθηκαν για συμμετρικό βραχυκύκλωμα πλάτους 200 kA και ασύμμετρο βραχυκύκλωμα με πλάτος ημιτόνου 200 kA.

Ακολουθούν οι χράνες δυναμικού για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο με εναπομείνσα ακτίνα 7.5 mm για διάφορους χρόνους:



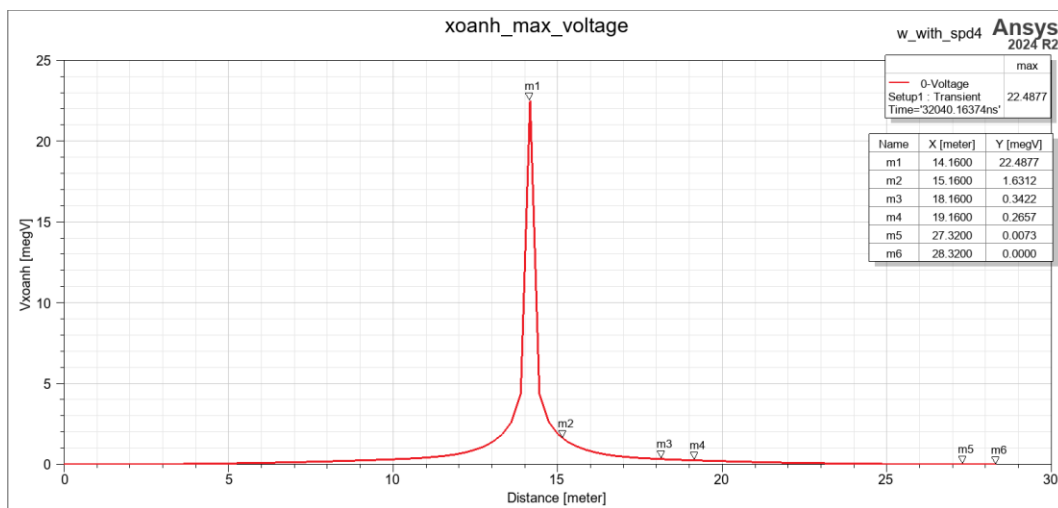
Σχήμα 4.3.8. Χοάνη δυναμικού για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm για χρόνους από τα 0 ως τα 500 μ s.

Στο σημείο του κεραυνικού πλήγματος, η τάση συναρτήσει του χρόνου είναι:



Σχήμα 4.3.9. Η τάση στο σημείο κεραυνικού πλήγματος για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.

Για τη στιγμή με τη μέγιστη τάση (32.04 μs), η χοάνη δυναμικού έχει την ακόλουθη κυματομορφή:



Σχήμα 4.3.10. Η χοάνη δυναμικού με το μεγαλύτερο overshoot για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.

Παρατηρούμε ότι η στιγμή μέγιστης τάσης με και χωρίς διάβρωση είναι σχεδόν ίδια (περίπου στα 31 μs)

Από τη χοάνη δυναμικού τη στιγμή μέγιστης τάσης, υπολογίζουμε

- τη βηματική τάση για μηδενική απόσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης:
 $|V_{15.16 \text{ m}} - V_{14.16 \text{ m}}| = 22.4877 - 1.6312 = 20.9 \text{ MV}$ (4.3.10.)

- τη βηματική τάση για απόσταση 4m από το ηλεκτρόδιο γείωσης:
 $|V_{19.16 \text{ m}} - V_{18.16 \text{ m}}| = 342.2 - 265.7 = 76.5 \text{ kV}$ (4.3.11.)

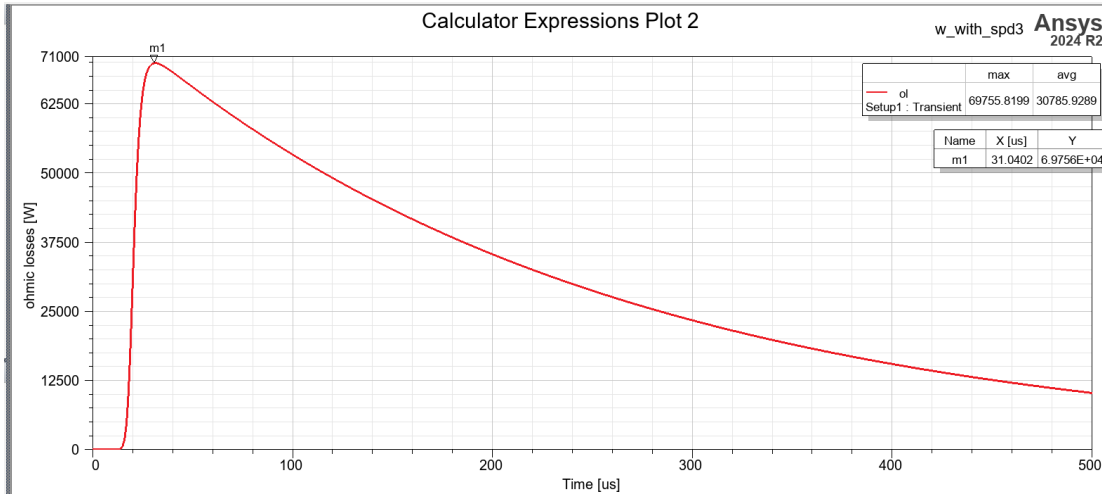
- και τη βηματική τάση για απόσταση 13m από το ηλεκτρόδιο γείωσης:
 $|V_{28.32 \text{ m}} - V_{27.32 \text{ m}}| = 7.3 - 0 = 7.3 \text{ kV}$ (4.3.12.)

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι για πλήξη ενός ήπια διαβρωμένου ηλεκτροδίου (εναπομείνασα ακτίνα 7.5 mm) με κεραυνό 200 kA,

- α. μία καλή προσέγγιση για τη βηματική τάση σε άτομο 50 kg θα μπορούσαν να είναι τα 7.3 kV (σχέση 4.3.12.).
- β. οι τιμές βηματικών τάσεων μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από το σημείο πτώσης του κεραυνού, ενώ μηδενίζονται μετά την άπειρη γη (αφού $V_{28.32\text{ m}} = 0\text{V}$)
- γ. όπως και στην περίπτωση του μη διαβρωμένου ηλεκτροδίου, τα επίπεδα τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων είναι απαγορευτικά για τη ζωή. Επομένως, αν το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο τοποθετηθεί σε κάποια περιοχή με υψηλό δείκτη T_d (ημέρες καταιγίδας ανά έτος), θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα ασφαλείας, ώστε να ο χώρο σε ακτίνα 14.16 m από το ηλεκτρόδιο να μην είναι προσβάσιμος για ανθρώπους και ζώα.
- δ. η διάβρωση αυξάνει και τις βηματικές τάσεις, αλλά όχι σημαντικά.

4.3.3. Τρίτο set προσομοιώσεων: Ωμικές απώλειες μη διαβρωμένου ηλεκτροδίου αρχικής ακτίνας 10 mm

Για ρεύμα 200 kA και μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 10 mm, παίρνουμε την καμπύλη:

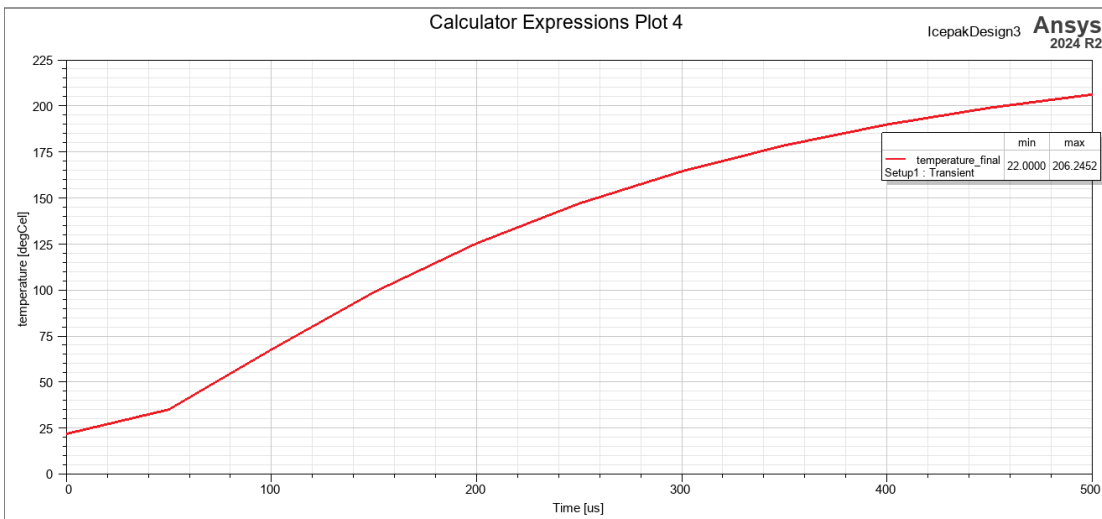


Σχήμα 4.3.11. Ωμικές απώλειες για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

Παρατηρούμε, ότι στα 31 μ s, που είναι η στιγμή με τη μέγιστη χοάνη δυναμικού έχουμε και τις μέγιστες ωμικές απώλειες.

Το διάγραμμα θερμοκρασίας έχει ως εξής:

Scaling Factor: 1.00792

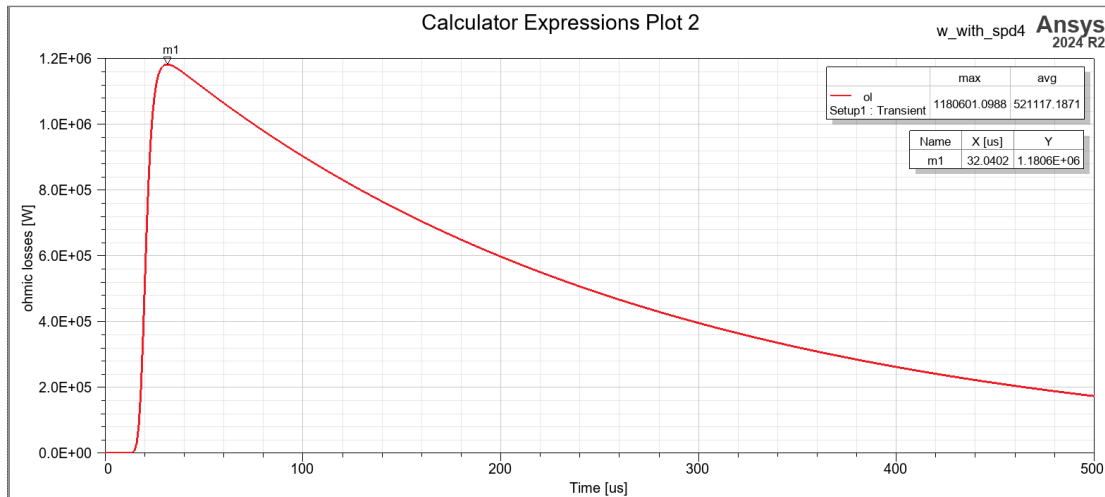


Σχήμα 4.3.12. scaling factor και διάγραμμα θερμοκρασίας για μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο αρχικής ακτίνας 10 mm.

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία που φτάνει είναι οι 206.3 $^{\circ}$ C, που είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του χαλκού (1085 $^{\circ}$ C). Επομένως το μη διαβρωμένο ηλεκτρόδιο δε θα λιώσει.

4.3.4. Τέταρτο set προσομοιώσεων: Ωμικές απώλειες διαβρωμένου ηλεκτροδίου με εναπομείνασα ακτίνα 7.5 mm

Για ρεύμα 200 kA και διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm, παίρνουμε τις καμπύλες:

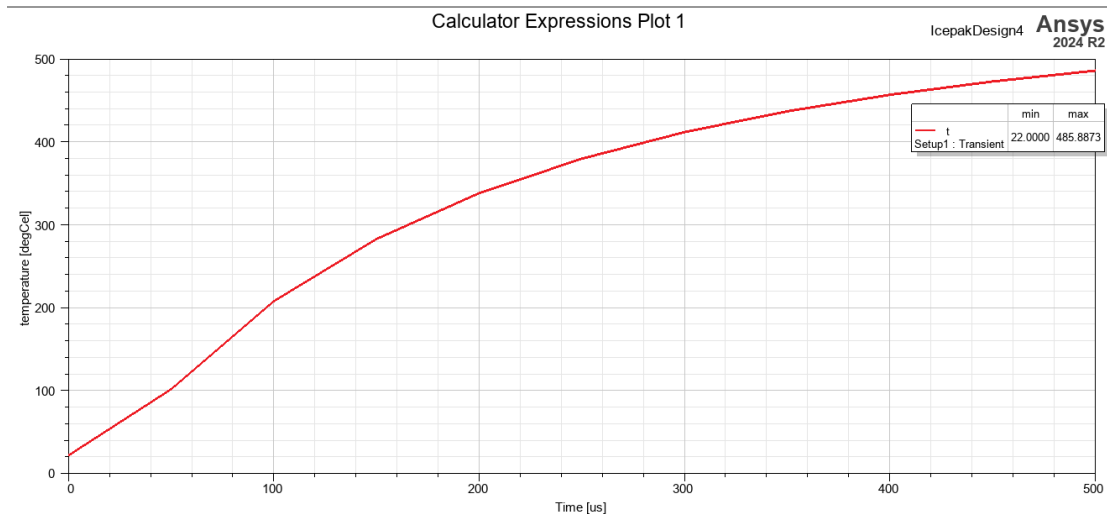


Σχήμα 4.3.13. Ωμικές απώλειες για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.

Παρατηρούμε, ότι στα 32 μ s, που είναι η στιγμή με τη μέγιστη χοάνη δυναμικού έχουμε και τις μέγιστες ωμικές απώλειες.

Το διάγραμμα της θερμοκρασίας έχει ως εξής:

Scaling Factor: 1.03548



Σχήμα 4.3.14. Scaling factor και διάγραμμα θερμοκρασίας για διαβρωμένο ηλεκτρόδιο ακτίνας 7.5 mm.

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία που φτάνει είναι οι 485.9 $^{\circ}$ C, που είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του χαλκού (1085 $^{\circ}$ C). Επομένως, για ήπια διάβρωση (εναπομείνασα ακτίνα 7.5 mm), το ηλεκτρόδιο δε θα λιώσει. Αν και για $r = 7.5$ mm, το ηλεκτρόδιο υφίσταται ήπια διάβρωση,

η μέγιστη θερμοκρασία των 485.9 °C, στην οποία συγκλίνει η καμπύλη του διαβρωμένου (Σχήμα 4.3.14.) ξεπέρασε κατά πολύ το διπλάσιο της μέγιστης θερμοκρασίας στην οποία συγκλίνει η καμπύλη του μη διαβρωμένου (206.3 °C, Σχήμα 4.3.12.).

Κεφάλαιο 5: Συζήτηση

5.1. Συμπεράσματα

Από τις dc προσομοιώσεις για διαβρωμένο και μη ηλεκτρόδιο (Κεφάλαιο 4.1.), διαπιστώσαμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η βαρύτητα της διάβρωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του γείωσης. Ειδικότερα, για το ίδιο έδαφος ($\rho_1=100 \Omega\cdot\text{m}$ και $\rho_2=30 \Omega\cdot\text{m}$) η αντίσταση γείωσης αυξήθηκε από τα 31.05Ω του ακέραιου ηλεκτροδίου, στα 72.16Ω , 132.82Ω και 235.97Ω για ήπια, μέτρια και σοβαρή διάβρωση, αντίστοιχα (Πίνακας 4.1.2.). Μάλιστα, για σοβαρή διάβρωση, η αντίσταση γείωσης γίνεται περίπου 7.5 φορές μεγαλύτερη από την αρχική της τιμή, ενώ φαίνεται σαν να έχουμε διπλασιασμό της αντίστασης γείωσης κατά τη μετάβαση από τον έναν βαθμό διάβρωσης στον επόμενο. Άρα, η διάβρωση μειώνει την ικανότητα του ηλεκτροδίου να προστατεύει το ανθρώπινο δυναμικό και τον εξοπλισμό από βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, αφού η αντίσταση γείωσης δεν είναι στην τιμή για την οποία σχεδιάστηκε το σύστημα γείωσης. Η σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με αυτά του Ansys, επιβεβαίωσε το χρησιμοποιούμενο μοντέλο της παρούσας Διπλωματικής.

Από τις προσομοιώσεις με συμμετρικό και ασύμμετρο βραχυκύκλωμα, διαπιστώσαμε ότι, για ακέραιο ηλεκτρόδιο, η αντίσταση γείωσης ήταν 39.5Ω , ενώ για ήπια διαβρωμένο 112.3Ω (Κεφάλαιο 4.2.). Επομένως, η ήπια διάβρωση στο βραχυκύκλωμα, σχεδόν τριπλασίασε τη σύνθετη αντίσταση γείωσης. Συγκριτικά με τη dc-κατάσταση, το βραχυκύκλωμα προκάλεσε μεγαλύτερη αύξηση της αντίστασης γείωσης στον ήπια διαβρωμένο αγωγό σε σχέση με τον ακέραιο αγωγό (40.14Ω αύξηση έναντι 8.45Ω). Επίσης, σε συμμετρικό και ασύμμετρο βραχυκύκλωμα ίδιου πλάτους ημιτόνου, η αντίσταση γείωσης για το ίδιο ηλεκτρόδιο παρέμεινε σταθερή.

Από τις προσομοιώσεις για κεραυνικό ρεύμα (Κεφάλαιο 4.3.), διαπιστώθηκε ότι η παράμετρος Z_3 συμπίπτει με τη σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος (συμμετρικού ή ασύμμετρου), πλάτους ημιτόνου ίσου με το πλάτος του κεραυνικού ρεύματος. Υπολογίστηκαν οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής σύμφωνα με το πρότυπο για ακέραιο ηλεκτρόδιο. Προτάθηκε τρόπος υπολογισμού των βηματικών τάσεων για ακέραιο και διαβρωμένο ηλεκτρόδιο, που συνιστάται στον υπολογισμό V_{1m} από την άπειρη γη – $V_{\text{άπειρης γης}}$ (όπου $V_{\text{άπειρης γης}} = 0V$), από την υψηλότερη χοάνη δυναμικού. Διαπιστώθηκε αύξηση των βηματικών τάσεων (από τα 5.7 kV στα 7.3 kV), γεγονός που επιβεβαιώνει ότι ακόμη και η ήπια διάβρωση, αυξάνει την επικινδυνότητα των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής για τη ζωή.

Από τις προσομοιώσεις που αφορούν την επίδραση του κεραυνικού πλήγματος στη θερμοκρασία ακέραιου και ήπια διαβρωμένου ηλεκτροδίου (Κεφάλαιο 4.4.), διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη θερμοκρασία των $485.9\Phi \text{ }^\circ\text{C}$, στην οποία έφτασε το ήπια διαβρωμένο ηλεκτρόδιο, ήταν περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη θερμοκρασία του ακέραιου ηλεκτροδίου ($206.3 \text{ }^\circ\text{C}$). Η μεγάλη αυτή άνοδος της θερμοκρασίας στο κεραυνικό πλήγμα, οφείλεται στο γεγονός ότι η παράμετρος σύνθετης αντίστασης Z_3 για ακέραιο ηλεκτρόδιο ήταν 39.6Ω και περίπου τριπλάσια για ήπια διαβρωμένο (112.4Ω). Βέβαια, επειδή επρόκειτο για ήπια διάβρωση, το ηλεκτρόδιο δε θα έλιωνε. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι, σε περίπτωση που το ηλεκτρόδιο τοποθετηθεί σε περιοχή με υψηλό T_d και πλήττεται συνεχώς από τόσο ισχυρά κρουστικά κεραυνικά ρεύματα, αυξάνεται ο ρυθμός διάβρωσής του (βλ. Κεφάλαιο 2.5.5.).

Οπότε, σε περίπτωση που διαπιστωθεί ότι ο γειωτής δεν προστατεύει επαρκώς την εγκατάσταση (για παράδειγμα λόγω σοβαρής διάβρωσης), θα πρέπει να λαμβάνονται και τα αντίστοιχα μέτρα ασφαλείας, όπως η απαγόρευση εισόδου σε ακτίνα μικρότερη από αυτή της άπειρης γης.

Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος γείωσης, ο παράγων " διάβρωση" πρέπει να λαμβάνεται οπωσδήποτε υπόψιν, προκειμένου να επιλεγεί γειωτής από υλικό, κατάλληλο για τον συγκεκριμένο τύπο εδάφους της εγκατάστασης, ώστε να διασφαλισθεί ο μικρότερος δυνατός ρυθμός διάβρωσης. Ειδικότερα, σε ισχυρώς όξινο ή αλκαλικό έδαφος πρέπει, παρά το μεγαλύτερο κόστος του, να προτιμάται ο χάλκινος γειωτής έναντι του γειωτή από γαλβανισμένου χάλυβα (βλ. Κεφάλαιο 2.3.3.) γιατί α) προέχει η ασφάλεια του έμψυχου δυναμικού και του εξοπλισμού της εγκατάστασης και β) ο εντοπισμός και η αντικατάσταση σοβαρά διαβρωμένου γειωτή που δεν εξυπηρετεί πλέον το σκοπό του, είναι ακόμη πιο κοστοβόρα και δύσκολη διαδικασία.

5.2. Τα επόμενα βήματα

Σε επόμενα βήματα, θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση του ρεύματος συμμετρικού και ασύμμετρου βραχυκυκλώματος και του κεραυνικού πλήγματος σε διαφορετικής βαρύτητας διαβρωμένο ηλεκτρόδιο και να διαπιστωθεί αν η μεγαλύτερη φθορά θα προκαλούσε τήξη του χαλκού.

Βιβλιογραφία:

- [1] Samadinasab, S., Namdari, F., & Bakhshipour, M. (2017). A Novel Approach for Earthing System Design Using Finite Element Method. *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, 8, 54-63.
- [2] Οικονόμου, Λ., Φώτης, Γ., & Χριστοδούλου, Χ. (2023). Συστήματα Γείωσης σε Υψηλές Τάσεις. Στο Οικονόμου, Λ., Φώτης, Γ., & Χριστοδούλου, Χ. (Επιμ.), *Υψηλές Τάσεις* (σ. 381- 414), Αθήνα: Τζιόλας.
- [3] Ντοκόπουλος, Π. (2005). Γειώσεις σε εγκαταστάσεις χαμηλής και μέσης τάσης. Στο Ντοκόπουλος, Π. (Επιμ.), *Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης* (σ. 127-159), Θεσσαλονίκη: Ζήτη.
- [4] Faria, J. B., Pedro, M. E., & Machado, V. M. (2023). The Complex Impedance of the Hemispherical Ground Electrode: An Open Analytical Problem. *Energies*, 16(20), 7062. <https://doi.org/10.3390/en16207062>
- [5] Γκόνος, Ι., & Πολυκράτη, Α. (2021). Γειώσεις. Στο Γκόνος, Ι., & Πολυκράτη, Α. (Επιμ.), *Σχέδιο για Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς, Οικιακές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις* (σ. 609-646), Αθήνα: Τζιόλας.
- [6] Ivonin, V. V. (2020, October 6-9). Experimental Investigation of Impulse Resistance of Different Type Grounding Electrodes, [Conference presentation] 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia. doi:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271586.
- [7] Ladanyi, J., & Smohai, B. (2013, June 6-8). Influence of auxiliary electrode arrangements on earth resistance measurement using the Fall-of-Potential method [Conference presentation] 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), Siófok, Hungary,. doi: 10.1109/IYCE.2013.6604146.
- [8] Malik, K. A., Madun, A., Abu Talib, M. K., Wahab, N., Md Dan, M. F. (2023). Interpretation of soil grain size effect on electrical resistivity method. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 129, 103324. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103324>.
- [9] Lv, R., Sun, Q., Li, P., Geng, J., Xin, Y., & Wang, S. (2024). Effect of different water and organic matter content on the resistivity of loess. *The Science of the total environment*, 906, 167624. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167624>
- [10] Androvitsaneas, V. P., Damianaki, K. D., Christodoulou, C. A., & Gonos, I. F. (2020). Effect of Soil Resistivity Measurement on the Safe Design of Grounding Systems. *Energies*, 13(12), 3170. <https://doi.org/10.3390/en13123170>.
- [11] Zohra-Hadjadj, F., Laredj, N., Maliki, M., Missoum, H., & Bendani, K. (2019). Laboratory evaluation of soil geotechnical properties via electrical conductivity Evaluación de laboratorio de las propiedades geotécnicas del suelo mediante conductividad eléctrica. *Revista Facultad de Ingeniería*, 90, 101-112. doi:10.17533/udea.redin.n90a11
- [12] Liu, R., Zhu, C., Schmalzel, J., Offenbacher, D., Mehta, Y., Barrowes, B., Glaser, D., Lein, W. (2022). Experimental and numerical analyses of soil electrical resistivity under subfreezing conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 202, 104671. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104671>.
- [13] Caetano, C.E., Batista, R., Paulino, J.O., Boaventura, W.C., Lopes, I.J., & Cardoso, E.N. (2018). A Simplified Method for Calculating the Impedance of Vertical Grounding Electrodes Buried in a Horizontally Stratified Multilayer Ground. 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 1-7. doi:10.1109/ICLP.2018.8503460
- [14] Jesenik, M., Hamler, A., & Trlep, M. (2021). Analyzing of a Soil Model Using the Finite Element Method for Simulation of Soil Resistivity Measurement. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57, 1-4.

- [15] Nikolovski, S., Knežević, G., & Baus, Z. (2016). Assessment of Step and Touch Voltages for Different Multilayer Soil Models of Complex Grounding Grid. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 6(1441),1441-1455.
- [16] Gonos, I. F., Topalis F. V., & Stathopoulos, I. A. (1999). Transient impedance of grounding rods. 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, London, 272-275. doi: 10.1049/cp:19990646.
- [17] <https://soilsensor.com/articles/soil-textures/>
- [18] Zhang, B., Li, Z., & Wang, S. (2020). Onset electric field of soil ionisation around grounding electrode under lightning. *High Voltage*, 5(5). <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0209>
- [19] Mousa, A.M. (1994). The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9, 1669-1677.
- [20] Gonos, I.F., & Stathopoulos, I.A. (2004). Soil ionisation under lightning impulse voltages. *Science, Measurement and Technology. IEE Proceedings*, 151(5), 343 - 346.
- [21] Liew, A.C., & Darveniza, M. (1974). Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121 (2), 123-135.
- [22] Brenna, M., Foiadelli, F., Longo, M., & Zaninelli, D. (2018). Particular grounding systems analysis using FEM models. 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 1-6.
- [23] Trlep, M., Hamler, A., & Hribernik, B. (1999). The FEM analysis of complex grounding systems by the program package FIELD GS. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 22. doi: 10.2495/ES990241.
- [24] Μπούρκας, Π. Δ., & Πολυκράτη, Α. Δ. (2012). Γειώσεις σε συνήθειες εγκαταστάσεις. Στο Μπούρκας, Π. Δ., & Πολυκράτη, Α. Δ. (Επιμ.), *Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις (Εφαρμογές βιομηχανικών ηλεκτρικών διατάξεων)*, Τόμος II ” (σ. 401-411), Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [25] Kamel, R. M., Chaouachi, A., & Nagasaka, K. (2011). Comparison the Performances of Three Earthing Systems for Micro-Grid Protection during the Grid Connected Mode. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2(3). doi: 10.4236/sgre.2011.23024
- [26] Lackovic, V. How to Design System Grounding in Low Voltage Electrical Systems. An online PDH course by CEDengineering.com. <https://www.cedengineering.com/userfiles/E05-016%20-%20How%20to%20Design%20System%20Grounding%20in%20Low%20Voltage%20Electrical%20Systems%20-%20US.pdf>
- [27] Hardi, S., & Harahap, T. O. (2024). Parameters as indicators of grounding rod corrosion in substation in port area. *E3S Web of Conferences*, 519, 02013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451902013>
- [28] Zhao, J., Meng, X., Ren, X., Li, S., Zhang, F., Yang, X., Xu, J., & Yuan, Y. (2024). Review on Soil Corrosion and Protection of Grounding Grids. *Materials* (Basel, Switzerland), 17(2), 507. <https://doi.org/10.3390/ma17020507>
- [29] Khoshnaw, F., and Gubner, R. (2019). Part I: General Aspects of Corrosion, Corrosion Control, and Corrosion Prevention. In Khoshnaw, F., & Gubner, R. (Eds.), *Corrosion Atlas Case Studies (xxv-xli)* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818760-9.02002-X>.
- [30] <https://www.swagelok.com/en/toolbox/material-selection-guide/corrosion-types>
- [31] Υφαντής, Δ. Κ. (2008). *Υλικά, Διάβρωση & Προστασία, Ορολογία, Προτυποποίηση, Βιβλιογραφικός οδηγός (Θεωρία και Ασκήσεις)*, Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ
- [32] <https://www.materialsperformance.com/articles/material-selection-design/2016/09/the-science-behind-it-localized-corrosion-failure-of-type-316l-stainless-steel-drain-pipeline>

- [33] Starosvetsky, D., Armon, R.H., Yahalom, J., & Starosvetsky, J. (2001). Pitting corrosion of carbon steel caused by iron bacteria. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 47, 79-87.
- [34] Alharbi, S.O., Ahmad, S., Gul, T., Ali, I., & Bariq, A. (2024). The corrosion behavior of low carbon steel (AISI 1010) influenced by grain size through microstructural mechanical. *Scientific Reports*, 14. doi:[10.1038/s41598-023-47744-y](https://doi.org/10.1038/s41598-023-47744-y)
- [35] Zhang, C., Liao, Y., Gao, X., Zhao, J., Yuan, Y., & Liao, R. (2021). Research Advances of Soil Corrosion of Grounding Grids. *Micromachines*, 12(5), 513. <https://doi.org/10.3390/mi12050513>.
- [36] Wu, Y., Luo, S., & Gou, H. (2012). The corrosion behavior of copper in acid soil during soil acidification by simulated acid rain. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 43. doi:10.1002/mawe.201200927.
- [37] Zhu, Z., Shi, C., Zhang, Y., & Liu, Z. (2020). The Effects of Cl⁻ and Direct Stray Current on Soil Corrosion of Three Grounding Grid Materials. *Anti-Corros. Methods Mater*, 67, 73–82.
- [38] Norin, M., & Vinka, T. (2003). Corrosion of Carbon Steel in Filling Material in an Urban Environment. *Materials and Corrosion*, 54, 641–651.
- [39] Liu, Z.Y., Li, Q., Cui, Z.Y., Wu, W., Li, Z., Du, C.W., & Li, X.G. (2017). Field experiment of stress corrosion cracking behavior of high strength pipeline steels in typical soil environments. *Construction and Building Materials*, 148, 131–139.
- [40] Song, Y., Jiang, G., Chen, Y., Zhao, P., & Tian, Y. (2017). Effects of chloride ions on corrosion of ductile iron and carbon steel in soil environments. *Scientific reports*, 7(1), 6865. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07245-1>
- [41] F., Wang, Z., Wang, D., & Yin, S. A. (2020). Synergistic Effect of Dissolved Oxygen, HCO₃⁻, and Cl⁻ on the Electrochemical Corrosion Behavior of X70 Pipeline Steel in the Oilfield Soil Environment. *Applied Physics A*, 126, 868. doi:[10.1007/s00339-020-03792-z](https://doi.org/10.1007/s00339-020-03792-z)
- [42] Suganya, S., & Jeyalakshmi, R. (2019). Corrosion of Mild Steel Buried Underground for 3Years in Different Soils of Varying Textures. *Journal of Materials Engineering and Performance (Eng.)*, 28, 863–875.
- [43] Wang, S., Liu, D., Du, N., Zhao, & Q., Xiao, J. (2016). Cathodic Reactions Involved in the Corrosion of X80 Steel in Acidic Soil Simulated Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 11:8797–8809.
- [44] Javaherdashti, R., Raman R., Panter C., & Pereloma E. (2006). Microbiologically Assisted Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel in Mixed and Pure Cultures of Sulfate Reducing Bacteria. *Internional Biodeterioration & Biodegradation*, 58, 27–35.
- [45] Ma, Z., Wu, W., Zhao, P., & Dan, Y. (2021). Effect of DC Currents and Strain on Corrosion of X80 Steel in a Near-Neutral Environment. *Metals*, 11(10), 1601. <https://doi.org/10.3390/met11101601>
- [46] Yang Y., Sun M., Luo Y., Zeng W., & He R. (2021). Effects of Alternating Current on Corrosion Behavior of X100 Pipeline Steel in Simulated Soil Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 16:150927. <https://doi.org/10.20964/2021.01.63>.
- [47] Li, J., Yuan, T., Yang, Q., Sima, W., & Sun, C. (2010, October 11-14). Finite element modeling of the Grounding System in consideration of soil nonlinear characteristic," 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, USA, 2010, 164-167, doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640840.

- [48] Biro, O., & Preis, K. (1989). On the use of the magnetic vector potential in the finite-element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEE Transactions on Magnetism*, 25(4), 3145 – 3159. doi: 10.1109/20.34388.
- [49] Bouderballa, A., Zegnini, B., & Seghier, T. (2021). Determination of the resistance of a grounding system with application of finite element method, *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*, 5, 5-11.
- [50] Nekhoul, B., Guerin, C., Labie, P., Meunier, G., & Feuillet, T. (1995). A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems. *IEEE Transactions on Magnetism*, 31(3), 2150-2153.
- [51] Stanoyevitch, A. (2004). The Finite Element Method. In Stanoyevitch, A. (Ed), *Introduction To Numerical Ordinary And Partial Differential Equations Using MATLAB*, (pp. 599-690). New Jersey:Wiley-Interscience.
- [52] Ρουμελιώτης, Ι., & Τσαλαμέγκας, Ι. (2021). Δηλεκτρικά υλικά. Στο Ρουμελιώτης, Ι., & Τσαλαμέγκας, Ι. (Επιμ.), *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία – Στατικά και Μόνιμα πεδία -Τόμος Β'*(σ. 131-226), Αθήνα: Τζιόλας.
- [53] Kelly, P. A. *Mechanics Lecture Notes: An introduction to Solid Mechanics*. <http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/index.html>
- [54] Zhang, Z., Mei, D., Dan, Y., Zou, J., Liu, G., & Gao, C. (2020). Novel method for diagnosing corrosion of grounding electrodes in soil, *Electric Power Systems Research*, 178, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106049>
- [55] Batista, R., & Paulino, J.O. (2019). A practical approach to estimate grounding impedance of a vertical rod in a two-layer soil. *Electric Power Systems Research*, 177, 105973. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105973>.
- [56] Dan, Y., Zhang, Z., Wang, X., Jiang, Y., & Wang, J. (2024). A corrosion degree detection method of grounding electrodes considering lightning grounding performance and thermal stability. *Measurement*, 238:115272. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115272>.
- [57] International Electrotechnical Commission. (2006). *Protection Against Lightning-Part 1: General Principles*, (IEC 62305 1), (pp. 51-52).
- [58] De Metz-Noblat, B., Dumas, F., & Poulain, C. *Cahier technique* no. 158, 1-35.
- [59] Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2015). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, (IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015), (pp. 1-226). doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.