



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Βελτιστοποίηση των παραμέτρων εισόδου εξισώσεων
για τον υπολογισμό αντίστασης γείωσης
σε υποσταθμούς υψηλής τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Π. Καλαμπάκα

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέποντες: Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας
Διδάκτωρ Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Θεόδωρος Χ. Λιάγκας
Υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Βελτιστοποίηση των παραμέτρων εισόδου εξισώσεων
για τον υπολογισμό αντίστασης γείωσης
σε υποσταθμούς υψηλής τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Π. Καλαμπάκα

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέποντες: Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας
Διδάκτωρ Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Θεόδωρος Χ. Λιάγκας
Υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Οκτωβρίου 2023.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....
Αικατερίνη Π. Καλαμπάκα

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

Copyright © Αικατερίνη Καλαμπάκα, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία επικεντρώνεται στην εκτενή μελέτη των Ηλεκτρικών Υποσταθμών, των Συστημάτων Γείωσης και της ανάλυσης των αντίστοιχων στοιχείων, που τα απαρτίζουν. Πρόκειται για έναν εκτεταμένο κλάδο της ηλεκτρολογίας, που αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, επιτρέποντας τη μεταφορά, τη διανομή, την αύξηση και τη μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα σημεία του δικτύου.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση σχετικά με την εξέλιξη των υποσταθμών, αναδεικνύοντας τη σημασία τους στην ηλεκτρική μεταφορά. Στη συνέχεια, εξετάζεται ο εξοπλισμός του υποσταθμού, κάποια εξαρτήματα εκ των οποίων είναι ο Μετασχηματιστής Ισχύος, τα Διακοπτικά Στοιχεία, τα Μονωτικά Υλικά, καθώς και οι Μετασχηματιστές Εντάσεως και Τάσεως. Ακολουθούν οι διάφοροι τύποι των υποσταθμών, όπως ο Υποσταθμός Μεταφοράς και Διανομής.

Επίσης, εξετάζεται η σπουδαιότητα των συστημάτων γείωσης στη διασφάλιση της προστασίας των ηλεκτρικών συστημάτων. Παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της έλλειψης ή της ελαττωματικής γείωσης και αναλύονται οι διάφοροι τύποι γειωτών. Προκειμένου, να πραγματοποιηθεί σωστός σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες κατά τον σχεδιασμό. Δίνεται έμφαση στον ορισμό και τον υπολογισμό της Ειδικής Αντίστασης Γείωσης και ιδίως στον τρόπο ερμηνείας των μετρήσεων αυτής. Αδιαμφισβήτητα, πολύ σημαντικές είναι οι προδιαγραφές και τα πρότυπα, που διέπουν τους κανονισμούς και τις λειτουργίες των συστημάτων και του εξοπλισμού.

Ακολούθως, περιγράφεται η μαθηματική σημασία των εφαρμογών, που σχετίζονται με τα Μη Γραμμικά Μοντέλα και της μεθόδου της Μη Γραμμικής Πολλαπλής Παλινδρόμησης, για την πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης. Τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν, είναι το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο*, το *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών* και το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*. Σκοπός, λοιπόν, είναι να εφαρμοστούν τα μοντέλα αυτά προκειμένου από αποτελέσματα προσομοιώσεων να λάβουμε αξιοποιήσιμα αποτελέσματα για την τιμή της αντίστασης γείωσης.

Τέλος, με χρήση του λογισμικού *CDEGS* και με συγκεκριμένες αρχικές μεταβλητές, λαμβάνονται διάφορες προσομοιώσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να εισέλθουν στο *MATLAB*. Παρέχονται μεθοδολογίες βελτιστοποίησης αποτελεσμάτων με τη χρήση του προγράμματος *MATLAB*, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων γείωσης. Κυρίαρχος στόχος είναι να υπολογιστούν οι παράμετροι του κάθε μαθηματικού μοντέλου για την εύρεση της τιμής της αντίστασης γείωσης. Αυτή η εργασία αναδεικνύει τη σημασία των υποσταθμών και των συστημάτων γείωσης στη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου και προσφέρει νέες προοπτικές για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις σε αυτόν τον σημαντικό τομέα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αντίσταση Γείωσης, Βελτιστοποίηση Αποτελεσμάτων, Διστρωματικό Μοντέλο Εδάφους, Ειδική Αντίσταση Εδάφους, Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση, Προσαρμογή Μοντέλων, Συστήματα Γείωσης, Υποσταθμός, Υψηλή Τάση, CDEGS, MATLAB

ABSTRACT

This thesis is focused on the exhaustive study of Electrical Substations, Earthing Systems, and the comprehensive analysis of their constituent elements. This domain represents a substantial segment of electrical engineering, serving as the cornerstone for the functionality of the electrical grid. It facilitates the transmission, distribution, and regulation of electrical energy at various junctures within the grid.

The initial section provides a succinct historical overview of the evolution of substations, underscoring their pivotal role in electric transportation. Subsequently, the thesis delves into an in-depth exploration of substation equipment, encompassing vital components such as the Power Transformer, Switching Elements, Insulating Materials, Current Transformers, and Voltage Transformers. Furthermore, it elucidates the diverse categories of substations, including Transmission Substations and Distribution Substations.

The thesis also scrutinizes the pivotal role of grounding systems in upholding the safety of electrical systems. It elucidates the repercussions of absent or faulty grounding and assesses various grounding methodologies. The meticulous design of a grounding system necessitates consideration of multiple factors, with a particular focus on the definition and calculation of Earth Resistivity, along with the interpretation of associated measurements. The significance of standards and specifications governing the regulations and functioning of systems and equipment is underscored.

Additionally, the thesis delves into the mathematical significance of applications related to Non-Linear Models and the Non-Linear Multiple Regression method for predicting earthing resistance. The models employed encompass the Simple Exponential Model, Sum of Exponential Model, and Unit Area Model. The primary objective is to apply these models to derive grounding resistance values from simulation outcomes.

In conclusion, utilizing the *CDEGS* software and specific initial variables, the thesis conducts various simulations, with resultant data integrated into *MATLAB*. Methodologies for optimizing results through the *MATLAB* program are provided, with the overarching goal of enhancing the accuracy of ground models. The principal aim is to calculate the parameters of each mathematical model to ascertain the value of earthing resistance. This research underscores the paramount importance of substations and grounding systems in the functioning of the power grid, offering novel perspectives for prospective investigations and enhancements within this critical domain.

KEY WORDS

CDEGS, Earthing Resistance, Earthing Systems, Electrical Substation, High Voltage, MATLAB, Model Fitting, Nonlinear Multiple Regression, Results Optimization, Soil Resistivity, Two Layer Soil Model

Σε όσους στάθηκαν δίπλα μου
όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vii
Πρόλογος	ix
Κεφάλαιο 1: Εξοπλισμός & Δομή Υποσταθμών	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή	1
1.2 Χαρακτηριστικά Υποσταθμών	1
1.3 Εξοπλισμός Υποσταθμών	2
1.3.1 Μετασχηματιστής Ισχύος	3
1.3.2 Διακοπτικά Στοιχεία	4
1.3.3 Μονωτικά Υλικά	6
1.3.4 Μετασχηματιστής Εντάσεως & Τάσεως	10
1.4 Τύποι Υποσταθμών	12
1.4.1 Υποσταθμός Μεταφοράς	12
1.4.2 Υποσταθμός Διανομής	13
1.4.3 Υποσταθμός Ανύψωσης Τάσης (Step-up)	14
1.4.4 Υποσταθμός Υποβιβασμού Τάσης (Step-down)	15
1.5 Σύνδεση με το Ηλεκτρικό Δίκτυο	15
1.6 Προκλήσεις & Τάσεις στους Υποσταθμούς	16
Κεφάλαιο 2: Συστήματα Γείωσης	19
2.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Γείωσης	19
2.2 Σκοπός & Σημασία της Γείωσης στα Ηλεκτρικά Συστήματα	20
2.3 Συνέπειες της Έλλειψης ή Ελαττωματικής Γείωσης	21
2.4 Συστήματα Γείωσης σε Υποσταθμούς	22
2.4.1 Επιλογή Τοποθεσίας Υποσταθμού	23
2.4.2 Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης Υποσταθμών	25
2.4.3 Πλέγματα Γείωσης σε Υποσταθμούς	28
2.5 Ειδική Αντίσταση Εδάφους	30
2.6 Αντίσταση Γείωσης	32
2.7 Βασικοί Τύποι & Μορφές Γειωτών	34
2.8 Βελτιωτικά Υλικά Γειώσεων	36
2.9 Προδιαγραφές, Πρότυπα & Κανονισμοί για τη Γείωση σε Υποσταθμούς	36
2.10 Συντήρηση, Έλεγχος & Αναβάθμιση των Συστημάτων Γείωσης Υποσταθμών	37
2.11 Προκλήσεις & Μελλοντικές Τάσεις στα Συστήματα Γείωσης Υποσταθμών	39

Κεφάλαιο 3: Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση	41
3.1 Εισαγωγή	41
3.2 Μη Γραμμικά Μοντέλα & Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων	42
3.3 Μέθοδοι Εκτίμησης των Παραμέτρων σε Μη Γραμμικά Συστήματα	44
3.4 Η Σημασία των Αρχικών Τιμών	45
3.5 Αξιολόγηση της Προσαρμογής	46
3.6 Βασικές Στατιστικές Μέθοδοι	47
3.7 Εξαγωγή Μαθηματικών Μοντέλων	49
Κεφάλαιο 4: Δεδομένα από το Λογισμικό CDEGS	51
4.1 Το Λογισμικό CDEGS	51
4.2 Εισαγωγή Δεδομένων	52
4.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	53
Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση Αποτελεσμάτων με το MATLAB	91
5.1 Εισαγωγή	91
5.2 Προσαρμογή του Απλού Εκθετικού Μοντέλου	92
5.3 Απλοποίηση & Προσαρμογή του Απλού Εκθετικού Μοντέλου	95
5.4 Προσαρμογή του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών	101
5.5 Απλοποίηση & Προσαρμογή του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών	103
5.6 Προσαρμογή του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών	110
5.7 Βελτιστοποίηση του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού	112
5.8 Προσαρμογή του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού με Προσθήκη του Εμβαδού Ματιού	119
Κεφάλαιο 6: Επίλογος	125
6.1 Σύνοψη	125
6.2 Συμπεράσματα	126
6.3 Προοπτικές Μελλοντικής Έρευνας	128
Παράρτημα Α	129
Παράρτημα Β	133
Παράρτημα Γ	137
Παράρτημα Δ	139
Βιβλιογραφία	141

Πρόλογος

Οι Υποσταθμοί, αν και συχνά απαρατήρητοι από το κοινό, αποτελούν βασικούς πυλώνες της ηλεκτρικής ενέργειας που φωτίζει τα σπίτια μας, τροφοδοτεί τις επιχειρήσεις και θέτει σε κίνηση τις σύγχρονες κοινωνίες. Η σωστή λειτουργία τους είναι κρίσιμη για την ασφάλεια και τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της σημασίας του συστήματος γείωσης, καθώς και της αντίστασης γείωσης και πως μπορεί να βελτιστοποιηθεί στους Υποσταθμούς Υψηλής Τάσης. Με τη χρήση προηγμένων μαθηματικών μοντέλων και σύγχρονων εργαλείων προσομοίωσης, θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο η δομή του εδάφους και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την αντίσταση γείωσης. Στόχος είναι να αναπτυχθούν νέες προσεγγιστικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, οι οποίες θα συμβάλλουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των υποσταθμών.

Κεφάλαιο 1

Εξοπλισμός & Δομή Υποσταθμών

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1870 εμφανίστηκαν τα πρώτα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση τους να προορίζεται αρχικά στον φωτισμό. Αρχικά, τα συστήματα αυτά λειτουργούσαν με συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης, με περιορισμένη απόδοση και εξυπηρέτηση μικρών περιοχών λόγω της δυσκολίας μεταφοράς του ρεύματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ωστόσο, η κοινωνική ωφέλεια από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίστηκε αμέσως, προωθώντας έτσι την ανάπτυξη πιο αποδοτικών μεθόδων. Η πρωτοποριακή ανατροπή προήλθε από την εισαγωγή του εναλλασσόμενου ρεύματος τη δεκαετία του 1880, συνοδευόμενη από τη δημιουργία της γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος και του μετασχηματιστή. Περίπου το 1893 κατασκευάστηκε η πρώτη εν λειτουργία τριφασική γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μήκους 21 χιλιομέτρων και τάσης 2300V αποδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος για την αποτελεσματική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Με την πάροδο των χρόνων ξεκίνησε η εγκατάσταση γραμμών μεταφοράς τάσης 220kV σε ποικίλα μέρη παγκοσμίως, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρικά συστήματα να παίρνουν τη σύγχρονη μορφή τους, προσφέροντας τη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με χαμηλές απώλειες σε υψηλές αποστάσεις μεταξύ των κέντρων παραγωγής και κατανάλωσης [1].

Η λέξη υποσταθμός προέρχεται από τις μέρες πριν το σύστημα διανομής γίνει δίκτυο. Καθώς οι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής γίνονταν μεγαλύτεροι, οι μικρότερες μονάδες παραγωγής μετατράπηκαν σε σταθμούς διανομής, παίρνοντας τον ενεργειακό τους εφοδιασμό από μια μεγαλύτερη μονάδα αντί να χρησιμοποιούνται οι γεννήτριες τους. Οι πρώτοι υποσταθμοί συνδέονταν μόνο με ένα σταθμό ηλεκτρικής παραγωγής, όπου στεγάζονταν οι γεννήτριες, οι οποίες ήταν θυγατρικές του εν λόγω σταθμού [2].

1.2 Χαρακτηριστικά Υποσταθμών

Η ενεργειακή παραγωγή και διανομή αποτελούν ζωτικά στοιχεία της σύγχρονης εποχής με τους υποσταθμούς να αποτελούν κρίσιμο κρίκο σε αυτή την αλυσίδα. Είναι γνωστό ότι οι υποσταθμοί αποτελούν βασικό στοιχείο του ηλεκτρικού ενεργειακού συστήματος, αφού αναλαμβάνουν τον ρόλο της μετατροπής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας από τις πηγές παραγωγής προς τους καταναλωτές. Η σημασία των υποσταθμών πηγάζει από την ικανότητα τους για διασφάλιση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας του ηλεκτρικού δικτύου.

Σε γενικές γραμμές, οι υποσταθμοί είναι η «καρδιά» του ηλεκτρικού συστήματος, διότι λειτουργούν ως ενδιάμεσος κρίκος μεταξύ των σταθμών παραγωγής και των δικτύων διανομής και στόχος τους είναι να μετασχηματίζουν την ηλεκτρική ενέργεια σε διάφορα επίπεδα τάσης.

Επιπλέον, οι υποσταθμοί διαθέτουν συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης που επιτρέπουν την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία τους. Με τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας και αυτοματοποιημένων συστημάτων μπορούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες του ηλεκτρικού δικτύου, να ανιχνεύσουν και να αντιμετωπίσουν προβλήματα ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ασφάλεια της ηλεκτροδότησης των καταναλωτών. Η κατανομή τους γίνεται σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με την απαιτούμενη τάση και τον τύπο ενέργειας που μεταφέρουν. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε τους Υποσταθμούς Υψηλής Τάσης (High Voltage Substations), που συνδέονται με τους σταθμούς παραγωγής και τους Υποσταθμούς Διανομής (Distribution Substations), οι οποίοι συνδέονται με τους καταναλωτές. Συνήθως, οι υποσταθμοί αυτοί είναι τοποθετημένοι σε στρατηγικές τοποθεσίες για να εξυπηρετούν αποτελεσματικά τις ανάγκες του ηλεκτρικού δικτύου.

Επιπροσθέτως, δύο ακόμα χαρακτηριστικά στοιχεία των υποσταθμών είναι η ευελιξία και η αντοχή. Έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν σε οποιαδήποτε αλλαγή ή ανάγκη του δικτύου και να υποστηρίξουν την ένταξη νέων πηγών ενέργειας, όπως ανανεώσιμες πηγές και αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής. Αυτή η ευελιξία εξασφαλίζει την αντοχή του δικτύου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και αυξημένες απαιτήσεις ενέργειας. Άλλωστε, είναι ήδη γνωστό ότι συμβάλλουν στην αποδοτική λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, μετατρέποντας την ενέργεια σε απαραίτητες τάσεις για τη μεταφορά και διανομή της. Επιπλέον, προσαρμόζουν την παραγωγή στις απαιτήσεις των καταναλωτών, βοηθώντας έτσι αφενός στην εξοικονόμηση ενέργειας και αφετέρου στη μείωση των λειτουργικών δαπανών.

Συνολικά, οι υποσταθμοί είναι αναγκαίοι για την ομαλή λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου για την εξασφάλιση της ασφάλειας, αξιοπιστίας, ευελιξίας, αποδοτικότητας και οικονομίας. Χωρίς αυτούς η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας θα ήταν σαφώς δυσκολότερη, με αυξημένο κίνδυνο διακοπών και απώλειας ενέργειας. Τέλος, μπορεί να ειπωθεί ότι οι υποσταθμοί έχουν καθοριστική σημασία στην ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και πηγών ενέργειας, προωθώντας με αυτόν τον τρόπο την αιεφόρο και αποδοτική παραγωγή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας [3].

1.3 Εξοπλισμός Υποσταθμών

Ένας υποσταθμός αποτελείται από ένα πολύπλοκο σύνολο εξοπλισμού και συστημάτων που συνεργάζονται αρμονικά για τη μεταφορά, το μετασχηματισμό και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά, ο εξοπλισμός αυτός αντιπροσωπεύει τον πυρήνα του υποσταθμού και περιλαμβάνει διάφορες σημαντικές συσκευές και εξαρτήματα που εκτελούν κρίσιμες λειτουργίες.



Εικόνα 1.1: Υποσταθμός μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [4].

1.3.1 Μετασχηματιστής Ισχύος

Αρχικά, το πολυτιμότερο εξάρτημα σε έναν υποσταθμό είναι ο Μετασχηματιστής Ισχύος, καθώς έχει τη δυνατότητα να μετασχηματίζει, με τη δράση ενός μαγνητικού πεδίου, την εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ένα επίπεδο τάσης σε ένα διαφορετικού επιπέδου. Κύριο χαρακτηριστικό των Μετασχηματιστών Ισχύος είναι να αυξάνουν είτε να μειώνουν την τάση, διατηρώντας τη συχνότητα σταθερή, για την αποτελεσματική μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη, με τις μεγαλύτερες μονάδες που χρησιμοποιούνται σε υποσταθμούς να φτάνουν εκατοντάδες τόνους και να είναι τριφασικοί. Ειδικότερα, αποτελούνται από δύο ή περισσότερα τυλίγματα. Το τύλιγμα που βρίσκεται προς την πηγή ενέργειας ονομάζεται πρωτεύον, ενώ το τύλιγμα στο οποίο μπορεί να συνδεθεί κάποιο φορτίο ονομάζεται δευτερεύον.

Με βάση τον νόμο του Faraday, όταν εφαρμόζεται μια τάση στο πρωτεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή, παράγεται ένα μαγνητικό πεδίο εντός του πυρήνα του. Κατά τη μεταβολή του πεδίου αυτού, αναπτύσσεται μια τάση στα άκρα του δευτερεύοντος [5]. Όμως σε ένα σύστημα ισχύος η ενέργεια συχνά ρέει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση μέσω του μετασχηματιστή και ο χαρακτηρισμός του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος χάνει το νόημά του με τους όρους αυτούς να χρησιμοποιούνται σε γενική χρήση για να μην υπάρχει σύγχυση [6].



Εικόνα 1.2: Μετασχηματιστής ισχύος [7].

1.3.2 Διακοπτικά Στοιχεία

Τα διακοπτικά στοιχεία αποτελούν ύψιστης σημασίας μέρος του εξοπλισμού ενός υποσταθμού. Αυτά τα ηλεκτρικά στοιχεία επιτρέπουν τον έλεγχο και τη διαχείριση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο, παρέχοντας ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία. Οι διακοπτικές συσκευές είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, τη διακοπή του ρεύματος κατά την εκτέλεση εργασιών συντήρησης και επισκευής, καθώς και την αντιμετώπιση προβλημάτων στο δίκτυο, όπως βραχυκυκλώματα. Η ορθή λειτουργία των στοιχείων αυτών είναι απαραίτητη για την ασφάλεια του προσωπικού, την προστασία του εξοπλισμού και τη συνεχή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

Συνεπώς, η σωστή συντήρηση είναι μία άκρως σημαντική διαδικασία που εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία και την αποτροπή ενδεχόμενων σφαλμάτων και δυσλειτουργιών των οποίων οι συνέπειες μπορεί να είναι καταστροφικές. Είναι γεγονός ότι σε κάθε μεγάλη γραμμή και στους υποσταθμούς υπάρχουν ως μέσο πλήρους απομόνωσης και αποσύνδεσης και εγκαθίστανται και στις δύο πλευρές του εξοπλισμού ή της γραμμής [8].

Συνήθως, τα εξαρτήματα αυτά κατασκευάζονται από υψηλής ποιότητας μόνωση και εξαιρετικά ανθεκτικά υλικά, προκειμένου να αντέξουν στις συνθήκες κανονικής λειτουργίας, αλλά και στις αυξημένες ηλεκτρικές φορτίσεις που προκαλούν υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης,

επειδή ο εξοπλισμός αυτός βρίσκεται εκτεθειμένος σε φυσικά φαινόμενα είναι αναγκαίο να αντέχει σε πληθώρα περιβαλλοντικών συνθηκών [9].

Είναι γνωστό ότι ο διακόπτης διαθέτει δύο θέσεις λειτουργίας (on-off). Όταν είναι σε ανοικτή θέση δεν διέρχεται ρεύμα από τους ακροδέκτες του, ενώ όταν είναι σε κλειστή θέση υπάρχει ροή ρεύματος μέσω των ακροδεκτών του. Κυρίαρχο χαρακτηριστικό των διακοπών αποτελεί η ικανότητα απόξευξης (ή ισχύς διακοπής). Ακόμη, ο χρόνος μεταγωγής κατάστασης είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας, καθώς πρέπει να είναι αρκετά μικρός ώστε να αποσβέσει το σφάλμα άμεσα, αλλά και να τηρηθεί η επιλεκτικότητα του συστήματος προστασίας της εγκατάστασης. Όταν απαιτείται να διακοπεί το ηλεκτρικό κύκλωμα, ο μηχανισμός των διακοπών εκτελεί μία κίνηση που απομακρύνει τις επαφές μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι ένα ηλεκτρικό τόξο. Ο βασικός σκοπός του διακόπτη είναι να αποσβέσει αυτό το τόξο προκειμένου να διακοπεί η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρουσία μονωτικού ελαίου ή αερίου, που υπάρχει μόνιμα εντός του θαλάμου του διακόπτη, καλύπτοντας έτσι τις επαφές του. Η επιλογή του αντίστοιχου μονωτικού μέσου καθορίζει τον τύπο του διακόπτη και εξασφαλίζει την αποτελεσματική σβέση του τόξου [10].

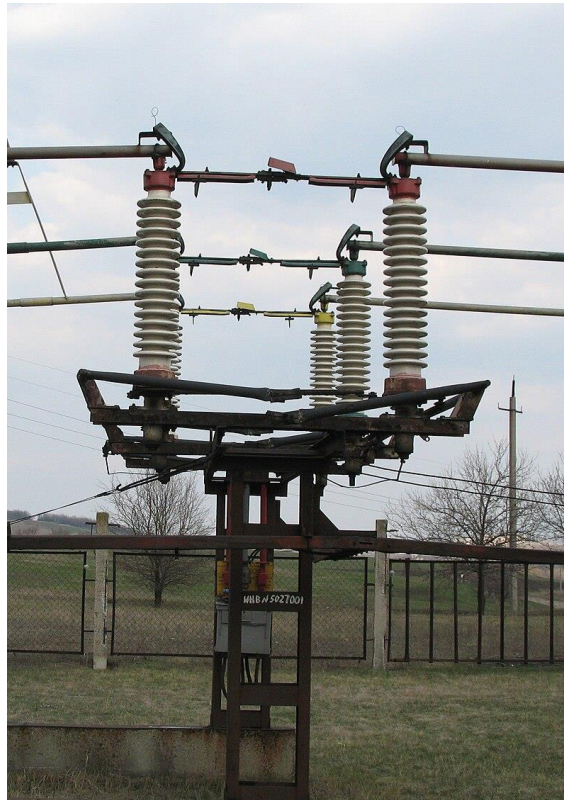
Ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται διάφοροι τύποι διακοπτικών στοιχείων, τα οποία συναντάμε σε υποσταθμούς και η παρουσία των οποίων κρίνεται απαραίτητη. Οι τύποι των διακοπτικών αυτών στοιχείων αναφέρονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια παρακάτω.

Οι αυτόματοι διακόπτες ή διακόπτες ισχύος αποτελούν μέσα προστασίας, που σπανίως χρησιμοποιούνται για χειρισμούς. Το καθήκον τους είναι η αξιόπιστη διακοπή των ρευμάτων φορτίων, των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και γενικότερα των σφαλμάτων [11]. Έχουν τη δυνατότητα να διακόπτουν γρήγορα το υψηλό ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει στα δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, χρησιμοποιώντας ειδικές διατάξεις που αποσβένουν το τόξο μεταξύ των επαφών. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι αυτών των διακοπών είναι με μονωτικά λάδια και με εξαφθοριούχο θείο (SF_6) [9].



Εικόνα 1.3: Διακόπτες ισχύος υψηλής τάσης [12].

Αντιθέτως σε σχέση με τους διακόπτες ισχύος, οι αποζεύκτες δεν έχουν κατασκευαστεί για να διακόπτουν το ηλεκτρικό ρεύμα υπό φορτίο, αλλά διαθέτουν μεγάλη απόσταση μεταξύ των επαφών τους, επιτυγχάνοντας την ασφαλή απομόνωση του κυκλώματος όταν εργαζόμενοι εκτελούν εργασίες σε αυτό. Οι γειωτές είναι επίσης διακόπτες με παρόμοια χαρακτηριστικά με τους αποζεύκτες και μανδαλώνονται με αυτούς, εξασφαλίζοντας έτσι ότι όταν ο αποζεύκτης είναι ανοιχτός το κύκλωμα συνδέεται με τη γείωση. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η ασφάλεια των εργαζομένων από επικίνδυνα ηλεκτρικά φαινόμενα που μπορεί να προκύψουν [9].



Εικόνα 1.4: Αποζεύκτης υψηλής τάσης [13].

1.3.3 Μονωτικά Υλικά

Τα μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ηλεκτρικού διαχωρισμού ανάμεσα στα ρευματοφόρα τμήματα μιας εγκατάστασης ή μιας συσκευής, καθώς και ανάμεσα στα ρευματοφόρα τμήματα και τη γείωση. Ανάλογα με τη φυσική τους μορφή, τα μονωτικά υλικά κατηγοριοποιούνται σε αέρια, υγρά και στερεά, με κάθε κατηγορία να παρουσιάζει μοναδικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. Η χρήση των υλικών αυτών επιτρέπει την απομόνωση και ασφάλεια των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, αποτρέποντας την ανεπιθύμητη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων. Η κατάλληλη επιλογή και χρήση αυτών των μονωτικών υλικών είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική λειτουργία, την αξιοπιστία και την ασφάλεια των ηλεκτρικών συστημάτων, αφού διασφαλίζεται η απομόνωση

και προστασία των ρευματοφόρων μερών από ανεπιθύμητες ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις και δυνητικούς κινδύνους [14].

Αξίζει να γίνει αναφορά αρχικά στα στερεά μονωτικά υλικά, τα οποία εμφανίζουν υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή σε σύγκριση με τα αέρια και τα υγρά. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αντέξουν σε υψηλές τάσεις πριν αρχίσει η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτά. Επιπλέον, λόγω της ανθεκτικότητάς τους στις μηχανικές καταπονήσεις, τα στερεά μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών και των ηλεκτροτεχνικών εξαρτημάτων μιας κατασκευής. Παρότι τα στερεά υλικά αποτελούν μια εξαιρετική μέθοδο μόνωσης με επιθυμητά αποτελέσματα, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που υποστούν διάσπαση, τότε καταστρέφονται εξ ολοκλήρου ή μπορεί να καταπονηθούν με μόνιμες ζημιές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χάνουν τη μονωτική τους ικανότητα [14].

Τα κυριότερα στερεά μονωτικά είναι η πορσελάνη, το γυαλί, το χαρτί, το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο (PE). Αρχικά, η πορσελάνη αποτελεί πολύ σημαντικό υλικό κατασκευής μονωτήρων και ακροκιβωτίων σύνδεσης καλωδίων ισχύος. Κάποιες από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες της πορσελάνης αφορούν την υψηλή διηλεκτρική της αντοχή, τη μη απορρόφηση της υγρασίας και τέλος την αντοχή σε χημικά στοιχεία, όπως αλκάλια και οξέα. Όμως, παρόλο που η πορσελάνη διαθέτει αυτές τις επιθυμητές ιδιότητες, είναι επίσης γνωστό ότι είναι εύθραυστη και ευαίσθητη σε απότομες μηχανικές καταπονήσεις. Όμοια χαρακτηριστικά με την πορσελάνη έχει και το γυαλί, το οποίο συναντιέται στους μονωτήρες ανάρτησης στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [14].

Για τη μόνωση των αγωγών υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με την εφαρμογή τους και την τάση που αντέχουν. Πιο συγκεκριμένα, η πορσελάνη, το γυαλί και κάποια συνθετικά πολυμερή, όπως π.χ. το καουτσούκ, καθιστούν εδραιωμένες επιλογές για την κατασκευή των μονωτήρων. Ακόμη, οι αλυσοειδείς μονωτήρες αναρτήσεων χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση των αγωγών στους πυλώνες υψηλής τάσης, ενώ οι μονωτήρες στήριξης είναι περισσότερο κατάλληλοι για εφαρμογές μέσης τάσης. Επιπλέον, στις θέσεις εξόδου των αγωγών μετασχηματιστών ή άλλων συσκευών συναντώνται οι μονωτήρες διέλευσης. Αυτές οι κατηγορίες μονωτήρων εξασφαλίζουν αποτελεσματική μόνωση και προστασία από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 1.5: Γυάλινοι μονωτήρες αναρτήσεως σε πυλώνα υψηλής τάσης [15].

Παλαιότερα η διαδεδομένη πρακτική στα καλώδια ισχύος μέσης και υψηλής τάσης ήταν η χρήση μόνωσης από χαρτί που εμποτιζόταν με λάδι. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών, παρατηρείται αύξηση στη χρήση πλαστικών συνθετικών υλικών για τη μόνωση και την εξωτερική επένδυση των καλωδίων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα πιο συνηθισμένα πλαστικά μονωτικά είναι τα PVC και PE (ή XLPE). Έχει αποδειχθεί ότι το PVC είναι καλύτερο στη μόνωση των καλωδίων έως 10kV, λόγω των υψηλών διηλεκτρικών απωλειών που εμφανίζει και του περιορισμένου εύρους τάσης που μπορεί να ανταπεξέλθει. Επίσης, χρησιμοποιείται και ως εξωτερική προστατευτική επένδυση σε καλώδια υψηλής τάσης. Από την άλλη μεριά, τα καλώδια με μόνωση PE (ή XLPE) παρουσιάζουν υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή και εκδηλώνουν καλύτερη συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες [14].



Εικόνα 1.6: Βασικοί τύποι καλωδίων [16].

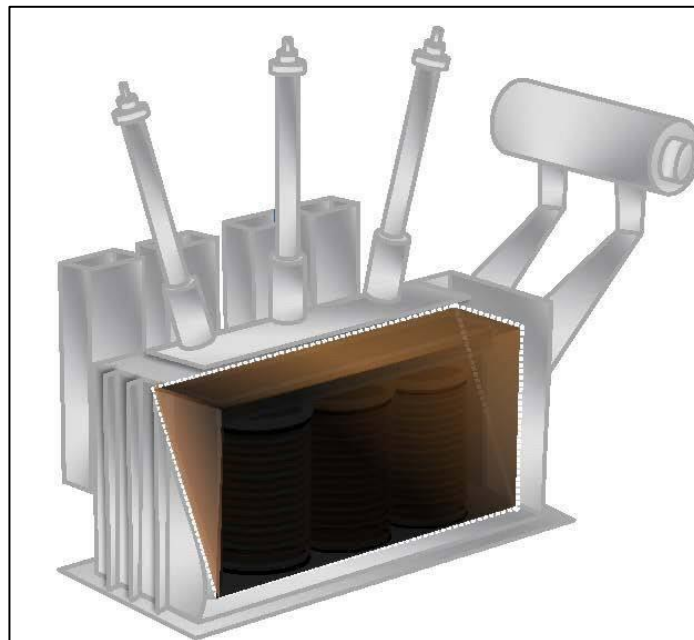
Τα αέρια μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε ποικίλες ηλεκτρολογικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε γραμμές μεταφοράς ενέργειας, σε διακόπτες, σε αποζεύκτες, σε πίνακες μέσης τάσης, σε καλώδια ισχύος και άλλο συναφή εξοπλισμό. Η επιλογή αερίων μονωτικών υλικών εμφανίζει ποικίλα πλεονεκτήματα, όπως η εξαιρετική διηλεκτρική αντοχή και η ικανότητα να ανταπεξέρχονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τα αέρια μονωτικά υλικά κατάλληλα για την ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευής και διατάξεων. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής γίνεται και η αντίστοιχη επιλογή του μονωτικού αερίου, λαμβάνοντας υπόψη την τάση και τις συνθήκες λειτουργίας.

Είναι γεγονός ότι το πιο δημοφιλές μονωτικό αέριο είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, που χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των φάσεων. Ο αέρας έχει σχετικά χαμηλή διηλεκτρική αντοχή η οποία εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. Επίσης, βρίσκεται άφθονος στη φύση και δωρεάν, ενώ έχει τη δυνατότητα να αποκτήσει ξανά τις μονωτικές του ιδιότητες κάθε φορά αμέσως μετά από κάποια διάσπαση. Ένα άλλο πολύ γνωστό μονωτικό αέριο είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF_6), που παρουσιάζει υψηλή διηλεκτρική αντοχή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Κατά την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό είναι ότι η τάση κατά μήκος του διακένου μειώνεται εξελικτικά, πράγμα που τελικά προξενεί πλήρη αγωγή σύνδεση μεταξύ ανόδου και καθόδου. Αυτή η διαδικασία γίνεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η χωρητικότητα του διακένου να μην μπορεί να επαναφορτιστεί γρήγορα. Αυτό έχει ως άμεσο επακόλουθο τη διάσπαση του διακένου.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στους διακόπτες ισχύος πραγματοποιείται η χρήση του κενού ως μονωτικό μέσο, καθώς αποδεικνύεται αποτελεσματικό για την αντιμετώπιση του ηλεκτρικού τόξου κατά τη διάρκεια των λειτουργικών επεμβάσεων. Για να επιτευχθεί η αποτελεσματική λειτουργία του κενού ως μονωτικό υλικό, είναι απαραίτητη η δημιουργία αεροστεγών κατασκευών. Παράλληλα, χρειάζεται προσοχή να μην εισβάλουν ξένα σωματίδια στον χώρο αυτόν. Όταν η πίεση του κενού είναι μικρότερη από 10^{-6} bar συνεπάγεται εξαιρετικές ιδιότητες μόνωσης. Η χαρακτηριστική του διηλεκτρική αντοχή είναι υψηλή, ενώ οι απώλειες στο κενό είναι μηδενικές, καθιστώντας το έτσι ως ένα αναντικατάστατο μέσο μόνωσης [14].

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα μονωτικά λάδια χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πληθώρα ηλεκτροτεχνικών συσκευών, τόσο για τη μεγάλη διηλεκτρική τους αντοχή, όσο και για την εξαιρετική τους θερμική αγωγιμότητα. Γενικά, έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τα αέρια και ο συντελεστής θερμικής τους αγωγιμότητας είναι σημαντικά μεγάλος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, στις επαφές διακοπών και στους σιδηροπυρήνες των μετασχηματιστών [14].

Επιπλέον, η διηλεκτρική σταθερά των υγρών μονωτικών είναι σχετικά χαμηλή, καθώς επίσης και οι διηλεκτρικές τους απώλειες. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να αποκτούν ξανά τις μονωτικές τους ιδιότητες μετά από μια διάσπαση. Πράγματι, ένα μεγάλο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν σε συνδυασμό με τα στερεά μονωτικά είναι η καλύτερη μόνωση, επειδή το λάδι γεμίζει ολόκληρο τον χώρο (που είναι προς μόνωση) χωρίς την παρουσία αέρα, που μπορεί να είναι επιβλαβής για τα προστατευόμενα στερεά μονωτικά.



Εικόνα 1.7: Μετασχηματιστής ισχύος λαδιού με δεξαμενή [18].

Κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διηλεκτρική αντοχή των υγρών μονωτικών είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, το εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίων, το υλικό και η γεωμετρία των ηλεκτροδίων, το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης, η θερμοκρασία, η πίεση (εξωτερική ή υδροστατική), η παρουσία υγρασίας, φυσαλίδων αέρα ή και γενικά ξένων σωματιδίων.

Επιπροσθέτως, το χρώμα του λαδιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ενδεικτικό στοιχείο για την κατάσταση ενός μετασχηματιστή. Παρατηρείται ότι μια αλλαγή στο χρώμα του λαδιού από διαυγές σε σκούρο μπορεί να υποδείξει την παρουσία ρύπων ή οξείδωσης [18]. Αυτό μπορεί να υποδείξει πιθανά προβλήματα μόνωσης ή φθοράς του εξοπλισμού. Συνολικά, το χρώμα του λαδιού είναι ένα στοιχείο που μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση της κατάστασης ενός μετασχηματιστή, αλλά δεν μπορεί να αποτελέσει μοναδικό δείκτη για τη μονωτική του ικανότητα. Είναι σημαντικό να πραγματοποιηθούν κατάλληλες μετρήσεις και αξιολογήσεις για να εκτιμηθεί η απόδοση και η ασφάλεια του εκάστοτε μετασχηματιστή.



Εικόνα 1.8: Πιθανές αλλαγές στο χρώμα του λαδιού [18].

Γενικά, έχουμε τρεις μηχανισμούς διάσπασης των υγρών μονωτικών. Αρχικά, είναι η ηλεκτρονική διάσπαση ή αλλιώς ενδογενής, όπου τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την κάθοδο, επιταχύνονται λόγω του επιβαλλόμενου πεδίου, έχοντας ως αποτέλεσμα τη σύγκρουση των μορίων του υγρού και την πρόκληση ιονισμού σε αυτά. Έτσι, λόγω του φαινομένου αυτού, έχουμε τον ταχύ σχηματισμό στιβάδων ηλεκτρονίων και συνεπώς την αύξηση της αγωγιμότητας και της πιθανότητας να γίνει διάσπαση για κάποια τιμή του πεδίου. Στη συνέχεια, έχουμε τον μηχανισμό διάσπασης που οφείλεται σε ξένα σωματίδια, που αιωρούνται μέσα στο λάδι, όπως είναι η σκόνη και τα μεταλλικά ή μονωτικά σωματίδια που δημιουργήθηκαν από τη φθορά του στερεού μονωτικού. Τα σωματίδια αυτά υποβαθμίζουν την ποιότητα του λαδιού, με κύρια συνέπεια τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του. Πιο συγκεκριμένα, τα σωματίδια λόγω του εφαρμοζόμενου πεδίου, πολώνονται και κατευθύνονται στην περιοχή του πεδίου, που παρουσιάζει υψηλότερη ένταση. Η συνέχεια αυτού του φαινομένου είναι ο σχηματισμός μιας αγωγίμης γέφυρας μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, προκαλώντας τη διάσπαση του λαδιού. Τέλος, έχουμε τη διάσπαση μέσω φυσαλίδων αέρα ή υγρασίας, επειδή με την παρουσία του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, οι φυσαλίδες επιμηκύνονται, χωρίς όμως να έχουμε αλλαγή του όγκου τους κι έτσι έχουμε ξανά τη δημιουργία ενός αγωγίμου δρόμου μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων [14].

1.3.4 Μετασχηματιστής Εντάσεως & Τάσεως

Οι μετασχηματιστές μετρήσεων αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων σε σταθμούς παραγωγής και υποσταθμούς ανυψώσεως και υποβιβασμού της τάσης, καθώς και σε κυκλώματα όπου η τάση και η ένταση ρεύματος είναι υψηλές και απαιτείται η μείωσή τους για τη δυνατότητα μέτρησής τους. Παράλληλα, παρέχουν γαλβανική απομόνωση μεταξύ των κυκλωμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης, προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας για το προσωπικό και η καταστροφή μονωμένων από την υψηλή

τάση οργάνων του δικτύου. Έτσι, επιστρατεύεται η χρήση κατάλληλων μετασχηματιστών τάσης και έντασης για τη μέτρηση υψηλών τάσεων και ισχυρών ρευμάτων [19].

Αρχικά, οι Μετασχηματιστές Εντάσεως (Current Transformers ~ CT) είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά συστήματα για τον μετασχηματισμό του ρεύματος από ένα επίπεδο σε ένα άλλο προκειμένου να γίνει εφικτή η μέτρηση της έντασής τους. Συγκεκριμένα, οι μετασχηματιστές εντάσεως λειτουργούν βάσει των αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού και στοχεύουν στην παρακολούθηση των υψηλών ρευμάτων. Αποτελούνται από ένα πρωτεύον τύλιγμα και ένα ή περισσότερα, συνήθως δύο, δευτερεύοντα τυλίγματα [20]. Το πρωτεύον τύλιγμα συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα ισχύος υψηλής τάσης και το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτό, δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Το δευτερεύον τύλιγμα συνδέεται με συσκευές μέτρησης ή προστασίας και παρέχει ένα μειωμένο ρεύμα εξόδου ανάλογο με το πρωτεύον ρεύμα.

Όμοια με τους μετασχηματιστές έντασης, οι Μετασχηματιστές Τάσης (Voltage Transformers ~ VT) λειτουργούν με την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Αποτελούνται, επίσης, από ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον τύλιγμα. Το πρωτεύον τύλιγμα συνδέεται παράλληλα με το κύκλωμα υψηλής τάσης και η τάση σε αυτό προκαλεί μια ανάλογη τάση μειωμένης τιμής στο δευτερεύον τύλιγμα.

Εφαρμόζονται τεχνικά πρότυπα και πρακτικές σχεδιασμού για τη διασφάλιση της προστασίας των εγκαταστάσεων, που χρησιμοποιούν μετασχηματιστές εντάσεως και τάσεως. Αντίστοιχα χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση ρεύματος και τάσεως σε συστήματα υψηλής τάσης, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν πολύτιμα δεδομένα για την ανάλυση και την παρακολούθηση του συστήματος ενέργειας. Μετρώντας το ρεύμα και την τάση σε διάφορα σημεία του δικτύου, οι μηχανικοί μπορούν να αξιολογήσουν σε συνεχή βάση τη ροή ισχύος και γενικά να εντοπίσουν πιθανά ζητήματα, που ενδέχεται να προκύψουν.



Εικόνα 1.9: Μετασχηματιστές μέτρησης τάσεως SF₆ [21].



Εικόνα 1.10: Μετασχηματιστής εντάσεως [17].

Για την προστασία των υποσταθμών υψηλής τάσης, οι μετασχηματιστές μετρήσεων έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύσουν μη φυσιολογικές συνθήκες, όπως βραχυκυκλώματα ή υπερφορτίσεις. Όταν παρουσιάζεται σφάλμα, το υψηλό ρεύμα στο πρωτεύον προκαλεί ένα αντίστοιχο ρεύμα στο δευτερεύον, το οποίο συμβάλλει στην ενεργοποίηση προστατευτικών συσκευών, όπως οι διακόπτες κυκλώματος. Με ανάλογο τρόπο λειτουργούν και οι μετασχηματιστές τάσης για την απομόνωση του ελαττωματικού τμήματος από το υπόλοιπο σύστημα [22].

Οι μετασχηματιστές μετρήσεων ρίχνουν τις μεγάλες τιμές ρεύματος ή τάσης σε μικρότερες, τυποποιημένες τιμές, που είναι εύκολο να χειριστούν τα όργανα μέτρησης και τα προστατευτικά ρελέ. Σκοπός των μετασχηματιστών μετρήσεων είναι να απομονώνουν τα κυκλώματα μέτρησης ή/και προστασίας από την υψηλή τάση του πρωτεύοντος συστήματος [22]. Κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών έντασης και τάσεως είναι η ονομαστική ένταση ή τάση στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τυλίγμα, η κλάση ακρίβειας, η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων και η φαινόμενη ισχύς που απορροφάται υπό το ονομαστικό ρεύμα του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος τυλίγματος. Για παράδειγμα, στους μετασχηματιστές έντασης τα τυλίγματα μέτρησης έχουν κλάση ακρίβειας cl. 0.2SF5 και της προστασίας cl. 5P20, ενώ στους μετασχηματιστές τάσης τα τυλίγματα μέτρησης έχουν κλάση ακρίβειας cl. 0.5 και της προστασίας cl. 3P. Τέλος, διατίθενται και μετασχηματιστές μέτρησης συνδυασμένου τύπου, που να είναι και τάσης και έντασης.

1.4 Τύποι Υποσταθμών

Οι υποσταθμοί μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την ονομαστική τους τάση, τις εφαρμογές τους στο σύστημα ισχύος, τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη μόνωση των περισσότερων συνδέσεων και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται.

1.4.1 Υποσταθμός Μεταφοράς

Ένας υποσταθμός μεταφοράς συνδέει δύο ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς. Αυτοί οι υποσταθμοί διευκολύνουν τη μετατροπή των επιπέδων τάσης, τον έλεγχο και την προστασία του συστήματος, την αντιστάθμιση άεργου ισχύος με χρήση πυκνωτών, τη διασύνδεση του δικτύου και την παρακολούθηση. Η κατανόηση των διαφορετικών εφαρμογών των υποσταθμών μεταφοράς είναι θεμελιώδης για τη διασφάλιση ενός αποτελεσματικού και αξιόπιστου δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [2].

Είναι ήδη γνωστό ότι γίνεται μετατροπή της τάσης σε υψηλότερα επίπεδα για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, μειώνοντας έτσι τις απώλειες ισχύος. Αντίθετα, μειώνουν την τάση στους υποσταθμούς διανομής ή στους βιομηχανικούς καταναλωτές σε κατάλληλα επίπεδα για τοπική διανομή ή χρήση. Αυτή η μετατροπή τάσης εξασφαλίζει αποτελεσματική μεταφορά ισχύος σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Επιτρέπουν την ενοποίηση της ενέργειας που παράγεται από διάφορες πηγές, όπως είναι οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής, διεσπαρμένη παραγωγή και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Με την αποτελεσματική

μεταφορά αυτού του διαφορετικού μείγματος ισχύος, οι υποσταθμοί μεταφοράς διασφαλίζουν την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικές περιοχές.

Παράλληλα, είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο και την προστασία του συστήματος. Στεγάζουν προστατευτικά ρελέ, διακόπτες ισχύος, αποζεύκτες και άλλες συσκευές ελέγχου που παρακολουθούν τις γραμμές μεταφοράς και τον εξοπλισμό. Όταν γίνεται αισθητό κάποιο σφάλμα, πραγματοποιείται απομόνωσή του άμεσα από τα επηρεαζόμενα τμήματα, για να αποτρέψουν εκτεταμένες διακοπές λειτουργίας ή ζημιές. Έτσι, ο αποτελεσματικός έλεγχος και η προστασία του συστήματος συμβάλλουν στην αξιοπιστία του δικτύου και ελαχιστοποιούν τις διακοπές ρεύματος. Επίσης, χρησιμοποιούν προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και επικοινωνιακές υποδομές. Τα συστήματα εποπτικού ελέγχου και λήψης δεδομένων (SCADA) επιτρέπουν στους χειριστές να παρακολουθούν και να ελέγχουν εξ αποστάσεως τον εξοπλισμό του υποσταθμού, να συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να ανταποκρίνονται άμεσα σε λειτουργικές αλλαγές ή σφάλματα. Έτσι, τα ισχυρά δίκτυα επικοινωνίας διευκολύνουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των υποσταθμών και του κεντρικού κέντρου ελέγχου, επιτρέποντας τη συντονισμένη λειτουργία και έλεγχο του δικτύου [2].

1.4.2 Υποσταθμός Διανομής

Οι υποσταθμοί διανομής παρέχουν μια σύνδεση μεταξύ του συστήματος μεταφοράς και των τελικών χρηστών. Μια από τις κύριες λειτουργίες τους είναι η ρύθμιση της τάσης. Συγκεκριμένα, λαμβάνουν την ισχύ από το σύστημα μεταφοράς σε υψηλότερες τάσεις και τη μειώνουν σε κατάλληλα επίπεδα για τοπική διανομή, διατηρώντας την τάση εντός αποδεκτών ορίων. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουν συνεχή και αξιόπιστη παροχή ρεύματος στους τελικούς χρήστες, μετριάζοντας τον κίνδυνο διακυμάνσεων τάσης που θα μπορούσαν να βλάψουν ευαίσθητο εξοπλισμό. Επιπλέον, διευκολύνουν τη διαχείριση του φορτίου κατανέμοντας την ενέργεια με βάση τη ζήτηση, παρακολουθούν και εξισορροπούν το φορτίο, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη χρήση της χωρητικότητας του δικτύου διανομής. Η διαχείριση του φορτίου είναι απαραίτητη για την αποφυγή υπερφόρτωσης, τη βελτιστοποίηση της ροής ισχύος, και τη μείωση του κινδύνου διακοπής του ρεύματος ή πτώσης τάσης κατά τις περιόδους αυξημένης ζήτησης [2].

Είναι εξοπλισμένοι με ρυθμιστές τάσης, πυκνωτές και άλλες συσκευές που διαχειρίζονται ποιοτικούς παραμέτρους ισχύος, όπως σταθερότητα τάσης, αρμονικές και συντελεστής ισχύος. Αυτά τα μέτρα συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της πτώσης τάσης, των υπερτάσεων και άλλων προβλημάτων ποιότητας ισχύος. Ομοίως με τους υποσταθμούς μεταφοράς, οι υποσταθμοί διανομής διαχειρίζονται κι αυτοί τη ροή ισχύος και αναλαμβάνουν τον συγχρονισμό μεταξύ συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών, προσφέροντας ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον δίκτυο διανομής [23].

1.4.3 Υποσταθμός Ανύψωσης Τάσης (Step-up)

Αυτοί οι υποσταθμοί βρίσκονται συνήθως σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Η λειτουργία τους προφανώς είναι να αυξάνουν την παραγόμενη τάση σε υψηλότερα επίπεδα (π.χ. 400kV) κατάλληλα για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις. Ενσωματώνουν μεγάλους μετασχηματιστές ισχύος, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται υψηλά επίπεδα τάσης, με σκοπό την άνοδο της τάσης και τη σύνδεση της παραγόμενης ισχύος στο δίκτυο μεταφοράς [22]. Είναι γνωστό ότι προτιμάται η μεταφορά σε υψηλή τάση επειδή επιτρέπει χαμηλότερα επίπεδα ρεύματος, τα οποία με τη σειρά τους μειώνουν τις απώλειες ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Μικρότερες απώλειες συνεπάγονται υψηλότερη απόδοση στη διαδικασία μεταφοράς της ισχύος. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι υποσταθμοί ανύψωσης είναι συγκεκριμένοι για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διαφέρουν από τους υποσταθμούς μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, οι υποσταθμοί μεταφοράς είναι ενδιάμεσοι υποσταθμοί που βρίσκονται κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς, ενώ οι ανύψωσης συνδέονται ειδικά σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής [24].



Εικόνα 1.11: Υποσταθμός ανύψωσης θερμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής [25].

1.4.4 Υποσταθμός Υποβιβασμού Τάσης (Step-down)

Οι υποσταθμοί υποβιβασμού, όπως δηλώνει και το όνομά τους, είναι υπεύθυνοι για τη μείωση της υψηλής τάσης των γραμμών μεταφοράς σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης κατάλληλα για τοπική διανομή. Συχνά βρίσκονται κοντά σε βιομηχανικές περιοχές ή αστικά κέντρα για την παροχή ρεύματος σε διάφορους υποσταθμούς διανομής, εμπορικά συγκροτήματα ή κατοικημένα μέρη [22]. Για να μην υπάρχει σύγχυση με τους υποσταθμούς μεταφοράς, οι υποσταθμοί υποβιβασμού χρησιμοποιούνται ειδικά για τη μείωση της τάσης με σκοπό την τοπική διανομή, ενώ οι μεταφορές έχουν έναν ευρύτερο ρόλο στο σύστημα, μεταφέροντας την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις.

1.5 Σύνδεση με το Ηλεκτρικό Δίκτυο

Η συνδεσιμότητα στο δίκτυο είναι ένα θέμα που αφορά τους υποσταθμούς και τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Για την αποτελεσματική λειτουργία των υποσταθμών χρειάζεται να πραγματοποιείται σωστή και ασφαλή σύνδεση με το κύριο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθεί η συνδεσιμότητα απαιτούνται διάφορες διαδικασίες και συγκεκριμένος εξοπλισμός. Οι υποσταθμοί πρέπει να είναι σωστά συνδεδεμένοι με το δίκτυο μέσω κατάλληλων συνδέσεων, όπως εναέριων αγωγών. Επιπλέον, πρέπει να υπάρχουν αυστηρές διαδικασίες για τη διαχείριση της συνδεσιμότητας συμπεριλαμβανομένων συστημάτων ελέγχου σε συνθήκες λειτουργίας.

Ακόμη, οι υποσταθμοί είναι αναγκαίο να πληρούν τις απαιτήσεις αδειοδότησης, με σκοπό να συμμορφώνονται με τους νομικούς κανονισμούς και τα πρότυπα που καθορίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά που διέπουν τη λειτουργία των υποσταθμών. Η τήρηση αυτών των κανονισμών εγγυάται την ασφάλεια, την αξιοπιστία, τη συμβατότητα των υποσταθμών με το δίκτυο και την προστασία των καταναλωτών. Επιπλέον, η συνδεσιμότητα περιλαμβάνει τη διαχείριση των υψηλών τάσεων και ισχυρών εντάσεων που μεταφέρονται από το δίκτυο υψηλής τάσης στο δίκτυο χαμηλής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της γαλβανικής απόζευξης και της μόνωσης μεταξύ των κυκλωμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης.

Οι προδιαγραφές και τα πρότυπα, που αφορούν τη συνδεσιμότητα στο δίκτυο και τους υποσταθμούς είναι αρκετά και ποικίλα. Τα πρότυπα αυτά και οι προδιαγραφές προσδιορίζουν τις απαιτήσεις και τις τεχνικές προδιαγραφές, που πρέπει να πληρούνται, για την ασφαλή, αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Ορισμένα πρότυπα και προδιαγραφές παρουσιάζονται παρακάτω.

Πρότυπα IEC (International Electrotechnical Commission)

Η IEC εκδίδει πρότυπα, που καλύπτουν διάφορους τομείς της ηλεκτροτεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων των υποσταθμών. Τα πρότυπα της IEC περιλαμβάνουν το IEC 62271-200 [26], που είναι συγκεκριμένα για υποσταθμούς υψηλής τάσης.

Πρότυπα IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

Το IEEE είναι ένα ινστιτούτο που αναπτύσσει πρότυπα για την ηλεκτρική και ηλεκτρονική βιομηχανία. Μερικά από τα πρότυπα του IEEE, που αφορούν τους υποσταθμούς είναι το IEEE Std C37.04-2018 [27] για τα δοκιμαστικά πρότυπα υποσταθμού, το IEEE Std C37.06-2009 [28] για την προστασία και τον έλεγχο των υποσταθμών και το IEEE Std 80-2013 [29], που στην ουσία είναι ένας οδηγός για την ασφάλεια στη γείωση υποσταθμών εναλλασσόμενου ρεύματος.

Κάθε χώρα έχει τις δικές της εθνικές κανονιστικές αρχές και οργανισμούς, που εκδίδουν προδιαγραφές και κανονισμούς για την ηλεκτρική ενέργεια και τους υποσταθμούς. Σύμφωνα με αυτές καθορίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις, που πρέπει να πληρούνται για τη σύνδεση και τη λειτουργία.

Τέλος, οι κατασκευαστές εξοπλισμού, που προορίζεται για υποσταθμούς, συνθέτουν τις δικές τους προδιαγραφές για τον εξοπλισμό τους, που καθορίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται όταν χρησιμοποιείται ο εκάστοτε εξοπλισμός τους.

Συνεπώς, οι εταιρείες παραγωγής ενέργειας και οι κατασκευαστές υποσταθμών πρέπει να τηρούν αυτές τις προδιαγραφές και πρότυπα για να εξασφαλίσουν την ομαλή λειτουργία και την αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

1.6 Προκλήσεις & Τάσεις στους Υποσταθμούς

Οι προκλήσεις και οι τάσεις στους υποσταθμούς διαμορφώνονται από διάφορους παράγοντες, όπως η εξελισσόμενη τεχνολογία, η αλλαγή του ενεργειακού τοπίου και η αυξανόμενη πολυπλοκότητα του δικτύου.

Αρχικά, μια πρόκληση στους υποσταθμούς είναι η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, στο δίκτυο. Καθώς ο κόσμος στρέφεται προς την καθαρότερη και πιο βιώσιμη παραγωγή ενέργειας, οι υποσταθμοί πρέπει με τη σειρά τους να προσαρμόσουν τη διακοπτόμενη και αποκεντρωμένη φύση των ΑΠΕ. Αυτό απαιτεί αναβαθμίσεις στις υποδομές του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης, δυνατοτήτων έξυπνου δικτύου (smart grid) και βελτιωμένης διαχείρισης ροής ισχύος για να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη ενσωμάτωση των ΑΠΕ στους υπάρχοντες υποσταθμούς και δίκτυα διανομής. Αυτή η αυξημένη ευελιξία και προσαρμοστικότητα για την υποστήριξη της ενσωμάτωσης ΑΠΕ απαιτεί την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων ελέγχου και επικοινωνίας, λύσεων αποθήκευσης ενέργειας και γενικά έξυπνων τεχνολογιών διαχείρισης του δικτύου. Οι υποσταθμοί εξελίσσονται για να γίνουν «Έξυπνοι Υποσταθμοί» που επιτρέπουν την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση των ροών ισχύος σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να γίνει αποτελεσματική η ενσωμάτωση των ΑΠΕ και να βελτιωθεί η σταθερότητα του δικτύου.

Καθώς οι υποσταθμοί γίνονται πιο ψηφιοποιημένοι και διασυνδεδεμένοι, ο κίνδυνος απειλών στον κυβερνοχώρο αυξάνεται. Οι υποσταθμοί είναι ευάλωτοι σε επιθέσεις που μπορεί να

διαταράζουν την ομαλή τους λειτουργία, να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα των δεδομένων, την αξιοπιστία και την ασφάλεια του δικτύου γενικότερα. Επομένως, η προστασία των υποσταθμών από τέτοιου είδους απειλές απαιτεί ισχυρά μέτρα ασφαλείας. Κάποιες προτάσεις, που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ασφάλεια, είναι η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας, που θα πρέπει να ακολουθείται πιστά και πάνω από όλα να εγκατασταθούν συστήματα ανίχνευσης εισβολών και τακτικών ελέγχων ασφαλείας.

Επιπλέον, σημαντικό είναι να αναπτυχθεί ένα τείχος προστασίας και μηχανισμοί κρυπτογράφησης. Όσον αφορά το προσωπικό προτείνεται η προώθηση ευαισθητοποίησης και εκπαίδευσής του σε θέματα κυβερνοασφάλειας και να διενεργούνται τακτικά αξιολογήσεις ευπάθειας του συστήματος. Επομένως, μια τάση στους υποσταθμούς είναι η προς αυξημένη έμφαση στα μέτρα κυβερνοασφάλειας, οι υποσταθμοί υιοθετούν προηγμένες τεχνολογίες ασφαλείας για την προστασία των κρίσιμων υποδομών τους από τυχόν απειλές.

Είναι πρόκληση να κατασκευαστεί ένα ανθεκτικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, μέσα στο οποίο εντάσσονται και οι υποσταθμοί. Η αυξανόμενη συχνότητα και η σοβαρότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων, των φυσικών καταστροφών και άλλων διαταραχών απαιτούν να είναι οι υποσταθμοί πιο ανθεκτικοί και ικανοί για ταχεία ανάκαμψη. Οι πρωτοβουλίες εκσυγχρονισμού του δικτύου επικεντρώνονται στην αναβάθμιση της γηρασμένης υποδομής, στην ενίσχυση της ευελιξίας του δικτύου και στην ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών παρακολούθησης και ελέγχου. Αυτές οι προσπάθειες στοχεύουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας, του χρόνου απόκρισης και των δυνατοτήτων αποκατάστασης των υποσταθμών ενόψει των προκλήσεων.

Για να χαρακτηριστούν οι υποσταθμοί ως ανθεκτικοί χρειάζεται να αναπτυχθούν προηγμένοι αισθητήρες, συστήματα αυτοματισμού, δίκτυα που μπορούν να επανέλθουν άμεσα μετά από κάποιο σφάλμα και χρήση προγνωστικών αναλύσεων για να καταστεί δυνατή η ταχύτερη ανίχνευση σφαλμάτων με τη σωστή διαχείριση των διακοπών και να ακολουθεί η αποκατάσταση. Η ενσωμάτωση της παρακολούθησης του δικτύου και των σύγχρονων τεχνολογιών ανάλυσης, επιτρέπει στους υποσταθμούς να εντοπίζουν προληπτικά πιθανά ζητήματα, να βελτιστοποιούν την απόδοση της ενέργειας και να βελτιώνουν τη συνολική ανθεκτικότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

Συμπερασματικά, οι προκλήσεις και οι τάσεις στους υποσταθμούς οφείλονται στην ανάγκη ενσωμάτωσης των ΑΠΕ, αντιμετώπισης των κινδύνων στον κυβερνοχώρο και διασφάλισης της ανθεκτικότητας του δικτύου. Οι υποσταθμοί εξελίσσονται για να ανταπεξέρχονται στις νέες προκλήσεις της σύγχρονης κοινωνίας καθιστώντας τους πιο ευέλικτους και καλύτερα εξοπλισμένους για να χειρίζονται τις απαιτήσεις ενός μεταβαλλόμενου ενεργειακού τοπίου. Αγκαλιάζοντας τις εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας και υιοθετώντας καινοτόμες προσεγγίσεις, οι υποσταθμοί μπορούν να ξεπεράσουν τις προκλήσεις και να συμβάλουν σε ένα πιο βιώσιμο, ασφαλές και ανθεκτικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 2

Συστήματα Γείωσης

2.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Γείωσης

Τα συστήματα γείωσης αποτελούν ουσιώδη πτυχή των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, προσφέροντας προστασία και ασφάλεια στους χρήστες του ηλεκτρικού δικτύου. Ανεξαρτήτως της χρήσης, είτε αυτή είναι οικιακή, βιομηχανική, εμπορική, είτε αφορά την κατασκευή υποσταθμού υψηλής τάσης, η κατάλληλη γείωση αποτελεί προτεραιότητα για την ασφάλεια των ανθρώπων και του εξοπλισμού.

Ο όρος «γείωση» χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αγωγή σύνδεση μεταξύ ενός σημείου σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή ενός μεταλλικού αντικειμένου με τη γη. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ασφαλή παροχέτευση τυχόν ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος ή διαρροής προς τη γη, με στόχο την προστασία των ατόμων και των ηλεκτρικών συσκευών από πιθανούς κινδύνους [14].

Η εγκατάσταση γείωσης περιλαμβάνει δύο βασικά στοιχεία: τους αγωγούς γείωσης και τους γειωτές. Οι γειωτές, οι οποίοι συχνά αποκαλούνται και ηλεκτρόδια γείωσης, αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ της εγκατάστασης γείωσης και του εδάφους. Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι τοποθετημένα στο έδαφος σε κάποιο βάθος και σχεδιάζονται έτσι ώστε να εξασφαλίζουν μια αποτελεσματική αγωγή διαδρομή προς τη γη, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα για την ασφαλή παροχέτευση των ρευμάτων σφάλματος [14]. Είναι ένα μέτρο στην ουσία ασφάλειας, που περιλαμβάνει τη σκόπιμη σύνδεση ηλεκτρικού εξοπλισμού ή αγωγίμων τμημάτων του συστήματος με τη γη ή ένα αγωγίμο σώμα με χαμηλή αντίσταση. Τα ηλεκτρόδια γείωσης μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα και διαστάσεις, όπως ράβδους γείωσης, πλάκες ή πλέγματα, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος γείωσης και της εγκατάστασης.

Οι γειώσεις ανήκουν σε τρία διακριτά είδη, τα οποία καθορίζονται βάσει του σκοπού που εξυπηρετούν σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση. Αυτά τα είδη είναι η γείωση λειτουργίας, η γείωση προστασίας και η γείωση ασφαλείας.

Αρχικά, η γείωση λειτουργίας αποτελεί τη γείωση ενός τμήματος της εγκατάστασης που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Αυτό το είδος γείωσης χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, την άμεση και την έμμεση. Η άμεση γείωση δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση εκτός από την αντίσταση γείωσης, ενώ η έμμεση γείωση περιλαμβάνει, επιπλέον και άλλους τύπους αντιστάσεων, όπως ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις [14].

Στη συνέχεια, η γείωση προστασίας αποτελεί την αγωγή σύνδεση μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης που δεν βρίσκονται κανονικά υπό τάση, με σκοπό την προστασία των ανθρώπων, που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά. Επομένως, η γείωση αυτή έχει ως στόχο

να μειώσει τις τάσεις επαφής και να προστατεύσει τα άτομα από τυχόν ηλεκτροπληξίες. Ένα παράδειγμα γείωσης προστασίας είναι η γείωση των μεταλλικών μερών ενός υποσταθμού υψηλής τάσης ή η γείωση όλων των μεταλλικών μερών σε μια εγκατάσταση [14].

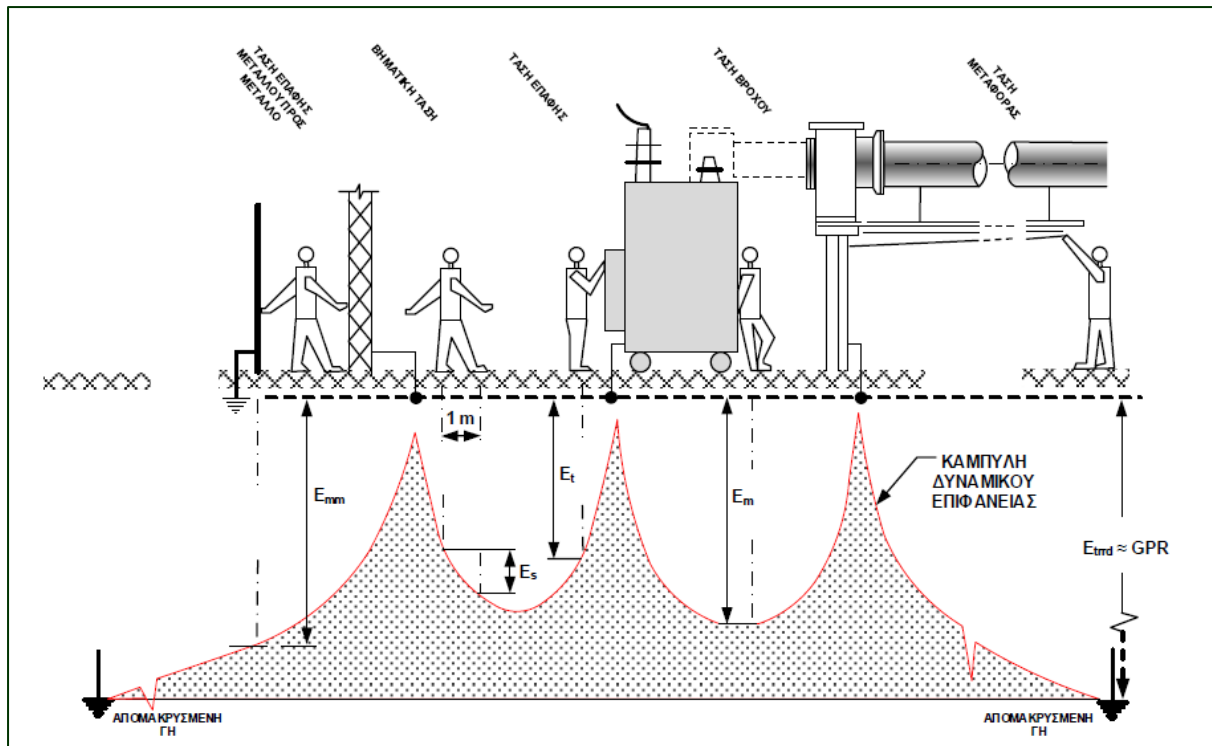
Τέλος, η γείωση ασφαλείας αφορά τη σύνδεση με τη γη των προστατευτικών αντικεραυνικών εγκαταστάσεων, με σκοπό να διοχετεύσει σε αυτή τα κεραυνικά ρεύματα. Αυτό είναι κρίσιμο για την ασφάλεια των κτιρίων και των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, καθώς η πτώση κεραυνών μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές [14].

2.2 Σκοπός & Σημασία της Γείωσης στα Ηλεκτρικά Συστήματα

Οι άνθρωποι συχνά υποθέτουν ότι μπορούν να έρθουν σε επαφή με οποιοδήποτε γειωμένο αντικείμενο με ασφάλεια. Ο πρωταρχικός και πιο κρίσιμος σκοπός των συστημάτων γείωσης είναι να διασφαλίζουν την ασφάλεια των ατόμων, που έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρικό εξοπλισμό ή εκτεθειμένα μεταλλικά αγωγία μέρη. Η τάση επαφής (touch voltage) εμφανίζεται στο σημείο που στέκεται ένα άτομο ενώ ταυτόχρονα ακουμπά με το χέρι του κάποια γειωμένη μεταλλική επιφάνεια [30]. Γενικά, ηλεκτροπληξία μπορεί να συμβεί όταν ένα άτομο γίνεται κατά λάθος μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, επιτρέποντας στο ηλεκτρικό ρεύμα να ρέει μέσα από το σώμα του. Τέτοιοι σπασμοί μπορεί να είναι επικίνδυνοι, προκαλώντας τραυματισμούς, που κυμαίνονται από ήπια ενόχληση έως σοβαρά εγκαύματα ή ακόμα και θάνατο. Αυτή η εκτροπή του ρεύματος μέσω του συστήματος γείωσης, εμποδίζει το ρεύμα σφάλματος να περάσει μέσα από το σώμα ενός ατόμου ή άλλα αγωγία αντικείμενα, μειώνοντας έτσι το ενδεχόμενο της ηλεκτροπληξίας [29].

Επιπροσθέτως, στα ίδια πλαίσια επικινδυνότητας κατατάσσονται και οι βηματικές τάσεις (step voltage). Ως βηματική τάση χαρακτηρίζεται η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εδάφους μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, όταν συμβεί ένα σφάλμα στην εγκατάσταση. Λέγεται βηματική τάση, διότι αναπτύσσεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, όταν περπατάει με άνοιγμα βήματος περίπου 1m, το οποίο δεν ακουμπά κάποιο γειωμένο αντικείμενο και βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με το σημείο που έγινε το σφάλμα [30].

Παράλληλα, η γείωση προστατεύει τον ηλεκτρικό εξοπλισμό από ζημιές, που προκαλούνται από ρεύματα σφάλματος ή κεραυνικά πλήγματα, παρέχοντας έτσι μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης για τα επικίνδυνα ρεύματα. Με αυτόν τον τρόπο αποτελεί ένα σημείο αναφοράς για την τάση (μηδενικό δυναμικό) και μια ασφαλή διαδρομή για τη ροή των ρευμάτων σφάλματος, μειώνοντας συνεπώς την εμφάνιση υπερεντάσεων και διασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Αυτό εξασφαλίζει ότι όλα τα αγωγία μέρη με τα οποία μπορεί να έρθουν σε επαφή τα άτομα, όπως μεταλλικά περιβλήματα, αγωγοί και σασί εξοπλισμού, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο τάσης. Για την αντικεραυνική προστασία συγκεκριμένα, τα αλεξικέραυνα και τα ηλεκτρόδια γείωσης χρησιμοποιούνται για την ασφαλή παροχέτευση των κεραυνικών ρευμάτων στη γη. Έτσι, προστατεύονται οι κατασκευές και ο εξοπλισμός από επιζήμιες καταστάσεις. Ακόμη, με το μηδενικό δυναμικό επιτυγχάνεται αντιστάθμιση των διαφορών τάσεων μεταξύ των ποικίλων μεταλλικών μερών του συστήματος.



Εικόνα 2.1: Βηματικές τάσεις & τάσεις επαφής [30].

Η σωστή γείωση βοηθά επίσης και στην ελαχιστοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Electromagnetic Interference ~ EMI) και των παρεμβολών ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency Interference ~ RFI) στα ηλεκτρικά συστήματα. Παρέχει μια διαδρομή για το ανεπιθύμητο ηλεκτρικό θόρυβο ή παρεμβολές για τη ροή στη γη. Αυτό έχει ως συνέπεια να μειώνονται οι διακοπές σε ευαίσθητες ηλεκτρικές συσκευές και να βελτιώνει την ποιότητα των σημάτων [31].

2.3 Συνέπειες της Έλλειψης ή Ελαττωματικής Γείωσης

Η έλλειψη ή η ελαττωματική γείωση σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες που επηρεάζουν τόσο την ασφάλεια των ανθρώπων όσο και την ομαλή λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος.

Η πιο σοβαρή συνέπεια της έλλειψης γείωσης είναι ο αυξημένος κίνδυνος ηλεκτροπληξίας. Αν η εγκατάσταση δεν είναι σωστά γειωμένη, το ρεύμα μπορεί να διέρχεται μέσα από το ανθρώπινο σώμα, προκαλώντας, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, σοβαρά τραύματα ή ακόμα και θανάτους. Η ηλεκτροπληξία μπορεί να συμβεί σε διάφορες καταστάσεις, όπως όταν τα άκρα του ανθρώπου έρχονται σε επαφή με μεταλλικά μέρη ή εξοπλισμό, που έχει επιστρώσεις μετάλλου, όταν αυτά βρίσκονται υπό τάση.

Γεγονός είναι ότι η μη ύπαρξη γείωσης μπορεί να προκαλέσει υπερβολική συσσώρευση ηλεκτρικού φορτίου στους εξοπλισμούς και τις καλωδιώσεις [32]. Λόγω αυτού του φαινομένου υπάρχει πιθανότητα υπερθέρμανσης των καλωδίων σε σημείο που να κάψουν το

περίβλημά τους και την μόνωση, με κίνδυνο να ξεσπάσει πυρκαγιά. Ομοίως, λόγω της υπερθέρμανσης μπορεί να προκληθεί και έκρηξη των ηλεκτρικών συσκευών με αποτέλεσμα εκδήλωση πυρκαγιάς. Εάν η πυρκαγιά δεν αντιμετωπιστεί άμεσα, μπορεί να εξαπλωθεί στις γύρω περιοχές και να προκαλέσει καταστροφικές ζημιές.

Παράλληλα, η έλλειψη γείωσης οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλές τάσεις και ρεύματα στον ηλεκτρικό εξοπλισμό, προκαλώντας βλάβες ή ακόμα και καταστροφή των συσκευών. Οι αυξημένες αυτές τάσεις μπορούν να επιφέρουν διάβρωση και φθορά στον εξοπλισμό, μειώνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους και αυξάνοντας το κόστος συντήρησης. Αναμφισβήτητα, το μη αποτελεσματικό σύστημα γείωσης έχει την ευθύνη της εμφάνισης προβλημάτων στο ηλεκτρικό σύστημα, όπως διακοπές ρεύματος, υπερβολικές τάσεις και ανικανότητα του δικτύου. Αποτέλεσμα αυτού είναι να χαθεί η αξιοπιστία και να υπάρξει απώλεια τροφοδοσίας της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και ζημιές σε εγκαταστάσεις και εξοπλισμό.

Σε πολλές χώρες, οι κανονισμοί ασφαλείας απαιτούν την ύπαρξη κατάλληλων συστημάτων γείωσης σε όλες τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Η ανύπαρκτη ή ελαττωματική γείωση μπορεί να οδηγήσει σε παράβαση των κανονισμών και να επιβληθούν κυρώσεις ή και στην χειρότερη περίπτωση να απαγορευτεί η λειτουργία των προβληματικών εγκαταστάσεων.

Συνολικά, το παραπάνω πρόβλημα αποτελεί μια σοβαρή και επικίνδυνη κατάσταση που πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά. Η σωστή γείωση εξασφαλίζει την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, προστατεύοντας τους χρήστες από ηλεκτροπληξία και προλαμβάνοντας πιθανές βλάβες στον εξοπλισμό. Επομένως, η σωστή σχεδίαση, εγκατάσταση και συντήρηση των συστημάτων γείωσης είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για την ασφάλεια και την ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων.

2.4 Συστήματα Γείωσης σε Υποσταθμούς

Η γείωση είναι σημαντική πτυχή κάθε υποσταθμού. Η λειτουργία ενός συστήματος γείωσης είναι να διασφαλίζει την ασφάλεια και να ελαχιστοποιεί τους κινδύνους. Έτσι, ένα σύστημα γείωσης θα πρέπει να εγκατασταθεί με τρόπο που θα περιορίζει την επίδραση των κλίσεων του δυναμικού γης σε τέτοια επίπεδα τάσης και ρεύματος, που δε θα θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των ανθρώπων ή του εξοπλισμού υπό συνθήκες σφάλματος [29]. Προκειμένου ένα σύστημα γείωσης να είναι ασφαλές, πρέπει να παρέχει έναν τρόπο μεταφοράς των ρευμάτων σφάλματος στο έδαφος στον συντομότερο δυνατό χρόνο.

Επειδή δεν υπάρχει απλή σχέση μεταξύ της αντίστασης του συστήματος γείωσης και του μέγιστου ρεύματος, που μπορεί να βιώσει ένα άτομο, απαιτείται να γίνει μια πλήρης ανάλυση για να ληφθούν υπόψη πολλές διαφορετικές πτυχές, όπως η θέση των ηλεκτροδίων γείωσης και τα χαρακτηριστικά του εδάφους [29].

Με άλλα λόγια, η σύνδεση των εκτεθειμένων μεταλλικών μερών του υποσταθμού με το έδαφος δημιουργεί έναν αγωγίμο δρόμο μέσω του οποίου μπορούν να διοχετευτούν τα επικίνδυνα ρεύματα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση γειωτών, που αποτελούν τα ηλεκτρόδια γείωσης, τα οποία τοποθετούνται εντός του εδάφους και συνδέονται με τα μεταλλικά μέρη του υποσταθμού. Κατά τη διάρκεια κεραυνικών ή επαγωγικών φαινομένων, τα ρεύματα

ακολουθούν αυτόν τον αγωγό και διοχετεύονται με ασφάλεια στο έδαφος, αποτρέποντας πιθανές ζημιές στον υποσταθμό.

Συμπερασματικά, η σχεδίαση και η υλοποίηση των συστημάτων γείωσης πρέπει να γίνεται προσεκτικά και με ακρίβεια. Αυτό σημαίνει ότι είναι αναγκαίο να ακολουθούνται τα εθνικά ή διεθνή πρότυπα και κανονισμοί που διέπουν την ασφάλεια των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Η σωστή σχεδίαση περιλαμβάνει τον υπολογισμό των κατάλληλων γειωτών και ηλεκτροδίων, τη διάταξη τους στο χώρο του υποσταθμού και την ασφαλή σύνδεσή τους με τα μεταλλικά μέρη της εγκατάστασης.

2.4.1 Επιλογή Τοποθεσίας Υποσταθμού

Η διαδικασία απόφασης για την καταλληλότητα ενός οικοπέδου ή μιας περιοχής για την ανέγερση ενός υποσταθμού απαιτεί μια περιεκτική μελέτη και αξιολόγηση πολλών παραγόντων από έμπειρους μηχανικούς, ηλεκτρολόγους και τεχνικούς. Οι ειδικοί πρέπει να υπολογίσουν τις απαιτήσεις του υποσταθμού και να σχεδιάσουν το βέλτιστο σύστημα γείωσης, προκειμένου να αντιμετωπιστούν διάφορα σενάρια ασφαλείας. Η επιλογή της καλύτερης δυνατής τοποθεσίας για τον υποσταθμό αποτελεί ένα απαιτητικό στάδιο, το οποίο περιλαμβάνει την εξέταση και ανάλυση ποικίλων παραγόντων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μερικοί από τους παράγοντες είναι στην πραγματικότητα αλληλεξαρτώμενοι.

Ένας πρωταρχικός παράγοντας, που πρέπει να εξεταστεί, είναι η γεωγραφική τοποθεσία. Η ευκολία σύνδεσης του υποσταθμού με το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο είναι πολύ σημαντική επιλογή. Επιπλέον, ο υποσταθμός πρέπει να τοποθετείται κοντά στις υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς για να εξασφαλίζει εύκολη πρόσβαση σε άλλες περιοχές του δικτύου.

Επίσης, η επιφάνεια και η υδρογραφία της περιοχής είναι εξίσου σημαντικοί παράγοντες. Η πρωταρχική παράμετρος που εξετάζεται είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους στο οικόπεδο όπου σχετίζεται η κατασκευή του υποσταθμού. Η τιμή της θα πρέπει να είναι εξαιρετικά χαμηλή ώστε η τιμή της αντίστασης του συστήματος γείωσης του υποσταθμού να μην υπερβαίνει το 1Ω σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ΑΔΜΗΕ [33]. Το έδαφος απαιτείται να είναι σταθερό και ικανό να υποστηρίξει το βάρος του υποσταθμού και του εξοπλισμού του. Παράλληλα, η καλύτερη περίπτωση θα ήταν η επιλογή της τοποθεσίας να μην χρειάζεται παρεμβάσεις με αφαίρεση ή προσθήκη χώματος. Η απαίτηση επιπρόσθετου χώματος ή αφαίρεσής του απαιτεί χρόνο και αυξάνει συνολικά το κόστος. Γενικά, στα εδάφη όπου υπάρχει αυξημένη υγρασία μπορεί να επηρεαστεί η αντοχή των θεμελίων και του πλέγματος, συνεπώς χρειάζεται προσοχή στις μετρήσεις, που πραγματοποιούνται στην αρχή. Αξίζει να αναφέρουμε ότι λαμβάνονται υπόψη τα ιστορικά δεδομένα της χειρότερης πλημμύρας της εκάστοτε περιοχής, έτσι ώστε να κατασκευαστούν τα ανάλογα κατάλληλα αντιπλημμυρικά έργα.

Φυσικά, σημαντικό ρόλο παίζουν και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως το αλάτι που συναντάται κυρίως σε περιοχές κοντά στη θάλασσα και οι αιωρούμενες χημικές προσμείξεις, που επηρεάζουν την επιλογή του εξοπλισμού και τις απαιτήσεις συντήρησης [34]. Είναι γεγονός ότι η ύπαρξη υψηλής περιεκτικότητας αλάτων στην ατμόσφαιρα δυσχεραίνει τις συνθήκες λειτουργίας και φθείρει τον εξοπλισμό συνεχώς, έτσι ώστε να μειώνεται δραματικά ο χρόνος ζωής του.

Ακόμη, η ύπαρξη κατάλληλων υποδομών πρέπει να ληφθεί στα υπόψη, διότι είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί το απαραίτητο οδικό δίκτυο για να είναι ο υποσταθμός εύκολα προσβάσιμος τόσο στο προσωπικό, αλλά και κατά τη μεταφορά ογκώδους εξοπλισμού στο εργοτάξιο [34]. Αναμφίβολα, προτεραιότητα είναι να υπάρχει σεβασμός στις κατοικημένες περιοχές, να μην είναι πολύ κοντά ώστε να επιφέρει κινδύνους, καθώς επίσης και να μην επιβαρύνει αισθητικά τις περιοχές αυτές. Συνήθως, βρίσκονται μακριά από πολυσύχναστα μέρη ή και εκτός των περιοχών της πόλης. Οι ντόπιοι θα πρέπει να ενημερωθούν για τον επερχόμενο υποσταθμό, για να αποφευχθεί η δημόσια δυσαρέσκεια και καλύτερο είναι να εμπλέκονται κι αυτοί στη διαδικασία. Ο υποσταθμός είναι πηγή θορύβου. Οι φορτισμένοι μετασχηματιστές, οι αποζεύκτες, οι διακόπτες ισχύος και η γραμμές υψηλής τάσης είναι πηγές συνεχούς θορύβου. Κάποιες λειτουργίες του εξοπλισμού προκαλούν επίσης θόρυβο. Έτσι, θα πρέπει να υιοθετηθεί σχεδιασμός για την αντιμετώπιση των ζητημάτων, ώστε να συμμορφώνονται με τα πρότυπα, που ορίζονται από την αρμόδια αρχή για τη μείωση της ηχορύπανσης και την αποφυγή δυσαρέσκειας του κοινού.

Επιπλέον, οι υποσταθμοί πρέπει να σχεδιάζονται και να λειτουργούν με τρόπο, που να μην επιδρά όσο το δυνατό γίνεται αρνητικά στο περιβάλλον. Αποφεύγονται λοιπόν δασικές εκτάσεις, μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, τουριστικά σημεία και εθνικά πάρκα. Σχεδόν όλες οι κυβερνήσεις έχουν θεσπίσει αυστηρούς κανόνες σχετικά με την απαγόρευση κατασκευής σε δασική γη και καταφύγια άγριας ζωής. Η συνήθης διαδικασία απαιτεί χρόνο για να εγκριθεί από τις αρμόδιες αρχές. Αυτή η διαδικασία καθυστερεί υπερβολικά τις κατασκευαστικές δραστηριότητες. Απαιτείται επίσης έγκριση και από την αεροπορική αρχή, με σκοπό ο υποσταθμός να μην βρίσκεται κοντά σε αεροδρόμια και αμυντικές εγκαταστάσεις.

Εν κατακλείδι, η εύρεση ιδανικής τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός υποσταθμού αποτελεί σύνθετη διαδικασία, που απαιτεί λεπτομερή ανάλυση και εκτενή μελέτη. Η εγκυρότητα της ασφαλούς και αποτελεσματικής λειτουργίας του υποσταθμού προσφέρει αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η επιλεγμένη τοποθεσία χρειάζεται να λαμβάνει υπόψη τις ανάγκες του περιβάλλοντος και της κοινότητας. Η ορθή σχεδίαση και υλοποίηση των συστημάτων γείωσης εξασφαλίζει την αποτελεσματική προστασία των υποσταθμών από υπερεντάσεις και κεραυνούς, προάγοντας έτσι την ασφάλεια του προσωπικού και τη συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.



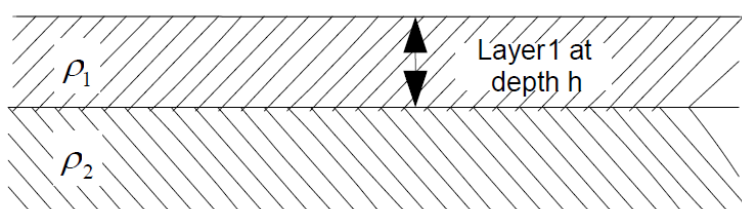
Εικόνα 2.2: Ξενόγλωσσο άρθρο με παράπονα κατοίκων για την παρουσία υποσταθμού σε κατοικημένη περιοχή [35].

2.4.2 Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης Υποσταθμών

Για τη σχεδίαση του συστήματος γείωσης, απαιτούνται ορισμένα δεδομένα εισόδου, με το κυριότερο να είναι η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ). Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, είναι αναγκαία η κατάλληλη επιλογή των αξόνων μέτρησης, συμπεριλαμβανομένου του πλήθους μετρήσεων, των θέσεων και των αποστάσεων μεταξύ τους. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η εποχή στην οποία προγραμματίζονται να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, καθώς η ειδική αντίσταση του εδάφους υπόκειται σε μεταβολές σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες. Συνεπώς, προτείνεται η διεξαγωγή των μετρήσεων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, κατά τους οποίους η ειδική αντίσταση εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της [36].

Συνολικά, η σωστή σχεδίαση και υλοποίηση του συστήματος γείωσης σε υποσταθμούς απαιτεί προσεκτική μελέτη και επιλογές σχετικά με τα δεδομένα εισόδου, τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους και την πιστοποίηση του εργαστηρίου που εκτελεί τις μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία του συστήματος γείωσης και επιτυγχάνεται η ασφάλεια του υποσταθμού και των συνδεδεμένων με αυτόν εγκαταστάσεων.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση και η μοντελοποίηση του συστήματος γείωσης ενός υποσταθμού, είναι αναγκαίο να καθοριστούν τα πρότυπα και οι προδιαγραφές που θα οδηγήσουν τη σχεδίαση, όπως και να διασαφηνιστούν τα στοιχεία, που απαιτούνται για την προσομοίωση. Αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνουν το είδος του εδάφους (μονοστρωματικό, διστρωματικό κ.τ.λ.), τη μορφολογία του εδάφους, τη συχνότητα, το βάρος του ανθρώπου και τον προϋπολογισμό, που έχει διατεθεί για τη σχεδίαση και την κατασκευή του συστήματος.



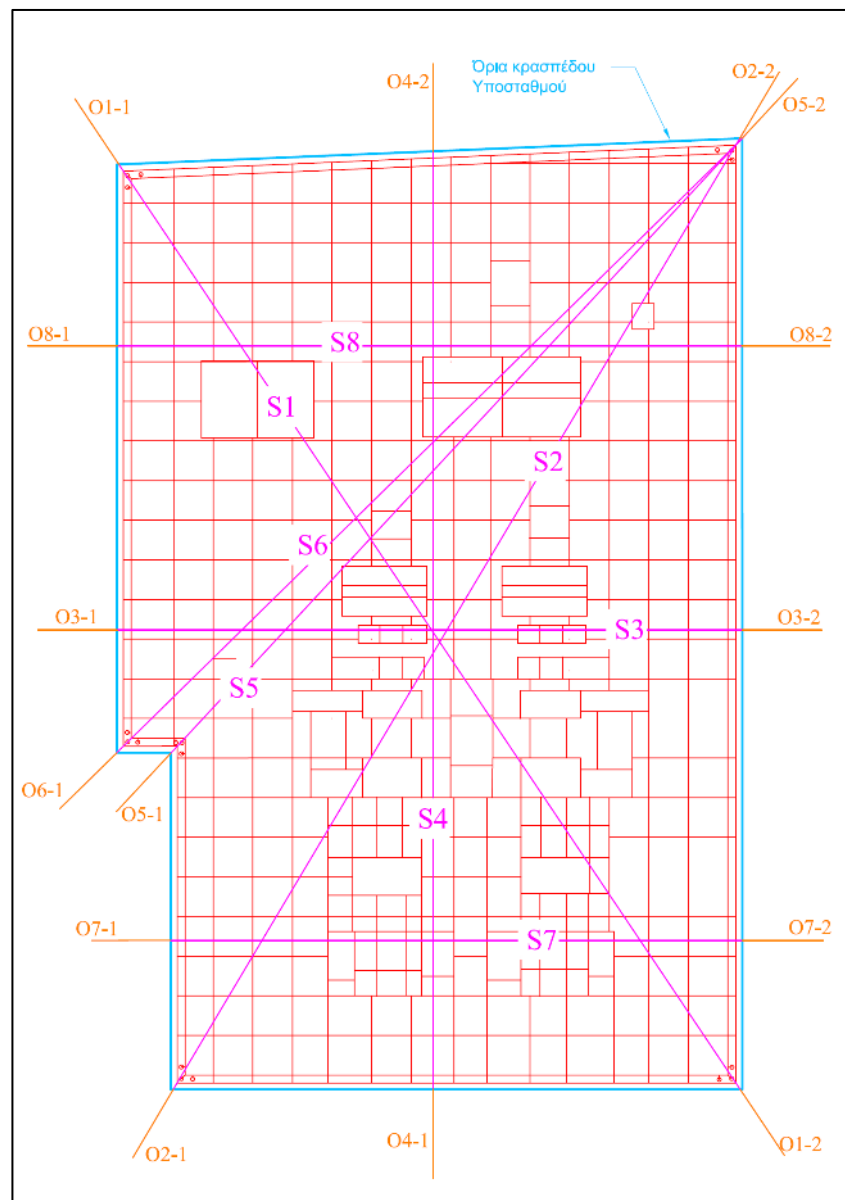
Εικόνα 2.3: Τυπική απεικόνιση διστρωματικού εδάφους [37].

Σε περίπτωση που δεν έχουν καθοριστεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και η διαστασιολόγηση των αγωγών, απαιτούνται επιπλέον στοιχεία για τον υπολογισμό τους. Στην πράξη, τα βήματα που ακολουθούνται για τη σχεδίαση και κατασκευή του συστήματος γείωσης περιλαμβάνουν [36]:

- Επιλογή των πιθανών θέσεων για την εγκατάσταση του συστήματος γείωσης, όπως αναφέρθηκε εκτενώς στην παραπάνω ενότητα.
- Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, η οποία θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, για κάθε μία από τις προτεινόμενες θέσεις εγκατάστασης. Η μέθοδος αυτή, περιλαμβάνει τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε διάφορα σημεία γύρω από τις θέσεις εγκατάστασης. Συνήθως, ο Διαχειριστής απαιτεί μετρήσεις σε 3–5 διαφορετικούς άξονες ανάλογα με τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Ο

υπεύθυνος μέτρησης έχει την ευελιξία να επιλέξει τους άξονες από τις πλευρές, τις διαγωνίους ή με τυχαίο τρόπο για να λάβει υπόψη τις διάφορες μεταβολές του εδάφους στο οικόπεδο.

- Υπολογισμός του μοντέλου εδάφους βασισμένο στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους για όλες τις θέσεις, όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τον υπολογισμό του μέσου όρου των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης για κάθε απόσταση μέτρησης και για κάθε άξονα όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Είναι κοινά αποδεκτό ότι το έδαφος μοντελοποιείται ως μονοστρωματικό ή διστρωματικό. Η επιλογή του μοντέλου γίνεται βάσει της ελαχιστοποίησης του σφάλματος μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης και των τιμών που δίνει το μοντέλο προσομοίωσης.
- Καθορισμός του μέγιστου ρεύματος σφάλματος που επιτρέπεται και καθορίζεται από τις προδιαγραφές του Διαχειριστή.
- Σχεδιασμός του τυπικού πλέγματος γείωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του οικοπέδου και το μέγεθος του υποσταθμού.



Εικόνα 2.4: Ενδεικτικό πλέγμα γείωσης υποσταθμού & άξονες μετρήσεων [38].

- Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.
- Υπολογισμός της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής σε κάθε σημείο πάνω από το πλέγμα γείωσης, χρησιμοποιώντας επίσης κατάλληλο λογισμικό.
- Έλεγχος των παραπάνω μεγεθών για να επιβεβαιωθεί ότι η αντίσταση γείωσης είναι μικρότερη ή ίση από 1Ω και ότι οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής παραμένουν εντός των ασφαλών ορίων, που καθορίζονται από το πρότυπο της IEEE Std 80-2013 [29]. Αυτό είναι επιθυμητό για να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος γείωσης.



Εικόνα 2.5: Ενδεικτική γενική διάταξη υποσταθμού [38].

2.4.3 Πλέγματα Γείωσης σε Υποσταθμούς

Ο σχεδιασμός του πλέγματος γείωσης στο έδαφος του υποσταθμού βασίζεται στο σχέδιο της διάταξής του. Για την αξιοποίηση αποτελεσματικών πλεγμάτων γείωσης πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες. Οι προδιαγραφές πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του κανονισμού HD384-54 [39], που ισχύει στην Ευρώπη. Τα ακόλουθα σημεία χρησιμεύουν ως κατευθυντήριες γραμμές για την έναρξη του σχεδιασμού του πλέγματος γείωσης. Αν και τα συγκεκριμένα βήματα μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το σχέδιο και το μέγεθος του υποσταθμού, ακολουθούν τα στάδια, που απαιτούνται για την εγκατάσταση γείωσης.

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία εγκατάστασης είναι η τοποθέτηση ηλεκτροδίων γείωσης στο έδαφος. Τα ηλεκτρόδια γείωσης κατασκευάζονται συνήθως από χαλύβδινες ράβδους ή αγωγίμες μεταλλικές πλάκες με επένδυση χαλκού. Θάβονται σε συγκεκριμένο βάθος για να εξασφαλίζεται η καλή επαφή με το έδαφος. Ο αριθμός και η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων αυτών, εξαρτώνται από το μέγεθος του υποσταθμού και τον σχεδιασμό της γείωσης. Είναι χρήσιμο να τονιστεί ότι οι ράβδοι γείωσης μπορούν να τοποθετηθούν στις γωνίες του πλέγματος και σε σημεία διασταύρωσης κατά μήκος της περιμέτρου, αλλά προτείνεται να εγκατασταθούν και σε ευαίσθητο εξοπλισμό για την αποτελεσματική προστασία του.

Στη συνέχεια, τοποθετούνται αγωγοί γείωσης, συνήθως χαλκού ή αλουμινίου, για τη σύνδεση των ηλεκτροδίων γείωσης και άλλων μεταλλικών κατασκευών στον υποσταθμό. Ειδικότερα, οι αγωγοί τοποθετούνται σε παράλληλες γραμμές τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες. Στα σημεία, όπου συναντώνται και συνδέονται οι αγωγοί, σχηματίζουν μικρότερα τετράγωνα, τα οποία έχουν την ονομασία ως «μάτι» του πλέγματος. Όπου είναι πρακτικό, οι αγωγοί τοποθετούνται κατά μήκος των δομών ή των σειρών του εξοπλισμού για να παρέχουν σύντομες συνδέσεις γείωσης. Όμως, οι συνθήκες του εδάφους (θερμοκρασία, υγρασία) και των ρευμάτων διαρροής επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση γείωσης και επομένως τους αγωγούς. Έτσι, θα πρέπει η σχεδίαση να λαμβάνει υπόψη αυτούς τους παράγοντες, προκειμένου να αποφευχθούν διαβρώσεις και σταδιακή καταστροφή του συστήματος γείωσης. Σημειώνεται, ακόμη, ότι η ειδική αντίσταση του μετάλλου του γειωτή δεν επηρεάζει την αντίσταση γείωσης. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση αυτή δεν εξαρτάται από το υλικό του γειωτή και συνεπώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά για την κατασκευή του [39].

Έτσι, οι αγωγοί με τη συνδεσμολογία σε μορφή πλέγματος επιτυγχάνουν ένα ισοδυναμικό επίπεδο και παρέχουν διαδρομές χαμηλής αντίστασης, με αποτέλεσμα τα ρεύματα σφάλματος να ρέουν στο έδαφος. Γενικά, τα τυπικά πλέγματα γείωσης υποσταθμών, αποτελούνται από γυμνούς χάλκινους αγωγούς, που είναι θαμμένοι 0,5m ή και περισσότερο κάτω από το έδαφος και σε απόσταση 3–7 μέτρων μεταξύ τους σχηματίζοντας το πλέγμα [39]. Το πλέγμα χρειάζεται να είναι θαμμένο για να προστατεύονται οι αγωγοί από φυσικές βλάβες και περιβαλλοντικούς παράγοντες, που δυσχεραίνει το λειτουργικό τους έργο. Αναμφισβήτητα, οι αγωγοί γείωσης είναι απαραίτητο να είναι καλά συνδεδεμένοι στις εγκάρσιες συνδέσεις, ώστε να παρέχουν μηχανική στιβαρότητα του συστήματος γείωσης για μακροχρόνια αποτελεσματική λειτουργία [40].

Έπειτα, το πλέγμα γείωσης στους υποσταθμούς απαιτείται να εξασφαλίζει τη σύνδεση όλων των συσκευών, πυλώνων, ουδετέρων κόμβων των μετασχηματιστών, μεταλλικών περιβλημάτων και εγκαταστάσεων. Οι αγωγοί γείωσης συνδέονται με αυτόν τον εξοπλισμό και τις κατασκευές για να διασφαλιστεί ότι βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό με το πλέγμα γείωσης, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας των ατόμων και ζημιάς στον

εξοπλισμό. Επίσης, μεταλλικά εξαρτήματα, όπως φράκτες, πύλες και δομικά στηρίγματα, πρέπει να συνδεθούν στο σύστημα γείωσης. Επιπλέον, το πλέγμα θα πρέπει να περιβάλλει την περίμετρο και να καταλαμβάνει όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια χρειάζεται προκειμένου να αποφευχθούν υψηλές συγκεντρώσεις ρευμάτων. Η χρήση μεγαλύτερης περιοχής μειώνει επίσης την αντίσταση του πλέγματος γείωσης. Συγχρόνως, το πλέγμα απαιτείται να εκτείνεται σε ολόκληρο τον υποσταθμό, αλλά και πέρα από τη γραμμή περιφραξής [40].

Όμως, η πολυπλοκότητα της δομής του εδάφους παρουσιάζει σε πολλές περιπτώσεις δυσχέρειες στην επίτευξη των επιθυμητών τιμών αντίστασης γείωσης. Για τον λόγο αυτόν, έχει αναπτυχθεί μια εναλλακτική λύση, που συνίσταται στη διαμόρφωση του εδάφους γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης με βελτιωτικά υλικά γείωσης χαμηλής ειδικής αντίστασης και στην επίστρωση της επιφάνειας του εδάφους πάνω από το πλέγμα με υλικά επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης [41]. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα βελτιωτικά γείωσης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Μετά την εγκατάσταση, το σύστημα γείωσης υποβάλλεται σε δοκιμές για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά του και η συμμόρφωσή του με τις προδιαγραφές σχεδιασμού. Αυτό περιλαμβάνει μέτρηση της αντίστασης γείωσης με τη χρήση εξειδικευμένων ελεγκτών, καθώς και οπτικές επιθεωρήσεις για την επαλήθευση των σωστών συνδέσεων και εγκατάστασης.

Είναι σίγουρο ότι τα συστήματα γείωσης απαιτούν τακτική συντήρηση και περιοδικές επιθεωρήσεις για να διασφαλιστεί η συνεχής αποτελεσματικότητά τους. Η συντήρηση μπορεί να περιλαμβάνει καθαρισμό της περιοχής γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης, έλεγχο για διάβρωση και διασφάλιση της ακεραιότητας των συνδέσεων και των αγωγών.

Η σωστή γείωση επιτρέπει τον γρήγορο εντοπισμό βλαβών. Πιο συγκεκριμένα, όταν παρουσιάζεται σφάλμα, η αύξηση της έντασης του ρεύματος σφάλματος ενεργοποιεί προστατευτικές συσκευές ή ασφάλειες για να ανοίξουν και να απομονώσουν το ελαττωματικό κύκλωμα. Αυτή η ταχύτατη απόκριση συμβάλλει στον περιορισμό της διάρκειας επικίνδυνων συνθηκών και την καταπόνηση του εξοπλισμού.



Εικόνα 2.6: Κατασκευή πλέγματος γείωσης υποσταθμού υψηλής τάσης [42].

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση συστημάτων γείωσης σε υποσταθμούς θα πρέπει να πραγματοποιείται από εξειδικευμένο προσωπικό σύμφωνα με τους εθνικούς κανονισμούς και τα βιομηχανικά πρότυπα. Η σωστή εγκατάσταση γείωσης είναι απαραίτητη διαδικασία για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των υποσταθμών και διαδραματίζει βασικό ρόλο στην προστασία τόσο του προσωπικού όσο και του ηλεκτρικού εξοπλισμού από πιθανούς κινδύνους.



Εικόνα 2.7: Κατασκευή πλέγματος γείωσης υποσταθμού υψηλής τάσης (συνολική έκταση) [42].

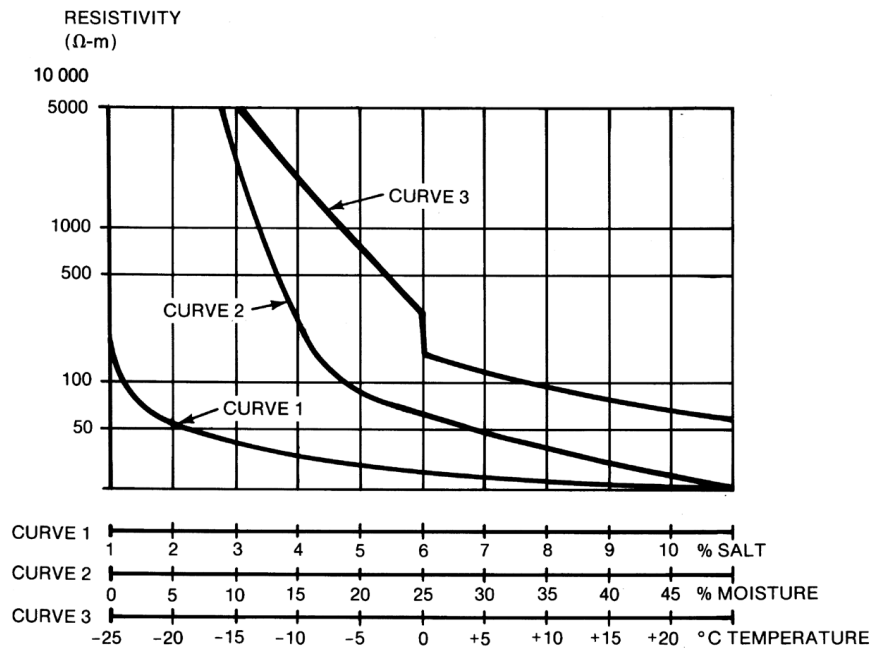
2.5 Ειδική Αντίσταση Εδάφους

Ένας κρίσιμος παράγοντας, ο οποίος επιδρά σημαντικά στην αντίσταση γείωσης, αφορά την ειδική αντίσταση του εδάφους ρ ($\Omega \cdot m$). Η ειδική αντίσταση του εδάφους υπόκειται σε διακυμάνσεις, που προκύπτουν από τον τύπο του εδαφικού υποστρώματος, όπως το βραχώδες, το αργιλώδες, το αμμώδες ή άλλες κατηγορίες. Η εν λόγω αντίσταση προσφέρει επίσης, στοιχεία για το μέγεθος των κόκκων, που αποτελούν το υλικό του εδάφους, ενώ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος συμβάλλει στη διαμόρφωσή της. Παραδείγματος χάρη, αν και είναι εξαιρετικά ασυνήθιστο να εντοπιστεί ομοιογενές υπόστρωμα, που θα εμφάνιζε τα ίδια χαρακτηριστικά ειδικής αντίστασης, η πραγματικότητα αναδεικνύει την παρουσία διάφορων στρωμάτων εδάφους [14].

Η υγρασία αποτελεί επιπρόσθετο παράγοντα, που επηρεάζει την τιμή της ειδικής αντίστασης γείωσης. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της υγρασίας, μειώνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρά την επιφανειακή ξηρασία του εδάφους, εντός βάθους τουλάχιστον 0,5m, συνήθως διατηρείται υγρό το έδαφος σε όλη τη διάρκεια του χρόνου.

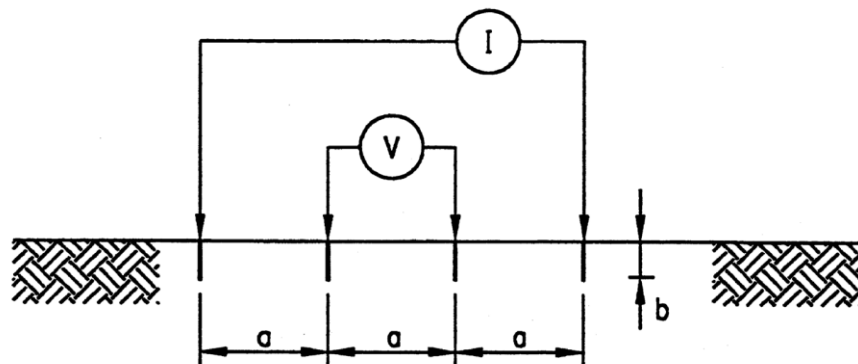
Επιπλέον, η ποσότητα των αλάτων, που περιέχει το έδαφος, σε συνδυασμό με την περιεκτικότητα του σε υγρασία, επιδρά πολύ στη διαμόρφωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Μια μικρή ποσότητα αλάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αυτό δείχνει και τον λόγο πίσω από τις διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης, που παρουσιάζει ο τύπος του εδάφους σε άλλες περιοχές [29].

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους επιφέρει εξίσου σημαντικές διακυμάνσεις στην τιμή της, καθώς, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας, η τιμή της ειδικής αντίστασης μειώνεται. Αυτό φαίνεται να επικρατεί κατά τους θερινούς μήνες, ενώ αυξημένη τιμή λαμβάνει κατά τους χειμερινούς μήνες [29].



Εικόνα 2.8: Επίδραση υγρασίας, θερμοκρασίας & άλατος στην ειδική αντίσταση εδάφους [29].

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί μία μέθοδος υπολογισμού της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που είναι η μέθοδος Wenner. Ειδικότερα, γίνεται χρήση τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων σε ευθεία γραμμή, με σταθερή απόσταση μεταξύ τους a και σε βάθος b μέσα στο έδαφος. Η διάταξη των ηλεκτροδίων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.9: Απεικόνιση της μεθόδου κατά Wenner [29].

Αφήνεται το πάνω μέρος των ηλεκτροδίων πάνω από το έδαφος προκειμένου να συνδεθεί το μετρητικό όργανο, δηλαδή το γειωσόμετρο. Όσον αφορά τις συνδεσμολογίες, στα δύο ακριανά

ηλεκτρόδια πραγματοποιείται η μέτρηση του ρεύματος και στα άλλα δύο η μέτρηση της τάσης. Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, το μετρητικό όργανο δείχνει τη φαινόμενη αντίσταση του εδάφους (R) απευθείας και στη συνέχεια με βάση την σχέση που ακολουθεί υπολογίζεται η ειδική αντίσταση γείωσης.

$$\rho = \frac{4\pi\alpha R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως όσο αυξάνεται η τιμή του a , το ρεύμα που εισρέει στο έδαφος διεισδύει σε μεγαλύτερο βάθος [29]. Προφανώς υπάρχουν και άλλες μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους, αλλά δε κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά τους στην παρούσα διπλωματική εργασία.

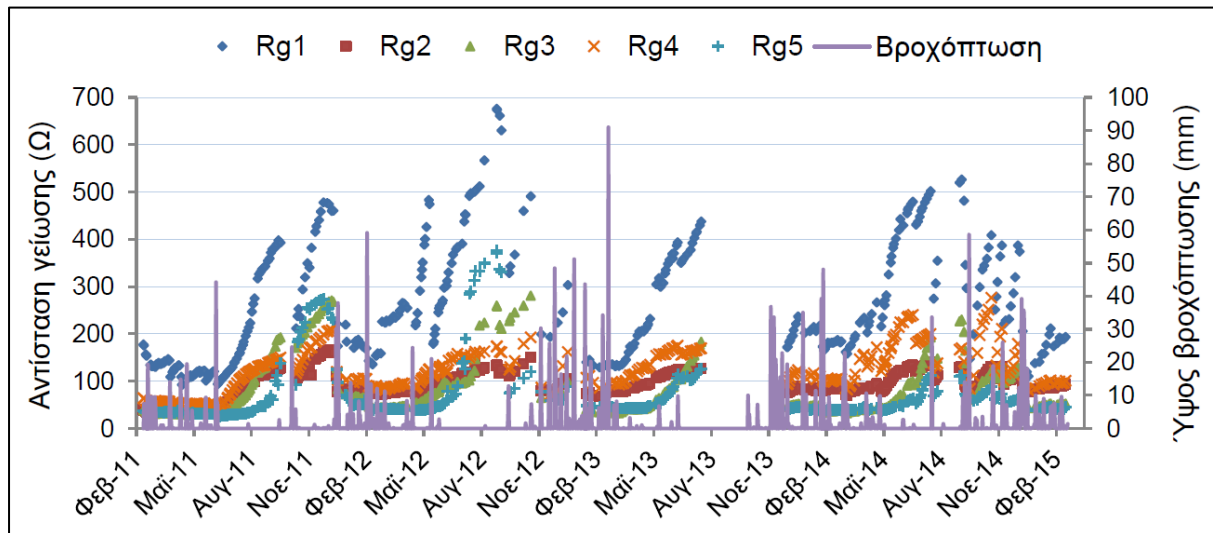
2.6 Αντίσταση Γείωσης

Σε μια μελέτη γείωσης η αντίσταση γείωσης ορίζεται ως η αντίσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης υπό εξέταση και την άπειρη γη, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, πως η αντίσταση γείωσης ενός γειωτή δεν χαρακτηρίζει την αντίσταση του μεταλλικού αγωγού. Στην πραγματικότητα, αυτή είναι μια ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και εκφράζει την αντίσταση που συναντάει το ρεύμα από τον γειωτή προς το έδαφος που τον περιβάλλει. Εναλλακτικά, η αντίσταση γείωσης μπορεί να οριστεί και ως ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου που είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο και της απομακρυσμένης (άπειρης) γης προς την ένταση του ρεύματος διαρροής [30]. Σημειώνεται πως όσον αφορά την άπειρη γη, αυτή λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς δυναμικού, δηλαδή έχει δυναμικό μηδέν, και βρίσκεται σε φαινομενικά άπειρη απόσταση. Συνήθως, με αμελητέο σφάλμα μπορεί να θεωρηθεί σαν «άπειρη» απόσταση 5-10 φορές τη μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή που χρησιμοποιείται. Συνολικά, η αντίσταση γείωσης αποτελείται από την αντίσταση του μεταλλικού αγωγού, την αντίσταση επαφής της επιφάνειας ηλεκτροδίου με το έδαφος και της αντίστασης που εμφανίζει ο όγκος του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο [30].

Παράλληλα, ο ορθός υπολογισμός της αντίστασης γείωσης σε ένα σύστημα γείωσης είναι πολύ σημαντικός, καθώς αποτελεί ένα από τα αρχικά στάδια της μελέτης. Με τα χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφοροι θεωρητικοί τύποι, οι οποίοι προσεγγιστικά υπολογίζουν την αντίσταση γείωσης με βάση διάφορες παραμέτρους. Όμως, συχνά οι τιμές που υπολογίζονται θεωρητικά διαφέρουν από την πραγματική τιμή που βρίσκεται με τις μετρητικές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει για διάφορους λόγους, ένας από αυτούς είναι η ανεπάρκεια που μπορεί να χαρακτηρίζει την αναλυτική μέθοδο ή πιθανά σφάλματα που εμφανίζονται στις μετρούμενες τιμές. Παραδείγματος χάρη, τέτοια σφάλματα εμφανίζονται όταν γίνεται χρήση τσιμπίδας γείωσης (clamp-on method) ή όταν υπάρχουν ξένα αγωγιμα σώματα στο έδαφος, τα οποία επηρεάζουν το ρεύμα μέτρησης. Ακόμα, η αντίσταση γείωσης επηρεάζεται και από την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους στο χώρο που μελετάται, η οποία την περίοδο μέτρησης πιθανώς διαφέρει από τη θεωρητική τιμή που λήφθηκε για τους υπολογισμούς [14].

Είναι γνωστό πως η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους, αλλά και από την έκταση και τη διαμόρφωση του ηλεκτροδίου γείωσης. Όπως παρουσιάστηκε

στην προηγούμενη ενότητα, η ειδική αντίσταση εδάφους μπορεί να παρουσιάζει μεγάλο εύρος τιμών δεδομένου διαφόρων παραμέτρων του εδάφους. Αυτές περιλαμβάνουν τη μορφολογία και την ομοιογένεια του εδάφους, το ποσοστό υγρασίας, τη θερμοκρασία και την πυκνότητα του εδάφους. Μεταβολές που μπορεί να παρουσιάζουν αυτοί οι παράγοντες, επηρεάζουν την τιμή ειδικής αντίστασης εδάφους και, συνεπώς, την τιμή αντίστασης γείωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η έντονη διασπορά που εμφανίζουν οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης ανάλογα με την εποχή κατά τη διάρκεια του χρόνου [30].



Εικόνα 2.10: Εποχική μεταβολή της αντίστασης γείωσης σε περίοδο 4 ετών [30].

Η διαδικασία μέτρησης της αντίστασης γείωσης περιλαμβάνει τη χρήση γειωσομέτρου και βοηθητικών ηλεκτροδίων, ο αριθμός των οποίων κυμαίνεται ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο μέτρησης. Ειδικότερα, ο πρώτος ακροδέκτης του γειωσομέτρου συνδέεται στο ηλεκτρόδιο γείωσης και ο δεύτερος ακροδέκτης συνδέεται στο ηλεκτρόδιο ρεύματος και στο κύκλωμα αυτών των δύο, που κλείνει μέσω του εδάφους, εγχύεται εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής εντάσεως και συχνότητας. Προφανώς το ρεύμα αυτό πρέπει να διατηρείται επαρκώς μικρό, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία επικίνδυνων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Στη συνέχεια, στην ίδια ευθεία, ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο συνδέεται στον ακροδέκτη δυναμικού, στον οποίο γίνεται μέτρηση της τάσης που έχει εμφανιστεί στο έδαφος μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης και ρεύματος [30].

Όσον αφορά τις μεθόδους μέτρησης που χρησιμοποιούνται διακρίνονται τρεις, ανάλογα με τον αριθμό και τη διάταξη των χρησιμοποιούμενων βοηθητικών ηλεκτροδίων. Η πρώτη είναι η μέθοδος των δύο σημείων, όπου η αντίσταση γείωσης μετριέται σε σειρά με ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο, του οποίου η αντίσταση θεωρείται αμελητέα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλα σφάλματα, ειδικά για αντιστάσεις γείωσης μικρών τιμών, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί για την παροχή μιας προσεγγιστικής τιμής. Δεύτερη είναι η μέθοδος των τριών σημείων, η οποία χρησιμοποιεί δύο βοηθητικά ηλεκτρόδια. Τα δύο αυτά ηλεκτρόδια παρουσιάζουν αντίσταση r_2 και r_3 αντίστοιχα, ενώ το ηλεκτρόδιο προς μελέτη θεωρείται πως έχει αντίσταση r_1 . Στη συνέχεια μετρώνται οι αντιστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, $r_{12} = r_1 + r_2$, $r_{13} = r_1 + r_3$, και $r_{23} = r_2 + r_3$. Η αντίσταση r_1 βρίσκεται επιλύοντας το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει [30]:

$$r_1 = \frac{r_{12} - r_{23} + r_{13}}{2} \quad (2.2)$$

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει σημαντική δυσκολία, τόσο στην εφαρμογή της, όσο και στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, στην περίπτωση που το σύστημα γείωσης, που μελετάται, έχει μεγάλες διαστάσεις και περίπλοκη γεωμετρία. Τέλος, η πιο συνηθισμένη μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η μέθοδος της πτώσης δυναμικού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δύο βοηθητικά ηλεκτρόδια, ένα ρεύματος και ένα δυναμικού. Συγκεκριμένα, ρεύμα εγχύεται στο έδαφος μέσω του ηλεκτροδίου γείωσης και του ηλεκτροδίου ρεύματος, το οποίο μετράται. Ακόμα, μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης και δυναμικού. Συνεπώς, η τιμή της αντίστασης γείωσης δίνεται από το λόγο του μετρούμενου δυναμικού προς το εγχέομενο ρεύμα. Σημειώνεται πως το ηλεκτρόδιο ρεύματος τοποθετείται τυπικά σε απόσταση τουλάχιστον πέντε φορές τη μεγαλύτερη διάσταση του μετρούμενου συστήματος. Επίσης, το ηλεκτρόδιο δυναμικού τοποθετείται σύμφωνα με τον κανόνα του 62%, δηλαδή σε απόσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης ίση με το 62% της απόστασης ηλεκτροδίων γείωσης και ρεύματος. Γενικά, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει καλή ακρίβεια και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση, είτε όπως περιγράφηκε παραπάνω, είτε με μικρές παραλλαγές στην τοποθέτηση των ηλεκτροδίων [30].

2.7 Βασικοί Τύποι & Μορφές Γειωτών

Τα ηλεκτρόδια γείωσης αποτελούν κρίσιμο στοιχείο της εγκατάστασης ηλεκτρικής ασφάλειας και αποτροπής ατυχημάτων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων γείωσης, για τα οποία η τιμή της αντίστασης εξαρτάται και από την ειδική αντίσταση του εδάφους, αλλά και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Κάθε γειωτής σχεδιάστηκε με σκοπό να ανταπεξέλθει σε συγκεκριμένες απαιτήσεις γείωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές παραμέτρους του περιβάλλοντος της εγκατάστασης.

Ένας από τους συνηθέστερους και πιο απλούς τύπους ηλεκτροδίων γείωσης είναι τα κατακόρυφα ηλεκτρόδια, γνωστά και ως καρφιά γείωσης ή ραβδοειδείς γειωτές. Αυτά τα ηλεκτρόδια εισάγονται κάθετα στο έδαφος παρέχοντας μια αποτελεσματική διαδρομή για την παροχέτευση των υπερεντάσεων. Μπορούμε να τα συναντήσουμε σε διάφορα μήκη, συνήθως κυμαίνονται από 1–3 μέτρα. Έχουν σχεδιαστεί έχοντας τη μορφή ακίδας στο κάτω μέρος τους, με σκοπό τη διευκόλυνση της τοποθέτησής τους με τη χρήση σφυριού στο έδαφος.

Γενικά, η αντίστασή τους εκδηλώνει φθίνουσα τιμή με την αύξηση του μήκους του. Εν προκειμένω, η διατομή του ραβδοειδούς γειωτή δεν κατέχει σημαντική επιρροή στην αξιολόγηση της απόδοσής του. Είναι συνήθης πρακτική να κατασκευάζονται οι γειωτές αυτοί από επιχάλκωμένο χάλυβα και εναλλακτικά από χάλυβα, που έχει υποστεί επιψευδαργύρωση. Αυτό εξασφαλίζει ότι κατά τη διαδικασία τοποθέτησής τους σε σκληρά εδάφη, ο χάλυβας δε θα έρχεται σε επαφή με το έδαφος, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η γρήγορη διάβρωση του γειωτή [14].

Ακόμη, ο γειωτής ταινίας είναι μία δομή αποτελούμενη από ταινία κατασκευασμένη από χαλκό, γαλβανισμένο χάλυβα ή επιχάλκωμένο χάλυβα, παρουσιάζοντας ποικίλες διαστάσεις. Σε μια τυπική εγκατάσταση, ο γειωτής ταινίας τοποθετείται κάθετα εντός ενός χαντακιού σε βάθος τουλάχιστον 50cm. Ωστόσο, προτείνεται ένα βάθος περίπου 70–100cm όπου επιτυγχάνεται η επαφή με υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί είτε ευθύγραμμα, είτε κυκλικά γύρω από την περίμετρο της εγκατάστασης. Ενδεικτικά, παρατηρείται ότι η

αντίσταση γείωσης μειώνεται αναλογικά προς το μήκος της ταινίας, που βρίσκεται εντός του εδάφους [14].



Εικόνα 2.11: Βασικές γεωμετρίες χάλκινων αγωγών γείωσης [42].

Έπειτα, άλλος ένας τύπος είναι ο γειωτής πλάκας. Συγκεκριμένα αναπαριστά μία δομημένη παραλληλόγραμμη μορφή με ποικίλες διαστάσεις, η οποία ενσωματώνεται στο έδαφος κατακόρυφα, με σκοπό τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας της γείωσης. Η τοποθέτηση της πλάκας γείωσης απαιτεί ελάχιστο βάθος 100cm. Επιπρόσθετα, η αντίσταση γείωσης ελαττώνεται ως προς τις διαστάσεις της πλάκας, ενώ η τοποθέτηση σε μεγαλύτερο βάθος συμβάλλει σε περαιτέρω μείωση. Ειδικότερα, τα υλικά κατασκευής της πλάκας περιλαμβάνουν γαλβανισμένο χάλυβα με ελάχιστο πάχος 3mm ή χαλκό ελαχίστου πάχους 2mm. Σημειώνεται ότι οι γειωτές πλάκας μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες κατακόρυφες ή οριζόντιες θέσεις ενταφιασμού. Τέλος, ενδείκνυται η εφαρμογή περισσότερων από ένα γειωτή πλάκας, συμβάλλοντας έτσι στην ενισχυμένη γείωση και στη συνέχεια σε μείωση της αντίστασης γείωσης [14].



Εικόνα 2.12: Γειωτές πλάκας σε κάθετη συνδεσμολογία [42].

2.8 Βελτιωτικά Υλικά Γειώσεων

Η πολυπλοκότητα, που χαρακτηρίζει τη δομή του εδάφους, αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις μία πρόκληση, καθώς εμποδίζει την επίτευξη των αναγκαίων τιμών για την αντίσταση γείωσης. Ενόψει αυτού, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση γείωσης. Συχνά, δεν είναι εφικτή είτε λόγω οικονομικών παραγόντων, η αύξηση των ηλεκτροδίων γείωσης σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα γείωσης λόγω χώρου, είτε η επέκταση αυτού. Αυτή η προσέγγιση στοχεύει στην τροποποίηση του εδάφους κοντά στα ηλεκτρόδια γείωσης με χρήση ειδικών υλικών, που συνεισφέρουν στη βελτίωση της γείωσης και συνίσταται ιδιαίτερα σε βραχώδεις περιοχές [41]. Υπάρχει εκτενής διεθνής βιβλιογραφία και σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες που διαπραγματεύονται τον τομέα των βελτιωτικών υλικών εδάφους [43], [44], [45].

Πιο συγκεκριμένα, το υλικό, που βελτιώνει την ειδική αντίσταση του εδάφους, τοποθετείται εντός του ορύγματος, όπου θα τοποθετηθεί το ηλεκτρόδιο γείωσης και αναμιγνύεται με το έδαφος που υπάρχει. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση τοπικά, κοντά στο ηλεκτρόδιο γείωσης, της ειδικής αντίστασης εδάφους. Έτσι, επιτυγχάνεται μείωση της αντίστασης γείωσης [41].

Συνήθως, η έκταση του υποσταθμού καλύπτεται από χαλίκι ή επιφανειακά υλικά, βάθους περίπου 8–15cm. Τα υλικά αυτά είναι πολύ χρήσιμα στην επιβράδυνση της εξάτμισης της υγρασίας και επομένως, στον περιορισμό της ξήρανσης των στρωμάτων του εδάφους. Το εύρος τιμών της ειδικής αντίστασης εδάφους για το επιφανειακό στρώμα υλικού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι το είδος της πέτρας, το μέγεθος, η κατάστασή της, η ποσότητα και ο τύπος της περιεκτικότητας σε υγρασία, η ατμοσφαιρική μόλυνση κ.τ.λ. [29]. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να μετρηθεί η ειδική αντίσταση των δειγμάτων των πετρωμάτων, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

2.9 Προδιαγραφές, Πρότυπα & Κανονισμοί για τη Γείωση σε Υποσταθμούς

Είναι γνωστό, ότι οι προδιαγραφές, τα πρότυπα και οι κανονισμοί αποτελούν αναμφισβήτητα πολύ σημαντικό κομμάτι στη μελέτη και στην υλοποίηση των υποσταθμών και ταυτόχρονα του συστήματος γείωσής τους. Είναι στην ουσία κατευθυντήριες γραμμές, που καθορίζουν τα πρότυπα ασφαλείας, λειτουργικότητας και σχεδιασμού για την εφαρμογή των συστημάτων γείωσης σε υποσταθμούς. Αυτά τα πρότυπα και οι προδιαγραφές λειτουργούν ως κοινός παράγοντας, εναρμονίζοντας τις πρακτικές και διασφαλίζοντας, ότι οι εγκαταστάσεις γείωσης ακολουθούν πιστά τα πρότυπα ασφαλείας.

Σε εθνικό επίπεδο, διάφορες χώρες αναπτύσσουν τα δικά τους εθνικά πρότυπα και κανονισμούς για τη γείωση των υποσταθμών. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, το IEEE εκδίδει το πρότυπο IEEE Std 80-2013 [29] για τη γείωση σε υψηλή τάση. Επίσης, οι εθνικές ρυθμιστικές αρχές και οι αρμόδιες αρχές ενέργειας εκδίδουν κανονισμούς και οδηγίες, που αφορούν τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων γείωσης σε υποσταθμούς. Ειδικότερα, το πρότυπο IEEE Std 142-2007 [46], που εφαρμόζεται στη γείωση βιομηχανικών

εγκαταστάσεων και το IEEE Std 837-2014 [47], που χρησιμοποιείται στη γείωση υποσταθμών, προσφέρουν λεπτομερείς οδηγίες για τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση και τη δοκιμή των συστημάτων γείωσης. Επίσης, εξίσου σημαντικό είναι και το πρότυπο IEEE Std 81-2012 [48], το οποίο βασικά είναι ένας οδηγός για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους, της σύνθετης αντίστασης γείωσης και των δυναμικών της επιφάνειας της γης.

Επιπλέον, σε διεθνές επίπεδο, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission ~ IEC) εκδίδει διεθνή πρότυπα που καλύπτουν το φάσμα των ηλεκτροτεχνικών θεμάτων, όπου συμπεριλαμβάνονται και οι γειώσεις. Το πρότυπο IEC 60364 [49] παρέχει συγκεκριμένα βήματα για τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση και τη συντήρηση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, όπου σε αυτά εντάσσονται και τα συστήματα γείωσης. Αυτό το πρότυπο αποτελεί ένα ουσιαστικό πλαίσιο για τον τρόπο σχεδιασμού και υλοποίησης των γειώσεων των κρίσιμων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Στην Ελλάδα, ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) εκδίδει εθνικά πρότυπα που προσαρμόζονται στις ανάγκες της χώρας και συγκεκριμένα για συστήματα γείωσης σε υποσταθμούς ρυθμίζεται από την Τεχνική Οδηγία ΕΛΟΤ 60364 [39] που βασίζεται στο διεθνές πρότυπο IEC 60364 [49]. Αυτή η οδηγία αφορά τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση και τη συντήρηση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, συμπεριλαμβανομένων και των συστημάτων γείωσης, σε συμφωνία με τις αρχές της ασφάλειας και της επάρκειας. Τέλος, δύο ακόμα πολύ σημαντικά πρότυπα είναι το ΕΛΟΤ HD 637 S1 [50], που αναφέρεται στις απαιτήσεις ηλεκτρικών εγκαταστάσεων άνω των 1000V AC και το πολύ βασικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 50522 [51], όπου υπάρχουν οι απαιτήσεις γειώσεων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων ισχύος, που υπερβαίνουν το 1kV εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.10 Συντήρηση, Έλεγχος & Αναβάθμιση των Συστημάτων Γείωσης Υποσταθμών

Η συντήρηση, ο έλεγχος και η αναβάθμιση των συστημάτων γείωσης στους υποσταθμούς είναι κρίσιμες πτυχές για τη διασφάλιση της συνεχούς ασφάλειας, αξιοπιστίας και απόδοσης της ηλεκτρικής υποδομής. Αυτές οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν τακτικές επιθεωρήσεις, δοκιμές και απαραίτητες βελτιώσεις στο σύστημα γείωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομερώς αυτές οι πτυχές.

Η τακτική συντήρηση του συστήματος γείωσης είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας, προκειμένου να αποφευχθεί η υποβάθμιση, η διάβρωση ή βλάβη, που θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο την αποτελεσματικότητα της υποδομής του συστήματος. Η συντήρηση περιλαμβάνει περιοδικό έλεγχο της αντίστασης γείωσης, επιθεώρηση των ηλεκτροδίων γείωσης και αντικατάσταση τυχόν κατεστραμμένων εξαρτημάτων [52]. Οποιοσδήποτε αλλαγές στον εξοπλισμό ή τη διάταξη του υποσταθμού θα πρέπει να αξιολογούνται για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα γείωσης εξακολουθεί να είναι αποτελεσματικό. Πιο συγκεκριμένα, χρειάζεται να πραγματοποιούνται περιοδικές οπτικές επιθεωρήσεις των ηλεκτροδίων γείωσης, των αγωγών και των σημείων συγκόλλησης για τον εντοπισμό σημείων διάβρωσης ή φθοράς. Οι επιθεωρήσεις αυτές μπορούν να πραγματοποιούνται ετησίως σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τους κανονισμούς. Προκειμένου να γίνει αποτελεσματική πρόληψη της διάβρωσης χρειάζεται να συμπεριληφθούν

προστατευτικές επιστρώσεις (ή ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά) στα ηλεκτρόδια γείωσης και στους αγωγούς γενικότερα, έτσι ώστε να αποφευχθεί η φθορά λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών. Επίσης, πολύ σημαντικό ζήτημα είναι να διασφαλιστεί ότι η βλάβηση ή οι κατασκευές δεν εμποδίζουν ή παραβιάζουν το σύστημα γείωσης. Απαραίτητη προϋπόθεση, για το παραμικρό που γίνεται στη διαδικασία της συντήρησης, είναι να καταγράφεται και να τηρείται ένα λεπτομερές αρχείο για τις δραστηριότητες συντήρησης, τις επιθεωρήσεις και τυχόν επισκευές που πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα γείωσης. Η τεκμηρίωση βοηθά στην παρακολούθηση του ιστορικού του συστήματος και της συνέπειας με τους κανονισμούς [53].

Είναι γεγονός ότι, οι κατάλληλοι μηχανισμοί ελέγχου διασφαλίζουν τη συνεπή και αξιόπιστη απόδοση των συστημάτων γείωσης. Πιο συγκεκριμένα, χρειάζεται να γίνονται τακτικά μετρήσεις της αντίστασης γείωσης χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό, με σκοπό να διασφαλίζεται ότι παραμένει εντός των αποδεκτών ορίων. Οι αποκλίσεις από την επιθυμητή τιμή αντίστασης θα μπορούσαν να υποδηλώνουν επιδείνωση των συνθηκών και μη παροχή ασφάλειας. Επίσης, απαιτείται να υπάρχει στοιχειώδης προστασία έναντι των υπερτάσεων με την εγκατάσταση κατάλληλων διατάξεων για την προστασία του συστήματος γείωσης από παροδικές υπερτάσεις που προκαλούνται από κεραυνούς ή άλλες ηλεκτρικές διαταραχές. Στη συνέχεια, απαραίτητη είναι η ύπαρξη συστημάτων παρακολούθησης, δηλαδή αισθητήρων απομακρυσμένης παρακολούθησης προκειμένου να παρέχουν μια συνεχή ροή της κατάστασης του συστήματος γείωσης, της ειδικής αντίστασης του εδάφους και άλλων σχετικών παραμέτρων. Η παρακολούθηση επιτρέπει την επίγνωση πιθανών ζητημάτων σε πραγματικό χρόνο και είναι σημαντική για τον έλεγχο και την επιτήρηση του συστήματος γείωσης.

Με την πάροδο του χρόνου, η αναβάθμιση του συστήματος γείωσης μπορεί να είναι απαραίτητη για την κάλυψη των μεταβαλλόμενων απαιτήσεων, τη βελτίωση της ασφάλειας ή της απόδοσης. Ειδικότερα, εάν ο υποσταθμός υφίσταται επέκταση ή αναβάθμιση, το σύστημα γείωσης είναι πιθανό να χρειαστεί να επεκταθεί ή να τροποποιηθεί για να καλύψει τις νέες ανάγκες. Ακόμη, προτείνεται να πραγματοποιείται αντικατάσταση ή αναβάθμιση των ηλεκτροδίων γείωσης με νεότερα υλικά ή σχέδια, που προσφέρουν βελτιωμένη αγωγιμότητα και αντοχή στη διάβρωση και στις περιβαλλοντικές συνθήκες γενικότερα. Με στόχο να επιτυγχάνεται βελτιωμένη συνδεσιμότητα, προτείνεται να προστεθούν αγωγοί γείωσης ή να αυξηθεί η πυκνότητα του πλέγματος για μείωση της αντίστασης γείωσης και βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Πράγματι, η τεχνολογία εξελίσσεται με ταχύτατους ρυθμούς και η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών συμβάλλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του συστήματος γείωσης. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αναβάθμιση του συστήματος γείωσης, ώστε να πληροί τυχόν ενημερωμένους κανονισμούς ή πρότυπα για να διασφαλιστούν οι απαιτήσεις ασφάλειας.

Συμπερασματικά, η συντήρηση, ο έλεγχος και η αναβάθμιση των συστημάτων γείωσης στους υποσταθμούς είναι απαραίτητα βήματα για τη διασφάλιση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της απόδοσης. Η τακτική συντήρηση, τα αποτελεσματικά μέτρα ελέγχου και οι προληπτικές αναβαθμίσεις συμβάλλουν στη μακροζωία και την αποδοτικότητα της υποδομής γείωσης, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους και διατηρώντας την ακεραιότητα του ηλεκτρικού συστήματος.

2.11 Προκλήσεις & Μελλοντικές Τάσεις στα Συστήματα Γείωσης Υποσταθμών

Τα συστήματα γείωσης αποτελούν βασική πτυχή των ηλεκτρικών υποσταθμών, διασφαλίζοντας την ασφάλεια, την προστασία του εξοπλισμού και την αξιοπιστία του συστήματος. Καθώς οι υποσταθμοί γίνονται πιο ενσωματωμένοι στα εξελισσόμενα ενεργειακά τοπία και τις τεχνολογικές εξελίξεις, είναι επιτακτική ανάγκη να εξεταστούν οι προκλήσεις, που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα συστήματα γείωσης και οι πιθανές μελλοντικές τάσεις που θα διαμορφώσουν την ανάπτυξή τους.

Αρχικά, η αποτελεσματικότητα των συστημάτων γείωσης επηρεάζεται βαθιά από την ειδική αντίσταση του εδάφους της τοποθεσίας του υποσταθμού. Η μεταβλητότητα στις ιδιότητες του εδάφους σε όλη την έκταση μπορεί να οδηγήσει σε μη ομοιόμορφη κατανομή των ρευμάτων σφάλματος, καθιστώντας την επίτευξη των επιθυμητών επιπέδων αντίστασης γείωσης περίπλοκη και αβέβαιη. Τα ηλεκτρόδια γείωσης και οι αγωγοί, συστατικά κρίσιμα των συστημάτων γείωσης, είναι ευαίσθητα στις διαβρωτικές επιδράσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Καθώς αυτά τα υλικά καταπονούνται με την πάροδο του χρόνου, η αγωγιμότητα του συστήματος γείωσης μειώνεται, απαιτώντας συχνές και επιμελείς παρεμβάσεις συντήρησης [54]. Είναι αλήθεια ότι η επέκταση των υποσταθμών για την κάλυψη της αυξημένης ζήτησης ενέργειας και η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θέτει περίπλοκες προκλήσεις για τη διατήρηση της ακεραιότητας του υπάρχοντος συστήματος γείωσης, ενώ διευκολύνει την αποτελεσματική σύνδεση με νέα εξαρτήματα.

Με την ολοένα και αυξανόμενη εξέλιξη της τεχνολογίας φαίνεται ότι στις μελλοντικές τάσεις των συστημάτων γείωσης θα εισέλθει η ενσωμάτωση της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο μέσω αισθητήρων, ανάλυσης δεδομένων και απομακρυσμένων συστημάτων. Αυτό το εγχείρημα θα φέρει επανάσταση στις πρακτικές συντήρησης των συστημάτων γείωσης. Η «έξυπνη» συντήρηση και ο έγκαιρος εντοπισμός σφαλμάτων θα ενισχύσουν την αξιοπιστία του συστήματος. Το εξελισσόμενο κλιματικό τοπίο υπογραμμίζει την ανάγκη για συστήματα γείωσης που παραμένουν ισχυρά ακόμη και ενόψει ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι πλημμύρες και οι σεισμοί, διασφαλίζοντας τη συνεχή λειτουργία του υποσταθμού κατά τη διάρκεια και μετά της κρίσης. Επίσης, οι καινοτομίες στους μηχανισμούς αντικεραυνικής προστασίας, που περιλαμβάνουν προηγμένες διαμορφώσεις γείωσης και συσκευές προστασίας από υπερτάσεις, θα μετριάσουν τις δυσμενείς επιπτώσεις των υπερτάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς.

Ακόμη, οι αναδυόμενες τεχνικές για την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (όπως για παράδειγμα η προετοιμασία του εδάφους ή η ενσωμάτωση αγωγίμου υλικού) δείχνουν πολλά υποσχόμενες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων, που τίθενται από τις ασταθείς ιδιότητες του εδάφους. Καθώς τα συστήματα επικοινωνίας των υποσταθμών γίνονται όλο και πιο περίπλοκα, χρειάζεται να αναπτυχθούν νέες στρατηγικές γείωσης ικανές να μετριάσουν τα φαινόμενα υψηλής συχνότητας και τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές για να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη απόδοση του συστήματος γείωσης [54]. Συγχρόνως, τα προηγμένα εργαλεία προσομοίωσης θα δώσουν τη δυνατότητα στους μηχανικούς να δημιουργήσουν βελτιστοποιημένα συστήματα γείωσης προσομοιώνοντας τις ιδιότητες του εδάφους, τα ρεύματα σφάλματος και τις παραμέτρους του συστήματος, οδηγώντας σε βελτιωμένη αξιοπιστία του συστήματος.

Αναντίρρητα, η συνεχιζόμενη έρευνα σε νέα υλικά και σχέδια για ηλεκτρόδια γείωσης είναι έτοιμη να εισάγει νέα σημεία αναφοράς για την αγωγιμότητα, την αντοχή στη διάβρωση και συνεπώς τη μακροζωία. Σε όλες αυτές τις αλλαγές θα χρειαστεί να προσαρμοστούν τα πρότυπα και οι κανονισμοί γείωσης, με σκοπό τη βελτίωση, την ασφάλεια και τον ποιοτικό σχεδιασμό με πιο φιλική στο περιβάλλον χροιά.

Τέλος, το δυναμικό τοπίο των συστημάτων γείωσης υποσταθμών χαρακτηρίζεται από πολύπλευρες προκλήσεις και πολλά υποσχόμενες μελλοντικές τάσεις. Αφότου πλοηγούμαστε στην περίπλοκη ισορροπία μεταξύ της τεχνολογικής προόδου, της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και ηλεκτρικής ασφάλειας, η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και η υιοθέτηση των αναδυόμενων τάσεων θα καθορίσει την τροχιά των συστημάτων γείωσης στο μέλλον.

Κεφάλαιο 3

Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση

3.1 Εισαγωγή

Η μη γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση είναι μια στατιστική μέθοδος ανάλυσης δεδομένων. Χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τη σχέση μεταξύ μίας εξαρτημένης μεταβλητής και δύο ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών, λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική φύση της σχέσης αυτής. Στην ουσία είναι μια μαθηματική διαδικασία, που εξισώνει τη συνάρτηση της εξαρτημένης μεταβλητής, όταν μία ή περισσότερες από τις ανεξάρτητες μεταβλητές αλλάζουν, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές. Κύριος στόχος είναι η προσπάθεια εύρεσης ενός μαθηματικού μοντέλου, που περιγράφει τη συσχέτιση ανάμεσα στις ανεξάρτητες μεταβλητές, δηλαδή η εύρεση μιας συνάρτησης παλινδρόμησης. Κατά την ανάλυση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίνεται στον χαρακτηρισμό της εξαρτώμενης μεταβλητής, με βάση το μοντέλο παλινδρόμησης, καθώς αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί από μια κατανομή πιθανότητας [55].

Σε αντίθεση με την κλασική γραμμική παλινδρόμηση, όπου θεωρείται γραμμική σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές, η μη γραμμική επιτρέπει την προσαρμογή πιο πολύπλοκων μοντέλων, που μπορούν να αναπαραστήσουν μη γραμμικές και πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, όταν οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών είναι περίπλοκες και δεν μπορούν να περιγραφούν από απλές γραμμικές συναρτήσεις [55].

Για την εκτέλεση της μη γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης χρησιμοποιούνται ποικίλες μη γραμμικές συναρτήσεις (όπως πολυωνυμικές συναρτήσεις, λογαριθμικές συναρτήσεις κ.τ.λ.), προκειμένου να αποδοθεί με ακρίβεια η σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Ο στόχος είναι να προσεγγιστεί η πραγματική συσχέτιση των μεταβλητών, ανεξάρτητα από το αν αυτή είναι γραμμική ή μη. Συχνά, η ανάλυση παλινδρόμησης εξαρτάται, τουλάχιστον εν μέρει, από παραδοχές που συνάδουν με τη διεργασία, επειδή η πραγματική μορφή της διαδικασίας, που παράγει τα δεδομένα τις περισσότερες φορές, παραμένει άγνωστη. Φυσικά, η βάση αυτών των υποθέσεων θεωρείται εύλογη εφόσον υπάρχει αρκετό υλικό δεδομένων. Δεν είναι αυτονόητο ότι οι υποθέσεις δεν είναι πιθανό να παραβιαστούν, παρόλα αυτά τα παλινδρομικά μοντέλα προβλέψεων παραμένουν χρήσιμα, αν και ενδέχεται να μην λειτουργούν με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Σε μερικές περιπτώσεις, η ανάλυση παλινδρόμησης μπορεί να υπονοεί μία σχέση αιτίου-αιτιατού μεταξύ των μεταβλητών. Αυτό, όμως, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα, διότι η απλή σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών δε συνεπάγεται αναγκαία ότι η μία μεταβλητή οδηγεί στην άλλη [55].

Η μη γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση βρίσκει εφαρμογή σε πολλά πεδία, που χρειάζεται να γίνει κάποια πρόβλεψη. Συνήθως, εφαρμόζεται σε πρακτικές, όπως η επιστήμη, η τεχνολογία, η οικονομία και άλλες, όπου οι σχέσεις μεταξύ μεταβλητών ενδέχεται να είναι περίπλοκες και μη γραμμικές. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες προσεγγίσεις για την ανάλυση της παλινδρόμησης, με τη μη γραμμική παλινδρόμηση και τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων να κατέχουν κεντρική θέση. Πρόκειται για μεθόδους που είναι παραμετρικές, καθώς η συνάρτηση παλινδρόμησης καθορίζεται από ένα πεπερασμένο σύνολο αγνώστων παραμέτρων οι οποίες εκτιμώνται μέσω των δεδομένων. Υπάρχουν, ωστόσο, τεχνικές που επιτρέπουν στη συνάρτηση παλινδρόμησης να ανήκει σε ένα προκαθορισμένο σύνολο συναρτήσεων με πιθανώς μη πεπερασμένη διάσταση. Αυτό καθίσταται ως μη παραμετρική ανάλυση παλινδρόμησης. Πρακτικά, η απόδοση των μεθόδων ανάλυσης παλινδρόμησης εξαρτάται από τον τρόπο συλλογής των δεδομένων ή των μετρήσεων, αλλά και από το πώς αυτά συσχετίζονται με την παλινδρομική διαδικασία, που χρησιμοποιείται [55].

3.2 Μη Γραμμικά Μοντέλα & Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων

Η γενική μορφή των γραμμικών μοντέλων πολλαπλής παλινδρόμησης είναι:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \dots + \beta_{p-1} Z_{p-1} + \varepsilon \quad (3.1)$$

όπου το Z_i αναπαριστά οποιεσδήποτε συναρτήσεις των βασικών μεταβλητών πρόβλεψης X_1, X_2, \dots, X_k . Ενώ η εξίσωση μπορεί να αντιπροσωπεύει μια μεγάλη ποικιλία σχέσεων, υπάρχουν πολλές καταστάσεις στις οποίες το μοντέλο με αυτή τη μορφή δεν είναι κατάλληλο. Για παράδειγμα, όταν είναι διαθέσιμες σαφείς πληροφορίες σχετικά με τη μορφή της σχέσης μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητης μεταβλητής. Πληροφορίες σαν κι αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν άμεση γνώση της πραγματικής μορφής του αληθινού μοντέλου ή μπορεί να αντιπροσωπεύονται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, που το μοντέλο πρέπει να ικανοποιεί. Μερικές φορές οι πληροφορίες οδηγούν σε πολλά εναλλακτικά μοντέλα, όπως είναι τα μη γραμμικά μοντέλα [55].

Παρακάτω φαίνονται δύο γενικές εξισώσεις μη γραμμικών εξισώσεων.

$$Y = e^{\theta_1 + \theta_2 t + \varepsilon} \quad (3.2)$$

$$Y = \frac{\theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \left(\frac{1}{e^{\theta_2 t}} - \frac{1}{e^{\theta_1 t}} \right) + \varepsilon \quad (3.3)$$

Σε αυτά τα παραδείγματα οι παράμετροι που πρέπει να εκτιμηθούν συμβολίζονται με θ , αντί για β , όπως χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως. Το t είναι μεταβλητή πρόβλεψης (ανεξάρτητη) και το ε είναι ένας τυχαίος όρος σφάλματος, το οποίο ακολουθεί κανονική κατανομή, με $E(\varepsilon) = 0, V(\varepsilon) = \sigma^2$.

Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για μη γραμμικά μοντέλα είναι μια αναλυτική προσέγγιση, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός μη γραμμικού μοντέλου από παρατηρούμενα δεδομένα. Αυτή η μέθοδος επεκτείνει την παραδοσιακή μέθοδο ελαχίστων

τετραγώνων, που συνήθως εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των παραμέτρων σε γραμμικά μοντέλα, προσαρμόζοντάς τη σε περιπτώσεις μη γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών. Επιτρέπει, δηλαδή, την ανάλυση και την προσαρμογή πολύ πιο πολύπλοκων σχέσεων από εκείνες που μπορούν να αναπαρασταθούν με γραμμικά μοντέλα. Πρακτικά η μέθοδος αυτή επιχειρεί να βρει τις παραμέτρους, που ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων ανάμεσα στις προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου και τις πραγματικές παρατηρήσεις [55].

Σε ένα μη γραμμικό μοντέλο, η σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών εκφράζεται με μη γραμμικό τρόπο και η προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα προϋποθέτει την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων. Οι υπολογισμοί για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι συχνά περίπλοκοι και απαιτούν την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων. Για την επίλυση των εξισώσεων αυτών, συνήθως χρησιμοποιούνται αριθμητικές τεχνικές, όπως η επαναληπτική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία προσεγγίζει τη λύση μέσω επαναληπτικών βημάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιβάλλει τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού, που είναι ικανό να πραγματοποιεί επαναληπτικούς και απαιτητικούς υπολογισμούς [55].

Έστω ότι η γενική εξίσωση ενός μη γραμμικού μοντέλου είναι:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) + \varepsilon \quad (3.4)$$

Όπου, ξ_k οι ανεξάρτητες μεταβλητές και θ_p οι παράμετροι της εξίσωσης.

Στη συνέχεια, μπορούμε να πούμε ότι ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} \xi &= (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)' \\ \theta &= (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)' \end{aligned}$$

Συνεπώς, η παραπάνω εξίσωση εναλλακτικά γράφεται:

$$Y = f(\xi, \theta) + \varepsilon \quad (3.5)$$

ή

$$E(Y) = f(\xi, \theta) \quad (3.6)$$

Με την προϋπόθεση ότι $E(\varepsilon) = 0$.

Στην περίπτωση που έχουμε n μετρήσεις της μορφής:

$$Y_u, \xi_{1u}, \dots, \xi_{ku}$$

για $u = 1, 2, \dots, n$ μπορεί εναλλακτικά το μοντέλο να γραφεί ως:

$$Y_u = f(\xi_{1u}, \xi_{2u}, \dots, \xi_{ku}; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) + \varepsilon_u \quad (3.7)$$

όπου ε_u το σφάλμα με $u = 1, 2, \dots, n$.

Επομένως, ισχύει η μορφή:

$$Y_u = f(\xi_u, \theta) + \varepsilon_u \quad (3.8)$$

όπου $\xi_u = (\xi_{1u}, \xi_{2u}, \dots, \xi_{ku})'$.

Ορίζεται το άθροισμα των τετραγώνων σφάλματος για το μη γραμμικό μοντέλο και τα δεδομένα που δίνονται ως:

$$S(\theta) = \sum_{u=1}^n \{Y_u - f(\xi_u, \theta)\}^2 \quad (3.9)$$

Σημειώνεται ότι επειδή το Y_u και το ξ_u είναι σταθερές παρατηρήσεις, το άθροισμα των τετραγώνων είναι συνάρτηση του θ . Για την ελαχιστοποίηση της εκτιμήτριας ελαχίστων τετραγώνων $S(\theta)$ η τιμή της μεταβλητής θ θα αναπαρίσταται ως $\hat{\theta}$.

Με σκοπό να βρεθεί η εκτίμηση των ελαχίστων τετραγώνων χρειάζεται να διαφοριστεί η εξίσωση (3.9) ως προς το θ . Αυτό παρέχει τις κανονικές εξισώσεις p , οι οποίες πρέπει να λυθούν για $\hat{\theta}$. Οι κανονικές εξισώσεις παίρνουν την παρακάτω μορφή.

$$\sum_{u=1}^n \{Y_u - f(\xi_u, \hat{\theta})\} \left[\frac{\partial f(\xi_u, \theta)}{\partial \theta_i} \right]_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \quad (3.10)$$

Για $i = 1, 2, \dots, p$, όπου η ποσότητα που συμβολίζεται με αγκύλες είναι η παράγωγος του $f(\xi_u, \theta)$ ως προς το θ_i με όλα τα θ να αντικαθίστανται από τα αντίστοιχα $\hat{\theta}$ που έχουν τον ίδιο δείκτη. Υπενθυμίζεται ότι όταν η συνάρτηση $f(\xi_u, \theta)$ ήταν γραμμική αυτή η ποσότητα ήταν συνάρτηση μόνο του ξ_u και δεν περιλάμβανε καθόλου τα $\hat{\theta}$.

Είναι γεγονός ότι εάν το μοντέλο παρουσιάσει αυξημένη πολυπλοκότητα και συμπεριληφθούν περισσότερες παράμετροι, τότε η επίλυση των κανονικών εξισώσεων πιθανότατα να παρουσιάσει σημαντική δυσκολία. Έτσι επιβάλλεται η ανάγκη εξέτασης επαναληπτικών μεθόδων σε κάθε περίπτωση. Ακόμη, πιο δυσμενής είναι η πιθανότητα να υπάρχουν πολλαπλές λύσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε διάφορες στατικές τιμές της συνάρτησης $S(\hat{\theta})$ [55].

3.3 Μέθοδοι Εκτίμησης των Παραμέτρων σε Μη Γραμμικά Συστήματα

Συνήθως, σε ορισμένα μη γραμμικά συστήματα σκοπός είναι να αποτυπωθούν οι κανονικές εξισώσεις (3.10) και στη συνέχεια να εφαρμόζεται μια επαναληπτική προσέγγιση για την επίλυσή τους. Η μορφοποίηση των εξισώσεων και η επαναληπτική προσέγγιση, που θα υιοθετηθεί, θα καθορίσουν την επιτυχία της τεχνικής αυτής. Εκτός από την προσέγγιση αυτή, υπάρχουν ευρέως διαδεδομένες άλλες μέθοδοι για την εκτίμηση των παραμέτρων με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών [55].

Επιγραμματικά οι μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων είναι [55]:

- **Μέθοδος της γραμμικοποίησης:** Είναι μια τεχνική βασισμένη σε σειρές Taylor, η οποία επικεντρώνεται στη χρήση των αποτελεσμάτων των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων σε διαδοχικά στάδια. Βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι έχει αργή σύγκλιση, λόγω των πολλών επαναλήψεων, ή ακόμα ενδέχεται να μην υπάρξει σύγκλιση ή να ταλαντώνεται συνεχώς.
- **Μέθοδος πιο ταχείας καθόδου:** Με βάση την εξίσωση (3.9), η μέθοδος αυτή εστιάζει στη συνάρτηση αθροίσματος των τετραγώνων $S(\theta)$ και χρησιμοποιεί μία επαναληπτική διαδικασία προκειμένου να υπολογιστεί το ελάχιστο της. Επιπλέον μειονέκτημα είναι η αργή σύγκλιση. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή δε χρησιμοποιείται τόσο όσο η μέθοδος της γραμμικοποίησης.
- **Μέθοδος συμβιβασμού του Marquardt:** Αυτή η μέθοδος αντιπροσωπεύει ένα συνδυασμό μεταξύ της γραμμικοποίησης και της πιο απότομης καθόδου, ενσωματώνοντας τα θετικά χαρακτηριστικά και των δύο προσεγγίσεων, ενώ αποφεύγει κυρίως τα αδύναμα σημεία τους. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου Marquardt είναι επιθυμητός, καθώς εγγυάται σύγκλιση τις περισσότερες φορές και προχωρά προς την εύρεση της τιμής $\hat{\theta}$ χωρίς την καθυστέρηση που χαρακτηρίζει την προσέγγιση της πιο απότομης καθόδου.

3.4 Η Σημασία των Αρχικών Τιμών

Όπως είναι γνωστό, κάθε επαναληπτική διαδικασία απαιτεί αρχικές τιμές $\theta_{10}, \theta_{20}, \dots, \theta_{p0}$ για τις παραμέτρους $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$. Σημαντικός στόχος είναι να επιλεγθούν αρχικές τιμές, που είναι όσο το δυνατό πιο αξιόπιστες, προκειμένου να επιτρέψουν στην επαναληπτική διαδικασία να συγκλίνει σε μια λύση με μεγαλύτερη ταχύτητα. Επιπλέον, εάν υπάρχουν πολλά τοπικά ελάχιστα, άστοχες επιλεγμένες αρχικές τιμές έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν σε σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο, πράγμα που είναι ανεπιθύμητο. Αυτό το μη επιθυμητό σημείο μπορεί να περιλαμβάνει τιμές παραμέτρων που είναι αντίθετες με τη φύση της διαδικασίας ή που δεν προσεγγίζουν το ολικό ελάχιστο της $S(\theta)$. Για τη σωστή επιλογή των αρχικών τιμών, είναι χρήσιμο να αξιοποιηθεί μία πρώτη εκτίμηση της $S(\theta)$ σε πολλά σημεία του παραμετρικού χώρου [55].

Πρακτικά, δεν υπάρχει τυπικός μηχανισμός για τη λήψη των αρχικών εκτιμήσεων θ_0 για κάθε πρόβλημα μη γραμμικής εκτίμησης. Μέθοδοι που έχουν λειτουργήσει σε διάφορα προβλήματα είναι οι ακόλουθες [55].

- Εάν υπάρχουν p παράμετροι, γίνεται αντικατάσταση για p σύνολα παρατηρήσεων (Y_u, ξ_u) στο υποτιθέμενο μοντέλο αγνοώντας το σφάλμα. Επιλύονται οι p εξισώσεις που προκύπτουν για τις παραμέτρους, αν είναι δυνατόν. Οι ευρέως διαχωρισμένες ξ_u συχνά λειτουργούν καλύτερα.
- Κατά την προσέγγιση των τιμών των ξ_i προς το μηδέν ή το άπειρο, εξετάζεται ο τρόπος λειτουργίας της συνάρτησης απόκρισης και αντικαθίστανται αυτές οι τιμές στις παρατηρήσεις, που είναι πιο προσεγγιστικές των συνθηκών αυτών στο πλαίσιο του προβλήματος προς επίλυση. Στη συνέχεια, αν είναι δυνατόν, επιλύονται οι

εξισώσεις που απορρέουν από αυτήν την αντικατάσταση. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με την πρώτη μέθοδο, που αναφέρθηκε παραπάνω.

- Πραγματοποιείται έλεγχος της μορφής του μοντέλου για να αποσαφηνιστεί εάν το μοντέλο θα μπορούσε να μετασχηματιστεί κατά προσέγγιση, σε περίπτωση που δεν έχει προστεθεί κάποιο σφάλμα.
- Αν καμία από τις προηγούμενες προσεγγίσεις δεν αποδειχθεί επιτυχής, αξιοποιείται η μέθοδος της γραφικής απεικόνισης των δεδομένων, με σκοπό να υπολογιστούν οι αρχικές τιμές με ακρίβεια.

3.5 Αξιολόγηση της Προσαρμογής

Στη συνέχεια, αφού πραγματοποιηθεί η προσαρμογή των δεδομένων σε ένα ή περισσότερα μοντέλα, είναι αναγκαίο να αξιολογηθεί η ποιότητα της προσαρμογής. Πρώτα αξιολογούμε οπτικά την προσαρμογή στην καμπύλη ή την επιφάνεια. Συνήθως, μια προσαρμογή θεωρείται ικανοποιητική όταν τα δεδομένα μπορούν να προκύψουν λογικά με βάση τις υποθέσεις που έγιναν κατά την προσαρμογή, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ακόμη, εάν οι συντελεστές του μοντέλου, που χρησιμοποιήθηκε, μπορούν να εκτιμηθούν με μικρή αβεβαιότητα, τότε θεωρείται ότι η προσαρμογή είναι καλή. Επίσης, ένα ικανοποιητικό μοντέλο για την υλοποίηση της προσομοίωσης εξηγεί τη μεταβλητότητα των δεδομένων και την προβλεψιμότητα των παρατηρήσεων με μεγάλη ακρίβεια [56].

Μια συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να υπαγορεύσει άλλες πτυχές της προσαρμογής του μοντέλου, που είναι σημαντικές για την επίτευξη καλής εφαρμογής, όπως ένα απλό μοντέλο που είναι εύκολο να ερμηνευτεί. Ειδικότερα, οι αριθμητικές και οι γραφικές μέθοδοι μπορούν να βοηθήσουν να προσδιοριστεί η ικανοποιητική εφαρμογή με όλες αυτές τις έννοιες. Γενικά, οι γραφικές μέθοδοι είναι πιο ωφέλιμες σε σχέση με τις αριθμητικές, επειδή διαθέτουν την ικανότητα να προβάλλεται ολοκληρωτικά το σύνολο των δεδομένων ταυτόχρονα. Έτσι, εύκολα μπορεί να προκύψει ένα ευρύ φάσμα σχέσεων μεταξύ του μοντέλου και των δεδομένων. Οι αριθμητικές μέθοδοι εστιάζονται πιο στενά σε μια συγκεκριμένη πτυχή των δεδομένων και συχνά προσπαθούν να συμπιέσουν αυτές τις πληροφορίες σε ένα μόνο αριθμό. Στην πράξη, σύμφωνα με τα δεδομένα και τις απαιτήσεις της ανάλυσης, ίσως χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν και οι δύο τύποι για προσδιορισμό της καλύτερης προσαρμογής [56].

Είναι πιθανό καμία από τις προσαρμογές να μην μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη για τα δεδομένα, με βάση αυτές τις μεθόδους. Σε αυτήν την περίπτωση, μπορεί να χρειαστεί να επιλεγεί διαφορετικό μοντέλο. Ενδέχεται επίσης, όλα τα μέτρα καλής εφαρμογής να υποδεικνύουν ότι μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι κατάλληλη. Ωστόσο, εάν ο στόχος είναι να εξάγονται προσαρμοσμένοι συντελεστές που έχουν φυσικό νόημα, αλλά το μοντέλο δεν αντικατοπτρίζει τη φυσική των δεδομένων, οι συντελεστές που προκύπτουν είναι πρακτικά άχρηστοι. Η κατανόηση του τι αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα, και πως αυτά μετρήθηκαν είναι εξίσου σημαντική με την αξιολόγηση της καλής προσαρμογής. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές στατιστικές μέθοδοι που αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την αξιολόγηση της προσαρμογής.

3.6 Βασικές Στατιστικές Μέθοδοι

Άθροισμα Τετραγώνων λόγω Σφάλματος

Αυτό το στατιστικό εργαλείο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συνολικού αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών από την προσαρμογή και των πραγματικών μετρήσεων. Συχνά αναφέρεται ως SSE, που αποτελεί τη συντομογραφία του Sum of Squared Errors. Στην περίπτωση που η τιμή του SSE τείνει στο μηδέν, αυτό υποδηλώνει ότι το μοντέλο προσαρμόζεται πολύ καλά στα δεδομένα. Σημαίνει ότι το μοντέλο δεν έχει αυξημένες τιμές τυχαίου σφάλματος και προσεγγίζει τις πραγματικές μετρήσεις. Αυτό καθιστά το μοντέλο χρήσιμο για προβλέψεις και αξιόπιστες εκτιμήσεις. Ως SSE ορίζεται σύμφωνα με την σχέση που ακολουθεί [56].

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.11)$$

Συντελεστής R^2

Το R^2 , γνωστό και ως τετράγωνο των συντελεστών πολλαπλών συσχετίσεων ή αλλιώς συντελεστής προσδιορισμού, είναι ένα στατιστικό εργαλείο που μετρά τον βαθμό επιτυχίας μιας προσαρμογής στην εξήγηση της διακύμανσης των δεδομένων. Είναι το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών από την προσαρμογή και των πραγματικών μετρήσεων. Έχει τη μορφή ενός ποσοστού και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, όπου ένα υψηλό R^2 υποδεικνύει ότι το μοντέλο εξηγεί βασικό μέρος της διακύμανσης, ενώ ένα R^2 κοντά στο 0 σημαίνει ότι το μοντέλο δεν είναι καλό στο να προβλέπει τις μετρήσεις αποτελεσματικά. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των τετραγώνων της παλινδρόμησης SSR (Sum of Squares of Regression) προς το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων (SST – Total Sum of Squares) [56].

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.12)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.13)$$

Όμως, ισχύει: $SSR + SSE = SST$, οπότε:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.14)$$

Βαθμοί Ελευθερίας – Προσαρμοσμένο R^2

Ο προσαρμοσμένος συντελεστής του R^2 , που λαμβάνει υπόψη τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας, ονομάζεται προσαρμοσμένο R^2 ή προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού.

Αυτός ο συντελεστής προσαρμογής λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών, που συμμετέχουν στο μοντέλο και τις διακυμάνσεις των εκτιμητών τους (v). Συγκεκριμένα, οι υπολειπόμενοι βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom) είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων (n) μείον τον αριθμό των εκτιμητών (συντελεστές προσαρμογής, m), δηλαδή $v = n - m$. Ο προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει πόσο ακριβές είναι το μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των παρατηρήσεων και των ανεξάρτητων μεταβλητών. Επιπρόσθετα, ο συντελεστής κινείται μεταξύ 0 και 1 και αξιολογεί το ποσοστό της διακύμανσης της απόκρισης, που εξηγείται από το μοντέλο, σε σχέση με το ποσοστό που διατηρείται ως απόκριση τυχαίας διακύμανσης [56].

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(v)} \quad (3.15)$$

Όταν οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι φραγμένες και ένας ή περισσότεροι εκτιμητές είναι στα όρια τους, οι εκτιμητές αυτοί θεωρούνται σταθεροί. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούν να αλλάξουν περαιτέρω για να προσαρμοστούν καλύτερα στα δεδομένα, καθώς έχουν φτάσει στα όριά τους. Όσον αφορά το προσαρμοσμένο R^2 , είναι ένας αξιόπιστος δείκτης ποιότητας προσαρμογής όταν συγκρίνουμε δύο εμφωλευμένα μοντέλα. Αυτό συμβαίνει όταν ένα μοντέλο περιέχει όλες τις μεταβλητές, που είναι και στο προηγούμενο μοντέλο, συν μερικές επιπλέον. Λαμβάνει υπόψη, επίσης, την αυξημένη πολυπλοκότητα του μοντέλου (λόγω των επιπλέον εκτιμητών) και συγκρίνει πόση διακύμανση εξηγείται από το νέο μοντέλο σε σχέση με το προηγούμενο. Έτσι, αυτό καθιστά ευκολότερη τη σύγκριση της απόδοσης των δύο μοντέλων, όταν εξετάζεται η επίδραση των πρόσθετων μεταβλητών στην προσαρμογή.

Σφάλμα Ρίζας Μέσου Τετραγώνου (Root Mean Squared Error ~ RMSE)

Πρόκειται ουσιαστικά για έναν δείκτη, που βοηθά στην εκτίμηση της τυπικής απόκλισης τυχαίας συνιστώσας των δεδομένων. Υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Mean Square Error ~ MSE). Για να υπολογιστεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί το SSE, που είναι το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων. Έπειτα, διαιρείται το SSE με τον αριθμό των υπολοίπων (v) για να ληφθεί το MSE. Όπως και στην περίπτωση του SSE, ένα MSE που πλησιάζει το 0 υποδηλώνει ότι η προσαρμογή είναι πιο χρήσιμη για προβλέψεις. Συνεπώς, το RMSE είναι μια μέτρηση που βοηθά στην αξιολόγηση της ακρίβειας της προσαρμογής, με χαμηλότερες τιμές να υποδεικνύουν καλύτερη απόδοση του μοντέλου στην πρόβλεψη των δεδομένων [56].

$$MSE = \frac{SSE}{v} \quad (3.16)$$

$$RMSE = s = \sqrt{MSE} \quad (3.17)$$

3.7 Εξαγωγή Μαθηματικών Μοντέλων

Προτείνονται τρία μαθηματικά μοντέλα για την περιγραφή της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης ως προς τον υπολογισμό της αντίστασής τους. Τα μοντέλα, που αναπτύχθηκαν έχουν εξαχθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [57] και αφορούν τον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης γείωσης σε ανεμογεννήτριες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξελίσσονται και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε υποσταθμούς. Εφαρμόζονται για λήψη δεδομένων σε διστρωματικά εδάφη με παραμέτρους εισόδου την ειδική αντίσταση 1^{ου} στρώματος ρ_1 , την ειδική αντίσταση 2^{ου} στρώματος ρ_2 , με το ύψος του 1^{ου} στρώματος να είναι h . Επιπρόσθετα, για το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* προστίθεται μία ακόμα παράμετρος, το εμβαδό E . Οι μαθηματικές αυτές σχέσεις [58] θα χρησιμοποιηθούν και στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά με προσομοιώσεις για διαφορετικά μεγέθη πλεγμάτων γείωσης υποσταθμών. Επομένως, οι τρεις βασικοί τύποι, που θα χρησιμοποιηθούν, είναι:

Απλό Εκθετικό Μοντέλο

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{1}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left[a + b \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{c \cdot h^d + e} \right] \quad (3.18)$$

Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{1}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left[a + b \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{c \cdot h^d + e} + 0.1 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{q \cdot h^d + m} \right] \quad (3.19)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν κοινά μεγέθη που τις απαρτίζουν και περιγράφονται παρακάτω. Όπου:

- R είναι η αντίσταση γείωσης.
- ρ_1, ρ_2 οι ειδικές αντιστάσεις 1^{ου} και 2^{ου} στρώματος του διστρωματικού μοντέλου εδάφους αντίστοιχα.
- h το βάθος του 1^{ου} στρώματος του μοντέλου.
- a, b, c, d, e, q, m σταθερές.

Υπάρχει δυνατότητα να απλοποιηθεί η παραπάνω σχέση (3.18) και θέτοντας με $K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ να γίνει:

$$RR(K, h) = a + b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e} \quad (3.20)$$

Στη συνέχεια, θέτοντας:

$$RR = \left[a + b \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{c \cdot h^d + e} + 0.1 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{q \cdot h^d + m} \right]$$

Η σχέση (3.19) απλοποιείται και προκύπτει:

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{RR}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \quad (3.21)$$

Τα συστήματα που περιγράφονται παραπάνω δεν είναι εφικτό να επιλυθούν μέσω των αναλυτικών μεθόδων. Για αυτόν τον λόγο, πρόκειται να αναζητηθεί αριθμητική λύση χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB με τη βοήθεια της εντολής *cftool*.

Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού

Έπειτα, στους υπολογισμούς εντάσσεται και το εμβαδό γείωσης. Η σχέση, στην οποία θα βασιστεί η παρούσα μελέτη, είναι [57]:

$$R(\rho_1, \rho_2, h, E) = a \left[\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{m-1} \cdot \left[\frac{1}{E} \right]^{n-1} \quad (3.22)$$

Όπου:

- R είναι η αντίσταση γείωσης.
- ρ_1, ρ_2 οι ειδικές αντιστάσεις 1^{ου} και 2^{ου} στρώματος του διστρωματικού μοντέλου εδάφους αντίστοιχα.
- h το βάθος του 1^{ου} στρώματος του μοντέλου.
- E το εμβαδό γείωσης
- a, m, n σταθερές.

Συνεπώς, και δεδομένου ότι η εντολή *cftool* του λογισμικού MATLAB δέχεται έως και τρεις μεταβλητές, οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν, είναι οι παρακάτω:

$$RR = R \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (3.23)$$

$$K_1 = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \quad (3.24)$$

$$K_2 = 1/E \quad (3.25)$$

Κεφάλαιο 4

Δεδομένα από το Λογισμικό *CDEGS*

4.1 Το Λογισμικό *CDEGS*

Στον τομέα της μηχανικής του ηλεκτρισμού και της ασφάλειας, η ακριβής αξιολόγηση και η βελτιστοποίηση των συστημάτων γείωσης είναι πρωταρχικής σημασίας. Τα συστήματα γείωσης διασφαλίζουν την ασφαλή διάχυση των ρευμάτων σφάλματος στη γη στον ελάχιστο δυνατό χρόνο προστατεύοντας τον εξοπλισμό και το προσωπικό. Για να διευκολυνθούν αυτές οι κρίσιμες λειτουργίες, οι μηχανικοί και οι ειδικοί βασίζονται σε εξειδικευμένα εργαλεία λογισμικού υπολογισμών και προσομοιώσεων. Μεταξύ αυτών, το *CGEDS (Current Distribution Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis)* ξεχωρίζει ως ένα ολοκληρωμένο και ισχυρό πακέτο λογισμικού, που έχει γίνει βιομηχανικό πρότυπο για την ανάλυση συστημάτων γείωσης.

Το *CDEGS* περιλαμβάνει πολλαπλές ενότητες, καθεμία προσαρμοσμένη για να αντιμετωπίζει συγκεκριμένες πτυχές της ανάλυσης του συστήματος γείωσης. Κάποιες βασικές λειτουργίες και εφαρμογές σε μορφή προσομοιώσεων είναι [59]:

- Βοηθά στην αξιολόγηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου *Wenner*. Έτσι, οι αναλύσεις βοηθούν στην επιλογή των κατάλληλων διαμορφώσεων ηλεκτροδίων γείωσης.
- Επιτρέπει στους μηχανικούς να σχεδιάσουν και να βελτιστοποιήσουν τις διατάξεις των ηλεκτροδίων γείωσης. Το λογισμικό παρέχει πληροφορίες για την τοποθέτηση ηλεκτροδίων, την επιλογή αγώγιμου υλικού και το σχεδιασμό πλέγματος για την επίτευξη επιθυμητών παραμέτρων απόδοσης, όπως είναι η χαμηλή αντίσταση γείωσης.
- Τα ρεύματα σφάλματος ενέχουν κινδύνους και το *CDEGS* συμβάλλει στη μοντελοποίηση της κατανομής τους εντός του συστήματος γείωσης.
- Προσομοίωση των επιπτώσεων του κεραυνού στα συστήματα γείωσης, επιτρέποντας τον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέτρων αντικεραυνικής προστασίας.
- Αξιολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και των επιπέδων παρεμβολών.
- Για ηλεκτρικούς υποσταθμούς, όπου η ασφάλεια και η αξιοπιστία είναι πρωταρχικής σημασίας, το *CDEGS* συνεισφέρει στον σχεδιασμό και την ανάλυση συστημάτων γείωσης προσαρμοσμένων στις μοναδικές απαιτήσεις αυτών των πολύπλοκων εγκαταστάσεων.

Το *CDEGS* αντιπροσωπεύει μια αξιοσημείωτη πρόοδο στον τομέα της ανάλυσης συστημάτων γείωσης. Η ευελιξία, η ακρίβεια και η ολοκληρωμένη σειρά εργαλείων του, το καθιστούν

απαραίτητο πόρο για μηχανικούς, συμβούλους και οργανισμούς, που επιδιώκουν να εξασφαλίσουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία των συστημάτων γείωσης.

4.2 Εισαγωγή Δεδομένων

Στην παρούσα μελέτη είναι διαθέσιμο ένα πλήθος πολύτιμων δεδομένων, που αφορούν στην ανάλυση της αντίστασης του εδάφους. Συγκεκριμένα, διατίθεται ένα σύνολο από εννέα σύνολα αποτελεσμάτων προσομοιώσεων, τα οποία αναφέρονται σε τρία διαφορετικά μεγέθη πλευρών ενός ορθογώνιου πλέγματος και τρεις διαφορετικές διαστάσεις «ματιού» του πλέγματος. Κάθε σύνολο μετρήσεων αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη συνδυασμένη διάσταση πλευρών πλέγματος και διάσταση «ματιού». Τα αποτελέσματα προέκυψαν με τη βοήθεια του επιλύτη *MALT* του *CDEGS*. Συνεπώς, έχουμε τα ακόλουθα σύνολα μετρήσεων:

Διαστάσεις Πλευρών (m)	Μάτι (m)
50 x 100	3
50 x 100	5
50 x 100	10
60 x 120	3
60 x 120	5
60 x 120	10
80 x 150	3
80 x 150	5
80 x 150	10

Επιπρόσθετα, για κάθε τύπο πλέγματος, το έδαφος πάνω στο οποίο θα διεξαχθεί η μελέτη θεωρείται διστρωματικό. Από αυτήν την υπόθεση προκύπτουν οι ειδικές αντιστάσεις ρ_1 και ρ_2 για το πρώτο και το δεύτερο στρώμα αντίστοιχα και, επίσης το βάθος h του πρώτου στρώματος. Τα μεγέθη αυτά λαμβάνουν τις εξής τιμές:

$$\rho_1 = 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200$$

$$\rho_2 = 100, 200, 300, 500, 1000, 1500$$

$$h = 1, 2, 3, 5$$

Έτσι λοιπόν, για κάθε τύπο γείωσης θα διεξαχθούν συνολικά $7 \cdot 6 \cdot 4 = 168$ προσομοιώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα παραπάνω μεγέθη συνδυάζονται με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Με τη βοήθεια του *CDEGS* στη συνέχεια, θα γίνει ανάλυση αυτών των δεδομένων.

Για μεγαλύτερη ευκρίνεια θα χρησιμοποιηθεί ο εξής χρωματικός κώδικας ανάλογα με τις διαστάσεις των πλευρών του υποσταθμού.

50 x 100
60 x 120
80 x 150

4.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Ακολουθούν οι εννέα πίνακες με τα αποτελέσματα από τις 168 προσομοιώσεις για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.1

Διαστάσεις Πλευρών: (50 x 100)m			
Μάτι: 3m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος h (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης R (Ω)
1	20	100	0.51
1	20	200	0.913
1	20	300	1.256
1	20	500	1.83
1	20	1000	2.886
1	20	1500	3.654
1	30	100	0.534
1	30	200	0.979
1	30	300	1.369
1	30	500	2.043
1	30	1000	3.342
1	30	1500	4.329
1	50	100	0.559
1	50	200	1.045
1	50	300	1.489
1	50	500	2.281
1	50	1000	3.897
1	50	1500	5.19
1	70	100	0.575
1	70	200	1.086
1	70	300	1.56
1	70	500	2.421
1	70	1000	4.238
1	70	1500	5.74
1	100	100	0.59
1	100	200	1.118
1	100	300	1.621
1	100	500	2.549
1	100	1000	4.563
1	100	1500	6.282

1	150	100	0.608
1	150	200	1.157
1	150	300	1.678
1	150	500	2.671
1	150	1000	4.896
1	150	1500	6.844
1	200	100	0.622
1	200	200	1.181
1	200	300	1.72
1	200	500	2.749
1	200	1000	5.097
1	200	1500	7.203
2	20	100	0.464
2	20	200	0.788
2	20	300	1.048
2	20	500	1.453
2	20	1000	2.143
2	20	1500	2.614
2	30	100	0.5
2	30	200	0.874
2	30	300	1.183
2	30	500	1.684
2	30	1000	2.581
2	30	1500	3.215
2	50	100	0.539
2	50	200	0.967
2	50	300	1.339
2	50	500	1.971
2	50	1000	3.165
2	50	1500	4.051
2	70	100	0.565
2	70	200	1.026
2	70	300	1.436
2	70	500	2.149
2	70	1000	3.549
2	70	1500	4.624
2	100	100	0.59
2	100	200	1.078
2	100	300	1.526
2	100	500	2.322
2	100	1000	3.942
2	100	1500	5.239
2	150	100	0.621
2	150	200	1.139

2	150	300	1.618
2	150	500	2.499
2	150	1000	4.368
2	150	1500	5.914
2	200	100	0.646
2	200	200	1.18
2	200	300	1.683
2	200	500	2.617
2	200	1000	4.643
2	200	1500	6.37
3	20	100	0.431
3	20	200	0.705
3	20	300	0.914
3	20	500	1.234
3	20	1000	1.751
3	20	1500	2.092
3	30	100	0.473
3	30	200	0.797
3	30	300	1.058
3	30	500	1.464
3	30	1000	2.155
3	30	1500	2.626
3	50	100	0.523
3	50	200	0.908
3	50	300	1.232
3	50	500	1.764
3	50	1000	2.717
3	50	1500	3.4
3	70	100	0.555
3	70	200	0.978
3	70	300	1.339
3	70	500	1.958
3	70	1000	3.106
3	70	1500	3.962
3	100	100	0.59
3	100	200	1.045
3	100	300	1.452
3	100	500	2.155
3	100	1000	3.527
3	100	1500	4.571
3	150	100	0.633
3	150	200	1.124
3	150	300	1.568
3	150	500	2.366

3	150	1000	3.983
3	150	1500	5.291
3	200	100	0.669
3	200	200	1.18
3	200	300	1.652
3	200	500	2.51
3	200	1000	4.31
3	200	1500	5.788
5	20	100	0.384
5	20	200	0.595
5	20	300	0.751
5	20	500	0.975
5	20	1000	1.323
5	20	1500	1.544
5	30	100	0.434
5	30	200	0.695
5	30	300	0.893
5	30	500	1.19
5	30	1000	1.67
5	30	1500	1.984
5	50	100	0.497
5	50	200	0.822
5	50	300	1.083
5	50	500	1.489
5	50	1000	2.181
5	50	1500	2.653
5	70	100	0.541
5	70	200	0.907
5	70	300	1.207
5	70	500	1.694
5	70	1000	2.56
5	70	1500	3.165
5	100	100	0.59
5	100	200	0.995
5	100	300	1.342
5	100	500	1.92
5	100	1000	2.977
5	100	1500	3.754
5	150	100	0.656
5	150	200	1.101
5	150	300	1.492
5	150	500	2.171
5	150	1000	3.476
5	150	1500	4.466

5	200	100	0.711
5	200	200	1.181
5	200	300	1.604
5	200	500	2.35
5	200	1000	3.84
5	200	1500	4.988

Πίνακας 4.2

Διαστάσεις Πλευρών: (50 x 100)m			
Μάτι: 5m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος h (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης R (Ω)
1	20	100	0.51
1	20	200	0.915
1	20	300	1.258
1	20	500	1.832
1	20	1000	2.889
1	20	1500	3.658
1	30	100	0.537
1	30	200	0.982
1	30	300	1.372
1	30	500	2.046
1	30	1000	3.345
1	30	1500	4.333
1	50	100	0.564
1	50	200	1.05
1	50	300	1.493
1	50	500	2.286
1	50	1000	3.901
1	50	1500	5.194
1	70	100	0.582
1	70	200	1.092
1	70	300	1.566
1	70	500	2.428
1	70	1000	4.245
1	70	1500	5.747
1	100	100	0.6
1	100	200	1.128
1	100	300	1.63
1	100	500	2.558

1	100	1000	4.573
1	100	1500	6.291
1	150	100	0.622
1	150	200	1.171
1	150	300	1.692
1	150	500	2.685
1	150	1000	4.911
1	150	1500	6.859
1	200	100	0.641
1	200	200	1.201
1	200	300	1.739
1	200	500	2.768
1	200	1000	5.116
1	200	1500	7.222
2	20	100	0.466
2	20	200	0.791
2	20	300	1.05
2	20	500	1.455
2	20	1000	2.146
2	20	1500	2.616
2	30	100	0.503
2	30	200	0.876
2	30	300	1.186
2	30	500	1.687
2	30	1000	2.585
2	30	1500	3.219
2	50	100	0.544
2	50	200	0.972
2	50	300	1.344
2	50	500	1.976
2	50	1000	3.169
2	50	1500	4.056
2	70	100	0.571
2	70	200	1.032
2	70	300	1.443
2	70	500	2.156
2	70	1000	3.556
2	70	1500	4.632
2	100	100	0.6
2	100	200	1.088
2	100	300	1.536
2	100	500	2.332
2	100	1000	3.953
2	100	1500	5.249

2	150	100	0.635
2	150	200	1.154
2	150	300	1.632
2	150	500	2.514
2	150	1000	4.382
2	150	1500	5.929
2	200	100	0.665
2	200	200	1.2
2	200	300	1.702
2	200	500	2.636
2	200	1000	4.663
2	200	1500	6.39
3	20	100	0.433
3	20	200	0.707
3	20	300	0.916
3	20	500	1.236
3	20	1000	1.753
3	20	1500	2.095
3	30	100	0.476
3	30	200	0.8
3	30	300	1.061
3	30	500	1.467
3	30	1000	2.158
3	30	1500	2.629
3	50	100	0.527
3	50	200	0.913
3	50	300	1.237
3	50	500	1.768
3	50	1000	2.723
3	50	1500	3.404
3	70	100	0.562
3	70	200	0.984
3	70	300	1.346
3	70	500	1.964
3	70	1000	3.113
3	70	1500	3.97
3	100	100	0.6
3	100	200	1.055
3	100	300	1.462
3	100	500	2.165
3	100	1000	3.537
3	100	1500	4.581
3	150	100	0.648
3	150	200	1.138

3	150	300	1.582
3	150	500	2.381
3	150	1000	3.998
3	150	1500	5.305
3	200	100	0.688
3	200	200	1.2
3	200	300	1.671
3	200	500	2.529
3	200	1000	4.33
3	200	1500	5.808
5	20	100	0.386
5	20	200	0.598
5	20	300	0.753
5	20	500	0.978
5	20	1000	1.326
5	20	1500	1.547
5	30	100	0.437
5	30	200	0.698
5	30	300	0.896
5	30	500	1.194
5	30	1000	1.674
5	30	1500	1.989
5	50	100	0.502
5	50	200	0.827
5	50	300	1.088
5	50	500	1.494
5	50	1000	2.186
5	50	1500	2.659
5	70	100	0.548
5	70	200	0.913
5	70	300	1.214
5	70	500	1.701
5	70	1000	2.568
5	70	1500	3.174
5	100	100	0.6
5	100	200	1.004
5	100	300	1.352
5	100	500	1.93
5	100	1000	2.988
5	100	1500	3.766
5	150	100	0.67
5	150	200	1.115
5	150	300	1.506
5	150	500	2.186

5	150	1000	3.492
5	150	1500	4.482
5	200	100	0.731
5	200	200	1.2
5	200	300	1.623
5	200	500	2.369
5	200	1000	3.859
5	200	1500	5.008

Πίνακας 4.3

Διαστάσεις Πλευρών: (50 x 100)m			
Μάτι: 10m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος <i>h</i> (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης <i>R</i> (Ω)
1	20	100	0.517
1	20	200	0.919
1	20	300	1.263
1	20	500	1.835
1	20	1000	2.891
1	20	1500	3.66
1	30	100	0.546
1	30	200	0.99
1	30	300	1.379
1	30	500	2.052
1	30	1000	3.349
1	30	1500	4.337
1	50	100	0.58
1	50	200	1.065
1	50	300	1.508
1	50	500	2.299
1	50	1000	3.911
1	50	1500	5.202
1	70	100	0.604
1	70	200	1.114
1	70	300	1.587
1	70	500	2.447
1	70	1000	4.26
1	70	1500	5.76
1	100	100	0.629
1	100	200	1.159

1	100	300	1.661
1	100	500	2.587
1	100	1000	4.597
1	100	1500	6.313
1	150	100	0.663
1	150	200	1.217
1	150	300	1.739
1	150	500	2.731
1	150	1000	4.952
1	150	1500	6.896
1	200	100	0.691
1	200	200	1.259
1	200	300	1.8
1	200	500	2.831
1	200	1000	5.174
1	200	1500	7.276
2	20	100	0.471
2	20	200	0.795
2	20	300	1.054
2	20	500	1.458
2	20	1000	2.149
2	20	1500	2.619
2	30	100	0.511
2	30	200	0.883
2	30	300	1.192
2	30	500	1.693
2	30	1000	2.59
2	30	1500	3.224
2	50	100	0.558
2	50	200	0.984
2	50	300	1.356
2	50	500	1.987
2	50	1000	3.178
2	50	1500	4.064
2	70	100	0.591
2	70	200	1.051
2	70	300	1.46
2	70	500	2.171
2	70	1000	3.569
2	70	1500	4.644
2	100	100	0.629
2	100	200	1.116
2	100	300	1.562
2	100	500	2.356

2	100	1000	3.973
2	100	1500	5.267
2	150	100	0.678
2	150	200	1.197
2	150	300	1.674
2	150	500	2.553
2	150	1000	4.416
2	150	1500	5.96
2	200	100	0.72
2	200	200	1.258
2	200	300	1.759
2	200	500	2.69
2	200	1000	4.711
2	200	1500	6.433
3	20	100	0.438
3	20	200	0.711
3	20	300	0.92
3	20	500	1.24
3	20	1000	1.756
3	20	1500	2.099
3	30	100	0.484
3	30	200	0.806
3	30	300	1.067
3	30	500	1.473
3	30	1000	2.164
3	30	1500	2.635
3	50	100	0.541
3	50	200	0.925
3	50	300	1.248
3	50	500	1.779
3	50	1000	2.732
3	50	1500	3.413
3	70	100	0.581
3	70	200	1.002
3	70	300	1.362
3	70	500	1.98
3	70	1000	3.127
3	70	1500	3.983
3	100	100	0.628
3	100	200	1.081
3	100	300	1.487
3	100	500	2.188
3	100	1000	3.557
3	100	1500	4.6

3	150	100	0.629
3	150	200	1.18
3	150	300	1.622
3	150	500	2.418
3	150	1000	4.031
3	150	1500	5.336
3	200	100	0.747
3	200	200	1.257
3	200	300	1.726
3	200	500	2.581
3	200	1000	4.376
3	200	1500	5.851
5	20	100	0.39
5	20	200	0.601
5	20	300	0.757
5	20	500	0.981
5	20	1000	1.33
5	20	1500	1.55
5	30	100	0.443
5	30	200	0.704
5	30	300	0.902
5	30	500	1.199
5	30	1000	1.68
5	30	1500	1.994
5	50	100	0.513
5	50	200	0.837
5	50	300	1.098
5	50	500	1.503
5	50	1000	2.195
5	50	1500	2.669
5	70	100	0.563
5	70	200	0.928
5	70	300	1.228
5	70	500	1.715
5	70	1000	2.581
5	70	1500	3.186
5	100	100	0.623
5	100	200	1.025
5	100	300	1.372
5	100	500	1.949
5	100	1000	3.007
5	100	1500	3.784
5	150	100	0.706
5	150	200	1.148

5	150	300	1.538
5	150	500	2.215
5	150	1000	3.52
5	150	1500	4.51
5	200	100	0.781
5	200	200	1.246
5	200	300	1.667
5	200	500	2.41
5	200	1000	3.898
5	200	1500	5.047

Πίνακας 4.4

Διαστάσεις Πλευρών: (60 x 120)m			
Μάτι: 3m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος h (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης R (Ω)
1	20	100	0.433
1	20	200	0.784
1	20	300	1.089
1	20	500	1.603
1	20	1000	2.572
1	20	1500	3.294
1	30	100	0.452
1	30	200	0.836
1	30	300	1.177
1	30	500	1.774
1	30	1000	2.949
1	30	1500	3.859
1	50	100	0.47
1	50	200	0.886
1	50	300	1.269
1	50	500	1.961
1	50	1000	3.397
1	50	1500	4.568
1	70	100	0.482
1	70	200	0.916
1	70	300	1.323
1	70	500	2.069
1	70	1000	3.669
1	70	1500	5.013

1	100	100	0.493
1	100	200	0.94
1	100	300	1.369
1	100	500	2.167
1	100	1000	3.922
1	100	1500	5.442
1	150	100	0.506
1	150	200	0.969
1	150	300	1.411
1	150	500	2.259
1	150	1000	4.181
1	150	1500	5.884
1	200	100	0.517
1	200	200	0.987
1	200	300	1.442
1	200	500	2.317
1	200	1000	4.333
1	200	1500	6.161
2	20	100	0.399
2	20	200	0.687
2	20	300	0.922
2	20	500	1.296
2	20	1000	1.943
2	20	1500	2.393
2	30	100	0.426
2	30	200	0.754
2	30	300	1.03
2	30	500	1.488
2	30	1000	2.317
2	30	1500	2.914
2	50	100	0.455
2	50	200	0.826
2	50	300	1.153
2	50	500	1.717
2	50	1000	2.803
2	50	1500	3.625
2	70	100	0.474
2	70	200	0.871
2	70	300	1.229
2	70	500	1.858
2	70	1000	3.118
2	70	1500	4.102
2	100	100	0.493
2	100	200	0.91

2	100	300	1.297
2	100	500	1.993
2	100	1000	3.434
2	100	1500	4.608
2	150	100	0.516
2	150	200	0.956
2	150	300	1.366
2	150	500	2.129
2	150	1000	3.771
2	150	1500	5.151
2	200	100	0.534
2	200	200	0.986
2	200	300	1.415
2	200	500	2.218
2	200	1000	3.985
2	200	1500	5.512
3	20	100	0.372
3	20	200	0.62
3	20	300	0.813
3	20	500	1.11
3	20	1000	1.601
3	20	1500	1.931
3	30	100	0.405
3	30	200	0.695
3	30	300	0.93
3	30	500	1.303
3	30	1000	1.955
3	30	1500	2.402
3	50	100	0.443
3	50	200	0.78
3	50	300	1.069
3	50	500	1.55
3	50	1000	2.43
3	50	1500	3.071
3	70	100	0.467
3	70	200	0.835
3	70	300	1.156
3	70	500	1.706
3	70	1000	2.754
3	70	1500	3.55
3	100	100	0.493
3	100	200	0.886
3	100	300	1.241
3	100	500	1.862

3	100	1000	3.099
3	100	1500	4.067
3	150	100	0.525
3	150	200	0.945
3	150	300	1.328
3	150	500	2.026
3	150	1000	3.474
3	150	1500	4.649
3	200	100	0.551
3	200	200	0.986
3	200	300	1.392
3	200	500	2.136
3	200	1000	3.724
3	200	1500	5.05
5	20	100	0.335
5	20	200	0.529
5	20	300	0.674
5	20	500	0.887
5	20	1000	1.222
5	20	1500	1.437
5	30	100	0.375
5	30	200	0.611
5	30	300	0.793
5	30	500	1.074
5	30	1000	1.529
5	30	1500	1.833
5	50	100	0.423
5	50	200	0.713
5	50	300	0.949
5	50	500	1.322
5	50	1000	1.977
5	50	1500	2.428
5	70	100	0.457
5	70	200	0.779
5	70	300	1.048
5	70	500	1.491
5	70	1000	2.296
5	70	1500	2.867
5	100	100	0.493
5	100	200	0.847
5	100	300	1.155
5	100	500	1.674
5	100	1000	2.644
5	100	1500	3.371

5	150	100	0.541
5	150	200	0.927
5	150	300	1.27
5	150	500	1.873
5	150	1000	3.055
5	150	1500	3.967
5	200	100	0.582
5	200	200	0.987
5	200	300	1.355
5	200	500	2.012
5	200	1000	3.348
5	200	1500	4.412

Πίνακας 4.5

Διαστάσεις Πλευρών: (60 x 120)m			
Μάτι: 5m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος h (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης R (Ω)
1	20	100	0.435
1	20	200	0.786
1	20	300	1.09
1	20	500	1.605
1	20	1000	2.574
1	20	1500	3.295
1	30	100	0.454
1	30	200	0.839
1	30	300	1.179
1	30	500	1.777
1	30	1000	2.951
1	30	1500	3.861
1	50	100	0.474
1	50	200	0.89
1	50	300	1.273
1	50	500	1.966
1	50	1000	3.402
1	50	1500	4.573
1	70	100	0.488
1	70	200	0.923
1	70	300	1.329
1	70	500	2.076

1	70	1000	3.675
1	70	1500	5.019
1	100	100	0.5
1	100	200	0.948
1	100	300	1.377
1	100	500	2.175
1	100	1000	3.931
1	100	1500	5.451
1	150	100	0.515
1	150	200	0.98
1	150	300	1.422
1	150	500	2.272
1	150	1000	4.194
1	150	1500	5.897
1	200	100	0.526
1	200	200	1
1	200	300	1.457
1	200	500	2.334
1	200	1000	4.351
1	200	1500	6.179
2	20	100	0.4
2	20	200	0.688
2	20	300	0.923
2	20	500	1.298
2	20	1000	1.945
2	20	1500	2.396
2	30	100	0.428
2	30	200	0.756
2	30	300	1.033
2	30	500	1.49
2	30	1000	2.319
2	30	1500	2.917
2	50	100	0.459
2	50	200	0.83
2	50	300	1.157
2	50	500	1.721
2	50	1000	2.807
2	50	1500	3.629
2	70	100	0.479
2	70	200	0.876
2	70	300	1.233
2	70	500	1.863
2	70	1000	3.124
2	70	1500	4.108

2	100	100	0.5
2	100	200	0.917
2	100	300	1.304
2	100	500	2
2	100	1000	3.442
2	100	1500	4.616
2	150	100	0.526
2	150	200	0.966
2	150	300	1.376
2	150	500	2.139
2	150	1000	3.781
2	150	1500	5.163
2	200	100	0.547
2	200	200	1
2	200	300	1.429
2	200	500	2.231
2	200	1000	3.999
2	200	1500	5.526
3	20	100	0.374
3	20	200	0.621
3	20	300	0.815
3	20	500	1.111
3	20	1000	1.604
3	20	1500	1.933
3	30	100	0.407
3	30	200	0.697
3	30	300	0.932
3	30	500	1.305
3	30	1000	1.957
3	30	1500	2.405
3	50	100	0.446
3	50	200	0.784
3	50	300	1.072
3	50	500	1.554
3	50	1000	2.434
3	50	1500	3.076
3	70	100	0.472
3	70	200	0.839
3	70	300	1.161
3	70	500	1.711
3	70	1000	2.759
3	70	1500	3.556
3	100	100	0.5
3	100	200	0.892

3	100	300	1.247
3	100	500	1.869
3	100	1000	3.107
3	100	1500	4.075
3	150	100	0.535
3	150	200	0.955
3	150	300	1.338
3	150	500	2.036
3	150	1000	3.486
3	150	1500	4.66
3	200	100	0.564
3	200	200	1
3	200	300	1.405
3	200	500	2.15
3	200	1000	3.738
3	200	1500	5.064
5	20	100	0.336
5	20	200	0.53
5	20	300	0.676
5	20	500	0.889
5	20	1000	1.225
5	20	1500	1.44
5	30	100	0.377
5	30	200	0.613
5	30	300	0.796
5	30	500	1.077
5	30	1000	1.532
5	30	1500	1.837
5	50	100	0.427
5	50	200	0.716
5	50	300	0.953
5	50	500	1.326
5	50	1000	1.981
5	50	1500	2.432
5	70	100	0.461
5	70	200	0.784
5	70	300	1.053
5	70	500	1.496
5	70	1000	2.302
5	70	1500	2.874
5	100	100	0.5
5	100	200	0.853
5	100	300	1.161
5	100	500	1.681

5	100	1000	2.652
5	100	1500	3.38
5	150	100	0.551
5	150	200	0.937
5	150	300	1.28
5	150	500	1.883
5	150	1000	3.066
5	150	1500	3.978
5	200	100	0.595
5	200	200	1
5	200	300	1.368
5	200	500	2.026
5	200	1000	3.363
5	200	1500	4.427

Πίνακας 4.6

Διαστάσεις Πλευρών: (60 x 120)m			
Μάτι: 10m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος h (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης R (Ω)
1	20	100	0.439
1	20	200	0.79
1	20	300	1.094
1	20	500	1.608
1	20	1000	2.578
1	20	1500	3.299
1	30	100	0.46
1	30	200	0.844
1	30	300	1.185
1	30	500	1.782
1	30	1000	2.956
1	30	1500	3.867
1	50	100	0.484
1	50	200	0.9
1	50	300	1.282
1	50	500	1.974
1	50	1000	3.41
1	50	1500	4.58
1	70	100	0.501
1	70	200	0.936

1	70	300	1.343
1	70	500	2.088
1	70	1000	3.686
1	70	1500	5.03
1	100	100	0.519
1	100	200	0.968
1	100	300	1.397
1	100	500	2.194
1	100	1000	3.949
1	100	1500	5.468
1	150	100	0.54
1	150	200	1.009
1	150	300	1.452
1	150	500	2.301
1	150	1000	4.221
1	150	1500	5.923
1	200	100	0.558
1	200	200	1.037
1	200	300	1.496
1	200	500	2.374
1	200	1000	4.388
1	200	1500	6.215
2	20	100	0.403
2	20	200	0.691
2	20	300	0.926
2	20	500	1.3
2	20	1000	1.947
2	20	1500	2.399
2	30	100	0.433
2	30	200	0.761
2	30	300	1.037
2	30	500	1.494
2	30	1000	2.322
2	30	1500	2.921
2	50	100	0.467
2	50	200	0.838
2	50	300	1.164
2	50	500	1.728
2	50	1000	2.814
2	50	1500	3.635
2	70	100	0.492
2	70	200	0.887
2	70	300	1.244
2	70	500	1.873

2	70	1000	3.133
2	70	1500	4.118
2	100	100	0.518
2	100	200	0.935
2	100	300	1.321
2	100	500	2.015
2	100	1000	3.455
2	100	1500	4.628
2	150	100	0.553
2	150	200	0.993
2	150	300	1.402
2	150	500	2.163
2	150	1000	3.803
2	150	1500	5.183
2	200	100	0.583
2	200	200	1.037
2	200	300	1.464
2	200	500	2.265
2	200	1000	4.029
2	200	1500	5.555
3	20	100	0.377
3	20	200	0.624
3	20	300	0.818
3	20	500	1.114
3	20	1000	1.606
3	20	1500	1.936
3	30	100	0.412
3	30	200	0.701
3	30	300	0.936
3	30	500	1.309
3	30	1000	1.961
3	30	1500	2.409
3	50	100	0.454
3	50	200	0.791
3	50	300	1.079
3	50	500	1.56
3	50	1000	2.44
3	50	1500	3.082
3	70	100	0.484
3	70	200	0.85
3	70	300	1.172
3	70	500	1.721
3	70	1000	2.768
3	70	1500	3.563

3	100	100	0.518
3	100	200	0.909
3	100	300	1.263
3	100	500	1.834
3	100	1000	3.12
3	100	1500	4.088
3	150	100	0.563
3	150	200	0.981
3	150	300	1.363
3	150	500	2.06
3	150	1000	3.506
3	150	1500	4.68
3	200	100	0.602
3	200	200	1.036
3	200	300	1.44
3	200	500	2.182
3	200	1000	3.767
3	200	1500	5.092
5	20	100	0.339
5	20	200	0.533
5	20	300	0.679
5	20	500	0.892
5	20	1000	1.228
5	20	1500	1.443
5	30	100	0.381
5	30	200	0.618
5	30	300	0.8
5	30	500	1.081
5	30	1000	1.537
5	30	1500	1.841
5	50	100	0.435
5	50	200	0.724
5	50	300	0.96
5	50	500	1.334
5	50	1000	1.989
5	50	1500	2.441
5	70	100	0.473
5	70	200	0.795
5	70	300	1.064
5	70	500	1.507
5	70	1000	2.313
5	70	1500	2.885
5	100	100	0.518
5	100	200	0.87

5	100	300	1.178
5	100	500	1.697
5	100	1000	2.667
5	100	1500	3.395
5	150	100	0.58
5	150	200	0.963
5	150	300	1.305
5	150	500	1.907
5	150	1000	3.088
5	150	1500	4.001
5	200	100	0.635
5	200	200	1.037
5	200	300	1.403
5	200	500	2.059
5	200	1000	3.394
5	200	1500	4.458

Πίνακας 4.7

Διαστάσεις Πλευρών: (80 x 150)m			
Μάτι: 3m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος <i>h</i> (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης <i>R</i> (Ω)
1	20	100	0.345
1	20	200	0.634
1	20	300	0.889
1	20	500	1.332
1	20	1000	2.185
1	20	1500	2.836
1	30	100	0.358
1	30	200	0.67
1	30	300	0.951
1	30	500	1.454
1	30	1000	2.471
1	30	1500	3.278
1	50	100	0.37
1	50	200	0.703
1	50	300	1.014
1	50	500	1.586
1	50	1000	2.798
1	50	1500	3.816

1	70	100	0.378
1	70	200	0.724
1	70	300	1.052
1	70	500	1.661
1	70	1000	2.993
1	70	1500	4.138
1	100	100	0.385
1	100	200	0.739
1	100	300	1.082
1	100	500	1.727
1	100	1000	3.172
1	100	1500	4.445
1	150	100	0.393
1	150	200	0.758
1	150	300	1.109
1	150	500	1.789
1	150	1000	3.351
1	150	1500	4.757
1	200	100	0.399
1	200	200	0.77
1	200	300	1.13
1	200	500	1.828
1	200	1000	3.454
1	200	1500	4.949
2	20	100	0.321
2	20	200	0.565
2	20	300	0.768
2	20	500	1.099
2	20	1000	1.689
2	20	1500	2.109
2	30	100	0.34
2	30	200	0.613
2	30	300	0.847
2	30	500	1.244
2	30	1000	1.986
2	30	1500	2.533
2	50	100	0.36
2	50	200	0.663
2	50	300	0.935
2	50	500	1.412
2	50	1000	2.358
2	50	1500	3.096
2	70	100	0.372
2	70	200	0.694

2	70	300	0.987
2	70	500	1.513
2	70	1000	2.594
2	70	1500	3.466
2	100	100	0.385
2	100	200	0.72
2	100	300	1.034
2	100	500	1.607
2	100	1000	2.824
2	100	1500	3.839
2	150	100	0.399
2	150	200	0.75
2	150	300	1.079
2	150	500	1.7
2	150	1000	3.065
2	150	1500	4.236
2	200	100	0.411
2	200	200	0.769
2	200	300	1.112
2	200	500	1.761
2	200	1000	3.215
2	200	1500	4.495
3	20	100	0.303
3	20	200	0.516
3	20	300	0.686
3	20	500	0.953
3	20	1000	1.41
3	20	1500	1.723
3	30	100	0.326
3	30	200	0.571
3	30	300	0.774
3	30	500	1.103
3	30	1000	1.696
3	30	1500	2.115
3	50	100	0.351
3	50	200	0.631
3	50	300	0.875
3	50	500	1.29
3	50	1000	2.075
3	50	1500	2.66
3	70	100	0.368
3	70	200	0.669
3	70	300	0.937
3	70	500	1.404

3	70	1000	2.325
3	70	1500	3.033
3	100	100	0.385
3	100	200	0.703
3	100	300	0.995
3	100	500	1.515
3	100	1000	2.579
3	100	1500	3.432
3	150	100	0.405
3	150	200	0.742
3	150	300	1.054
3	150	500	1.63
3	150	1000	2.853
3	150	1500	3.868
3	200	100	0.422
3	200	200	0.769
3	200	300	1.097
3	200	500	1.706
3	200	1000	3.031
3	200	1500	4.162
5	20	100	0.276
5	20	200	0.448
5	20	300	0.578
5	20	500	0.774
5	20	1000	1.092
5	20	1500	1.3
5	30	100	0.304
5	30	200	0.508
5	30	300	0.672
5	30	500	0.925
5	30	1000	1.351
5	30	1500	1.639
5	50	100	0.338
5	50	200	0.583
5	50	300	0.787
5	50	500	1.12
5	50	1000	1.713
5	50	1500	2.133
5	70	100	0.361
5	70	200	0.63
5	70	300	0.859
5	70	500	1.244
5	70	1000	1.965
5	70	1500	2.491

5	100	100	0.385
5	100	200	0.676
5	100	300	0.935
5	100	500	1.38
5	100	1000	2.241
5	100	1500	2.89
5	150	100	0.416
5	150	200	0.73
5	150	300	1.014
5	150	500	1.522
5	150	1000	2.542
5	150	1500	3.361
5	200	100	0.442
5	200	200	0.77
5	200	300	1.072
5	200	500	1.619
5	200	1000	2.759
5	200	1500	3.689

Πίνακας 4.8

Διαστάσεις Πλευρών: (80 x 150)m			
Μάτι: 5m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος <i>h</i> (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης <i>R</i> (Ω)
1	20	100	0.346
1	20	200	0.635
1	20	300	0.89
1	20	500	1.333
1	20	1000	2.186
1	20	1500	2.838
1	30	100	0.359
1	30	200	0.672
1	30	300	0.953
1	30	500	1.455
1	30	1000	2.473
1	30	1500	3.279
1	50	100	0.372
1	50	200	0.705
1	50	300	1.017
1	50	500	1.588

1	50	1000	2.8
1	50	1500	3.818
1	70	100	0.381
1	70	200	0.727
1	70	300	1.055
1	70	500	1.664
1	70	1000	2.997
1	70	1500	4.141
1	100	100	0.39
1	100	200	0.744
1	100	300	1.087
1	100	500	1.732
1	100	1000	3.176
1	100	1500	4.451
1	150	100	0.4
1	150	200	0.766
1	150	300	1.116
1	150	500	1.795
1	150	1000	3.358
1	150	1500	4.764
1	200	100	0.409
1	200	200	0.78
1	200	300	1.14
1	200	500	1.837
1	200	1000	3.463
1	200	1500	4.959
2	20	100	0.323
2	20	200	0.566
2	20	300	0.769
2	20	500	1.1
2	20	1000	1.691
2	20	1500	2.11
2	30	100	0.342
2	30	200	0.615
2	30	300	0.849
2	30	500	1.246
2	30	1000	1.988
2	30	1500	2.536
2	50	100	0.362
2	50	200	0.665
2	50	300	0.937
2	50	500	1.415
2	50	1000	2.361
2	50	1500	3.099

2	70	100	0.376
2	70	200	0.697
2	70	300	0.991
2	70	500	1.517
2	70	1000	2.598
2	70	1500	3.47
2	100	100	0.39
2	100	200	0.724
2	100	300	1.039
2	100	500	1.613
2	100	1000	2.83
2	100	1500	3.844
2	150	100	0.406
2	150	200	0.757
2	150	300	1.087
2	150	500	1.708
2	150	1000	3.073
2	150	1500	4.245
2	200	100	0.42
2	200	200	0.779
2	200	300	1.122
2	200	500	1.771
2	200	1000	3.225
2	200	1500	4.506
3	20	100	0.304
3	20	200	0.517
3	20	300	0.688
3	20	500	0.955
3	20	1000	1.412
3	20	1500	1.724
3	30	100	0.328
3	30	200	0.572
3	30	300	0.775
3	30	500	1.105
3	30	1000	1.698
3	30	1500	2.118
3	50	100	0.354
3	50	200	0.633
3	50	300	0.877
3	50	500	1.292
3	50	1000	2.078
3	50	1500	2.663
3	70	100	0.371
3	70	200	0.672

3	70	300	0.94
3	70	500	1.408
3	70	1000	2.329
3	70	1500	3.037
3	100	100	0.39
3	100	200	0.708
3	100	300	1
3	100	500	1.521
3	100	1000	2.584
3	100	1500	3.438
3	150	100	0.412
3	150	200	0.749
3	150	300	1.061
3	150	500	1.638
3	150	1000	2.861
3	150	1500	3.877
3	200	100	0.431
3	200	200	0.779
3	200	300	1.106
3	200	500	1.716
3	200	1000	3.042
3	200	1500	4.173
5	20	100	0.277
5	20	200	0.449
5	20	300	0.579
5	20	500	0.776
5	20	1000	1.094
5	20	1500	1.302
5	30	100	0.306
5	30	200	0.51
5	30	300	0.674
5	30	500	0.927
5	30	1000	1.353
5	30	1500	1.641
5	50	100	0.34
5	50	200	0.585
5	50	300	0.79
5	50	500	1.123
5	50	1000	1.716
5	50	1500	2.137
5	70	100	0.364
5	70	200	0.633
5	70	300	0.862
5	70	500	1.248

5	70	1000	1.97
5	70	1500	2.495
5	100	100	0.39
5	100	200	0.681
5	100	300	0.94
5	100	500	1.385
5	100	1000	2.246
5	100	1500	2.897
5	150	100	0.423
5	150	200	0.737
5	150	300	1.021
5	150	500	1.529
5	150	1000	2.551
5	150	1500	3.369
5	200	100	0.452
5	200	200	0.78
5	200	300	1.082
5	200	500	1.629
5	200	1000	2.77
5	200	1500	3.701

Πίνακας 4.9

Διαστάσεις Πλευρών: (80 x 150)m			
Μάτι: 10m			
Βάθος 1 ^ο Στρώματος <i>h</i> (m)	Ειδική Αντίσταση 1 ^ο Στρώματος ρ_1 ($\Omega \cdot m$)	Ειδική Αντίσταση 2 ^ο Στρώματος ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	Αντίσταση Γείωσης <i>R</i> (Ω)
1	20	100	0.349
1	20	200	0.638
1	20	300	0.893
1	20	500	1.335
1	20	1000	2.187
1	20	1500	2.839
1	30	100	0.364
1	30	200	0.676
1	30	300	0.957
1	30	500	1.459
1	30	1000	2.475
1	30	1500	3.281
1	50	100	0.38
1	50	200	0.713

1	50	300	1.024
1	50	500	1.595
1	50	1000	2.806
1	50	1500	3.823
1	70	100	0.392
1	70	200	0.739
1	70	300	1.066
1	70	500	1.674
1	70	1000	3.005
1	70	1500	4.149
1	100	100	0.404
1	100	200	0.76
1	100	300	1.103
1	100	500	1.747
1	100	1000	3.19
1	100	1500	4.463
1	150	100	0.42
1	150	200	0.789
1	150	300	1.14
1	150	500	1.82
1	150	1000	3.38
1	150	1500	4.785
1	200	100	0.434
1	200	200	0.809
1	200	300	1.171
1	200	500	1.869
1	200	1000	3.495
1	200	1500	4.988
2	20	100	0.325
2	20	200	0.568
2	20	300	0.771
2	20	500	1.102
2	20	1000	1.692
2	20	1500	2.12
2	30	100	0.346
2	30	200	0.618
2	30	300	0.852
2	30	500	1.249
2	30	1000	1.991
2	30	1500	2.539
2	50	100	0.369
2	50	200	0.672
2	50	300	0.944
2	50	500	1.421

2	50	1000	2.366
2	50	1500	3.104
2	70	100	0.386
2	70	200	0.707
2	70	300	1
2	70	500	1.525
2	70	1000	2.605
2	70	1500	3.477
2	100	100	0.404
2	100	200	0.739
2	100	300	1.053
2	100	500	1.625
2	100	1000	2.841
2	100	1500	3.855
2	150	100	0.428
2	150	200	0.779
2	150	300	1.108
2	150	500	1.728
2	150	1000	3.092
2	150	1500	4.262
2	200	100	0.448
2	200	200	0.808
2	200	300	1.151
2	200	500	1.799
2	200	1000	3.251
2	200	1500	4.53
3	20	100	0.307
3	20	200	0.519
3	20	300	0.69
3	20	500	0.957
3	20	1000	1.414
3	20	1500	1.726
3	30	100	0.331
3	30	200	0.576
3	30	300	0.779
3	30	500	1.108
3	30	1000	1.702
3	30	1500	2.121
3	50	100	0.361
3	50	200	0.64
3	50	300	0.883
3	50	500	1.298
3	50	1000	2.083
3	50	1500	2.668

3	70	100	0.381
3	70	200	0.681
3	70	300	0.949
3	70	500	1.416
3	70	1000	2.337
3	70	1500	3.045
3	100	100	0.404
3	100	200	0.721
3	100	300	1.013
3	100	500	1.533
3	100	1000	2.596
3	100	1500	3.449
3	150	100	0.434
3	150	200	0.771
3	150	300	1.082
3	150	500	1.657
3	150	1000	2.879
3	150	1500	3.894
3	200	100	0.461
3	200	200	0.808
3	200	300	1.135
3	200	500	1.742
3	200	1000	3.066
3	200	1500	4.197
5	20	100	0.279
5	20	200	0.451
5	20	300	0.581
5	20	500	0.778
5	20	1000	1.097
5	20	1500	1.304
5	30	100	0.309
5	30	200	0.513
5	30	300	0.677
5	30	500	0.93
5	30	1000	1.356
5	30	1500	1.645
5	50	100	0.346
5	50	200	0.591
5	50	300	0.795
5	50	500	1.129
5	50	1000	1.721
5	50	1500	2.142
5	70	100	0.372
5	70	200	0.641

5	70	300	0.87
5	70	500	1.255
5	70	1000	1.977
5	70	1500	2.503
5	100	100	0.401
5	100	200	0.692
5	100	300	0.95
5	100	500	1.395
5	100	1000	2.257
5	100	1500	2.907
5	150	100	0.441
5	150	200	0.754
5	150	300	1.038
5	150	500	1.545
5	150	1000	2.566
5	150	1500	3.386
5	200	100	0.476
5	200	200	0.803
5	200	300	1.104
5	200	500	1.651
5	200	1000	2.791
5	200	1500	3.721

Κεφάλαιο 5

Βελτιστοποίηση Αποτελεσμάτων με το *MATLAB*

5.1 Εισαγωγή

Η ακρίβεια και η ασφάλεια σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αποτελούν κρίσιμα θέματα, ειδικά όταν πρόκειται για συστήματα υποσταθμών. Έτσι, ο υπολογισμός της αντίστασης γείωσης κρίνεται απαραίτητος για την πρόληψη κινδύνων.

Αυτή η μελέτη εστιάζει στην ανάπτυξη μοντέλων για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε υποσταθμούς υψηλής τάσης. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να επιτευχθεί η σύνδεση των προσομοιώσεων με σκοπό την εύρεση μιας ακριβούς και αξιόπιστης λύσης για την αντίσταση γείωσης R των υποσταθμών. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μελέτης είναι πως ο ερευνητής, που ασχολείται με την εγκατάσταση του συστήματος γείωσης σε υποσταθμούς, θα μπορεί με απλότητα να υπολογίζει την αντίσταση γείωσης του συστήματος βασιζόμενος σε κάποιες ήδη υπάρχουσες τιμές. Επιπρόσθετα, στον τομέα της έρευνας έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι υπολογισμού της αντίστασης γείωσης, για παράδειγμα με χρήση των νευρωνικών δικτύων, της μηχανικής μάθησης και του γενετικού προγραμματισμού [60], [61], [62], [63].

Στο πλαίσιο της ανάλυσης παρουσιάζονται δύο βασικές περιπτώσεις που απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις. Στην πρώτη περίπτωση, εφαρμόζονται οι εξισώσεις του *Απλού Εκθετικού Μοντέλου* για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, αναλύεται το *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών*, μια πιο απαιτητική προσέγγιση, όπου η σχέση μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων εμπλέκει τον υπολογισμό με συνδυασμούς εκθετικών παραγόντων. Η τιμή της αντίστασης γείωσης εξαρτάται από τρεις μεταβλητές και η εξίσωση είναι της μορφής $R = f(\rho_1, \rho_2, h)$. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιείται η εξίσωση που εξαρτάται από την επιφάνεια που καλύπτει το πλέγμα του υποσταθμού και ονομάζεται *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*. Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση εξαρτάται από τέσσερις μεταβλητές για τον υπολογισμό της τιμής αντίστασης γείωσης και είναι της μορφής $R = f(\rho_1, \rho_2, h, E)$. Τα μοντέλα αυτά με τις αντίστοιχες εξισώσεις τους παρουσιάστηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο. Για να θεωρηθεί ότι κάποια προσαρμογή παρέχει τις **βέλτιστες προβλέψεις**, χρειάζεται να ισχύει $R^2 > 0,99$, καθώς επίσης και **Adjusted $R^2 > 0,99$** .

Η πρόκληση, που δημιουργείται εδώ, είναι ότι σε κάποια μοντέλα απαιτείται διαχείριση σχέσεων πολλών μεταβλητών, πράγμα που καθιστά δυσάρεστη την αναπαράστασή τους σε γραφική μορφή. Ωστόσο, η υιοθέτηση ενός συλλογιστικού πλαισίου επιτρέπει την

αποτελεσματική εύρεση λύσεων και βελτιστοποίηση του μοντέλου για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε πολύπλοκες συνθήκες.

5.2 Προσαρμογή του Απλού Εκθετικού Μοντέλου

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε υποσταθμούς χρησιμοποιώντας το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο* ξεκινά με την προσαρμογή του μοντέλου στα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων. Η ανάλυση αυτή εκτελείται με τη χρήση της εντολής *cftool* του *MATLAB*. Τα σύνολα των δεδομένων των προσομοιώσεων, που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο, εισάγονται στο λογισμικό για περαιτέρω ανάλυση.

Κατά την προσαρμογή, το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο* προσπαθεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους του, έτσι ώστε να αντιστοιχούν στα δεδομένα των προσομοιώσεων. Σημαντικό ρόλο κατέχει η ακρίβεια της προσαρμογής, η οποία εξαρτάται από την αρχικοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου. Παρόλο που το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο* είναι πιο εύκολο στην εφαρμογή από το *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών*, προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτή η ανάλυση επιτρέπει τη γρήγορη εκτέλεση του υπολογισμού, αλλά αναφέρεται σε μικρότερο εύρος συνθηκών. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου δεν υπάρχει συγκεκριμένος αλγόριθμος για την εύρεσή τους και συχνά τοποθετούνται με βάση την εμπειρία και παρατηρήσεις.

Λαμβάνεται η απλοποιημένη εξίσωση του *Απλού Εκθετικού Μοντέλου* (3.20).

$$RR(K, h) = a + b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e}$$

Με $K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ και R την αντίσταση γείωσης προκύπτει ο παρακάτω κώδικας στον οποίο θα προστεθεί η ακόλουθη εξίσωση για την προσαρμογή.

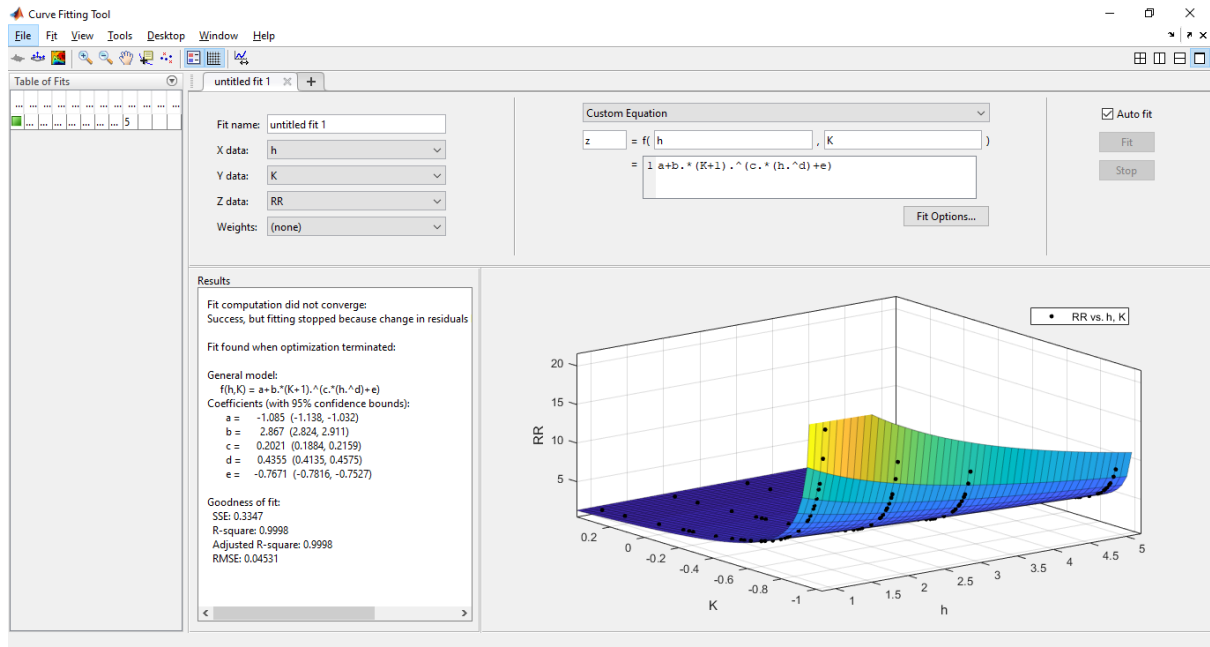
$$RR = 100 \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right) \quad (5.1)$$

Ο κώδικας *MATLAB*, που θα χρησιμοποιηθεί, είναι ο εξής [57].

```
r1=Var1; % ειδική αντίσταση 1ου στρώματος
r2=Var2; % ειδική αντίσταση 2ου στρώματος
h=Var3; % ύψος 1ου στρώματος
K=(r1-r2)/(r1+r2);
R=Var4; % αντίσταση γείωσης προσομοιώσεων
RR=100.*R.*((1./r1)+(1./r2)+(1./sqrt(r1.*r2)));
x=[r1;r2;h;R]';
```

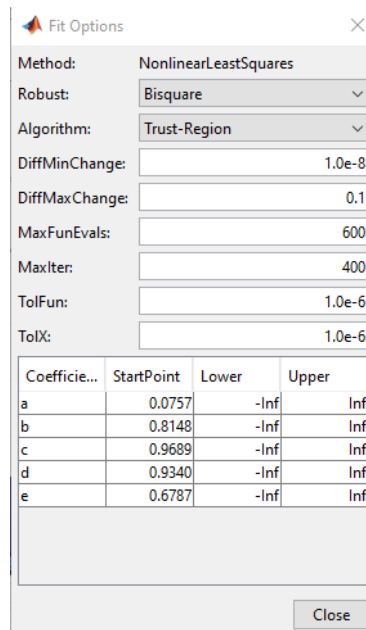
Αφού εφαρμοστεί ο παραπάνω κώδικας, γίνεται χρήση της εντολής *cftool* και στο εμφανιζόμενο παράθυρο τοποθετούμε τα εξής στοιχεία:

- *X data: h*
- *Y data: K*
- *Z data: RR*
- *Custom Equation $z = f(h, K) = a + b \cdot (K+1) \cdot (c \cdot (h \cdot d) + e)$*



Εικόνα 5.1: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Απλού Εκθετικού Μοντέλου για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.1.

Στο πλαίσιο *Fit Options* επιλέγουμε *Robust: Bisquare* και γενικά σε αυτό το πεδίο μπορούμε να αλλάξουμε τις αρχικές τιμές των μεταβλητών, καθώς επίσης και το κατώτατο και ανώτατο διάστημα, που επιτρέπεται να λαμβάνουν τιμές.



Εικόνα 5.2: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Απλού Εκθετικού Μοντέλου για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.1 ~ *Fit Options*.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 4.1, με σκοπό να παράγεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ είναι:

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
0.0757	0.8148	0.9689	0.934	0.6787

Παρατηρείται, ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
-1.085	2.867	0.2021	0.4355	-0.7671

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

<i>SSE</i>	R^2	<i>Adjusted R²</i>	<i>RMSE</i>
0.3347	0.9998	0.9998	0.04531

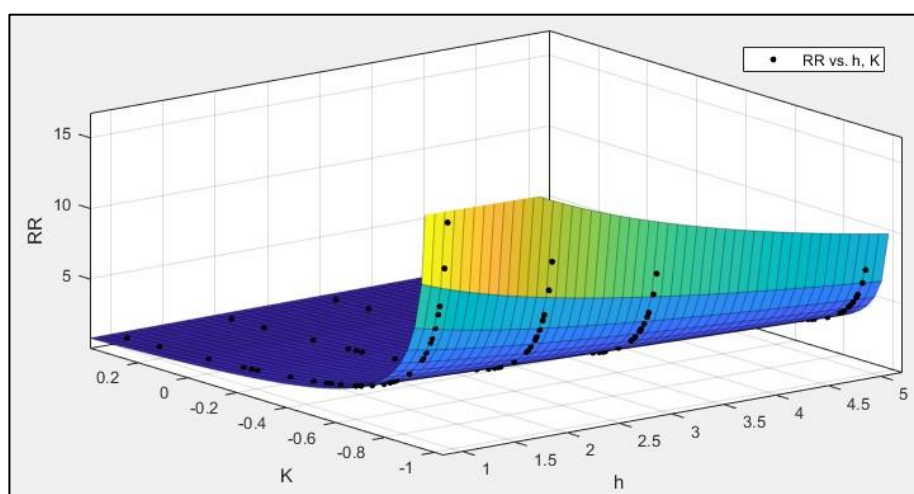
Στη διαδικασία προσαρμογής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *Trust Region*, ο οποίος είναι γνωστός για την αποτελεσματική προσαρμογή μοντέλων σε δεδομένα μετρήσεων. Αυτός ο αλγόριθμος επιτρέπει την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του μοντέλου, ώστε να είναι συμβατές με τα δεδομένα των προσομοιώσεων [64]. Επιπλέον, έγινε χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *Bisquare*. Η μέθοδος αυτή, ανήκει στην κατηγορία Μ-εκτιμητών και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για δεδομένα, που ενδέχεται να περιέχουν σφάλματα, καθώς αντιδρά ελάχιστα σε αυτά, προσφέροντας σταθερές και αξιόπιστες εκτιμήσεις [65]. Η συνδυασμένη χρήση του αλγορίθμου *Trust Region* με την ανθεκτική παλινδρόμηση τύπου *Bisquare* εξασφάλισε μια σταθερή προσαρμογή του μοντέλου με ακρίβεια στα δεδομένα.

Έτσι λοιπόν, αντικαθιστώντας τις μεταβλητές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο του *Απλού Εκθετικού Μοντέλου* στο *MATLAB* και λόγω της εξίσωση (3.18), για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του υποσταθμού προκύπτει:

$$R = \frac{1}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left[-1.085 + 2.867 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{0.2021 \cdot h^{0.4355} - 0.7671} \right] \quad (5.2)$$

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία για τον Πίνακα 4.1, θα γίνουν και οι Πίνακες 4.2 έως και 4.9. Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες, με σκοπό να εξετάσουμε την ποιότητα του μοντέλου για όλα τα σύνολα των προσομοιώσεων, που έγιναν. Στο Παράρτημα Α βρίσκονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών, που ελήφθησαν ως αρχική τιμή για κάθε περίπτωση.

Απλό Εκθετικό Μοντέλο				
Πίνακας	Εμβαδόν (m x m)	Μάτι (m)	R^2	Adjusted R^2
4.1	50 x 100	3	0.9998	0.9998
4.2		5	0.9998	0.9998
4.3		10	0.9998	0.9998
4.4	60 x 120	3	0.9998	0.9998
4.5		5	0.9998	0.9998
4.6		10	0.9998	0.9998
4.7	80 x 150	3	0.9998	0.9998
4.8		5	0.9998	0.9998
4.9		10	0.9998	0.9998
Μέσος Όρος:			0.9998	0.9998



Εικόνα 5.3: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Απλού Εκθετικού Μοντέλου για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.7.

5.3 Απλοποίηση & Προσαρμογή του Απλού Εκθετικού Μοντέλου

Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται στη διαδικασία απλοποίησης της πολυπλοκότητας του *Απλού Εκθετικού Μοντέλου* με σκοπό την περαιτέρω βελτιστοποίηση της εφαρμογής του στα δεδομένα μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η στρατηγική απλοποίησης είναι η αφαίρεση μεταβλητών που δεν επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση του μοντέλου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δοκιμές απαλοιφής μεταβλητών και τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$, τα οποία είναι σημαντικά για την αξιολόγηση της προσαρμογής. Στο Παράρτημα Α φαίνονται οι αρχικές τιμές, που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να παραχθούν τα παρακάτω αποτελέσματα.

1. Απαλοιφή μεταβλητής e

Άρα προκύπτει: $a + b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = a + b \cdot (K + 1) \cdot (c \cdot (h \cdot d))$

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο για κάθε σύνολο μετρήσεων που έχουμε στη διάθεσή μας, στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9984	0.9984
4.2		5	0.9984	0.9984
4.3		10	0.9983	0.9983
4.4	60 x 120	3	0.9990	0.9990
4.5		5	0.9990	0.9990
4.6		10	0.9986	0.9986
4.7	80 x 150	3	0.9992	0.9992
4.8		5	0.9992	0.9992
4.9		10	0.9991	0.9991
Μέσος Όρος:			0.9988	0.9988

2. Απαλοιφή μεταβλητής d

Άρα προκύπτει: $a + b \cdot (K + 1)^{c \cdot h + e}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = a + b \cdot (K + 1) \cdot (c \cdot h + e)$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9988	0.9988
4.2		5	0.9988	0.9988
4.3		10	0.9987	0.9987
4.4	60 x 120	3	0.9990	0.9990
4.5		5	0.9990	0.9990
4.6		10	0.9989	0.9989
4.7	80 x 150	3	0.9992	0.9992
4.8		5	0.9992	0.9992
4.9		10	0.9992	0.9992
Μέσος Όρος:			0.9990	0.9990

3. Απαλοιφή μεταβλητής c

Άρα προκύπτει: $a + b \cdot (K + 1)^{h \cdot d + e}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = a + b \cdot (K + 1) \cdot ((h \cdot d) + e)$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9804	0.9800
4.2		5	0.9996	0.9996
4.3		10	0.9996	0.9996

4.4	60 x 120	3	0.9996	0.9996
4.5		5	0.9996	0.9996
4.6		10	0.9996	0.9996
4.7	80 x 150	3	0.9997	0.9997
4.8		5	0.9997	0.9997
4.9		10	0.9997	0.9997
Μέσος Όρος:			0.9975	0.9975

4. Απαλοιφή μεταβλητών c & e

Άρα προκύπτει: $a + b \cdot (K + 1)^{h^d}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = a + b \cdot (K + 1)^{(h.^d)}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9162	0.9151
4.2		5	0.9162	0.9151
4.3		10	0.9133	0.9122
4.4	60 x 120	3	0.9132	0.9122
4.5		5	0.9130	0.9119
4.6		10	0.9098	0.9087
4.7	80 x 150	3	0.9075	0.9064
4.8		5	0.9067	0.9055
4.9		10	0.9064	0.9053
Μέσος Όρος:			0.9114	0.9103

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι δεν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

- $R^2 > 0.99$
- *Adjusted R²* > 0.99

Συνεπώς, είναι προφανές ότι η σχέση δεν είναι η βέλτιστη δυνατή.

5. Απαλοιφή μεταβλητής a

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = b \cdot (K + 1)^{(c \cdot (h.^d) + e)}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9983	0.9982
4.2		5	0.9983	0.9983
4.3		10	0.9985	0.9985
4.4	60 x 120	3	0.9984	0.9984
4.5		5	0.9987	0.9987
4.6		10	0.9990	0.9990

4.7	80 x 150	3	0.9986	0.9985
4.8		5	0.9980	0.9980
4.9		10	0.9990	0.9989
Μέσος Όρος:			0.9985	0.9985

6. Απαλοιφή μεταβλητής b

Άρα προκύπτει: $a + (K + 1)^{c \cdot h^d + e}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = a + (K + 1)^{(c \cdot (h.^d) + e)}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9868	0.9865
4.2		5	0.9869	0.9866
4.3		10	0.9877	0.9874
4.4	60 x 120	3	0.9918	0.9916
4.5		5	0.9920	0.9918
4.6		10	0.9928	0.9926
4.7	80 x 150	3	0.9963	0.9963
4.8		5	0.9964	0.9963
4.9		10	0.9967	0.9967
Μέσος Όρος:			0.9919	0.9918

7. Απαλοιφή μεταβλητών a & c

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{h^d + e}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = b \cdot (K + 1)^{(h.^d) + e}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9984	0.9984
4.2		5	0.9984	0.9984
4.3		10	0.9988	0.9988
4.4	60 x 120	3	0.9983	0.9983
4.5		5	0.9984	0.9984
4.6		10	0.9988	0.9988
4.7	80 x 150	3	0.9985	0.9985
4.8		5	0.9986	0.9986
4.9		10	0.9989	0.9989
Μέσος Όρος:			0.9986	0.9986

8. Απαλοιφή μεταβλητών a & e

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται: *Custom Equation* $z = f(h, K) = b \cdot (K + 1)^{(c \cdot (h.^d))}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9975	0.9974
4.2		5	0.9975	0.9974
4.3		10	0.9979	0.9979
4.4	60 x 120	3	0.9966	0.9965
4.5		5	0.9968	0.9967
4.6		10	0.9982	0.9982
4.7	80 x 150	3	0.9982	0.9982
4.8		5	0.9983	0.9983
4.9		10	0.9986	0.9986
Μέσος Όρος:			0.9977	0.9977

Στον κάτωθι πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο*.

Απλό Εκθετικό Μοντέλο		
Μεταβλητές	Μέσος Όρος	
	R^2	$Adjusted R^2$
Αρχική Σχέση	0.9998	0.9998
Απαλοιφή a	0.9985	0.9985
Απαλοιφή b	0.9919	0.9918
Απαλοιφή c	0.9975	0.9975
Απαλοιφή d	0.9990	0.9990
Απαλοιφή e	0.9988	0.9988
Απαλοιφή a, c	0.9986	0.9986
Απαλοιφή a, e	0.9977	0.9977
Απαλοιφή c, e	0.9114	0.9103

Παρατηρώντας τις παραπάνω δοκιμές απαλοιφής μεταβλητών, προκύπτει το συμπέρασμα ότι καλύτερα αποτελέσματα παράγονται όταν διαγράφεται η μεταβλητή d . Όμως, θεωρείται πως το βέλτιστο μοντέλο που δοκιμάστηκε είναι αυτό που δεν εντάσσει στην εξίσωση τις μεταβλητές a και c . Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι είναι επιθυμητό ένα βέλτιστο μοντέλο με τη μικρότερη δυνατή πολυπλοκότητα, πράγμα που ισχύει με την απαλοιφή περισσότερων μεταβλητών.

Ενδεικτικά, υπολογίζεται η εξίσωση για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9, με απαλοιφή των μεταβλητών a και c . Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, που επιλέχθηκαν, στοχεύουν στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$.

b	d	e
0.9611	0.9150	0.9218

Παρατηρείται ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

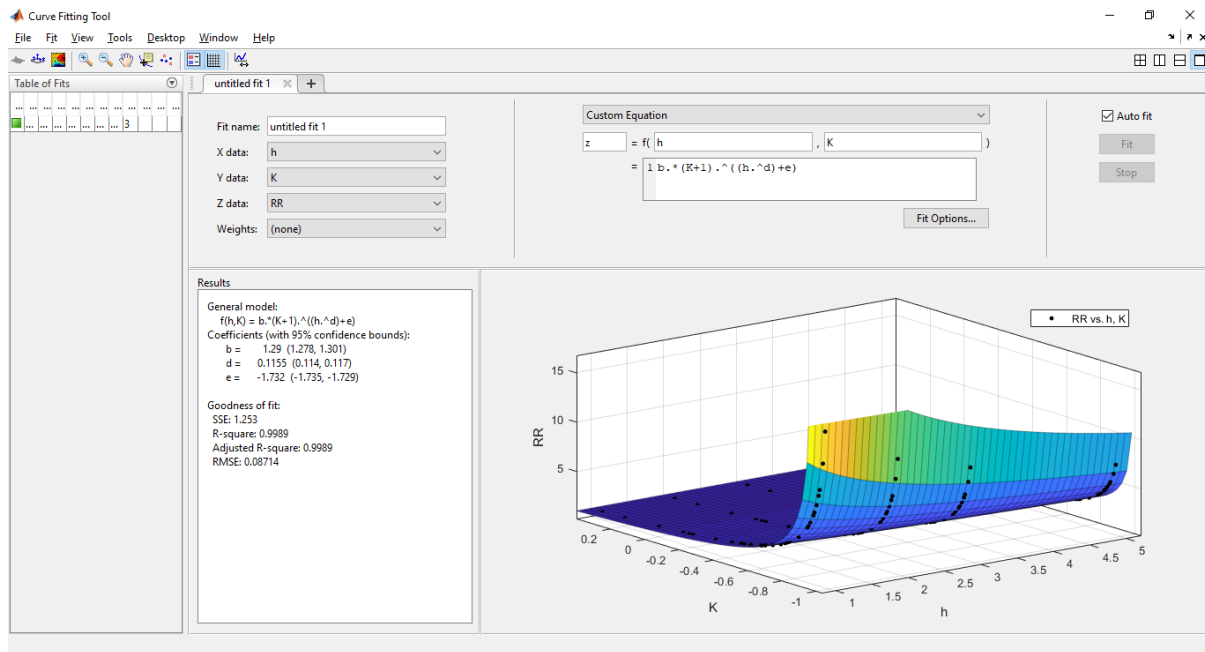
b	d	e
1.29	0.1155	-1.732

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

<i>SSE</i>	<i>R</i> ²	<i>Adjusted R</i> ²	<i>RMSE</i>
1.253	0.9989	0.9989	0.08714

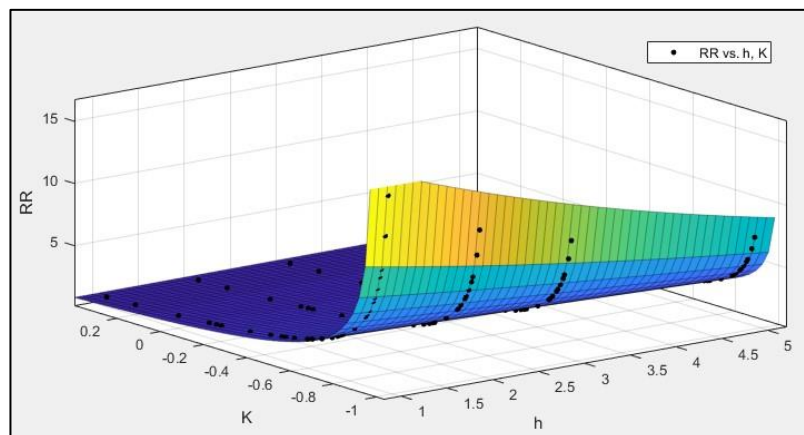
Έτσι λοιπόν, η εξίσωση που προκύπτει για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του υποσταθμού προκύπτει κάνοντας αντικατάσταση τις μεταβλητές, που υπολογίστηκαν από το μοντέλο του *Απλού Εκθετικού Μοντέλου* στο *MATLAB*. Άρα, από την εξίσωση (3.18) με απαλοιφή των μεταβλητών a και c προκύπτει:

$$R = \frac{1}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left[1.29 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right) h^{0.1155 - 1.732} \right] \quad (5.3)$$



Εικόνα 5.4: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Απλού Εκθετικού Μοντέλου για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9.

Παρουσιάζεται επίσης, μία προσαρμογή της επιφάνειας του Πίνακα 4.9, στην περίπτωση που διαγράφεται η μεταβλητή d .



Εικόνα 5.5: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Απλού Εκθετικού Μοντέλου με απαλοιφή της μεταβλητής d για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9.

5.4 Προσαρμογή του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε υποσταθμούς χρησιμοποιώντας το *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών* ξεκινά με την προσαρμογή του μοντέλου στα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων. Η ανάλυση αυτή εκτελείται με τη χρήση της εντολής *cftool* του *MATLAB*. Τα σύνολα των δεδομένων των προσομοιώσεων, που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο, εισάγονται στο λογισμικό για περαιτέρω ανάλυση.

Κατά την προσαρμογή, το *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών* προσπαθεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους του, έτσι ώστε να αντιστοιχούν στα δεδομένα των προσομοιώσεων. Σημαντικό ρόλο κατέχει η ακρίβεια της προσαρμογής, η οποία εξαρτάται από την αρχικοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου. Λόγω των πολλών μεταβλητών, το *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών* χαρακτηρίζεται από μεγάλη πολυπλοκότητα, αλλά προσφέρει περισσότερη ακρίβεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου δεν υπάρχει συγκεκριμένος αλγόριθμος για την εύρεσή τους και συχνά τοποθετούνται με βάση την εμπειρία και παρατηρήσεις.

Λαμβάνεται η εξίσωση του *Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών* (3.19).

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{RR}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \quad (5.4)$$

$$RR = \left[a + b \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{c \cdot h^d + e} + 0.1 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{q \cdot h^d + m} \right] \quad (5.5)$$

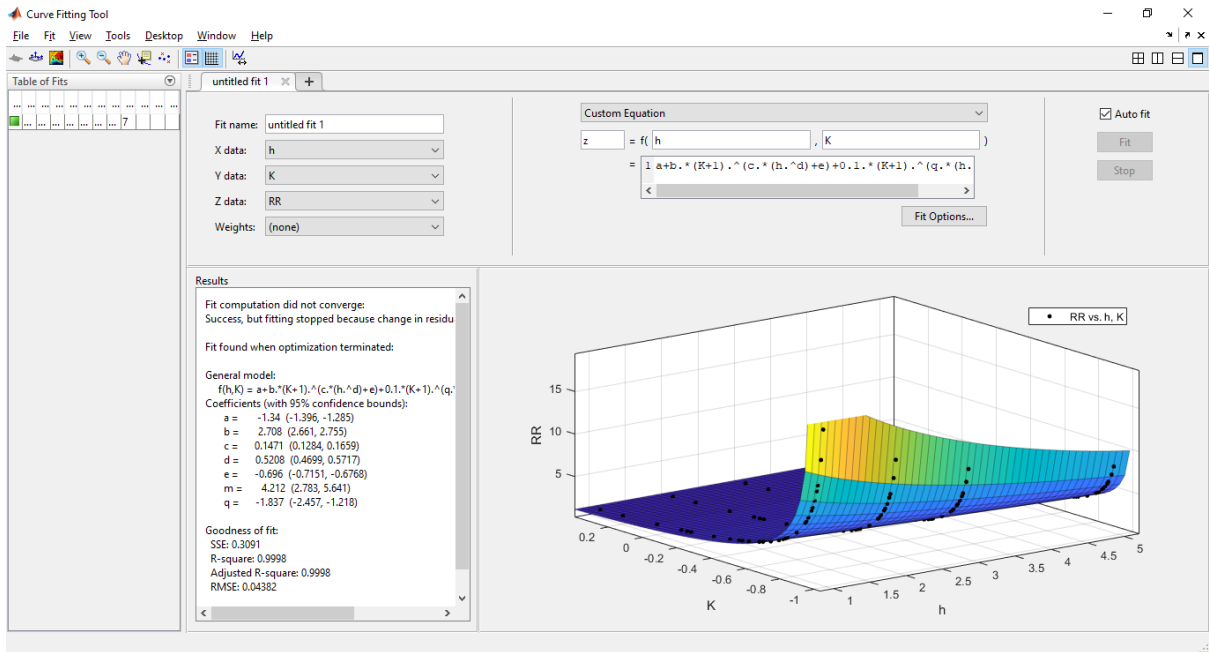
Με $K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ και R την αντίσταση γείωσης, έτσι στον κώδικα θα προστεθεί η παραπάνω εξίσωση για την προσαρμογή.

Ο κώδικας *MATLAB*, που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο ίδιος με το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο*.

Αφού εφαρμοστεί ο παραπάνω κώδικας, γίνεται χρήση της εντολής *cftool* και στο εμφανιζόμενο παράθυρο τοποθετούνται τα εξής στοιχεία:

- *X data*: h
- *Y data*: K
- *Z data*: RR
- *Custom Equation* $z = f(h, K) = a + b \cdot (K + 1)^{(c \cdot (h.^d) + e)} + 0.1 \cdot (K + 1)^{(q \cdot (h.^d) + m)}$

Στο πλαίσιο *Fit Options* επιλέγεται *Robust: Bisquare* και γενικά σε αυτό το πεδίο αλλάζουν οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, καθώς επίσης και το κατώτατο και ανώτατο διάστημα που επιτρέπεται να λαμβάνουν οι τιμές.



Εικόνα 5.6: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.4.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, που επιλέχθηκαν, αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 4.4, με σκοπό να παράγεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ είναι:

a	b	c	d	e	m	q
0.3963	0.8792	0.3854	0.6787	0.7577	0.0888	0.7430

Παρατηρείται, ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

a	b	c	d	e	m	q
-1.34	2.708	0.1471	0.5208	-0.696	4.212	-1.837

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

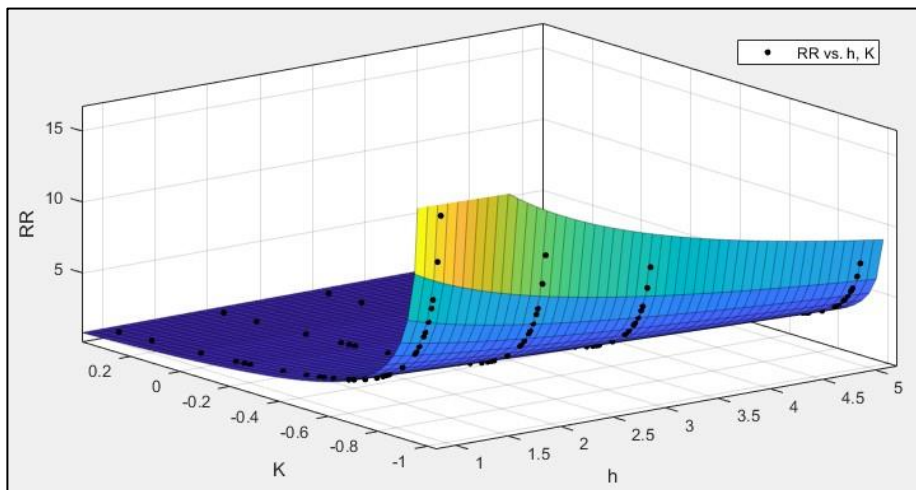
SSE	R^2	$Adjusted R^2$	$RMSE$
0.3091	0.9998	0.9998	0.04382

Έτσι, λοιπόν, αντικαθιστώντας τις μεταβλητές που υπολογίστηκαν από το Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών στο MATLAB και λόγω της εξίσωση (3.19), για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του υποσταθμού προκύπτει:

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{1}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \left[-1.34 + 2.708 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{0.1471 \cdot h^{0.5208} - 0.696} + 0.1 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-1.837 \cdot h^{0.5208} + 4.212} \right] \quad (5.6)$$

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για τον Πίνακα 4.4, θα γίνουν και οι υπόλοιποι οκτώ πίνακες. Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες, με σκοπό να εξεταστεί η ποιότητα του μοντέλου για όλα τα σύνολα των προσομοιώσεων που έγιναν. Στο Παράρτημα Β βρίσκονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών, που ελήφθησαν ως αρχική τιμή για κάθε περίπτωση.

Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών				
Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9998	0.9998
4.2		5	0.9998	0.9998
4.3		10	0.9997	0.9997
4.4	60 x 120	3	0.9998	0.9998
4.5		5	0.9998	0.9998
4.6		10	0.9998	0.9997
4.7	80 x 150	3	0.9998	0.9998
4.8		5	0.9995	0.9995
4.9		10	0.9998	0.9998
Μέσος Όρος:			0.9998	0.9997



Εικόνα 5.7: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.8.

5.5 Απλοποίηση & Προσαρμογή του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών

Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται στη διαδικασία απλοποίησης της πολυπλοκότητας του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών με σκοπό την περαιτέρω βελτιστοποίηση της εφαρμογής του στα δεδομένα μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η στρατηγική απλοποίησης είναι η αφαίρεση μεταβλητών που δεν επηρεάζουν σημαντικά στην απόκριση του μοντέλου. Αναμφισβήτητα, δε θα γίνει απαλοιφή των μεταβλητών m και q ταυτόχρονα, διότι προκύπτει το Απλό Εκθετικό Μοντέλο. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι δοκιμές απαλοιφής μεταβλητών και τα

αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$, τα οποία είναι σημαντικά για την αξιολόγηση της προσαρμογής. Στο Παράρτημα Β φαίνονται οι αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να παραχθούν τα παρακάτω αποτελέσματα.

1. Απαλοιφή μεταβλητής a

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e} + 0.1 \cdot (K + 1)^{q \cdot h^d + m}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = b \cdot (K+1)^{(c \cdot (h.^d)+e)} + 0.1 \cdot (K+1)^{(q \cdot (h.^d)+m)}$

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο για κάθε σύνολο μετρήσεων που έχουμε στη διάθεσή μας, στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9943	0.9941
4.2		5	0.9944	0.9942
4.3		10	0.9951	0.9949
4.4	60 x 120	3	0.9952	0.9950
4.5		5	0.9949	0.9947
4.6		10	0.9955	0.9953
4.7	80 x 150	3	0.9962	0.9961
4.8		5	0.9954	0.9952
4.9		10	0.9968	0.9967
Μέσος Όρος:			0.9953	0.9951

2. Απαλοιφή μεταβλητών a & c

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{h^d + e} + 0.1 \cdot (K + 1)^{q \cdot h^d + m}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = b \cdot (K+1)^{(h.^d)+e} + 0.1 \cdot (K+1)^{(q \cdot (h.^d)+m)}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9942	0.9940
4.2		5	0.9942	0.9940
4.3		10	0.9949	0.9948
4.4	60 x 120	3	0.9944	0.9943
4.5		5	0.9946	0.9945
4.6		10	0.9952	0.9950
4.7	80 x 150	3	0.9961	0.9960
4.8		5	0.9953	0.9951
4.9		10	0.9968	0.9967
Μέσος Όρος:			0.9951	0.9949

3. Απαλοιφή μεταβλητών a, c & m

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{h^d+e} + 0.1 \cdot (K + 1)^{q \cdot h^d}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = b \cdot (K+1)^{(h.^d)+e} + 0.1 \cdot (K+1)^{(q \cdot (h.^d))}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9969	0.9969
4.2		5	0.9969	0.9969
4.3		10	0.9974	0.9973
4.4	60 x 120	3	0.9969	0.9968
4.5		5	0.9970	0.9970
4.6		10	0.9974	0.9973
4.7	80 x 150	3	0.9972	0.9971
4.8		5	0.9973	0.9973
4.9		10	0.9979	0.9979
Μέσος Όρος:			0.9972	0.9972

4. Απαλοιφή μεταβλητών a, c & q

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{h^d+e} + 0.1 \cdot (K + 1)^{h^d+m}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = b \cdot (K+1)^{(h.^d)+e} + 0.1 \cdot (K+1)^{(h.^d)+m}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9952	0.9951
4.2		5	0.9952	0.9951
4.3		10	0.9965	0.9964
4.4	60 x 120	3	0.9955	0.9954
4.5		5	0.9956	0.9955
4.6		10	0.9962	0.9962
4.7	80 x 150	3	0.9961	0.9960
4.8		5	0.9964	0.9963
4.9		10	0.9958	0.9957
Μέσος Όρος:			0.9958	0.9957

5. Απαλοιφή μεταβλητών b & c

Άρα προκύπτει: $a + (K + 1)^{h^d+e} + 0.1 \cdot (K + 1)^{q \cdot h^d+m}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = a + (K+1)^{(h.^d)+e} + 0.1 \cdot (K+1)^{(q \cdot (h.^d)+m)}$

Πίνακας	Εμβαδόν (m x m)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9811	0.9807
4.2		5	0.9811	0.9806
4.3		10	0.9818	0.9813
4.4	60 x 120	3	0.9869	0.9866
4.5		5	0.9854	0.9850
4.6		10	0.9862	0.9859
4.7	80 x 150	3	0.9907	0.9904
4.8		5	0.9908	0.9906
4.9		10	0.9934	0.9932
Μέσος Όρος:			0.9864	0.9860

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι δεν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

- $R^2 > 0.99$
- *Adjusted R²* > 0.99

Συνεπώς, είναι προφανές ότι η σχέση δεν είναι η βέλτιστη δυνατή.

6. Απαλοιφή μεταβλητών c & e

Άρα προκύπτει: $a + b \cdot (K + 1)^{h^d} + 0.1 \cdot (K + 1)^{q \cdot h^d + m}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = a + b \cdot (K + 1)^{(h.^d)} + 0.1 \cdot (K + 1)^{(q \cdot (h.^d) + m)}$

Πίνακας	Εμβαδόν (m x m)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9848	0.9844
4.2		5	0.9844	0.9840
4.3		10	0.9843	0.9840
4.4	60 x 120	3	0.9850	0.9846
4.5		5	0.9855	0.9851
4.6		10	0.9855	0.9851
4.7	80 x 150	3	0.9680	0.9856
4.8		5	0.9843	0.9839
4.9		10	0.9833	0.9828
Μέσος Όρος:			0.9828	0.9844

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι δεν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

- $R^2 > 0.99$
- *Adjusted R²* > 0.99

Συνεπώς, είναι προφανές ότι η σχέση δεν είναι η βέλτιστη δυνατή.

7. Απαλοιφή μεταβλητών c & q

Άρα προκύπτει: $a + b \cdot (K + 1)^{h^d+e} + 0.1 \cdot (K + 1)^{h^d+m}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = a + b \cdot (K+1)^{(h.^d)+e} + 0.1 \cdot (K+1)^{(h.^d)+m}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9998	0.9998
4.2		5	0.9998	0.9998
4.3		10	0.9997	0.9997
4.4	60 x 120	3	0.9998	0.9998
4.5		5	0.9998	0.9998
4.6		10	0.9998	0.9998
4.7	80 x 150	3	0.9998	0.9997
4.8		5	0.9998	0.9998
4.9		10	0.9998	0.9998
Μέσος Όρος:			0.9998	0.9998

8. Απαλοιφή μεταβλητών a , d & e

Άρα προκύπτει: $b \cdot (K + 1)^{c \cdot h} + 0.1 \cdot (K + 1)^{q \cdot h+m}$.

Στο *MATLAB* η εξίσωση γίνεται:

Custom Equation $z = f(h, K) = b \cdot (K+1)^{(c \cdot h)} + 0.1 \cdot (K+1)^{(q \cdot h+m)}$

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9333	0.9321
4.2		5	0.9333	0.9321
4.3		10	0.9347	0.9335
4.4	60 x 120	3	0.9425	0.9414
4.5		5	0.9428	0.9418
4.6		10	0.9440	0.9430
4.7	80 x 150	3	0.9540	0.9531
4.8		5	0.9542	0.9534
4.9		10	0.9550	0.9542
Μέσος Όρος:			0.9438	0.9427

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι δεν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

- $R^2 > 0.99$
- *Adjusted R²* > 0.99

Συνεπώς, είναι προφανές ότι η σχέση δεν είναι η βέλτιστη δυνατή.

Στον κάτωθι πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα, που προέκυψαν για το Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών.

Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών		
Μεταβλητές	Μέσος Όρος	
	R^2	<i>Adjusted R²</i>
Αρχική Σχέση	0.9998	0.9997
Απαλοιφή a	0.9953	0.9951
Απαλοιφή a, c	0.9951	0.9949
Απαλοιφή b, c	0.9864	0.9860
Απαλοιφή c, e	0.9828	0.9844
Απαλοιφή c, q	0.9998	0.9998
Απαλοιφή a, c, m	0.9972	0.9972
Απαλοιφή a, c, q	0.9958	0.9957
Απαλοιφή a, d, e	0.9438	0.9427

Παρατηρώντας τις παραπάνω δοκιμές απαλοιφής μεταβλητών, εξάγεται το συμπέρασμα ότι καλύτερα αποτελέσματα παράγονται όταν διαγράφονται οι μεταβλητές c και q . Έτσι, θεωρείται πως το βέλτιστο μοντέλο που δοκιμάστηκε είναι αυτό που δεν εντάσσει στην εξίσωση τις μεταβλητές a , c και m . Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι είναι επιθυμητό ένα βέλτιστο μοντέλο με τη μικρότερη δυνατή πολυπλοκότητα, πράγμα που ισχύει με την απαλοιφή περισσότερων μεταβλητών.

Ενδεικτικά, υπολογίζεται η εξίσωση για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9, με απαλοιφή των μεταβλητών a , c και m . Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, που επιλέχθηκαν, στοχεύουν στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R²*.

b	d	e	q
0.5961	0.7094	0.7547	0.0760

Παρατηρείται ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

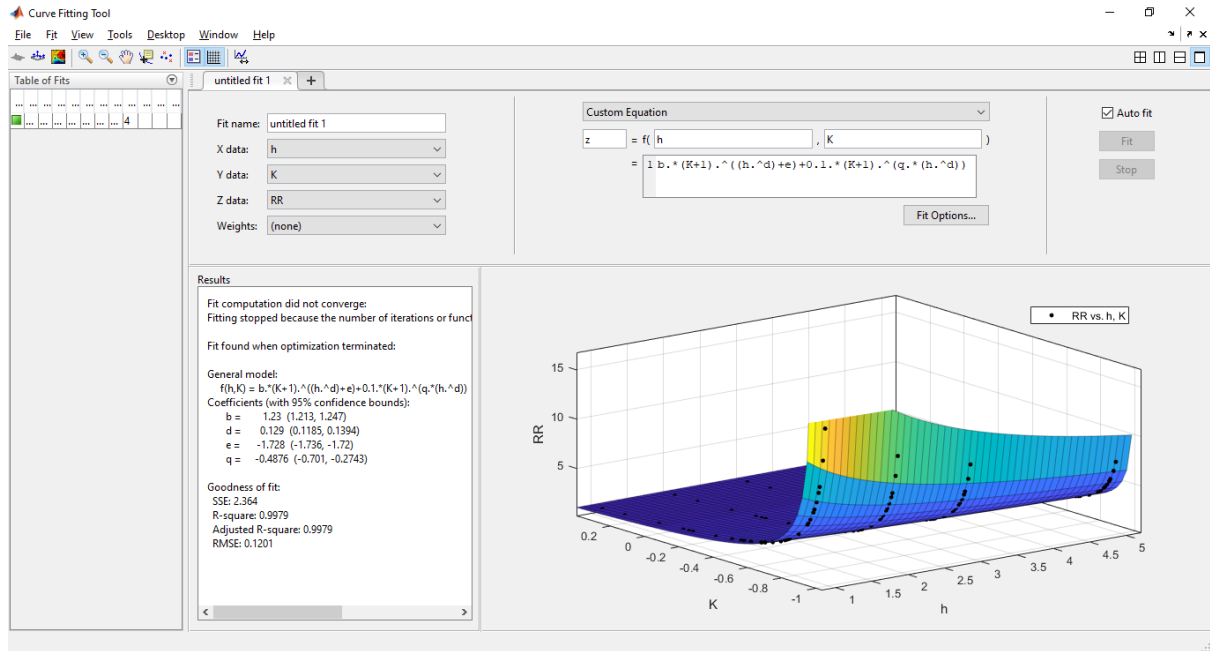
b	d	e	q
1.23	0.129	-1.728	-0.4876

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

<i>SSE</i>	R^2	<i>Adjusted R²</i>	<i>RMSE</i>
2.364	0.9979	0.9979	0.1201

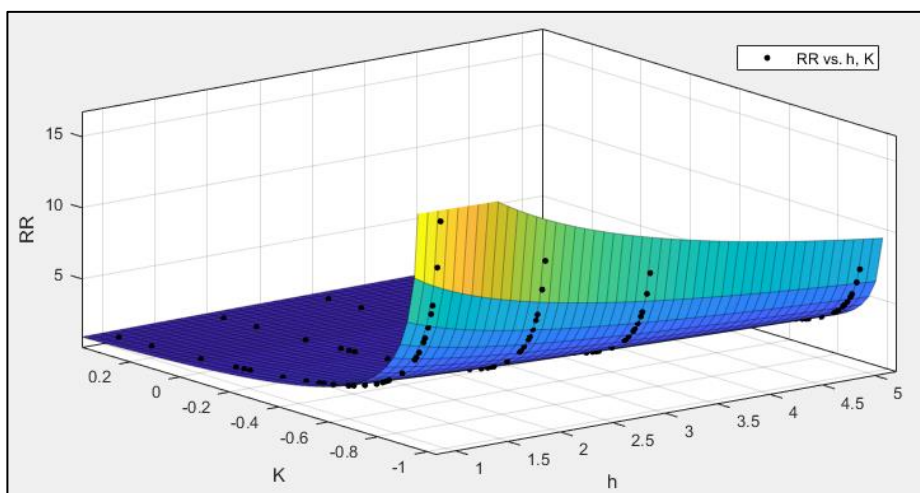
Έτσι λοιπόν, αντικαθιστώντας τις μεταβλητές που υπολογίστηκαν από το Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών στο *MATLAB* και λόγω της εξίσωσης (3.19), με απαλοιφή των μεταβλητών a , c και m προκύπτει για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του υποσταθμού:

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{1}{100 \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \left[1.23 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right) h^{0.129 - 1.728} + 0.1 \cdot \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-0.4876 \cdot h^{0.129}} \right] \quad (5.7)$$



Εικόνα 5.8: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9.

Παρουσιάζεται επίσης, μία προσαρμογή της επιφάνειας του Πίνακα 4.9, στην περίπτωση που διαγράφονται οι μεταβλητές c και q .



Εικόνα 5.9: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Απλού Εκθετικού Μοντέλου με απαλοιφή των μεταβλητών c και q για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9.

5.6 Προσαρμογή του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε υποσταθμούς, χρησιμοποιώντας το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*, ξεκινά με την προσαρμογή του μοντέλου στα διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων. Η ανάλυση αυτή εκτελείται με τη χρήση της εντολής *cftool* του *MATLAB*. Τα σύνολα των δεδομένων των προσομοιώσεων, που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο, εισάγονται στο λογισμικό για περαιτέρω ανάλυση.

Κατά την προσαρμογή, το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* προσπαθεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους του έτσι ώστε να αντιστοιχούν στα δεδομένα των προσομοιώσεων. Σημαντικό ρόλο κατέχει η ακρίβεια της προσαρμογής, η οποία εξαρτάται από την αρχικοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου δεν υπάρχει συγκεκριμένος αλγόριθμος για την εύρεσή τους και συχνά τοποθετούνται με βάση την εμπειρία και παρατηρήσεις.

Λαμβάνεται η απλοποιημένη εξίσωση του *Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού* (3.22).

$$R(\rho_1, \rho_2, h, E) = a \left[\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{m-1} \cdot \left[\frac{1}{E} \right]^{n-1}$$

Δεδομένου ότι η εντολή *cftool* του λογισμικού *MATLAB* δέχεται έως και τρεις μεταβλητές, οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι σχέσεις (3.23), (3.24) και (3.25):

$$RR = R \cdot K_1 \cdot K_2$$

$$K_1 = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}}$$

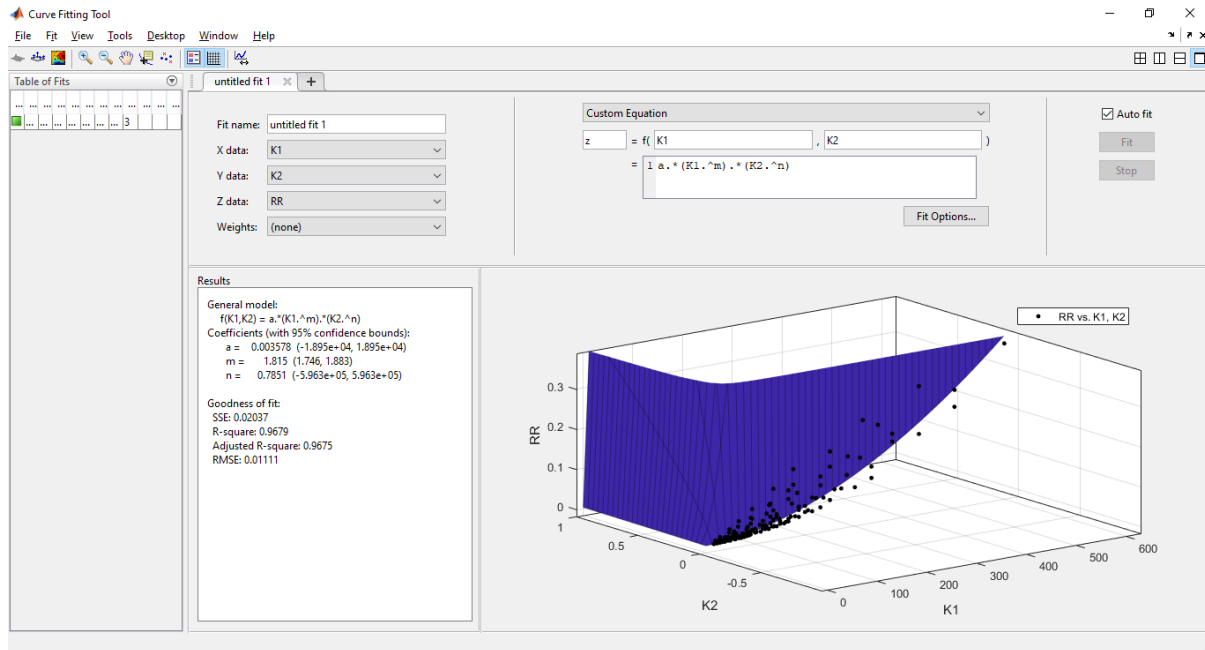
$$K_2 = 1/E$$

Ο κώδικας *MATLAB* που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο ακόλουθος [57].

```
r1=Var1; % ειδική αντίσταση 1ου στρώματος
r2=Var2; % ειδική αντίσταση 2ου στρώματος
h=Var3; % ύψος 1ου στρώματος
R=Var4; % αντίσταση γείωσης προσομοιώσεων
K1=r1.*r2./(r1+r2./h);
E=Var5; % εμβαδό πλέγματος
K2=1./E;
RR=R.*K1.*K2;
x=[r1;r2;h;E;R;]';
```

Αφού εφαρμοστεί ο παραπάνω κώδικας, στη συνέχεια γίνεται χρήση της εντολής *cftool* και στο εμφανιζόμενο παράθυρο τοποθετούνται τα εξής στοιχεία:

- *X data: K1*
- *Y data: K2*
- *Z data: RR*
- *Custom Equation $z = f(K1, K2) = a \cdot (K1.^m) \cdot (K2.^n)$*



Εικόνα 5.10: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.6.

Στο πλαίσιο *Fit Options* επιλέγεται *Robust: Bisquare* και γενικά σε αυτό το πεδίο είναι δυνατό να αλλαχθούν οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, καθώς επίσης και το κατώτατο και ανώτατο διάστημα που επιτρέπεται να λαμβάνουν οι τιμές.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 4.6, με σκοπό να παράγεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R^2* είναι:

<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
0.1318	0.8659	0.7702

Παρατηρείται ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
0.003578	1.815	0.7851

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

<i>SSE</i>	<i>R</i> ²	<i>Adjusted R</i> ²	<i>RMSE</i>
0.02037	0.9679	0.9675	0.01111

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες, με σκοπό να εξεταστεί η ποιότητα του μοντέλου για όλα τα σύνολα των προσομοιώσεων που έγιναν. Στο Παράρτημα Γ βρίσκονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών, που ελήφθησαν ως αρχική τιμή για κάθε περίπτωση.

Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού				
Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9676	0.9672
4.2		5	0.9675	0.9671
4.3		10	0.9681	0.9677
4.4	60 x 120	3	0.9671	0.9667
4.5		5	0.9671	0.9667
4.6		10	0.9679	0.9675
4.7	80 x 150	3	0.9633	0.9628
4.8		5	0.9638	0.9634
4.9		10	0.9643	0.9639
Μέσος Όρος:			0.9663	0.9659

Παρατηρείται ότι σε αυτό το μοντέλο τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά και δεν λαμβάνουν τιμές μέσα στα πλαίσια βελτιστοποίησης των παρακάτω σχέσεων:

- $R^2 > 0.99$
- $Adjusted R^2 > 0.99$

Έγιναν στη συνέχεια δοκιμές απαλοιφής μεταβλητών, αλλά τα αποτελέσματα εξακολουθούσαν να μην είναι ικανοποιητικά. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει προσπάθεια να βελτιστοποιηθεί το μοντέλο κάνοντας τροποποιήσεις.

5.7 Βελτιστοποίηση του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει προσπάθεια να βελτιωθεί το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* τροποποιώντας τα μεγέθη K_1 και K_2 . Να σημειωθεί ότι, οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στα μεγέθη αυτά δεν ακολουθούν συγκεκριμένη λογιστική και γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι σε αποδεκτά πλαίσια. Έτσι, για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου δεν υπάρχει συγκεκριμένος αλγόριθμος για την εύρεσή τους και συχνά τοποθετούνται βάσει εμπειρίας και παρατηρήσεων.

1 ^η Τροποποίηση
$K_1 = \rho_1 \cdot h$
$K_2 = \frac{100 \cdot \rho_2}{E + \rho_1}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1=r1.*h;$
- $K2=100.*r2./(E+r1);$

Εφαρμόζοντας τον παραπάνω κώδικα του *Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού* με τις συγκεκριμένες αλλαγές στο K_1 και K_2 , στη συνέχεια γίνεται χρήση της εντολής *cftool* και στο εμφανιζόμενο παράθυρο τοποθετούνται τα εξής στοιχεία:

- *X data: K1*
- *Y data: K2*
- *Z data: RR*
- *Custom Equation $z = f(K1, K2) = a \cdot (K1.^m) \cdot (K2.^n)$*

Ακριβώς τα ίδια δηλαδή με παραπάνω. Αυτό θα καθιερωθεί για τις περιπτώσεις στη συνέχεια.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών που επιλέχθηκαν, αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 4.6, με σκοπό να παράγεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R²* είναι:

<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
0.4003	0.3540	0.0540

Παρατηρείται, ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

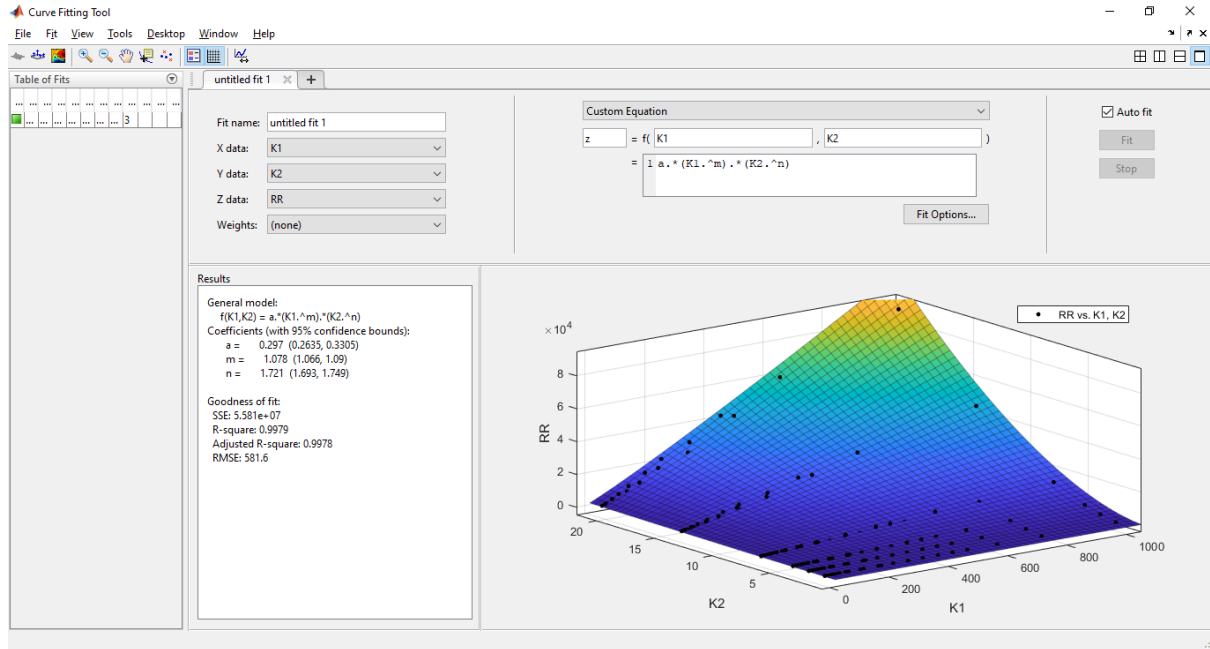
<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
0.297	1.078	1.721

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

<i>SSE</i>	<i>R²</i>	<i>Adjusted R²</i>	<i>RMSE</i>
$5.581 \cdot 10^7$	0.9979	0.9978	581.6

Έτσι λοιπόν, αντικαθιστώντας τις μεταβλητές που υπολογίστηκαν από το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* στο *MATLAB* και λόγω της εξίσωσης (3.22), για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του υποσταθμού προκύπτει:

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = 0.297 \left[\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{1.078-1} \cdot \left[\frac{1}{7200} \right]^{1.721-1} \quad (5.8)$$



Εικόνα 5.11: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.6.

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες, με σκοπό να εξεταστεί η ποιότητα του μοντέλου για όλα τα σύνολα των προσομοιώσεων που έγιναν. Στο Παράρτημα Γ βρίσκονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών που ελήφθησαν ως αρχική τιμή για κάθε περίπτωση.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9975	0.9975
4.2		5	0.9975	0.9975
4.3		10	0.9974	0.9974
4.4	60 x 120	3	0.9979	0.9979
4.5		5	0.9979	0.9979
4.6		10	0.9979	0.9978
4.7	80 x 150	3	0.9983	0.9983
4.8		5	0.9983	0.9983
4.9		10	0.9983	0.9983
Μέσος Όρος:			0.9979	0.9979

2 ^η Τροποποίηση
$K_1 = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2/h}$
$K_2 = \frac{100 \cdot \rho_1}{E}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1=r1.*r2./(r1+r2./h);$
- $K2=100.*r1./E;$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R²* για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν (m x m)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9918	0.9917
4.2		5	0.9919	0.9918
4.3		10	0.9920	0.9919
4.4	60 x 120	3	0.9919	0.9918
4.5		5	0.9919	0.9918
4.6		10	0.9921	0.9920
4.7	80 x 150	3	0.9919	0.9918
4.8		5	0.9919	0.9918
4.9		10	0.9920	0.9919
Μέσος Όρος:			0.9919	0.9918

3 ^η Τροποποίηση
$K_1 = \rho_1 \cdot h$
$K_2 = \frac{100 \cdot \rho_2 \cdot h}{E + \rho_1}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1=r1.*h;$
- $K2=100.*r2.*h./(E+r1);$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R²* για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9969	0.9969
4.2		5	0.9969	0.9969
4.3		10	0.9969	0.9969
4.4	60 x 120	3	0.9971	0.9970
4.5		5	0.9971	0.9971
4.6		10	0.9971	0.9971
4.7	80 x 150	3	0.9973	0.9973
4.8		5	0.9973	0.9973
4.9		10	0.9973	0.9973
Μέσος Όρος:			0.9971	0.9971

4^η Τροποποίηση

$$K_1 = \rho_1 \cdot h$$

$$K_2 = \frac{100 \cdot \rho_1 \cdot h}{E + \rho_2}$$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1=r1.*h;$
- $K2=100.*r1.*h./(E+r2);$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R²* για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9973	0.9972
4.2		5	0.9973	0.9973
4.3		10	0.9973	0.9973
4.4	60 x 120	3	0.9961	0.9961
4.5		5	0.9963	0.9963
4.6		10	0.9966	0.9965
4.7	80 x 150	3	0.9902	0.9901
4.8		5	0.9900	0.9899
4.9		10	0.9902	0.9900
Μέσος Όρος:			0.9946	0.9945

5 ^η Τροποποίηση
$K_1 = \rho_1 \cdot h^2$
$K_2 = \frac{100 \cdot \rho_2}{E + \rho_1}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1=r1.*h.*h;$
- $K2=100.*r2./(E+r1);$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R²* για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν (m x m)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9983	0.9983
4.2		5	0.9983	0.9983
4.3		10	0.9983	0.9983
4.4	60 x 120	3	0.9986	0.9985
4.5		5	0.9986	0.9985
4.6		10	0.9986	0.9985
4.7	80 x 150	3	0.9988	0.9988
4.8		5	0.9988	0.9988
4.9		10	0.9988	0.9988
Μέσος Όρος:			0.9986	0.9985

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα, που προέκυψαν για το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*.

Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού		
Τροποποιήσεις	Μέσος Όρος	
	R^2	<i>Adjusted R²</i>
Αρχική Σχέση	0.9663	0.9659
1 ^η Τροποποίηση	0.9979	0.9979
2 ^η Τροποποίηση	0.9919	0.9918
3 ^η Τροποποίηση	0.9971	0.9971
4 ^η Τροποποίηση	0.9946	0.9945
5 ^η Τροποποίηση	0.9986	0.9985

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα των προσομοιώσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο στόχος επιτεύχθηκε με το να βελτιστοποιηθεί το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*, πετυχαίνοντας πολύ καλά και αποδεκτά αποτελέσματα. Έτσι, η τροποποίηση που δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι η 5^η.

Ενδεικτικά, υπολογίζεται η εξίσωση για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9, με βάση την 5η τροποποίηση. Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών που επιλέχθηκαν, στοχεύουν στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$.

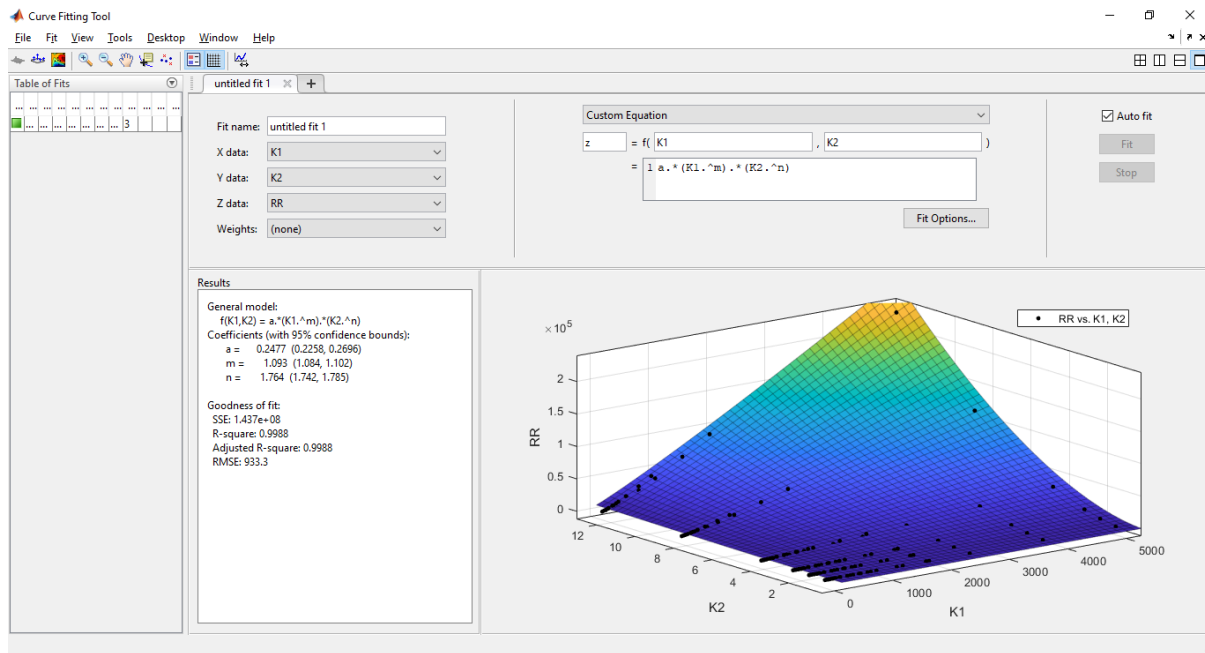
b	d	e
0.8415	0.4161	0.5079

Παρατηρείται ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

b	d	e
0.2477	1.093	1.764

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

SSE	R^2	$Adjusted R^2$	$RMSE$
$1.437 \cdot 10^8$	0.9988	0.9988	933.3



Εικόνα 5.12: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9.

Έτσι, λοιπόν, αντικαθιστώντας τις μεταβλητές που υπολογίστηκαν από το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* στο *MATLAB* και λόγω της εξίσωσης (3.22), για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του υποσταθμού προκύπτει:

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = 0.2477 \left[\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{1.093-1} \cdot \left[\frac{1}{12000} \right]^{1.764-1} \quad (5.9)$$

5.8 Προσαρμογή του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού με Προσθήκη του Εμβαδού Ματιού

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει προσπάθεια να προσαρμοστεί το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* προσθέτοντας το *Εμβαδόν Ματιού* (E_{mesh}). Στη συνέχεια, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το μοντέλο θα γίνει τροποποίηση στα μεγέθη K_1 και K_2 (όπως προηγουμένως). Να σημειωθεί, ότι οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στα μεγέθη αυτά δεν ακολουθούν συγκεκριμένη λογιστική και γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι σε αποδεκτά πλαίσια. Επίσης, για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου δεν υπάρχει συγκεκριμένος αλγόριθμος για την εύρεσή τους και συχνά τοποθετούνται με βάση την εμπειρία και παρατηρήσεις.

1 ^η Τροποποίηση
$K_1 = E_{mesh} \cdot \rho_1 \cdot h$
$K_2 = \frac{\rho_2}{E + \rho_1}$

Ο κώδικας *MATLAB* που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο ακόλουθος.

```

r1=Var1;           % ειδική αντίσταση 1ου στρώματος
r2=Var2;           % ειδική αντίσταση 2ου στρώματος
h=Var3;            % ύψος 1ου στρώματος
R=Var4;            % αντίσταση γείωσης προσομοιώσεων
Emesh=Var6;        % εμβαδό ματιού
K1=Emesh.*r1.*h;
E=Var5;            % εμβαδό πλέγματος
K2=r2./(E+r1);
RR=R.*K1.*K2;
x=[r1;r2;h;E;Emesh;R;]';

```

Αφού εφαρμοστεί ο παραπάνω κώδικας, στη συνέχεια γίνεται χρήση της εντολής *cftool* και στο εμφανιζόμενο παράθυρο τοποθετούνται τα εξής στοιχεία:

- *X data*: $K1$
- *Y data*: $K2$
- *Z data*: RR
- *Custom Equation* $z = f(K1, K2) = a \cdot (K1.^m) \cdot (K2.^n)$

Ακριβώς τα ίδια δηλαδή με παραπάνω. Αυτό θα καθιερωθεί για όλες τις περιπτώσεις στη συνέχεια.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, που επιλέχθηκαν, αντιστοιχούν στα δεδομένα του Πίνακα 4.6, με σκοπό να παράγεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ είναι:

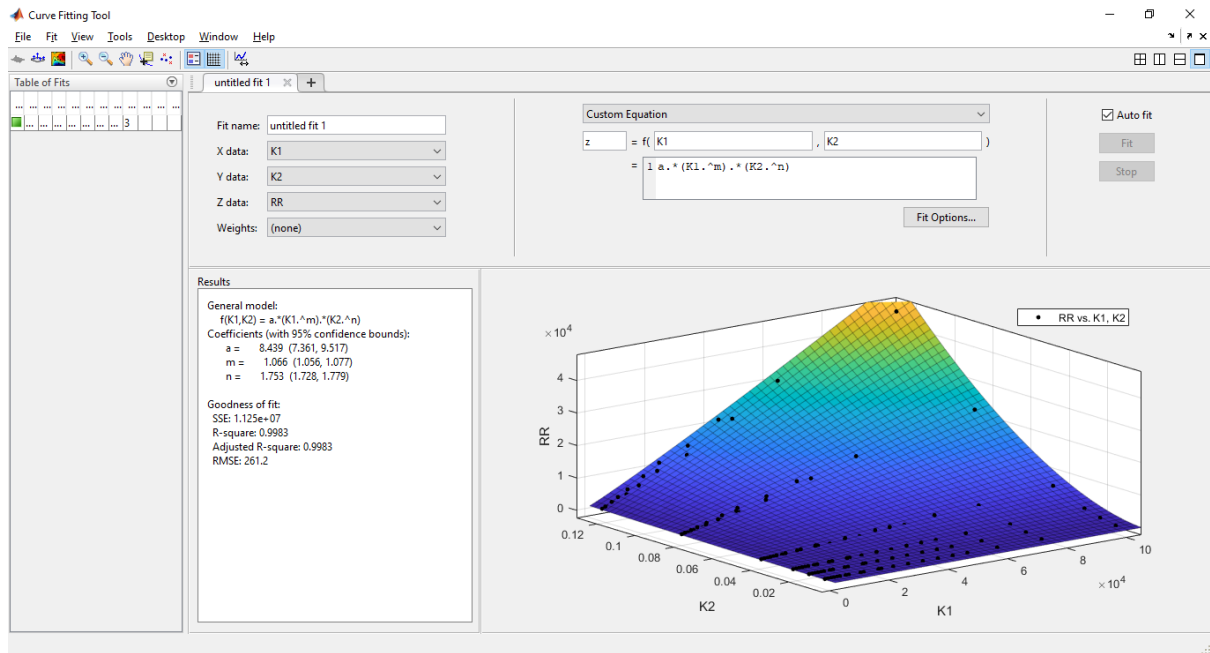
a	m	n
0.0028	0.3471	0.8001

Παρατηρείται ότι οι μεταβλητές λαμβάνουν τις εξής τελικές τιμές με την προσαρμογή του μοντέλου.

a	m	n
8.439	1.066	1.753

Έπειτα, η ποιότητα της προσαρμογής χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη.

SSE	R^2	$Adjusted R^2$	$RMSE$
$1.125 \cdot 10^7$	0.9983	0.9983	261.2



Εικόνα 5.13: Προσαρμογή της επιφάνειας σύμφωνα με τη σχέση του Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού με προσθήκη Εμβαδού Ματιού για τις μετρήσεις του Πίνακα 4.9.

Έτσι λοιπόν, αντικαθιστώντας τους μεταβλητές που υπολογίστηκαν από το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* στο *MATLAB* και λόγω τους εξίσωσης (3.22), για τον υπολογισμό τους αντίστασης γείωσης του υποσταθμού προκύπτει:

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = 8.439 \left[\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{1.066-1} \cdot \left[\frac{1}{12000} \right]^{1.753-1} \quad (5.10)$$

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες, με σκοπό να εξεταστεί η ποιότητα του μοντέλου για όλα τα σύνολα των προσομοιώσεων που έγιναν. Στο Παράρτημα Δ βρίσκονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών που ελήφθησαν ως αρχική τιμή για κάθε περίπτωση.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9975	0.9975
4.2		5	0.9975	0.9975
4.3		10	0.9974	0.9974
4.4	60 x 120	3	0.9979	0.9979
4.5		5	0.9979	0.9979
4.6		10	0.9979	0.9978
4.7	80 x 150	3	0.9983	0.9983
4.8		5	0.9983	0.9983
4.9		10	0.9983	0.9983
Μέσος Όρος:			0.9979	0.9979

2^η Τροποποίηση
$K_1 = \frac{E_{mesh} \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2/h}$
$K_2 = \frac{\rho_1}{E}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1 = E_{mesh} \cdot r1 \cdot r2 / (r1 + r2/h);$
- $K2 = r1/E;$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9918	0.9917
4.2		5	0.9919	0.9918
4.3		10	0.9920	0.9919
4.4	60 x 120	3	0.9919	0.9918
4.5		5	0.9919	0.9918
4.6		10	0.9921	0.9920
4.7	80 x 150	3	0.9919	0.9918
4.8		5	0.9919	0.9919
4.9		10	0.9921	0.9920
Μέσος Όρος:			0.9919	0.9919

3 ^η Τροποποίηση
$K_1 = E_{mesh} \cdot \rho_1 \cdot h$
$K_2 = \frac{\rho_2 \cdot h}{E + \rho_1}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1 = E_{mesh} \cdot r1 \cdot h;$
- $K2 = r2 \cdot h / (E + r1);$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν (m x m)	Μάτι (m)	R^2	$Adjusted R^2$
4.1	50 x 100	3	0.9969	0.9969
4.2		5	0.9969	0.9969
4.3		10	0.9969	0.9969
4.4	60 x 120	3	0.9971	0.9970
4.5		5	0.9971	0.9971
4.6		10	0.9971	0.9971
4.7	80 x 150	3	0.9973	0.9973
4.8		5	0.9973	0.9973
4.9		10	0.9973	0.9973
Μέσος Όρος:			0.9971	0.9971

4 ^η Τροποποίηση
$K_1 = E_{mesh} \cdot \rho_1 \cdot h$
$K_2 = \frac{\rho_1 \cdot h}{E + \rho_2}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1 = E_{mesh} \cdot r1 \cdot h;$
- $K2 = r1 \cdot h / (E + r2);$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9927	0.9926
4.2		5	0.9906	0.9905
4.3		10	0.9890	0.9889
4.4	60 x 120	3	0.9880	0.9878
4.5		5	0.9855	0.9853
4.6		10	0.9842	0.9840
4.7	80 x 150	3	0.9840	0.9838
4.8		5	0.9840	0.9838
4.9		10	0.9815	0.9913
Μέσος Όρος:			0.9866	0.9876

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι δεν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

- $R^2 > 0.99$
- *Adjusted R²* > 0.99

Συνεπώς, είναι προφανές ότι η σχέση δεν είναι η βέλτιστη δυνατή.

5 ^η Τροποποίηση
$K_1 = E_{mesh} \cdot \rho_1 \cdot h^2$
$K_2 = \frac{\rho_2}{E + \rho_1}$

Οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στον κώδικα του *MATLAB* είναι:

- $K1 = E_{mesh} \cdot r1 \cdot h \cdot h;$
- $K2 = r2 ./ (E + r1);$

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και *Adjusted R²* για τους υπόλοιπους πίνακες.

Πίνακας	Εμβαδόν ($m \times m$)	Μάτι (m)	R^2	<i>Adjusted R²</i>
4.1	50 x 100	3	0.9983	0.9983
4.2		5	0.9983	0.9983
4.3		10	0.9983	0.9983
4.4	60 x 120	3	0.9986	0.9985
4.5		5	0.9986	0.9985
4.6		10	0.9986	0.9985
4.7	80 x 150	3	0.9988	0.9988
4.8		5	0.9988	0.9988
4.9		10	0.9988	0.9988
Μέσος Όρος:			0.9986	0.9985

Στον κάτωθι πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*.

Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού		
Τροποποιήσεις	Μέσος Όρος	
	R^2	Adjusted R^2
1 ^η Τροποποίηση	0.9979	0.9979
2 ^η Τροποποίηση	0.9919	0.9919
3 ^η Τροποποίηση	0.9971	0.9971
4 ^η Τροποποίηση	0.9866	0.9876
5 ^η Τροποποίηση	0.9986	0.9985

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα των προσομοιώσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες με αυτές που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς, το εμβαδόν ματιού δεν επηρεάζει τους υπολογισμούς και δεν υπάρχει κάποια καλύτερη βελτιστοποίηση.

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Σύνοψη

Το 1^ο Κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής εργασίας περιλαμβάνει μία σύντομη ιστορική αναδρομή σχετικά με τους Υποσταθμούς Υψηλής Τάσης, προσφέροντας ένα εισαγωγικό υπόβαθρο για το θέμα. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των υποσταθμών, όπως ο εξοπλισμός, που τον απαρτίζει, συμπεριλαμβανομένου του Μετασχηματιστή Ισχύος. Αναλύονται οι διάφοροι τύποι Υποσταθμών, όπως είναι ο Υποσταθμός Μεταφοράς και Διανομής. Επίσης, αναφέρονται οι προκλήσεις και οι τάσεις που αντιμετωπίζονται στη σύγχρονη εποχή.

Το 2^ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μελέτη των Συστημάτων Γείωσης στον τομέα των Υποσταθμών. Αρχικά, παρουσιάζεται μια εισαγωγή στη γείωση και αναλύονται ο σκοπός και η σημασία της στα ηλεκτρικά συστήματα. Έπειτα, εξετάζονται οι ενδεχόμενες συνέπειες της έλλειψης ή της ελαττωματικής γείωσης. Σημαντικό μέρος του κεφαλαίου αποτελεί η ανάλυση των συστημάτων γείωσης, όπου εξετάζονται ζητήματα όπως η επιλογή της τοποθεσίας του υποσταθμού και η σχεδίαση των συστημάτων γείωσης. Επιπλέον, περιγράφονται θέματα, όπως η Ειδική Αντίσταση Εδάφους, οι βασικοί τύποι και οι μορφές των γειωτών. Δίνεται έμφαση στις προδιαγραφές, τα πρότυπα και τους κανονισμούς που διέπουν τα συστήματα γείωσης, καθώς στη συντήρηση, τον έλεγχο και την αναβάθμιση αυτών.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρέχεται μια σφαιρική εισαγωγή στο θέμα, επισημαίνοντας τη σημασία της Μη Γραμμικής Πολλαπλής Παλινδρόμησης στον τομέα της γείωσης σε υποσταθμούς. Εξετάζονται τα Μη Γραμμικά Μοντέλα και η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων και παρέχεται στοιχειώδη ανάλυση για τη θεωρία που κρύβεται πίσω από τη μέθοδο αυτή. Παράλληλα, εξετάζονται διάφορες μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων σε μη γραμμικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των προβλημάτων που προκύπτουν από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων. Επίσης, παρουσιάζονται βασικές στατιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της προσαρμογής των μη γραμμικών μοντέλων και εξηγείται η διαδικασία εξαγωγής μαθηματικών μοντέλων από τα δεδομένα.

Το 4^ο κεφάλαιο αναφέρεται στη χρήση του λογισμικού *CDEGS* για την ανάλυση των συστημάτων γείωσης σε υποσταθμούς ανάλογα με τις προδιαγραφές που εισάγονται, προκειμένου να ληφθούν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη.

Τέλος, το 5^ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το *CDEGS* με χρήση του λογισμικού *MATLAB*. Αναλύεται η διαδικασία προσαρμογής του *Απλού Εκθετικού Μοντέλου* και παρουσιάζεται πως μπορεί να απλοποιηθεί

και να προσαρμοστεί για καλύτερα αποτελέσματα. Ομοίως, γίνεται ανάλυση, προσαρμογή και βελτιστοποίηση του *Μοντέλου Αθροίσματος Εκθετικών* και του *Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού*. Όσον αφορά το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* γίνεται μια προσπάθεια να προστεθεί στους υπολογισμούς το *Εμβαδό Ματιού* και να βελτιωθούν περαιτέρω οι προβλέψεις της αντίστασης γείωσης.

6.2 Συμπεράσματα

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που να προβλέπει την αντίσταση γείωσης σε υποσταθμούς, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές της ειδικής αντίστασης ρ_1 και ρ_2 του διστρωματικού εδάφους, καθώς και το βάθος h του άνω στρώματος. Αυτό το μαθηματικό μοντέλο αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων γείωσης σε υποσταθμούς.

Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου, η κύρια πρόκληση ήταν η διασφάλιση της εφαρμοσιμότητάς του σε διάφορα μεγέθη πλέγματος γείωσης υποσταθμού, διατηρώντας παράλληλα την ακρίβεια των προβλέψεων. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιήθηκαν αρχές από την παλινδρομική ανάλυση και μέθοδοι βελτιστοποίησης, αλλά και πολλές δοκιμές προσαρμογής του μοντέλου.

Τα μαθηματικά μοντέλα, που εφαρμόστηκαν στη μελέτη, ήταν:

- *Απλό Εκθετικό Μοντέλο*
- *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών*
- *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*

Οι αναλύσεις και τα διαγράμματα, που παρουσιάστηκαν, αποδεικνύουν ότι και τα τρία μοντέλα είναι αρκετά ακριβή και ικανά να προβλέψουν την αντίσταση γείωσης, ανεξάρτητα από τον τύπο του πλέγματος που χρησιμοποιείται. Στο 5^ο Κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι για να θεωρηθεί κάποια προσαρμογή ότι παρέχει τις βέλτιστες προβλέψεις θα πρέπει να ισχύουν οι σχέσεις $R^2 > 0.99$ και $Adjusted R^2 > 0.99$, που ισχύουν για κάθε μοντέλο που εφαρμόστηκε. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 168 προσομοιώσεις για κάθε περίπτωση, η οποία αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη συνδυασμένη διάσταση πλευρών πλέγματος και διάσταση «ματιού». Συνολικά υλοποιούνται εννέα διαφορετικές περιπτώσεις προσομοιώσεων με διάσταση πλευρών 50 x 100, 60 x 120, 80 x 150 και η διάσταση του «ματιού» να παίρνει τιμές 3, 5 και 10. Επιπλέον, προκύπτει ότι η ποιότητα της προσαρμογής είναι υψηλή, ακόμη και όταν εξετάζονται διάφορες παραλλαγές των μοντέλων.

Αρχικά, για το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο* με χρήση των κατάλληλων εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο και με την προσαρμογή τους στο *MATLAB* λαμβάνονται από την αρχή πολύ καλά αποτελέσματα. Με ελάχιστες αλλαγές στις αρχικές τιμές των μεταβλητών με τρόπο τέτοιο ώστε να βελτιστοποιηθούν όσο γίνεται περισσότερο τα αποτελέσματα των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$, οι τελικές τιμές είναι εξαιρετικές με μέσο όρο $R^2 = 0.9998$ και $Adjusted R^2 = 0.9998$. Αυτό παρατηρείται και για τις εννέα περιπτώσεις γείωσης. Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια για απλοποίηση του μοντέλου μετατρέποντας την εξίσωση σε πιο απλή, με τη στρατηγική της απαλοποίησης μεταβλητών. Πρωταρχικός στόχος είναι τα αποτελέσματα να συνεχίσουν να είναι σε αποδεκτά πλαίσια.

Πράγματι, δοκιμάζοντας οκτώ διαφορετικές δοκιμές απαλοιφής μεταβλητών και εκτελώντας τις προσομοιώσεις για τις εννέα περιπτώσεις γείωσης, κατά το πλείστον τα αποτελέσματα είναι αρκετά καλά. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις με τα βέλτιστα αποτελέσματα, με τη 1^η να αντιστοιχεί σε απαλοιφή μίας μεταβλητής και τη 2^η σε απαλοιφή δύο μεταβλητών. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο έχει επιτευχθεί περαιτέρω απλοποίηση της εξίσωσης του μοντέλου, μειώνοντας την πολυπλοκότητά του και παρέχοντας πολύ καλά αποτελέσματα για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης. Οι τιμές των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ διακρίνονται στον παρακάτω πίνακα συγκριτικά και με τα καλύτερα αποτελέσματα των άλλων μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.

Ακολουθεί το *Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών*, που με τον ίδιο τρόπο λαμβάνονται από την αρχή ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, για τα εννέα μοντέλα γείωσης που εφαρμόζονται ο μέσος όρος των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ είναι 0.9998 και 0.9997 αντίστοιχα. Σε αυτό το μοντέλο τα αποτελέσματα είχαν μεγαλύτερη διακύμανση συγκριτικά με το *Απλό Εκθετικό Μοντέλο*, το οποίο είχε σταθερή τιμή για κάθε τύπο, αλλά ξανά τα αποτελέσματα είναι αρκετά καλά. Έπειτα, γίνεται προσπάθεια για απλοποίηση του μοντέλου μετατρέποντας την εξίσωση σε πιο απλή, με τη στρατηγική της απαλοιφής μεταβλητών. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι δε θα γίνει απαλοιφή των μεταβλητών m και q ταυτόχρονα, διότι προκύπτει η εξίσωση του *Απλού Εκθετικού Μοντέλου*, που ήδη έχει εξεταστεί. Κι εδώ στόχος είναι να εξακολουθούν τα αποτελέσματα να είναι σε επιθυμητές τιμές. Όμοια με το προηγούμενο μοντέλο, δοκιμάζονται οκτώ διαφορετικές δοκιμές απαλοιφής μεταβλητών και εκτελώντας τις προσομοιώσεις για τις εννέα περιπτώσεις γείωσης, σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις με τα βέλτιστα αποτελέσματα, με την 1^η να αντιστοιχεί σε απαλοιφή δύο μεταβλητών και τη 2^η σε απαλοιφή τριών. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο έχει επιτευχθεί περαιτέρω απλοποίηση της εξίσωσης του μοντέλου, μειώνοντας την πολυπλοκότητά του και παρέχοντας εξαιρετικά αποτελέσματα για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης. Οι τιμές των μεγεθών R^2 και $Adjusted R^2$ διακρίνονται στον παρακάτω πίνακα συγκριτικά και με τα καλύτερα αποτελέσματα των άλλων μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στη συνέχεια, εξετάζεται το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*, που επίσης με τον ίδιο τρόπο προσαρμογής τα αποτελέσματα που λαμβάνονται δεν ικανοποιούν το κριτήριο να ισχύουν οι σχέσεις $R^2 > 0.99$ και $Adjusted R^2 > 0.99$. Ο μέσος όρος των μεγεθών αυτών για τα εννέα μοντέλα γείωσης είναι $R^2 = 0.9663$ και $Adjusted R^2 = 0.9659$. Κύριος στόχος είναι να γίνει προσπάθεια βελτιστοποίησης του μοντέλου προκειμένου να παρέχει τιμές εντός ορίων. Για να επιτευχθεί αυτό, δοκιμάζονται πέντε περιπτώσεις τροποποίησης των μεγεθών K_1 και K_2 . Όλες οι περιπτώσεις τροποποίησης που δοκιμάστηκαν έδωσαν σαφώς καλύτερα αποτελέσματα στα μεγέθη R^2 και $Adjusted R^2$, ικανοποιώντας τα όριο τους. Παρατηρείται πως η καλύτερη περίπτωση τροποποίησης που δοκιμάστηκε βελτιστοποίησε το μοντέλο δίνοντας κατά μέσο όρο τις εξής τιμές: $R^2 = 0.9986$ και $Adjusted R^2 = 0.9985$.

Στον πίνακα, που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα καλύτερα αποτελέσματα που έχουν ληφθεί για κάθε μοντέλο.

Μοντέλο	Μεταβλητές	Μέσος Όρος	
		R^2	<i>Adjusted R²</i>
Απλό Εκθετικό Μοντέλο	Αρχική Σχέση	0.9998	0.9998
	Απαλοιφή d	0.9990	0.9990
	Απαλοιφή a, c	0.9986	0.9986
Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών	Αρχική Σχέση	0.9998	0.9998
	Απαλοιφή c, d	0.9998	0.9998
	Απαλοιφή a, c, q	0.9972	0.9972
Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού	Αρχική Σχέση	0.9663	0.9659
	5 ^η Τροποποίηση	0.9986	0.9986

Τέλος, γίνεται προσπάθεια να προσαρμοστεί το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού* με την προσθήκη στη σχέση το *Εμβαδόν Ματιού*. Ομοίως, όπως προηγουμένως, δοκιμάζονται πέντε περιπτώσεις τροποποίησης των μεγεθών K_1 και K_2 , όπου στο K_1 εντάσσεται το *Εμβαδόν Ματιού* τους υπολογισμούς. Παρατηρήθηκε ότι στην προσπάθεια αυτή τα αποτελέσματα δεν είχαν αισθητή διαφορά με αυτά που προέκυψαν από το αρχικό μοντέλο, δηλαδή το *Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού*. Συνεπώς, και δε θεωρείται ότι υπήρξε κάποια περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου αυτού.

6.3 Προοπτικές Μελλοντικής Έρευνας

Γενικά, η μελέτη επικεντρώθηκε αποκλειστικά στο διστρωματικό μοντέλο εδάφους για την προσομοίωση της γείωσης. Αυτό προσφέρει μια αρχική, αλλά σημαντική βάση για την ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πραγματική ποικιλομορφία των εδαφικών συνθηκών είναι πιο πολύπλοκη. Με το λογισμικό *CDEGS* να παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης σε διάφορα εδάφη, δημιουργείται η δυνατότητα μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες να επεκταθούν πέρα από το διστρωματικό μοντέλο εδάφους και να εξεταστούν πολυστρωματικά εδάφη.

Ακόμη, η μέγιστη τιμή της ειδικής αντίστασης γείωσης που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος ήταν $1500 \Omega \cdot m$. Επομένως, μια πρόταση θα ήταν να εξεταστεί ένα ευρύτερο φάσμα τιμών για την ειδική αντίσταση του εδάφους.

Τα μοντέλα, που χρησιμοποιήθηκαν, δεν περιελάμβαναν ως παραμέτρους τη θερμοκρασία ή την υγρασία του εδάφους. Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους, καθώς και η άνοδος της θερμοκρασίας μπορεί να μειώσει την αντίσταση γείωσης. Η υγρασία, από την άλλη πλευρά, επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Μια εκτενής μελέτη αυτών των παραμέτρων επιτρέπει την ανάπτυξη πιο λεπτομερών μαθηματικών μοντέλων για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, βελτιώνοντας ίσως έτσι την ακρίβεια των προβλέψεων.

Παράρτημα Α

Απλό Εκθετικό Μοντέλο

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών που ελήφθησαν ως αρχική τιμή και δεν παρουσιάστηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο για κάθε περίπτωση. Σε κάποιες μεταβλητές χρειάστηκε να μεταβληθούν τα όρια. Οι αλλαγές που χρειάστηκε να γίνουν στο *MATLAB*, βρίσκονται μέσα σε παρενθέσεις με *Lower* το κάτω όριο και *Upper* το άνω.

Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
50 x 100	3	0.0757	0.8148	0.9689	0.934	0.6787
	5	0.8582	0.7100	0.8809	0.6551	0.1626
	10	0.2537	0.9039	0.3679	0.4853	0.9238
60 x 120	3	0.9570	0.0647	0.3201	0.7922	0.2595
	5	0.3086	0.0132	0.3385	0.6555 (<i>Lower -100</i>)	0.1712
	10	0.1575	0.3225	0.1222	0.1125	0.1675
80 x 150	3	0.7280	0.9354	0.7684	0.2475	0.7406 (<i>Lower -100</i>)
	5	0.3476	0.2138	0.3589	0.3500	0.1966
	10	0.5547	0.3611	0.5435	0.7575	0.2150

1. Απαλοιφή μεταβλητής *e*

Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
50 x 100	3	0.8587	0.6507	0.0438	0.7555 (<i>Lower -100</i>)
	5	0.1299	0.2831	0.1273	0.0575
	10	0.9301	0.6915	0.0489	0.0787
60 x 120	3	0.8608	0.8372	0.0377	0.7060
	5	0.7498	0.3091	0.0754	0.0948
	10	0.7474	0.2917	0.3055	0.0555
80 x 150	3	0.2214	0.4902	0.3678	0.0134
	5	0.0031	0.5111	0.2348	0.0649
	10	0.0547	0.9611	0.5435	0.0150

2. Απαλοιφή μεταβλητής d

Εμβαδό	Μάτι	a	b	c	e
50 x 100	3	0.9587	0.0318	0.2769	0.0462
	5	0.1299	0.2831	0.0273	0.9649
	10	0.9301	0.6151	0.0489	0.7577
60 x 120	3	0.8608	0.8372	0.0377	0.0318
	5	0.7498	0.3091	0.0754	0.3171
	10	0.8463	0.5918	0.7055	0.9992 (Lower -1000)
80 x 150	3	0.2214	0.4902	0.3678	0.2324
	5	0.0031	0.5111	0.2348	0.1576
	10	0.0547	0.9611	0.5435	0.4218

3. Απαλοιφή μεταβλητής c

Εμβαδό	Μάτι	a	b	d	e
50 x 100	3	0.9787 (Lower -1000) (Upper 400)	0.0418	0.7555	0.6462
	5	0.1222	0.9832	0.5596	0.9649 (Lower -10000)
	10	0.9562	0.5951	0.9997	0.5744 (Lower -1000)
60 x 120	3	0.8608	0.8372	0.7060	0.5318 (Lower -100)
	5	0.8498 (Upper 10)	0.9371 (Lower -500)	0.0958	0.0271
	10	0.9335	0.5928	0.9555	0.9992 (Lower -1000)
80 x 150	3	0.1219	0.4900	0.0134	0.1324 (Lower -1000)
	5	0.0031	0.6531	0.0349	0.0476 (Lower -10000)
	10	0.1547	0.9611	0.0150	0.4218 (Lower -10000)

4. Απαλοιφή μεταβλητών c & e

Εμβαδό	Μάτι	a	b	d
50 x 100	3	0.9179 (Upper 1000)	0.9418 (Upper 100)	0.9555 (Upper 1000)
	5	0.9710 (Upper 90)	0.9365	0.5722 (Lower -20)
	10	0.9562	0.9951	0.9997
60 x 120	3	0.8608	0.9372	0.9060
	5	0.8498	0.8371	0.9958
	10	0.9335	0.7928	0.9555
80 x 150	3	0.8219	0.9900	0.9134
	5	0.8031	0.7531	0.9349
	10	0.9547	0.9611	0.9150

5. Απαλοιφή μεταβλητής a

Εμβαδό	Μάτι	b	c	d	e
50 x 100	3	0.1418	0.2769	0.7555	0.8462
	5	0.9365	0.6926	0.5722	0.8595
	10	0.9951	0.0489	0.9907	0.8844
60 x 120	3	0.9372	0.0377	0.9040	0.7318
	5	0.9491	0.9979	0.8957	0.0285
	10	0.9928	0.7055	0.8555	0.9992
80 x 150	3	0.9939	0.8878	0.9734	0.9924
	5	0.9591	0.3348	0.9349	0.9476
	10	0.9611	0.5435	0.9150	0.9218

6. Απαλοιφή μεταβλητής b

Εμβαδό	Μάτι	a	c	d	e
50 x 100	3	0.9787	0.1900	0.9555	0.0352
	5	0.8710	0.9936	0.6722	0.9595
	10	0.6562	0.1295	0.9809	0.0845
60 x 120	3	0.8628	0.0377	0.9244	0.7170
	5	0.8498	0.7979	0.6957	0.0285
	10	0.9335	0.8055	0.8555	0.2992
80 x 150	3	0.8219	0.8878	0.9734	0.0824
	5	0.8031	0.3348	0.9349	0.9476
	10	0.9547	0.5435	0.9150	0.9218

7. Απαλοιφή μεταβλητών a & c

Εμβαδό	Μάτι	b	d	e
50 x 100	3	0.9900	0.9555	0.0352
	5	0.9365	0.9722	0.0722
	10	0.9951	0.9809	0.0845
60 x 120	3	0.8372	0.9244	0.717
	5	0.9491	0.6957	0.0285
	10	0.9928	0.8555	0.2992
80 x 150	3	0.9939	0.9734	0.0824
	5	0.9591	0.9349	0.9476
	10	0.9611	0.9150	0.9218

8. Απαλοιφή μεταβλητών a & e

Εμβαδό	Μάτι	b	c	d
50 x 100	3	0.9900	0.9750	0.0455
	5	0.9365	0.9936	0.0722
	10	0.9951	0.9295	0.0809
60 x 120	3	0.9972	0.9377 (Lower -100)	0.0944
	5	0.9491	0.8979	0.0957
	10	0.9928	0.8055	0.0555
80 x 150	3	0.9939	0.9878	0.0734
	5	0.9591	0.9348	0.0349
	10	0.9611	0.9435	0.0150

Παράρτημα Β

Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών που ελήφθησαν ως αρχική τιμή και δεν παρουσιάστηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο για κάθε περίπτωση. Σε κάποιες μεταβλητές χρειάστηκε να μεταβληθούν τα όρια. Οι αλλαγές που χρειάστηκε να γίνουν στο *MATLAB*, βρίσκονται μέσα σε παρενθέσεις με *Lower* το κάτω όριο και *Upper* το άνω.

Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>q</i>
50 x 100	3	0.7415	0.7929	0.6460	0.9655	0.4952	0.1778	0.6869
	5	0.8582	0.7100	0.8809	0.6551	0.1626	0.6417	0.8190
	10	0.2537	0.9039	0.3679	0.4853	0.9238	0.1995	0.6593
60 x 120	3	0.3963	0.8792	0.3854	0.6787	0.7577	0.0888	0.7430
	5	0.0144	0.1528	0.8546	0.7060	0.0318	0.5047	0.9769
	10	0.4187	0.0861	0.6997	0.6948	0.3171	0.1531	0.9502
80 x 150	3	0.7280	0.8364	0.7684	0.3575	0.7407 (<i>Lower -100</i>)	0.4437	0.8543
	5	0.3476	0.2138	0.3589	0.3500	0.1966	0.4480	0.2511
	10	0.5517	0.5961	0.1872	0.7094	0.7547	0.9029	0.2760

1. Απαλοιφή μεταβλητής *a*

Εμβαδό	Μάτι	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>m</i>	<i>q</i>
50 x 100	3	0.7929	0.6460	0.9655	0.4952	0.0778	0.6869
	5	0.7100	0.8809	0.6551	0.1626	0.6417	0.0190
	10	0.9039	0.3679	0.4853	0.9238	0.1995	0.2593
60 x 120	3	0.8792	0.3854	0.6787	0.7577	0.0888	0.9430
	5	0.2962	0.4897	0.7502	0.9318	0.2624	0.4387
	10	0.6748	0.3679	0.9898	0.6456	0.0427	0.2463
80 x 150	3	0.8364	0.7684	0.3575	0.7407 (<i>Lower -100</i>)	0.4437	0.8543
	5	0.2138	0.3589	0.3500	0.1966	0.4480	0.2760
	10	0.5961	0.1872	0.7094	0.7547	0.9029	0.2760

2. Απαλοιφή μεταβλητών a & c

Εμβαδό	Μάτι	b	d	e	m	q
50 x 100	3	0.7929	0.8655	0.5952	0.9778	0.9989
	5	0.7100	0.6551	0.1626	0.6417	0.8190
	10	0.9039	0.4853	0.9238	0.1995	0.2995
60 x 120	3	0.8792	0.6787	0.7577	0.1888	0.2430
	5	0.2962	0.7502	0.6318	0.2624	0.5387
	10	0.6748	0.9898	0.6456	0.0427	0.2463
80 x 150	3	0.8364	0.3575	0.7407 (Lower -100)	0.4437	0.8543
	5	0.2138	0.3500	0.6966	0.4480	0.0760
	10	0.5961	0.7094	0.7547	0.6029	0.6760

3. Απαλοιφή μεταβλητών a , c & m

Εμβαδό	Μάτι	b	d	e	q
50 x 100	3	0.9929	0.9551	0.4626	0.3190
	5	0.7100	0.6551	0.1626	0.8190
	10	0.9039	0.4853	0.9238	0.0995
60 x 120	3	0.8792	0.6787	0.7577	0.0430
	5	0.2962	0.7502	0.6318	0.5387
	10	0.6748	0.9898	0.6456	0.0463
80 x 150	3	0.8364	0.3575	0.7407 (Lower -100)	0.8543
	5	0.2138	0.3500	0.6966	0.9760 (Lower -100)
	10	0.5961	0.7094	0.7547	0.0760

4. Απαλοιφή μεταβλητών a , c & q

Εμβαδό	Μάτι	b	d	e	m
50 x 100	3	0.8929	0.8655	0.7952	0.9778
	5	0.7100	0.6551	0.1626	0.6417
	10	0.8039	0.4853	0.8380	0.4995
60 x 120	3	0.8792	0.6787	0.7577	0.5888
	5	0.2962	0.7502	0.6318	0.9624
	10	0.6748	0.9898	0.2456	0.0427
80 x 150	3	0.8364	0.3575	0.7407 (Lower -100)	0.4437
	5	0.2138	0.3500	0.4966	0.9480
	10	0.5961	0.7094	0.6655	0.0029

5. Απαλοιφή μεταβλητών b & c

Εμβαδό	Μάτι	a	d	e	m	q
50 x 100	3	0.7415 (Lower -100) (Upper 10)	0.8655 (Upper 1000)	0.7952 (Upper 1000)	0.5778 (Upper 100)	0.9979
	5	0.8582 (Lower -100)	0.6551 (Upper 1000)	0.1626 (Upper 1000)	0.6417 (Upper 100)	0.8190
	10	0.2537 (Lower -100)	0.4853 (Upper 1000)	0.8380 (Upper 1000)	0.4995 (Upper 1000)	0.0995
60 x 120	3	0.3963 (Lower -1000) (Upper 10000)	0.6787 (Upper 1000)	0.7577 (Lower -10000)	0.5888	0.0430 (Lower -100)
	5	0.7144	0.7502	0.6318 (Upper 100)	0.9624	0.5387
	10	0.1897	0.9898	0.9456	0.0427	0.0463
80 x 150	3	0.8280	0.4575	0.7407 (Lower -100)	0.4437	0.8543
	5	0.3476	0.3500	0.5966	0.9480	0.3760 (Lower -100)
	10	0.5517	0.7094	0.6655	0.0029	0.0760

6. Απαλοιφή μεταβλητών c & e

Εμβαδό	Μάτι	a	b	d	m	q
50 x 100	3	0.7415	0.8929	0.8655	0.4778 (Lower -10)	0.9990 (Lower -1000)
	5	0.8820	0.0100	0.6551 (Lower -10000)	0.6417 (Lower -10000)	0.8190
	10	0.2537	0.8039	0.8853	0.4995	0.0995 (Upper 10000)
60 x 120	3	0.3963	0.7792	0.2787	0.5888	0.0430 (Lower -100)
	5	0.7144	0.2962	0.8502	0.2624	0.2387
	10	0.1897	0.8748	0.0898	0.0427	0.2463
80 x 150	3	0.8280	0.8364	0.4575	0.4437	0.0543
	5	0.2476 (Upper 10)	0.2138	0.3500	0.9480	0.1760 (Lower -100)
	10	0.4517	0.5961	0.7094	0.6029	0.0760

7. Απαλοιφή μεταβλητών c & q

Εμβαδό	Μάτι	a	b	d	e	m
50 x 100	3	0.7415	0.8929	0.8655	0.4952	0.5778
	5	0.8820	0.9100	0.6551	0.0626	0.3417
	10	0.2537	0.8039	0.8853	0.4380	0.4995
60 x 120	3	0.3963	0.7792	0.2787	0.7577 (Lower -100)	0.5888
	5	0.7144	0.2962	0.8502	0.6318	0.6624
	10	0.1897	0.8748	0.9898	0.0456	0.3427
80 x 150	3	0.8280	0.8364	0.4575	0.7407 (Lower -100)	0.4437
	5	0.2476	0.2138	0.3500	0.5966	0.1480
	10	0.9517	0.4961	0.6094	0.5550 (Lower -100)	0.8029

8. Απαλοιφή μεταβλητών a , d & e

Εμβαδό	Μάτι	b	c	m	q
50 x 100	3	0.1929	0.8460	0.5778	0.9990
	5	0.9100	0.8809	0.3417	0.0190
	10	0.8039	0.3679	0.4995	0.0995
60 x 120	3	0.7792	0.3854	0.5888	0.0430 (Lower -100)
	5	0.2962	0.4897	0.6624	0.2387
	10	0.8748	0.3679	0.3427	0.2463
80 x 150	3	0.8364	0.7684	0.4437	0.0543
	5	0.2138	0.3589	0.1480	0.1760 (Lower -100)
	10	0.4961	0.1872	0.8029	0.0760

Παράρτημα Γ

Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών που ελήφθησαν ως αρχική τιμή και δεν παρουσιάστηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο για κάθε περίπτωση. Σε κάποιες μεταβλητές χρειάστηκε να μεταβληθούν τα όρια. Οι αλλαγές που χρειάστηκε να γίνουν στο *MATLAB*, βρίσκονται μέσα σε παρενθέσεις με *Lower* το κάτω όριο και *Upper* το άνω.

Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.0954	0.7003	0.9546
	5	0.8125	0.7225	0.9695
	10	0.0595	0.8997	0.9340
60 x 120	3	0.9453	0.2518	0.8090
	5	0.9902	0.0260	0.0971
	10	0.1318	0.8659	0.7702
80 x 150	3	0.4086	0.3053	0.9775
	5	0.2287	0.8959	0.9468
	10	0.2806	0.9200	0.9891

1 ^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.1686	0.8132	0.9340
	5	0.0436	0.2326	0.9595
	10	0.6084	0.0745	0.6463
60 x 120	3	0.9034	0.5620	0.9706
	5	0.9195	0.5641	0.6797
	10	0.4003	0.3540	0.0540
80 x 150	3	0.0906	0.0218	0.9106
	5	0.8156	0.9014	0.3532
	10	0.9739	0.9051	0.1948

2 ^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.9588	0.3569	0.5469
	5	0.6512	0.6049	0.9134
	10	0.0613	0.1123	0.7952
60 x 120	3	0.0459	0.9629	0.9134
	5	0.2480	0.2182	0.6463
	10	0.1906	0.2698	0.7537

80 x 150	3	0.1832	0.9721	0.3998
	5	0.5932	0.4788	0.9561
	10	0.6660	0.7490	0.3012

3 ^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.2235	0.8251	0.8235
	5	0.0255	0.0263	0.3922
	10	0.5104	0.3900	0.4984
60 x 120	3	0.0307	0.1255	0.9595
	5	0.7872	0.8196	0.2238
	10	0.6753	0.5825	0.3371
80 x 150	3	0.0831	0.5160	0.1450
	5	0.6275	0.1689	0.4509
	10	0.1430	0.1188	0.1848

4 ^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.4792	0.1503	0.6463
	5	0.1957	0.1391	0.3344
	10	0.6836	0.9026	0.1386
60 x 120	3	0.2852	0.5660	0.0318
	5	0.0806	0.3677	0.2543
	10	0.9907	0.4452	0.0838
80 x 150	3	0.1551	0.3948 (Lower -10000)	0.8467
	5	0.9253 (Lower -100)	0.3869	0.9063
	10	0.1152	0.5190	0.7174

5 ^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.9724	0.4362	0.0838
	5	0.9690	0.0323	0.7749
	10	0.6173	0.0047	0.1361
60 x 120	3	0.1889	0.5326	0.8235
	5	0.6179	0.6877	0.3500
	10	0.9926	0.9201	0.8258
80 x 150	3	0.4216	0.8425	0.4893
	5	0.3928	0.0339	0.7948
	10	0.8415	0.4161	0.5079

Παράρτημα Δ

Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού με Εμβαδό Ματιού

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των μεταβλητών που ελήφθησαν ως αρχική τιμή και δεν παρουσιάστηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο για κάθε περίπτωση. Σε κάποιες μεταβλητές χρειάστηκε να μεταβληθούν τα όρια. Οι αλλαγές που χρειάστηκε να γίνουν στο *MATLAB*, βρίσκονται μέσα σε παρενθέσεις με *Lower* το κάτω όριο και *Upper* το άνω.

1 ^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.3758	0.5427	0.4694
	5	0.1968	0.6186	0.7943
	10	0.6028	0.0090	0.6020
60 x 120	3	0.3875	0.8645	0.7482
	5	0.4959	0.0280	0.9133
	10	0.7396	0.9664	0.9961
80 x 150	3	0.1113	0.7567	0.9619
	5	0.2470	0.0896	0.8687
	10	0.0028	0.3471	0.8001

2 ^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.0993	0.2426	0.1190
	5	0.4780	0.6891	0.5060
	10	0.9825	0.1078	0.5472
60 x 120	3	0.3103	0.8132	0.8407
	5	0.4025	0.0600	0.6160
	10	0.9067	0.0073	0.5853
80 x 150	3	0.8190	0.7917	0.9293
	5	0.3649	0.8658	0.7572
	10	0.0710	0.7468	0.0759

3^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.1197	0.2990	0.0598
	5	0.8785	0.8944	0.0154
	10	0.3907	0.0846	0.7317
60 x 120	3	0.9965	0.6915	0.2963
	5	0.3621	0.8408	0.1835
	10	0.1785	0.6228	0.0811
80 x 150	3	0.4422	0.4032	0.4359
	5	0.6046	0.0976	0.5108
	10	0.3131	0.6591	0.3786

4^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.2513	0.9816	0.6342
	5	0.2548	0.8356	0.7441
	10	0.9874	0.7407	0.6099
60 x 120	3	0.5980	0.6685	0.5767
	5	0.5445	0.6518	0.2287
	10	0.2502	0.2024	0.8027
80 x 150	3	0.4653	0.8761	0.6820
	5	0.1923	0.9120	0.0967
	10	0.0499	0.8856	0.9399

5^η Τροποποίηση				
Εμβαδό	Μάτι	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
50 x 100	3	0.1198	0.3126	0.6490
	5	0.0815	0.2524	0.8253
	10	0.5911	0.4186	0.3909
60 x 120	3	0.3720	0.1827	0.3993
	5	0.1614	0.6057	0.6280
	10	0.0820	0.4951	0.9841
80 x 150	3	0.1210	0.0221	0.1981
	5	0.5907	0.5845	0.9203
	10	0.2676	0.8518	0.4228

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010.
- [2] Πέτρος Ντοκόπουλος, «Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Α' Έκδοση, Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2005.
- [3] Repsol, A global energy company (2023), “What is an electrical substation? Transformation, transmission, and distribution of electricity”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο:
<https://www.repsol.com/en/energy-and-the-future/energy-transition/electrical-substation/index.cshtml>.
- [4] Shutterstock (2023), “Substation photos”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο:
https://www.shutterstock.com/search/substation?image_type=photo.
- [5] Stephen J. Charpan, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Εκδόσεις Τζιόλα, 4η Έκδοση, Θεσσαλονίκη 2018.
- [6] John J. Grainger, William D. Stevenson, Gary W. Chang, “Power System Analysis”, McGraw-Hill Education, US Edition, Singapore 2016.
- [7] Power Electronics (2023), “Transformer Maintenance Service”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.powerelectronicsus.com/>.
- [8] Crushtymks, Ενέργεια και δύναμη για όλους (2023), «Σκοπός των διακοπών διακοπής στον υποσταθμό HV», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://crushtymks.com/el/high-voltage/987-purpose-of-disconnect-switches-in-hv-substation.html>, Τελευταία ενημέρωση 2019.
- [9] Ιωάννης Φ. Γκόνος, Αικατερίνη Δ. Πολυκράτη, «Σχέδιο για Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς», Εκδόσεις Τζιόλα, 2^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη 2021.
- [10] Andreas Küchler, “High Voltage Engineering: Fundamentals – Technology – Applications”, Springer Vieweg, eBook, Berlin, Germany 2018.
- [11] Βασίλειος Β. Πασχαλίδης, «Ο Υποσταθμός Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», Αθήνα 2003.

- [12] QUALITROL Defining Reliability (2023), “Benefits of Permanent Travel Measurements in High Voltage Circuit Breaker Online Monitoring”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.qualitrolcorp.com/resource-library/case-studies/benefits-of-permanent-travel-measurement-in-high-voltage-circuit-breaker-online-monitoring/>.
- [13] Wikipedia, The Free Encyclopedia (2023), “Disconnecter”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://en.wikipedia.org/wiki/Disconnecter>, Τελευταία ενημέρωση 17 Σεπτεμβρίου 2023.
- [14] Λάμπρος Οικονόμου, Γεώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου, «Υψηλές Τάσεις» Εκδόσεις Τζιόλα, 3^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη, 2016.
- [15] insulators.info (2023), “Hungarian 750kV line: Insulator chains”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.insulators.info/pictures/?id=64344796>.
- [16] KEI Wires & Cables (2023), “High Voltage Cables”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.kei-ind.com/cables-and-wires/high-voltage-cable/>.
- [17] Wikipedia, The Free Encyclopedia (2023), “Current transformer ”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: https://en.wikipedia.org/wiki/Current_transformer, Τελευταία ενημέρωση 6 Αυγούστου 2023.
- [18] PureTech (2023), “Vacuum Transformer Oil Regeneration System”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.cgpuretech.com/Double-Stage-High-Vacuum-Transformer-Oil-Regeneration-Machine-p.html>.
- [19] Κωσταντίνος Κριτωτάκης, «Εισαγωγή στην Προστασία των Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2013.
- [20] TiSoft (2023), «Μετασχηματιστές έντασης», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.ti-soft.com/el/support/help/electricaldesign/knowledgebase/middlevoltage/cts>.
- [21] Trench (2023), “SF6 Insulated Voltage Transformers”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://trench-group.com/products/sf6-insulated-voltage-transformers/>.
- [22] Wikipedia, The Free Encyclopedia (2023), “Current transformer”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: https://en.wikipedia.org/wiki/Current_transformer, Τελευταία ενημέρωση 13 Απριλίου 2023.
- [23] Electrical Engineering Portal (2023), “What is distribution substation and its main components?”, Edvard Csanyi, July 2016, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://electrical-engineering-portal.com/distribution-substation>.
- [24] Critter Guard (2023), “3 Different Types of Substations”, John Sims, June 2022, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.critterguard.org/blogs/articles/3-different-types-of-substations>.

- [25] About Mechanics (2023), Lea Miller, “What is a Peak Load”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.aboutmechanics.com/what-is-a-peak-load.htm>, Τελευταία ενημέρωση 17 Σεπτεμβρίου 2023.
- [26] IEC 62271-200, International Standard, “High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1kV and up to and including 52kV”, Switzerland 2003.
- [27] IEEE Std C37.04-2018, IEEE Standards Association, “IEEE Standard for Ratings and Requirements for AC High-Voltage Circuit Breaker with Rated Maximum Voltage Above 1000V”, (Revision of IEEE Std C37.04-1999), USA, August 2019.
- [28] IEEE Std C37.06-2009, IEEE Standards Association, “IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000V”, USA, 2009.
- [29] IEEE Std 80-2013, IEEE Standards Association, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, (Revision of IEEE Std 80-2000), USA, 2013.
- [30] Ιωάννης Φ. Γκόνος, Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Προστασία Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων από Υπερτάσεις», Εργαστηριακές Ασκήσεις, ΕΜΠ, Νοέμβριος 2021.
- [31] Cadence System Analysis (2023), “Using EMC Grounding Techniques to Build Noise Immune Circuits”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-using-emc-grounding-techniques-to-build-noise-immune-circuits>.
- [32] Early Bird Electric (2023), “Why do electrical circuits need to be grounded?”, July 2023, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://earlybirdelectricians.com/electrical-circuits/>.
- [33] Προδιαγραφή ΑΔΜΗΕ/ΔΝΕΜ/ΥΣ7-1: «Τεχνική περιγραφή έργων επέκτασης του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) 150kV για την σύνδεση σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας», Τόμος Ι, Αθήνα, Φεβρουάριος 2015.
- [34] Engineering eNotes (2023), “Substations: Meaning, Classification and Site Selection | Electricity”, Gayathri K, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.engineeringenotes.com/electrical-engineering/substations/substations-meaning-classification-and-site-selection-electricity/29916>.
- [35] SONI (2023), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.soni.ltd.uk/>.
- [36] Ι. Γκόνος, Β. Κονταργύρη, Ι. Σταθόπουλος, Γ. Μάνος, «Συστήματα γείωσης υποσταθμών υψηλής τάσεως: Μεθοδολογία σχεδίασης, ανάλυσης και μέτρησης», Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση, Μάιος 2010.

- [37] Sematic Scholar (2023), G. Gilbert, “Soil Modelling Techniques”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.semanticscholar.org/paper/Soil-Modelling-Techniques-Gilbert/2c835039032fbe5be90a90432a227e8c92f722fa>, Δημοσιεύτηκε 2012.
- [38] Power Systems Advisors (2023), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://gr.linkedin.com/company/power-systems-advisors>.
- [39] ΕΛΟΤ 60364, Ελληνικό Πρότυπο, «Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις», Έκδοση 1^η, 2020-07-01.
- [40] Turan Gönen, “Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design”, John Wiley & Sons, Inc, USA 1988.
- [41] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, Μεταπτυχιακή Εργασία, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2011.
- [42] ELEMKO (2023), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.elemko.gr/el>.
- [43] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, “Research and applications of ground enhancing compounds in grounding systems”, IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 11, no. 13, pp. 3195–3201, September 2017.
- [44] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, “Performance of ground enhancing compounds during the year”, Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, paper 231
- [45] Vasilios P. Androvitsaneas, Ioannis F. Gonos, Ioannis A. Stathopoulos, “Research and Applications of Ground Enhancing Compounds in Grounding Systems” Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://goo.gl/zc8KGv>.
- [46] IEEE Std 142-2007, IEEE Standards Association, “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, Revision of IEEE Std 142-1991, USA, 2007.
- [47] IEEE Std 837-2014, IEEE Standards Association, “IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding”, USA, 2014.
- [48] IEEE Std 81-2012, IEEE Standards Association, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”, USA, 2012.
- [49] IEC 60364, International Electrotechnical Commission, International Standard, “Electrical Installations for Buildings”, IEC, 2005.
- [50] ΕΛΟΤ HD-637 S1, Ελληνικό Πρότυπο, «Εγκαταστάσεις ισχύος με ονομαστική τάση πάνω από 1kV εναλλασσόμενου ρεύματος», 1999.

- [51] ΕΛΟΤ EN 50522, Ελληνικό Πρότυπο, «Γείωση εγκαταστάσεων ισχύος που υπερβαίνουν το 1kV εναλλασσόμενου ρεύματος», Νοέμβριος 2010.
- [52] LinkedIn (2023), “Ensuring Electrical Safety: The Importance of Substation Earthing”, Md Mehedi Hasan Nahid, Published February 18, 2023, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.linkedin.com/pulse/ensuring-electrical-safety-importance-substation-earthing-nahid#:~:text=The%20maintenance%20includes%20periodic%20testing,earthing%20system%20is%20still%20effective.>
- [53] International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), “Maintenance of EHV Substation”, Mohammed Abdul Khader Aziz Biabani, Syed Rehan Mohsin Ahmed, IEEE, India 2016.
- [54] LinkedIn (2023), “What are the common challenges and solutions for substation grounding in urban areas?”, Last updated on July 27, 2023, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: [https://www.linkedin.com/advice/0/what-common-challenges-solutions-substation.](https://www.linkedin.com/advice/0/what-common-challenges-solutions-substation)
- [55] Norman R. Draper, Harry Smith, “Applied Regression Analysis” John Wiley & Sons, Inc, Third Edition, Canada, 1998.
- [56] MathWorks (2023), “Evaluating Goodness of Fit – MATLAB Simulink”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: [https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html.](https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html)
- [57] Θεόδωρος Παναγιώτης Χ. Λιάγκας, «Εκτίμηση τιμής συστημάτων γείωσης σε ανεμογεννήτριες», Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2021.
- [58] Georgios P. Kondylis, Katerina D. Damianaki, Vasilios P. Androvitsaneas, Ioannis F. Gonos, “Simplified Formulae Method for Estimating Wind Turbine Generators Ground Resistance”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 33, NO. 6, DECEMBER 2018.
- [59] SES & technologies ltd. (2023), “Software Packages - CDEGS”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: [https://www.sestech.com/Product/Package/CDEGS#:~:text=CDEGS%20\(Current%20Distribution%2C%20Electromagnetic%20Fields,all%20industries%20involving%20electric%20networks.](https://www.sestech.com/Product/Package/CDEGS#:~:text=CDEGS%20(Current%20Distribution%2C%20Electromagnetic%20Fields,all%20industries%20involving%20electric%20networks.)
- [60] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, “Artificial neural network methodology for the estimation of ground enhancing compounds resistance”, IET Science, Measurement and Technology, vol. 8, no. 6, pp. 552–570, November 2014, doi: 10.1049/iet-smt.2013.0292.

- [61] V. P. Androvitsaneas, A. K. Alexandridis, I. F. Gonos, G. D. Dounias, I. A. Stathopoulos, “Wavelet neural network methodology for ground resistance forecasting”, *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 288–295, November 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.06.013.
- [62] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos, G. D. Dounias, I. A. Stathopoulos, “Ground resistance estimation using inductive machine learning”, *Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015)*, Pilsen, Czech Republic, August 23rd–28th, 2015, paper 517.
- [63] K. Boulas, V. Androvitsaneas, I. Gonos, G. Dounias, and I. Stathopoulos, “Ground resistance estimation using genetic programming”, *Proceedings of the 5th International Symposium and 27th National Conference on Operational Research*, Athens, Greece, June 9th–11th, 2016, pp. 66–71.
- [64] MathWorks (2023), “Equation Solving Algorithms”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/equation-solving-algorithms.html>.
- [65] MathWorks (2023), “Introduction to Least-Squares Fitting”, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/least-squares-fitting.html>.