



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

Εκτίμηση Τιμής Αντίστασης Συστημάτων Γείωσης Ανεμογεννητριών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αδίκημενάκης Π. Γεώργιος

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

Επιβλέπων: Κατερίνα Δαμιανάκη
Υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025



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

Εκτίμηση Τιμής Αντίστασης Συστημάτων Γείωσης Ανεμογεννητριών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αδίκημενάκης Π. Γεώργιος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27η Ιουνίου 2025.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Χριστοδούλου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Βασίλειος Νικολαΐδης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2025

.....
Αδίκημενάκης Π. Γεώργιος

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

Copyright © Αδίκημενάκης Γεώργιος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Το πρώτο κεφάλαιο ξεκινάει με μία ιστορική αναδρομή στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Ακολουθεί παρουσίαση των ειδών και κάποιων βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών των Α/Γ και οι απαιτήσεις του διαχειριστή για την σύνδεση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται παρουσιάζοντας τους Ευρωπαϊκούς και Ελληνικούς στόχους για την αιολική εκμετάλλευση τονίζοντας την προοπτική αύξησης των αιολικών πάρκων.

Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματεύεται τα συστήματα γείωσης. Στην αρχή παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες, απαραίτητες για την κατανόηση ενός συστήματος γείωσης, από το πρότυπο IEEE Std 80-2013. Οι ορισμοί αφορούν τα συστήματα γείωσης, το ρεύμα ρεύμα σφάλματος και τις αναπτυσσόμενες τάσεις που αυτό προκαλεί. Έπεται μία αναφορά για την αντοχή του ανθρώπου στο ηλεκτρικό ρεύμα και μετά παρουσιάζεται το έδαφος και οι παράγοντες που το επηρεάζουν ως μέσο γείωσης. Ακολουθούν τρόποι μέτρησης της ειδικής αντίστασης και τρόποι μοντελοποίησης του εδάφους. Η μέτρηση της αντίστασης γείωσης στο πεδίο είναι το επόμενο κομμάτι που αναφέρεται ενώ το κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με την παρουσίαση των συστημάτων γείωσης ανεμογεννητριών, των ιδιαιτεροτήτων τους και την περιγραφή των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διπλωματική.

Η διαδικασία των προσομοιώσεων ήταν το θέμα του τρίτου κεφαλαίου. Αναφέρεται η δυνατότητα υπολογισμού της αντίστασης ενός συστήματος γείωσης είτε με την χρήση αριθμητικών μεθόδων, όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων που εκτελείται από τα λογισμικά είτε με αναλυτικές μεθόδους οι οποίες όμως εμφανίζουν περιορισμούς. Υστέρα ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση του λογισμικού CDEGS, με το οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις, και του επιλυτή MALT που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τα δεδομένα των προσομοιώσεων τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται αναλυτικά στο παράρτημα Β.

Το κεφάλαιο τέσσερα αναφέρεται στις μαθηματικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των τύπων. Γίνεται μία γενική εισαγωγή στην παλινδρόμηση και στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση της γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης και σχετικών εννοιών γύρω από αυτές. Τέλος γίνονται κάποια σχόλια για την χρήση της παλινδρόμησης σε αυτή την εργασία και παρουσιάζονται οι μαθηματικές έννοιες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των τύπων.

Το κύριο μέρος αυτής της διπλωματικής είναι το πέμπτο κεφάλαιο που αφορά την εξαγωγή των τύπων. Ξεκινάει με μία εισαγωγή και ποιος είναι ο στόχος της εργασίας, ακολουθεί το πρώτο στάδιο της μελέτης που ήταν η προσαρμογή ενός τύπου από την εργασία [8] , μέσω του εργαλείου Cftool και ακολουθεί η συλλογιστική που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή δύο τύπων, ενός με γραμμική και του άλλου με μη γραμμική παλινδρόμηση, με τους κώδικες να παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα Α.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική ανακεφαλαίωση της εργασίας και αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή. Συνεπώς τονίζεται η συμβολή της εργασίας στη διευκόλυνση των μελετών γείωσης και στην αρχική εκτίμηση της αντίστασης γείωσης πριν την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας. Η εργασία ολοκληρώνεται με αναφορά σε μελλοντικές προτάσεις μελετών που θα μπορούσαν να γίνουν βάση αυτά που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία.

Λέξεις κλειδιά: Αιολική ενέργεια, γείωση ανεμογεννήτριας, συστήματα γείωσης, αντίσταση γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, διστρωματικό μοντέλο εδάφους, MATLAB, CDEGS, MALT, Cftool, μη γραμμική παλινδρόμηση, γραμμική παλινδρόμηση.

Abstract

The first chapter begins with a historical overview of wind energy exploitation. It is followed by a presentation of the types and some key technical characteristics of wind turbines, as well as the requirements set by the system operator for the connection of wind farms to the grid. The chapter concludes by presenting the European and Greek targets for wind energy development, highlighting the expected growth of wind farm installations.

The second chapter focuses on grounding systems. It starts with an introduction to essential concepts necessary for understanding grounding systems, based on the IEEE Std 80-2013 standard. These definitions pertain to grounding systems, fault currents, and the voltages they induce. A section follows on human tolerance to electric current, and then the role of soil as a grounding medium is analyzed, along with the factors influencing it. Methods for measuring soil resistivity and modeling soil are then presented. The following section discusses field measurements of grounding resistance, while the chapter concludes with an overview of wind turbine grounding systems, their specific characteristics, and a description of the systems utilized in this thesis.

The third chapter addresses the simulation process. It discusses the ability to calculate grounding system resistance either through numerical methods, such as the finite element method employed by simulation software, or via analytical methods, which, however, have limitations. A brief presentation of the CDEGS software used for the simulations is then provided, along with the MALT module applied. The chapter concludes with the simulation data, whose results are presented in detail in Appendix B.

Chapter four covers the mathematical concepts used in deriving the formulas. It begins with a general introduction to regression, followed by a discussion on linear and nonlinear regression and related concepts. The chapter concludes with comments on how regression was applied in this study and an explanation of the mathematical metrics used for evaluating the derived formulas.

The core of this thesis lies in chapter five, which concerns the derivation of the formulas. It starts with an introduction and a statement of the study's objective. The first stage of the analysis involved adapting a formula from reference [8], using the Cftool utility. This is followed by the reasoning behind the derivation of two formulas—one using linear and the other using nonlinear regression. The respective code is provided in detail in Appendix A.

Finally, chapter six offers a concise summary of the study and presents the conclusions drawn. The contribution of this work is emphasized, particularly in facilitating grounding system design and providing an initial estimation of grounding resistance prior to wind turbine installation. The thesis concludes with proposals for future studies that could build upon the findings of this research.

Keywords: Wind energy, wind turbine grounding, grounding systems, grounding resistance, soil resistivity, two-layer soil model, MATLAB, CDEGS, MALT, Cftool, nonlinear regression, linear regression

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου, Πολυχρόνη. Αν και απεβίωσε μόλις μπήκα στην σχολή, τον ευχαριστώ για τις βάσεις που μου άφησε ποικιλοτρόπως ώστε να είμαι σε θέση να περατώσω τις σπουδές μου.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω την μητέρα μου Καλλιόπη, τον αδερφό μου Στέφανο και την φίλη και συνάδελφο Μαρία που χωρίς την βοήθεια και την στήριξη τους δεν θα ήμουν εδώ που είμαι σήμερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Γκόνο, για την προσιτή του στάση, την άμεση ανταπόκριση και τη σταθερή του υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, από την πρώτη μας επικοινωνία έως την ολοκλήρωσή της. Επίσης, ευχαριστώ θερμά την υποψήφια διδάκτορα κα Κατερίνα Δαμιανάκη για τη βοήθειά της στη διεξαγωγή των προσομοιώσεων και την πολύτιμη συμβολή της στην επιμέλεια της εργασίας.

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των γεωηλεκτρικών χαρακτηριστικών του εδάφους, μέσω της μεταβολής της ειδικής αντίστασης, στην τιμή της αντίστασης γείωσης, σε ένα τυπικό σύστημα γείωσης που χρησιμοποιείται σε Α/Γ.

Χρησιμοποιώντας λογισμικό προσομοίωσης μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης γείωσης για διάφορους τύπους εδαφών και επιφανειών του συστήματος, χρησιμοποιώντας μοντέλο διστρωματικού εδάφους. Στη συνέχεια, βάση των προσομοιώσεων, επιχειρείται να δοθεί προσεγγιστική μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του συστήματος σε συνάρτηση με την ειδική αντίσταση των δύο στρωμάτων, το βάθος του πρώτου στρώματος και την επιφάνεια του συστήματος.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας, κάθε μελετητής έργων Α/Γ που χρησιμοποιεί το σύστημα που πραγματεύεται η διπλωματική δίνοντας ως είσοδο τα στοιχεία της διστρωματικής μοντελοποίησης και την επιφάνεια που θα καταλαμβάνει το σύστημα, θα μπορεί να λαμβάνει μία πρώτη εκτίμηση για την αντίσταση γείωσης του συστήματος και αν θα πρέπει να γίνουν επιπλέον παρεμβάσεις για την μείωση αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Abstract.....	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	9
Πρόλογος.....	10
Ευρετήριο Σχημάτων.....	13
Ευρετήριο Πινάκων.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	16
1.1 Εισαγωγή.....	16
1.2 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών.....	16
1.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.....	18
1.4 Τεχνικές Απαιτήσεις Συστήματος.....	21
1.5 Δομή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	22
1.6 Επιλογή τοποθεσίας και στοιχεία ανεμογεννητριών.....	23
1.8 Αιολική ανάπτυξη στην Ευρώπη.....	26
1.9 Αιολική ανάπτυξη στην Ελλάδα.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ.....	32
2.1 Εισαγωγή.....	32
2.2 Ορισμοί.....	32
2.2.1 Ορισμοί Συστήματος Γείωσης.....	32
2.2.2 Ορισμοί Ρεύματος Σφάλματος.....	33
2.2.3 Ορισμοί Αναπτυσσόμενων Τάσεων.....	35
2.3 Ανεκτό όριο ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα.....	38
2.4 Το έδαφος ως μέσω γείωσης.....	39
2.4.1 Εισαγωγή.....	39
2.4.2 Ειδική αντίσταση του εδάφους.....	39
2.5 Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους.....	43
2.5.1 Μέθοδος Wenner.....	44
2.6 Μοντελοποίηση του εδάφους.....	48
2.6.1 Εισαγωγή.....	48
2.6.2 Διστρωματικό μοντέλο.....	49
2.7 Σύνθεση Αντίστασης Γείωσης.....	50
2.8 Μετρήσεις πεδίου σε σύστημα γείωσης [25].....	51
2.8.1 Μετρήσεις της Σύνθετης Αντίστασης του Συστήματος Γείωσης.....	51
2.8.1.1 Μέθοδος Πτώσης Τάσης (Fall-of-Potential).....	52
2.8.2 Μέτρηση πεδίου, πηγάδια δυναμικού, τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων.....	54
2.9 Συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών.....	55
2.9.1 Εισαγωγή.....	55
2.9.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου.....	57
2.9.3 Σχέδιο συστήματος γείωσης ανεμογεννητριών.....	60
2.10 Συστήματα γείωσης στην εργασία.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	67
3.1 Εισαγωγή.....	67
3.2 Το λογισμικό CDEGS [97].....	67
3.3 Επιλητής MALT [98].....	68
3.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ.....	71
4.1 Εισαγωγή [99].....	71
4.2 Γραμμική παλινδρόμηση [100].....	71
4.2.1 Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση [100].....	72
4.2.2 Προϋποθέσεις Εφαρμογής Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης [100].....	73
4.2.3 Λογαριθμικός Μετασχηματισμός [103].....	74
4.3 Μη Γραμμική Παλινδρόμηση [105].....	75
4.3.1 Εισαγωγή.....	75
4.3.2 Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση.....	76
4.3.3 Η σημασία των αρχικών τιμών στη μη γραμμική παλινδρόμηση.....	76
4.4 Η παλινδρόμηση σε αυτή την διπλωματική.....	77
4.5 Κριτήρια αξιολόγησης τύπων.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:Τύποι Αντίστασης Γείωσης Συστήματος Α/Γ.....	82
5.1 Εισαγωγή.....	82
5.2 Τύπος Cftool.....	82
5.3 Τύπος με γραμμική παλινδρόμηση.....	84
5.4 Τύπος με μη γραμμική παλινδρόμηση.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	90
6.1 Ανακεφαλαίωση.....	90
6.2 Συμπεράσματα.....	90
6.3 Μελλοντικές προτάσεις.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95
Παράρτημα Α: Κώδικες MATLAB.....	106
Κώδικας 1.....	106
Κώδικας 2.....	106
Κώδικας 3.....	108
Κώδικας 4.....	109
Κώδικας 5.....	111
Κώδικας 6.....	113
Κώδικας 7.....	114
Παράρτημα Β: Προσομοιώσεις.....	117

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Τυπολογία βάσει διαμόρφωσης του ηλεκτρικού μέρους [7].....	17
Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστική ελέγχου σύγχρονης γεννήτριας [7].....	18
Σχήμα 1.3: Διάγραμμα ισχύς - ταχύτητας ανέμου για pitch control και Stall A/Γ [10].....	19
Σχήμα 1.4: Μεταβολή της παραγόμενης ισχύς συνάρτηση της συχνότητας [12].....	20
Σχήμα 1.5: Απαίτηση για αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση [12].....	21
Σχήμα 1.6: Τα εξαρτήματα που είναι στο εσωτερικό μιας ανεμογεννήτριας [5].....	22
Σχήμα 1.7: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα [6].....	23
Σχήμα 1.8: A/Γ, υποσταθμός και σύνδεση με το δίκτυο μεταφοράς [16].....	24
Σχήμα 1.9: Offshore αιολικό πάρκο [17].....	25
Σχήμα 1.10: Αιολικό πάρκο στη Κύθνο [18].....	26
Σχήμα 1.11: Στόχοι EWEA(1991) [19].....	27
Σχήμα 1.12: Πρόβλεψη για την αύξηση της αιολικής ισχύς στην Ευρώπη έως το 2030 [20].....	27
Σχήμα 1.13: Ποσοστό αιολικής ενέργειας στην κατανάλωση Ευρωπαϊκών χωρών [20].....	28
Σχήμα 1.14: Αύξηση αιολικής παραγωγής ανά τα έτη [22].....	29
Σχήμα 2.1: Σχέση ανάμεσα στις πραγματικές τιμές ρεύματος σφάλματος και των τιμών των I_F , D_F , I_f για διάρκεια σφάλματος t_f [25].....	35
Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση της ροής ρεύματος από τον άνθρωπο λόγω βηματικής τάσης και τάσης επαφής [27].....	36
Σχήμα 2.3: Γραφική παράσταση σωματικού βάρους σε συνάρτηση με το μέτρο του ρεύματος που αν εφαρμοστεί για 3 sec προκαλεί μαρμαρυγή [25].....	39
Σχήμα 2.4: Κυκλωματική αναπαράσταση του εδάφους [25].....	40
Σχήμα 2.5: Επίδραση αλάτων, υγρασίας και θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [25].....	42
Σχήμα 2.6: Μέθοδος Wenner τεσσάρων ηλεκτροδίων [25].....	43
Σχήμα 2.7: Κυκλωματικό διάγραμμα για τη μέθοδο κατευθυνόμενης ράβδου [25].....	44
Σχήμα 2.8: Πλήθος εδαφών(%) συνάρτηση του σφάλματος που προκύπτει από την διστροματική περιγραφή τους.....	47
Σχήμα 2.9: (α) Μέθοδος της πτώσης δυναμικού (b) Δυναμικό στην επιφάνεια της γης για διάφορες αποστάσεις.....	51
Σχήμα 2.10: Σύστημα γείωσης A/Γ [64].....	59
Σχήμα 2.11: Τυπικό σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη).....	61
Σχήμα 2.12: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $40m \times 30m$ και συνολική επιφάνεια $1339m^2$	62
Σχήμα 2.13: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $42m \times 28m$ και συνολική επιφάνεια $1315m^2$	62
Σχήμα 2.14: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $48m \times 27m$ και συνολική επιφάνεια $1435m^2$	63

Σχήμα 2.15: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $50m \times 32m$ και συνολική επιφάνεια $1739m^2$	63
Σχήμα 2.16: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $52m \times 34m$ και συνολική επιφάνεια $1907m^2$	64
Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα Cftool για το πρώτο set προσομοιώσεων(αριστερά) και για το σύνολο των προσομοιώσεων(δεξιά).....	82

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης για διάφορα είδη εδάφους [25].....	41
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα κώδικα 2 για διαφορετικό πλήθος όρων.....	85
Πίνακας 6.1: Δοκιμή τύπων σε προσομοιώσεις για πραγματικά έργα.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο ξεκινάει από την αρχαιότητα. Από την μετατροπή της μέσω των ανεμόμυλων σε μηχανική ενέργεια για να αλέσουν τα σιτηρά ή να αντλήσουν νερό από τα πηγάδια και τα πανιά των πλοίων που την μετέτρεπαν σε κινητική ενέργεια για να κινήσουν τα καράβια [1].

Η πρώτη εμπορική ανεμογεννήτρια κατοχυρώθηκε ως πατέντα από τον εφευρέτη Daniel Halladay και τον επιχειρηματία John Burnham μέσω της εταιρίας τους Wind Engine & Pump Company την δεκαετία του 1850. Στη συνέχεια η γεννήτρια κατασκευάστηκε από τον μηχανικό Josef Friedlander, για πρώτη φορά για τη διεθνή ηλεκτρολογική έκθεση στην Βιέννη το 1883 [2].

Κομβικό σημείο για την ανάπτυξη και την εδραίωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κατ' επέκταση και της αιολικής, αποτελεί η αμερικάνικη ενεργειακή κρίση του 1970. Η πετρελαϊκή κρίση ώθησε αρχηγούς χωρών και ερευνητές να αναζητήσουν εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Πρωτοπόρος στην έρευνα υπήρξε η Αμερική με ένα ερευνητικό πρόγραμμα που διεξήχθη από την NASA, καθώς και με νομοθεσίες που υποχρέωσαν τις επιχειρήσεις να αγοράζουν ένα καθορισμένο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Τέλος την δεκαετία του 1980 το Αμερικανικό κράτος προωθούσε τις καθαρές πηγές ενέργειας προσφέροντας φοροαπαλλαγές στους καταναλωτές της [2].

Με όλη αυτή την ώθηση που δόθηκε στην έρευνα για τις ανανεώσιμες πηγές, οδήγησε σταδιακά την σημαντική μείωση κόστους κατασκευής, εγκατάστασης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις Α/Γ, καθιστώντας τες έτσι μία από τις πιο οικονομικές πρωτογενείς πηγές ισχύος [3].

1.2 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες ως προς τον προσανατολισμό του άξονα τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Οριζόντιου άξονα που παραμένει πάντα παράλληλος με το έδαφος ακόμα και όταν η άτρακτος περιστρέφεται (yaw control)
- Κατακόρυφου άξονα, ο οποίος είναι σταθερός και κάθετος στο έδαφος

Οι κατακόρυφου άξονα έχουν το πλεονέκτημα ότι τα ηλεκτρομηχανικά μέρη όπως, η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκονται στο έδαφος και έτσι δεν χρειάζεται η κατασκευή του πύργου για την στήριξη της άτρακτου. Επίσης είναι απλούστερες κατασκευές καθώς δεν έχουν ούτε σύστημα προσανατολισμού της άτρακτου (yaw control), ούτε των φτερών (pitch

control). Όλη αυτή η απλότητα όμως, όπως είναι λογικό, γίνεται εις βάρος της απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Η απουσία της δυνατότητας ελέγχου περιστροφής τόσο των πτερυγίων όσο και της ατράκτου εμποδίζει την κατασκευή να προσαρμόζεται στις μεταβολές του αέρα με αποτέλεσμα να μειώνει την μέση ισχύ που μπορεί να αποκομίσει από αυτόν. Επίσης ότι το κάτω μέρος του δρομέα βρίσκεται κοντά στο έδαφος αποτελεί και αυτό παράγοντα μείωσης της απόδοσης. Ο αέρας σε χαμηλά ύψη έχει χειρότερη ποιότητα λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας και της παρουσίας περισσότερων στροβιλισμών εξαιτίας των εμποδίων που συναντάει και του εδάφους [8]. Αυτοί είναι κάποιοι από τους λόγους που επικράτησαν οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

Οι οριζόντιου άξονα χωρίζονται και αυτές σε δύο κατηγορίες. Τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και αυτές των μεταβλητών στροφών. Όταν πρωτοεμφανίστηκαν οι ανεμογεννήτριες στον χώρο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν σταθερών στροφών. Ο λόγος ήταν ότι ήταν πιο απλές σαν μηχανές και τα ηλεκτρονικά ισχύος δεν ήταν τόσο αναπτυγμένα. Οι σταθερών στροφών είχαν κυρίως ασύγχρονες γεννήτριες οι οποίες συνδέονταν απευθείας στο δίκτυο με αποτέλεσμα, η γεννήτρια άρα και ο δρομέας της ανεμογεννήτριας να πρέπει να στρέφονται με σταθερή ταχύτητα με μία μικρή ελαστικότητα λόγω της ολίσθησης. Οι ασύγχρονες γεννήτριες είχαν δύο βασικά προβλήματα στην λειτουργία τα οποία όμως αντιμετωπίστηκαν.

Το πρώτο ήταν ότι επειδή επιβαλλόταν σταθερή ταχύτητα από το δίκτυο, μπορούσαν να είναι αποδοτικές σε μία ταχύτητα περιστροφής δρομέα και άρα και ανέμου, που καθορίζεται από το πλήθος των πόλων της γεννήτριας. Αυτό αντιμετωπίστηκε με την εγκατάσταση δύο γεννητριών. Μία για τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου και μία για τις υψηλές.

Το άλλο πρόβλημα είναι ότι με το κλείσιμο του διακόπτη και τη σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο, για την εγκατάσταση του πεδίου στην ασύγχρονη γεννήτρια απορροφούσε ένα ρεύμα περίπου επτά φορές του ονομαστικού. Αλλά και αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την υιοθέτηση soft starters που, ανεβάζοντας σταδιακά την τάση, μείωναν το μέτρο του απορροφούμενου ρεύματος κατά πολύ [7].

Έτσι για μεγάλο χρονικό διάστημα το πρόβλημα που απασχολούσε την κοινότητα της αιολικής ενέργειας ήταν τα κιβώτια ταχυτήτων, όντας το εξάρτημα, που λόγω τριβών, παρουσιάζει τις περισσότερες βλάβες και ήταν κοστοβόρο και δύσκολο στην επισκευή του.

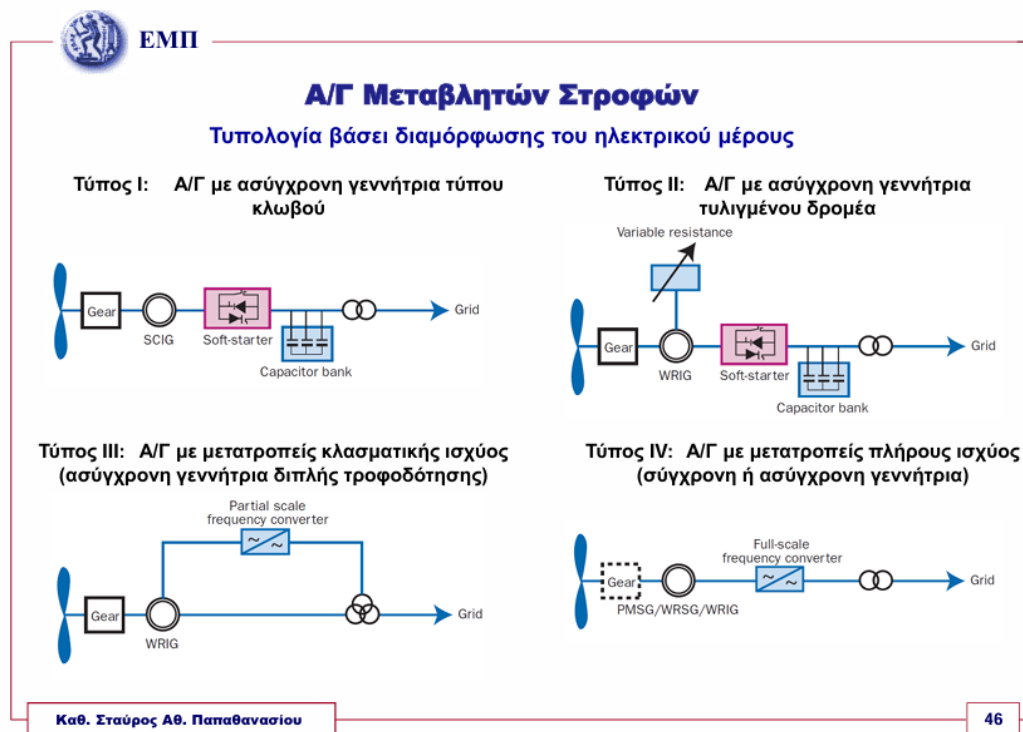
Το ουσιαστικό όμως πρόβλημα με τις μηχανές σταθερών στροφών που οδήγησε στην κατάργησή τους εμφανίστηκε με την αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή. Το πρόβλημα με την απευθείας σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο είναι ότι με την παραμικρή αναταραχή στη λειτουργία, όπως μία μικρή βύθιση τάσης η ανεμογεννήτρια αποσυνδεόταν. Αυτό σε συνδυασμό ότι με τον καιρό η παραγωγή από αιολικά αποτελούσε ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής παραγωγής οδηγούσε στην απότομη απώλεια μεγάλης παραγωγής, που είχε ως αποτέλεσμα τοπικά blackouts [7].

1.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Μετά την διαπίστωση αυτού του προβλήματος, οι διαχειριστές των δικτύων ξεκίνησαν να απαιτούν από τους παραγωγούς οι ανεμογεννήτριες τους να μην αποσυνδέονται σε μικρές αναταραχές του δικτύου. Επιπλέον, με την ακόμα μεγαλύτερη διείσδυση των αιολικών οι απαιτήσεις αυξήθηκαν και στην παροχή εφεδρικών υπηρεσιών, όπως ανοδικές και καθοδικές εφεδρείες σε ενεργό και άεργο ισχύ, καθώς και προσαρμογή της λειτουργίας της γεννήτριας ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου [9].

Οι μηχανές μεταβλητών στροφών δεν συνδέονται απευθείας στο δίκτυο αλλά μεσολαβούν ηλεκτρονικά ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, μετατροπέας AC/DC/AC, ο οποίος απομονώνει το δίκτυο με το περιβάλλον της ανεμογεννήτριας. Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών:

- Τύπος I: A/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού
- Τύπος II: A/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα
- Τύπου III: A/Γ με μετατροπείς κλασματικής ισχύος (ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης)
- Τύπος IV: A/Γ με μετατροπείς πλήρους ισχύος (σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια)



Σχήμα 1.1: Τυπολογία βάσει διαμόρφωσης του ηλεκτρικού μέρους [7]

Πέρα από αυτό το πρόβλημα η μεσολάβηση ηλεκτρονικών ισχύος για την σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο έχει και άλλα πλεονεκτήματα. Αρχικά, με τις μεταβλητές στροφές γίνεται πολύ καλύτερη εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου του αέρα. Από την αρχή που απελευθερώνεται η Α/Γ από τα μηχανικά φρένα έως να φτάσει και την ονομαστική της ταχύτητα, όπου είναι η ταχύτητα που παράγει την ονομαστική της ισχύ, λειτουργεί με τον βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή, που θεωρητικά αποδεικνύεται ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει είναι το 59,3%, αλλά στην πράξη φτάνει περίπου 42% με 48% λόγω απωλειών στο σύστημα μετάδοσης και αεροδυναμικών ατελειών.

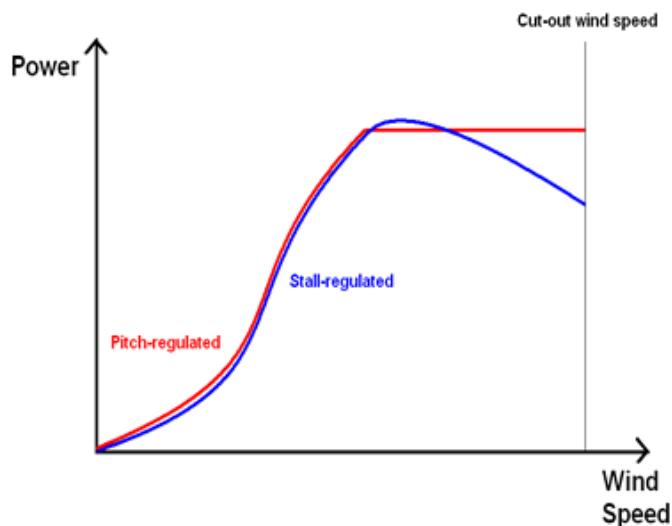
Στη συνέχεια, με την χρήση του pitch control χαλάει η αεροδυναμική του δρομέα όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, ώστε να κρατηθεί η ταχύτητα του δρομέα και η παραγόμενη ισχύς σταθερή, με σκοπό να προστατευθεί η Α/Γ από μεγάλα ρεύματα και μηχανικές καταπονήσεις. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου να τελειώσει το περιθώριο περιστροφής των πτερυγίων, όπου και ενεργοποιούνται τα μηχανικά φρένα και η Α/Γ σταματάει για λόγους ασφαλείας, όπως προαναφέρθηκε. Η ταχύτητα ανέμου που γίνεται αυτό, ονομάζεται ταχύτητα αποκοπής. Έτσι στη μεταβλητών στροφών υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της χαρακτηριστικής για να παρθεί η βέλτιστη απόδοση σε κάθε ταχύτητα ανέμου ενώ στην σταθερών στροφών πρέπει με βάση τις μετρήσεις του αέρα που έχουν καταγραφεί να επιλεγεί μία σταθερή χαρακτηριστική που έχει την μέγιστη ισχύ στην επικρατέστερη ταχύτητα ανέμου.



Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστική ελέγχου σύγχρονης γεννήτριας [7]

Ένα άλλο σημείο διάκρισης των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι αν έχουν pitch control ή όχι. Αντίστοιχα ονομάζονται pitch και stall. Η διαφορά τους είναι στην απόδοση. Οι stall μόλις ο άνεμος φτάσει την ονομαστική του ταχύτητα στη συνέχεια τα φτερά της είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να γίνεται αποκόλληση της ροής του αέρα με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγόμενη

ισχύς. Αντίθετα οι pitch control με την περιστροφή των φτερών παραμένουν στην ονομαστική τους ισχύ μέχρι και την ταχύτητα αποκοπής του ανέμου, όπου και σταματάνε. Επομένως οι stall είναι πιο απλές στην κατασκευή και στον έλεγχο τους, αλλά υστερούν σε απόδοση.



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα ισχύς - ταχύτητας ανέμου για pitch control και Stall A/T[10]

Ο τύπος που περιγράφει την μηχανική ισχύ στον άξονα της A/T είναι ο ακόλουθος

$$P_m(V_w) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A_R \cdot V_w^3$$

Όπου:

- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα
- A_R η επιφάνεια του δρομέα
- V_w η ταχύτητα της κάθετης στον δρομέα συνιστώσας του αέρα.
- C_p είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής

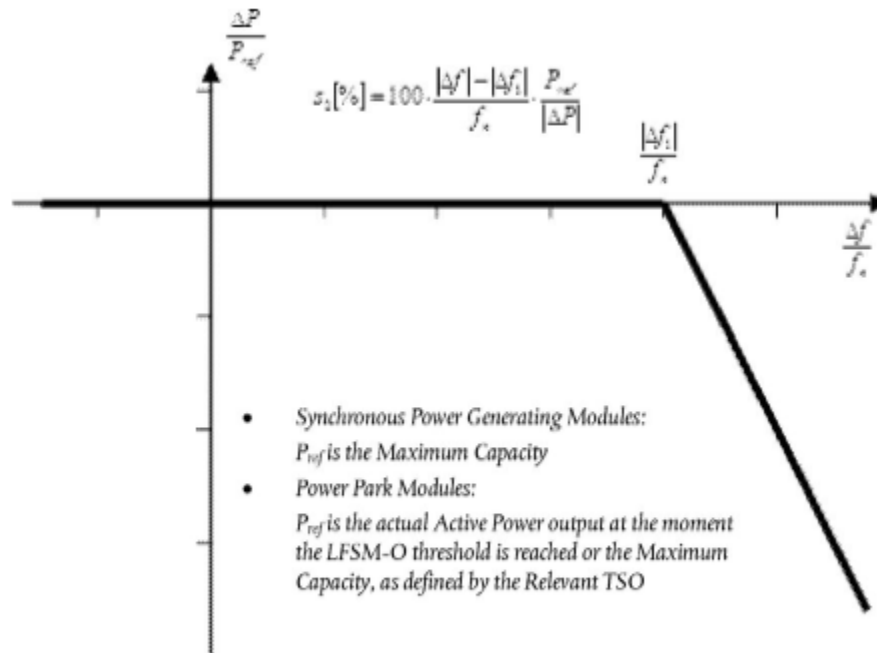
Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p είναι ο λόγος της μηχανικής ισχύος στον άξονα του δρομέα και της ισχύος του ανέμου. Ουσιαστικά μας δείχνει την αποτελεσματικότητα του δρομέα να μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική. Το C_p σε μηχανές τύπου stall είναι συνάρτηση μόνο του λ , ενώ σε τύπου pitch και του β . Το λ είναι ο λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα ανέμου και δίνεται από την σχέση $\lambda = \frac{\omega_R \cdot R}{V_w}$. Ενώ β είναι η γωνία pitch, που δείχνει πόσο έχει περιστραφεί το φτερό από την αρχική του θέση.

1.4 Τεχνικές Απαιτήσεις Συστήματος

Με την αύξηση εισχώρησης των αιολικών, που αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό των ΑΠΕ [11], πέρα από την παροχή ισχύος, υπήρξε η ανάγκη για παροχή και άλλων εφεδρικών υπηρεσιών που μέχρι τώρα κάλυπταν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής. Έτσι σταδιακά ο διαχειριστής του δικτύου ανέπτυξε προϋποθέσεις τις οποίες πρέπει να τηρούν οι Α/Γ κατά την λειτουργία τους για να δεχτεί την σύνδεση τους στο δίκτυο. Η μία έχει να κάνει με τον έλεγχο ενεργού ισχύος, ενώ η άλλη με την αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση (FRT).

Η κατάσταση στο δίκτυο, τόσο στο φορτίο όσο και στην παραγωγή, πλέον είναι δυναμική. Αυτό σημαίνει ότι η ζήτηση και η προσφορά μεταβάλλονται συνέχεια. Όμως, από τους νόμους της φυσικής, για να υπάρξει ευστάθεια, πρέπει κάθε χρονική στιγμή η κατανάλωση ενέργειας να ισούται με την παραγωγή. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου είναι η συχνότητα και η τάση. Η πρώτη εξαρτάται από την ενεργό ισχύ ενώ η δεύτερη από την άεργο.

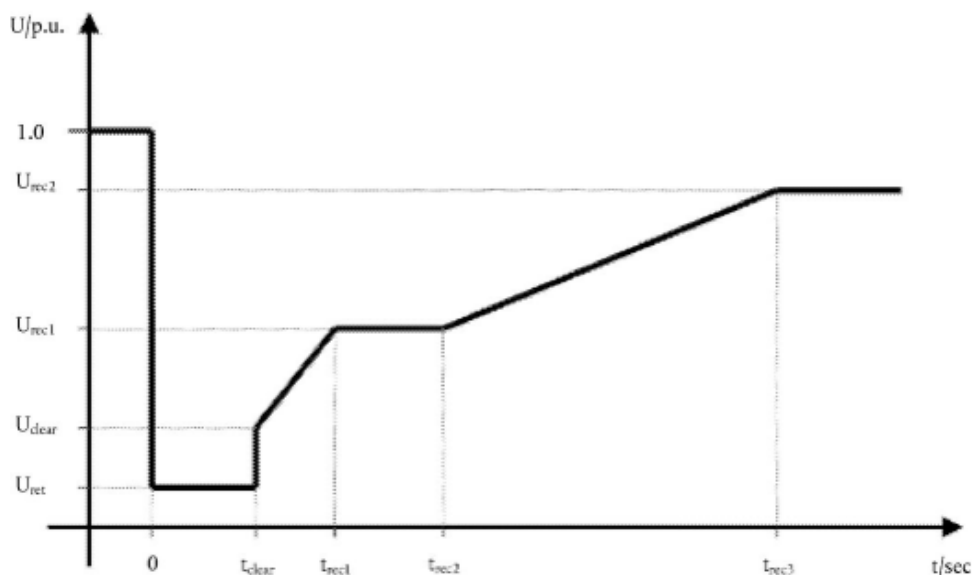
Με βάση τα παραπάνω ο ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) προβλέπει κάποιες χαρακτηριστικές που πρέπει να ακολουθούν οι Α/Γ για να συνδεθούν στο δίκτυο. Η πρώτη έχει να κάνει με την απαίτηση του κώδικα για μείωση ενεργού ισχύος σε υπερ-συχνότητα.



Σχήμα 1.4: Μεταβολή της παραγόμενης ισχύος συνάρτηση της συχνότητας [12]

Αυτό που ουσιαστικά φαίνεται στο γράφημα είναι ότι, με κάποια προσυμφωνημένη κλίση, όσο αυξάνεται η συχνότητα πρέπει να μειώνεται η παραγόμενη από την γεννήτρια ενεργό ισχύ.

Μία άλλη απαίτηση για την τάση φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα.



Σχήμα 1.5: Απαιτήση για αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση [12]

Σε περίπτωση σφάλματος όπου υπάρξει βύθιση της τάσης, αν η κυματομορφή της τάσης παραμείνει πάνω από το όριο που απεικονίζεται στην παραπάνω γραφική, η Α/Γ δεν έχει το δικαίωμα να αποσυνδεθεί. Αντίθετα αν οποιαδήποτε στιγμή πέσει κάτω από το όριο τότε μπορεί να αποσυνδεθεί χωρίς καμία κύρωση.

Πέραν του ENTSO-E που είναι ρυθμιστής για όλη την Ευρώπη και κάθε κράτος μέλος πρέπει να συμμορφώνεται με αυτόν, αφού πλέον μιλάμε για ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο η κάθε χώρα μπορεί να έχει επιπλέον όρους για της σύνδεση μιας Α/Γ. Όπως ο κανονισμός του ΑΔΜΗΕ [13] στην Ελλάδα και ο bdew [14] στη Γερμανία.

1.5 Δομή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

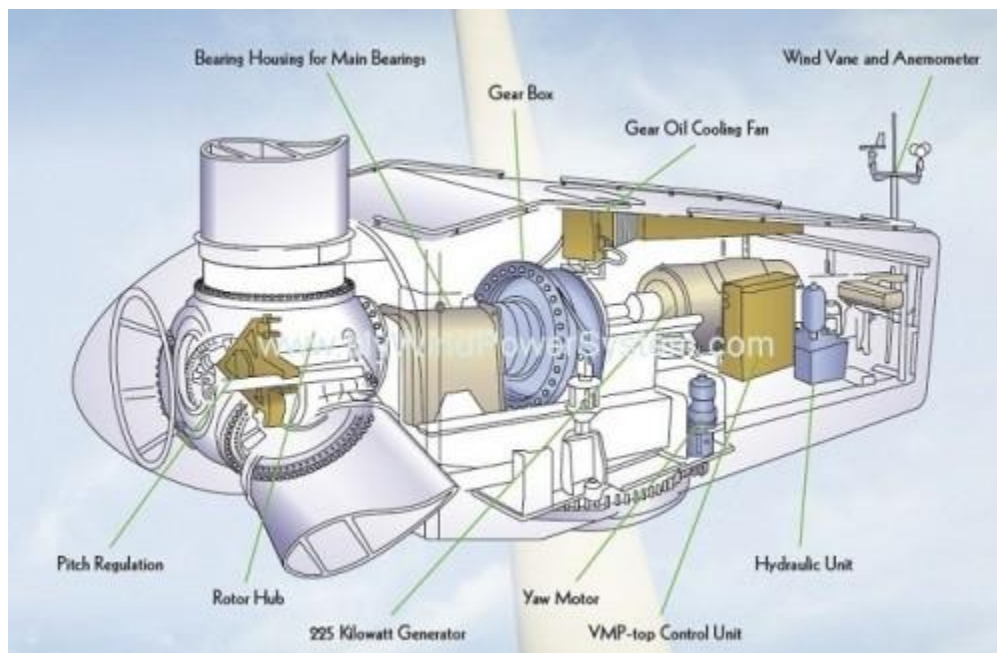
Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές μέσω των οποίων η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική που στη συνέχεια διοχετεύεται στο δίκτυο μεταφοράς ή διανομής για εκμετάλλευση. Μία Α/Γ αποτελείται από τρία μέρη, τον δρομέα, την άτρακτο και τον πύργο [4].

Ο δρομέας συνήθως κατασκευάζεται με τρία πτερύγια, τα οποία έχουν την αεροδυναμική μορφή των ελίκων αεροπλάνου, με αρκετή συστροφή και συνεχή μείωση της διατομής τους, από τη βάση προς τα άκρα. Για τους δρομείς μεγάλων Α/Γ χρησιμοποιούνται υλικά όπως τα ανθρακονήματα. Η στήριξη των πτερυγίων στον άξονα του δρομέα μπορεί να είναι είτε σταθερή ή μεταβλητή. Δηλαδή να υπάρξει η δυνατότητα περιστροφής του πτερυγίου στη βάση του. Επιπλέον το πτερύγιο μπορεί να αποτελείται από δύο τμήματα, ένα σταθερό, στηριζόμενο στον άξονα και ένα ρυθμιζόμενο ακροπτερύγιο. Αυτά τα συστήματα περιστροφής προσφέρουν την δυνατότητα ελέγχου ισχύος - στροφών κατά την λειτουργία της Α/Γ [4].

Ο χώρος μηχανισμών ή άτρακτος, κυρίως περιλαμβάνει το σύστημα εδράσεως του δρομέα στον πύργο, το κιβώτιο ταχυτήτων, τα μηχανικά φρένα, τους μηχανισμούς ελέγχου του

βήματος των περυγίων και του συστήματος περιστροφής και προσανατολισμού προς την κατεύθυνση του ανέμου [4].

Ο πύργος για Α/Γ μεγάλης ισχύος είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα ή μεταλλικός. Βασική σημασία για την επιλογή του πύργου είναι ο προβλεπόμενος τρόπος μεταφοράς και εγκατάστασής του, σε συνδυασμό με την όλη συναρμολόγηση της Α/Γ και την έδραση της. Ο πύργος υπολογίζεται ως πακτωμένη δοκός, η οποία υφίσταται σύνθετη στατική και κυρίως δυναμική καταπόνηση. Ο σχεδιασμός του πύργου ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού έχει βασική σημασία [4].



Σχήμα 1.6: Τα εξαρτήματα που είναι στο εσωτερικό μιας ανεμογεννήτριας [5]

1.6 Επιλογή τοποθεσίας και στοιχεία ανεμογεννητριών

Η διαδικασία ξεκινάει με την αναζήτηση “οικοπέδων” τα οποία είναι διαθέσιμα για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια, ξεκινούν διαδικασίες για την αδειοδότηση του πάρκου, συνεχείς μετρήσεις του ανέμου για να μελετηθεί αν έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και μελέτη γεωλογικών, τοπογραφικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων που θα καθορίσουν την δυσκολία της μεταφοράς των υλικών και του εξοπλισμού, την κατασκευή του πάρκου και την διασύνδεσή του με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.



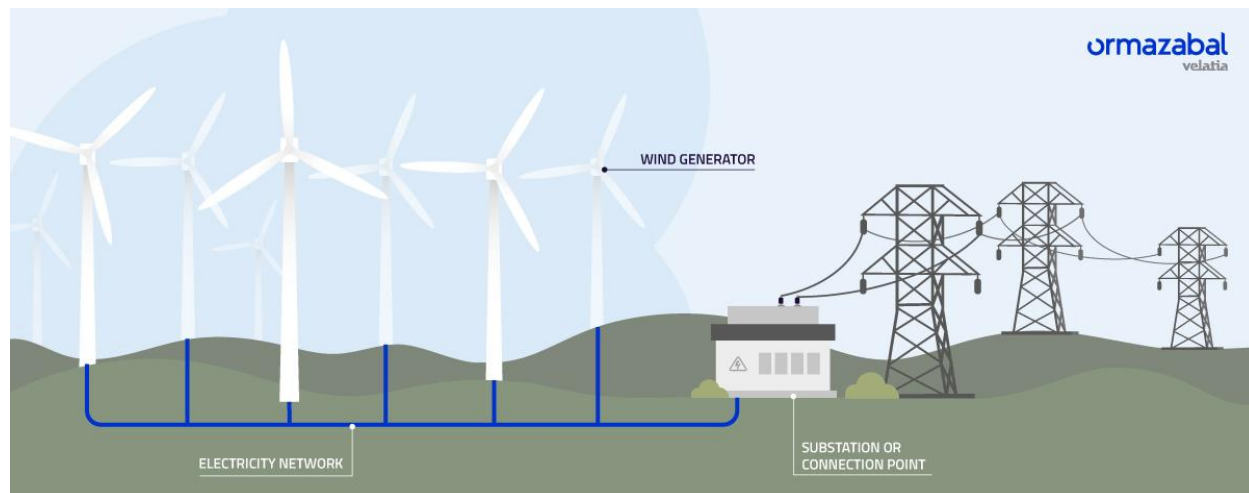
Σχήμα 1.7: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα [6]

Το βασικό στοιχείο για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της εκάστοτε θέσης είναι το αιολικό προφίλ της περιοχής. Για αυτό το λόγο για ένα με τρία έτη μετράται συνεχόμενα ο άνεμος στην υποψήφια θέση. Πιο συγκεκριμένα, μετρούνται η ταχύτητα, η διεύθυνση, ο στροβιλισμός και οι αναταράξεις του ανέμου.

Τεχνικά, μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα παράγει ισχύ από 800 έως 8000 kW. Η διάμετρος του δρομέα της είναι από 45 έως 160m ανάλογα το αιολικό προφίλ της περιοχής και αποτελείται από 3 πτερυγία. Το ύψος της ασέλας κυμαίνεται από 45 έως 160m. Η παραγωγή είναι δυνατή για ταχύτητες ανέμου μεταξύ 3-30m/s. Σε ταχύτητες πιο κάτω από αυτές, η παραγόμενη ισχύς δεν αρκεί για την κάλυψη των απωλειών ούτε της ίδιας της μηχανής, ενώ σε πιο μεγάλες κινδυνεύει από μηχανικές καταπονήσεις και υψηλές τιμές ρεύματος ο εξοπλισμός, οπότε ενεργοποιούνται τα μηχανικά φρένα και ακινητοποιείται ο δρομέας. Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου και δρομέα, στις οποίες η Α/Γ παράγει την ονομαστική και μέγιστη ισχύ της κυμαίνονται από 9 έως 16 m/s και 9 - 35 rpm αντίστοιχα. Η ελάχιστη ταχύτητα του δρομέα είναι τα 2 rpm. Σήμερα το κόστος για κατασκευή μιας Α/Γ είναι περίπου 1000 €/kW [7].

1.7 Αιολικά πάρκα

Οι Α/Γ συνήθως δεν εγκαθίστανται μεμονωμένα αλλά πολλές μαζί σχηματίζοντας ένα αιολικό πάρκο.

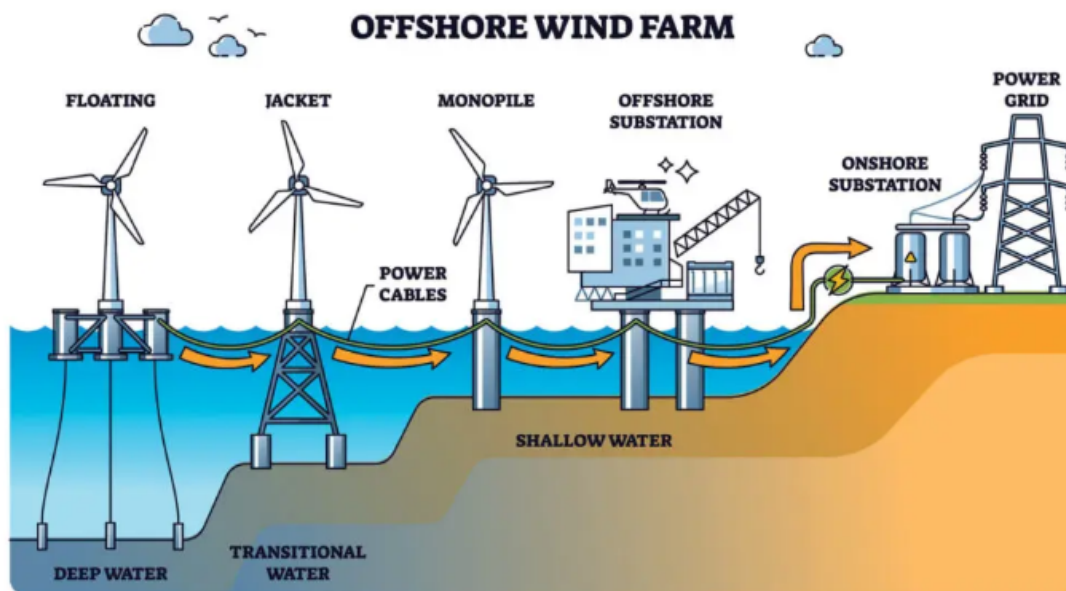


Σχήμα 1.8: Α/Γ, υποσταθμός και σύνδεση με το δίκτυο μεταφοράς [16]

Κάθε ανεμογεννήτρια, μεμονωμένα, παράγει ηλεκτρική ισχύ σε μία σχετικά χαμηλή τάση, ανάλογα το μέγεθός της. Μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες, κάτω των 100kW, έχουν τάση εξόδου 400V - 690V. Οι μεγαλύτερες, που περνάμε πλέον σε κλίμακα μερικών MW, έχουν τάση 690 V - 1kV. Στη συνέχεια, αυτή η τάση ανυψώνεται σε μέση (20kV), μέσω μετασχηματιστών, που υπάρχουν είτε στη βάση των ανεμογεννητριών, είτε στην άτρακτο. Έτσι, η ενέργεια είναι σε θέση να διανύσει μία απόσταση κάποιων χιλιομέτρων χωρίς σημαντικές απώλειες, έως τον υποσταθμό του πάρκου. Εκεί, ανυψώνεται από την μέση τάση στην υψηλή (150kV) και συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς του συστήματος. Η σύνδεση γίνεται είτε με εναέριο καλώδιο αν είναι onshore πάρκο είτε με υποβρύχιο DC καλώδιο, συνήθως, αν είναι offshore.

Οι βασικοί λόγοι που έχουμε πάρκα ανεμογεννητριών και όχι μεμονωμένες ανεμογεννήτριες είναι οικονομικοί και πρακτικοί. Αρχικά, με αυτό τον τρόπο ο κατασκευαστής πετυχαίνει οικονομίες κλίμακας. Είναι πολύ πιο εύκολο μία περιοχή με καλό αιλικό προφίλ να εκμεταλλεύεται πλήρως από πολλές Α/Γ. Μειώνεται το κόστος ανά MW από διάφορες απόψεις. Όσες περισσότερες Α/Γ αφορά η κατασκευή, τόσο καλύτερη τιμή μπορεί να διεκδικήσει ο επενδυτής ανά MW. Τα έργα υποδομής που θα γινόντουσαν έτσι και αλλιώς, όπως το άνοιγμα των δρόμων, η μεταφορά των υλικών και των μηχανημάτων και ο υποσταθμός, αλλά και οι διαδικασίες, όπως οι συντηρήσεις, η σύνδεση στο δίκτυο, οι μελέτες και οι άδειες κατακερματίζονται σε περισσότερα MW.

Ακόμα, προτιμάται και από τον ίδιο τον διαχειριστή ένα πάρκο με πολλές ανεμογεννήτριες, διότι είναι πιο προβλέψιμο και έχει καλύτερη ποιότητα ισχύος. Με την αύξηση του αριθμού των μηχανών η παραγωγή είναι πιο σταθερή και δεν έχει βηματικές μεταβολές από ενδεχόμενη ζημιά σε μία από αυτές, όπως θα υπήρχαν αν είχαμε μία ή δύο μηχανές.



Σχήμα 1.9: Offshore αιολικό πάρκο [17]

Οπότε η στοχαστικότητα στην παραγωγή περιορίζεται κυρίως στον άνεμο. Επίσης, με την σύνδεση πολλών Α/Γ στον ίδιο υποσταθμό μειώνεται η επίδραση του θορύβου του ανέμου στην κυματομορφή του ρεύματος και η επίδραση της σκίασης του πύργου, οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα ισχύος.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία τάση ανάπτυξης offshore πάρκων, παρά τις σημαντικά μεγαλύτερες τεχνικές δυσκολίες που έχουν στην υλοποίησή τους και τα υψηλότερα κόστη, ειδικά σε capex (αρχικό κεφάλαιο). Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που συμβαίνει αυτό. Τα διαθέσιμα οικοπέδα, και ιδιαίτερα αυτά με καλό αιολικό προφίλ, έχουν σε μεγάλο βαθμό κορεστεί στην στεριά. Το αιολικό δυναμικό στη θάλασσα είναι καλύτερο. Λόγω της έλλειψης εμποδίων και της ιδιομορφίας του εδάφους, οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι, εμφανίζουν λιγότερη τύρβη και είναι πιο σταθεροί στην κατεύθυνσή τους. Επίσης, η θάλασσα με τον άπλετο χώρο που διαθέτει, επιτρέπει την εγκατάσταση μεγαλύτερων Α/Γ, που πετυχαίνουν καλύτερες αποδόσεις. Η ευκολότερη μεταφορά με πλοία, η απουσία χωρικών εμποδίων και η έλλειψη αντιδράσεων από τους κατοίκους για οπτικούς και ακουστικούς λόγους είναι μερικοί από τους λόγους που επιτρέπουν την χρήση μεγαλύτερης ισχύος Α/Γ από αυτές της ξηράς.

1.8 Αιολική ανάπτυξη στην Ευρώπη

Η Ευρώπη ήταν πρωτοπόρα σε ότι αφορά την αιολική ενέργεια. Το 1982 ιδρύθηκε τον Σεπτέμβριο στην Στοκχόλμη ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας. Την ίδια χρονιά η Δανία εφαρμόζει το πρώτο πρόγραμμα ανάπτυξης για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και

κατασκευάζεται το πρώτο ευρωπαϊκό αιολικό πάρκο, στο νησί της Κύθνου στην Ελλάδα. Το πάρκο σχηματιζόταν από πέντε ανεμογεννήτριες των 20kW (Σχήμα 1.9).

Η εξέλιξη συνεχίστηκε με εξαγωγές Α/Γ στην Αμερική και καινοτομίες, τόσο στην κατασκευή Α/Γ όσο και στην εγκατάσταση, με κυρίαρχες χώρες την Δανιά, την Γερμανία και στη συνέχεια ακολούθησαν στη δημιουργία αιολικών πάρκων η Αγγλία, η Ισπανία, η Γαλλία. Οι εταιρείες που πραγματοποιούσαν την έρευνα και την ανάπτυξη των μηχανών ήταν κυρίως η Vestas και η Enercon [19].

Η EWEA το 1991 δημοσίευσε τους στόχους για τις επόμενες δεκαετίες που παρουσιάζονται στο σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.10: Αιολικό πάρκο στη Κύθνο [18]

Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις, οι δράσεις της EWEA, οι πολιτικές ανάπτυξης των ΑΠΕ που υιοθετήθηκαν από τα κράτη μέλη, οδήγησαν οι στόχοι αυτοί χρόνο με το χρόνο να αυξάνονται ραγδαία. Αυτό φαίνεται και από την αναφορά της WindEUROPE για το 2024. Το 2024 μόνο, εγκαταστάθηκαν νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 16.4 GW, όπου το 84% αυτής αφορά onshore, ενώ το υπόλοιπό offshore. Η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυτή τη στιγμή στην Ευρώπη ανέρχεται στα 285GW. Ο στόχος είναι την πενταετία 2025-2030 να εγκατασταθούν ακόμα 187 GW αιολικής ισχύος, φτάνοντας τα 450 GW συνολικά, ξεπερνώντας τον στόχο των 425 GW που υπάρχει [20].

EWEA publishes action plan for European wind energy development, showing potential for Installed capacity of:

4,000
MW

BY 2000

11,500
MW

BY 2005

25,000
MW

BY 2010

100,000
MW

BY 2030

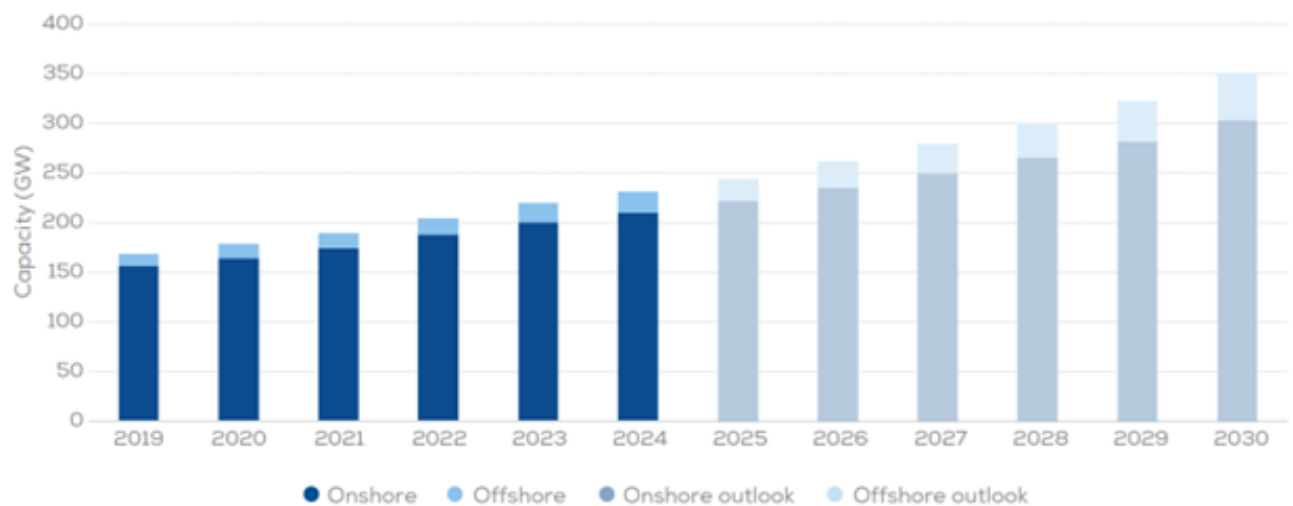


STATS & TARGETS

Σχήμα 1.11: Στόχοι EWEA(1991) [19]

Το συμπέρασμα από όλα τα παραπάνω είναι ότι η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος κλάδος και θα συνεχίσει να αναπτύσσεται εκθετικά και τα επόμενα χρόνια στην Ευρώπη.

FIGURE 20. New wind power capacity in the EU - WindEurope's Outlook



Source: WindEurope

Σχήμα 1.12: Πρόβλεψη για την αύξηση της αιολικής ισχύς στην Ευρώπη έως το 2030 [20]

1.9 Αιολική ανάπτυξη στην Ελλάδα

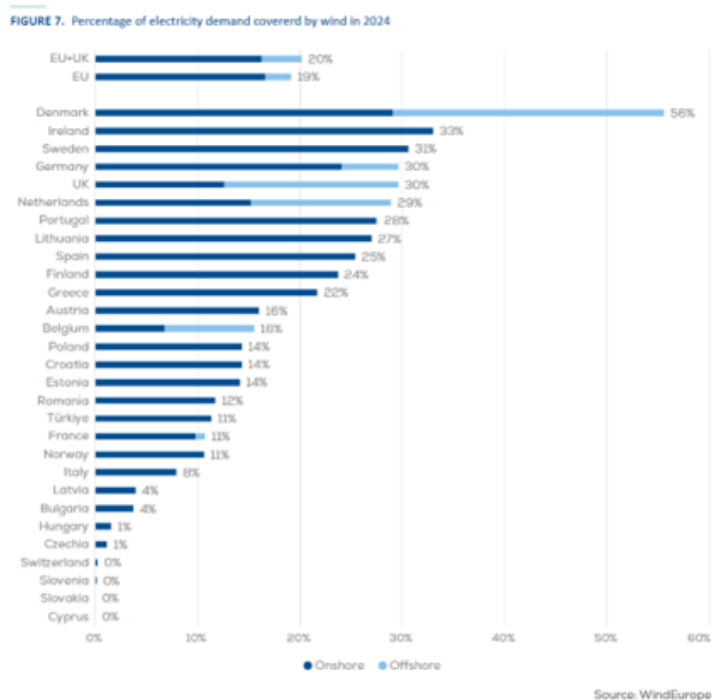
Η Ελλάδα, αν και μικρή χώρα, είχε ενταχθεί από νωρίς στον χώρο της αιολικής ενέργειας, αφού όπως και προαναφέρθηκε, το πρώτο αιολικό πάρκο στην Ευρώπη κατασκευάστηκε σε αυτή. Για το 2024, όπως φαίνεται στο γράφημα που ακολουθεί, το 22% από την ενέργεια που καταναλώθηκε προήλθε από αιολική ενέργεια. Βάσει των στοιχείων της ΕΛΕΤΑΕΝ (Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας), στο τέλος του 2024 η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα ήταν 5,355 GW, και ο στόχος μέχρι το 2030 είναι 9.5GW [21].

Επίσης, από το σχήμα 1.13 βλέπουμε ότι η αύξηση της αιολικής ισχύος τα τελευταία χρόνια ακολουθεί εκθετική καμπύλη.

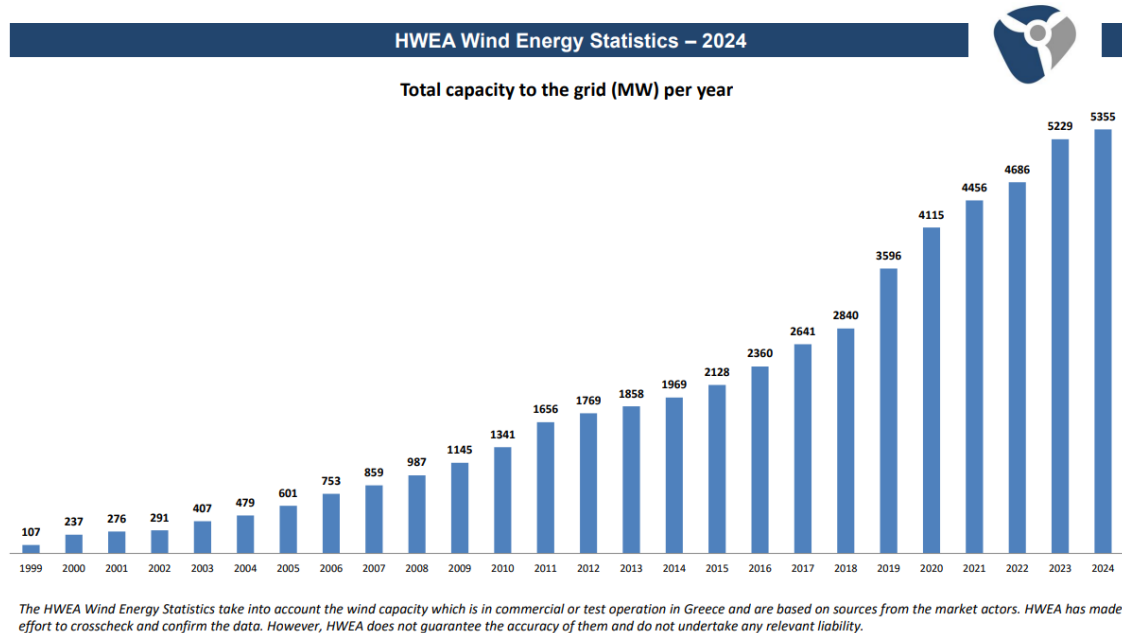
Βάση του ΕΣΕΚ (Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα) στόχος το 2030 είναι το 82% της ηλεκτρικής παραγωγής να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επενδύσεις ύψους 95 δις. Ευρώ έχουν προγραμματιστεί με στόχο την ανάπτυξη της ενεργειακής απόδοσης, των ΑΠΕ και των υποδομών αποθήκευσης [23].

Μέρος αυτής της κατανάλωσης θα καλυφθεί και με την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων, όπως ανακοινώθηκε από το εθνικό πρόγραμμα ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα περιλαμβάνει 25 περιοχές, με ισχύ 12,4 GW εκ των οποίων οι 10 προβλέπεται να αναπτυχθούν έως το 2030-32, ισχύος 4,9 GW [24].

Οπότε, βλέπουμε ότι ακόμα μεγάλα αιολικά έργα onshore και offshore προβλέπεται να κατασκευαστούν στην Ελλάδα στο μέλλον.



Σχήμα 1.13: Ποσοστό αιολικής ενέργειας στην κατανάλωση Ευρωπαϊκών χωρών [20]



Σχήμα 1.14: Αύξηση αιολικής παραγωγής ανά τα έτη [22]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα γείωσης είναι σημαντικό και αναπόσπαστο κομμάτι για την ασφάλεια τόσο του εξοπλισμού όσο και του ανθρώπου. Αυτό ισχύει ειδικά όταν μιλάμε για Α/Γ πάνω σε κορυφές βουνών ή στη θάλασσα μερικών δεκάδων μέτρων, με μεταλλικά μέρη, οι οποίες πολλές φορές λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών τους, πλήττονται από κεραυνούς.

Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει μία παρουσίαση των χαρακτηριστικών και των παραγόντων που επηρεάζουν τα συστήματα γείωσης, η οποία σταδιακά θα οδηγήσει στα συστήματα γείωσης για Α/Γ, που είναι το ερευνητικό αντικείμενο αυτής της διπλωματικής.

2.2 Ορισμοί

Για την καλύτερη κατανόηση της κατασκευής και της λειτουργίας των συστημάτων γείωσης, ακολουθούν κάποιο βασικοί ορισμοί, όπως δίνονται στο πρότυπο IEEE Std 80-2013 [25], που αποτελεί τον οδηγό για την αξιόπιστη γείωση υποσταθμών εναλλασσομένου ρεύματος. Οι ορισμοί και οι βασικές έννοιες είναι οι ίδιες και για τις γειώσεις των Α/Γ.

2.2.1 Ορισμοί Συστήματος Γείωσης

Ηλεκτρόδιο Γείωσης: Αγωγός θαμμένος στο έδαφος, που χρησιμοποιείται είτε για συλλογή του ρεύματος γης ή το διαρρέον ρεύμα προς γη.

Κύριο ηλεκτρόδιο γείωσης: Ηλεκτρόδιο που σχεδιάστηκε ή προσαρμόστηκε ειδικά για να διοχετεύει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Συνήθως με συγκεκριμένο πρότυπο διάχυσης, όπως προβλέπεται από τον σχεδιασμό του συστήματος γείωσης.

Βοηθητικό ηλεκτρόδιο γείωσης: Ηλεκτρόδιο γείωσης με συγκεκριμένους περιορισμούς σχεδιασμού ή λειτουργίας. Η κύρια λειτουργία του δεν είναι απαραίτητα η διοχέτευση του ρεύματος σφάλματος προς τη γη.

Πλέγμα γείωσης: Σύστημα αλληλοσυνδεδεμένων ηλεκτροδίων γείωσης διαταγμένων με ένα σχέδιο σε καθορισμένη περιοχή και θαμμένα κάτω από την επιφάνεια της γης.

Μεταλλικό πλέγμα επιφανείας: Στερεή μεταλλική πλάκα ή σύστημα από γυμνούς αγωγούς σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, τοποθετημένο ρηχά πάνω από πλέγμα ή κοντά στην επιφάνεια του

εδάφους. Σκοπός είναι η πρόσθετη προστασία σε περιοχές με συχνή παρουσία ανθρώπων, όπως χειριστές, μειώνοντας τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Υλικό επιφανείας: Υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος όπως χαλίκι, πέτρα, ασφαλτό και τεχνητά υλικά. Ανάλογα με την ειδική αντίσταση του υλικού, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα σε περίπτωση σφάλματος.

Αγωγός γείωσης: Αγωγός ή σύστημα αγωγών που συνδέει όλα τα μεταλλικά στοιχεία μιας Α/Γ με το σύστημα γείωσης.

Γείωση: Αγωγήμη σύνδεση, σκόπιμα ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή εξοπλισμός συνδέεται με τη γη ή με αγωγίμο σώμα μεγάλης έκτασης που λειτουργεί ως υποκατάστατο της γης.

Γειωμένο: Σύστημα, κύκλωμα ή εξοπλισμός που έχει συνδεθεί με γείωση για τη δημιουργία διαδρομής επιστροφής ρεύματος σφάλματος μέσω της γης και για την διατήρηση του δυναμικού του κοντά στο δυναμικό της γης.

Κύκλωμα επιστροφής μέσω γης: Κύκλωμα στο οποίο η γη ή ισοδύναμο αγωγίμο σώμα χρησιμοποιείται για να ολοκληρωθεί το κύκλωμα και να κυκλοφορήσει ρεύμα προς ή από την πηγή του.

Σύστημα γείωσης: Το σύνολο όλων των αλληλοσυνδεδεμένων διατάξεων γείωσης σε μία καθορισμένη περιοχή.

2.2.2 Ορισμοί Ρεύματος Σφάλματος

Έχοντας αναφέρει τους ορισμούς των στοιχείων που αποτελούν ένα σύστημα γείωσης στην προηγούμενη παράγραφο, θα συνεχίσουμε με την παράθεση των ορισμών των ρευμάτων που είναι σχεδιασμένο ένα σύστημα γείωσης να απορροφά και να διοχετεύει με ασφάλεια στη γη.

Ρεύμα γείωσης: Ρεύμα που ρέει προς ή από τη γη, ή το ισοδύναμο της.

DC συνιστώσα: Η διαφορά ανάμεσα στο εναλλασσόμενο ρεύμα και στο πραγματικό ρεύμα κατά τη διάρκεια σφάλματος στο σύστημα ισχύος. Μαθηματικά, το πραγματικό ρεύμα σφάλματος αποτελείται από την υπέρθεση δύο συνιστωσών. Μιας συμμετρικής εναλλασσόμενης και μιας dc συνιστώσας, η οποία δεν αλλάζει πολικότητα και μειώνεται με συγκεκριμένο ρυθμό.

Συντελεστής εξασθένισης: Παράγοντας διόρθωσης που χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς ασφαλείας γείωσης, σε συνδυασμό με το εναλλασσόμενο ρεύμα σφάλματος. Υπολογίζει το

ισοδύναμο ενεργό ρεύμα RMS της ασύμμετρης κυματομορφής για μια χρονική διάρκεια σφάλματος, λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό dc offset και την απόσβεση του.

Υπομεταβατική αντίσταση: Η αντίσταση μιας γεννήτριας κατά την έναρξη ενός σφάλματος. Χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος. Η τιμή αυτή θεωρείται σταθερή για περίπου 0,05 s μετά την εκδήλωση του σφάλματος.

Συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη: Η μέγιστη τιμή RMS του συμμετρικού ρεύματος μετά την εκδήλωση σφάλματος προς γη. Αντιπροσωπεύει την τιμή RMS του συμμετρικού μέρους στην πρώτη ημιπερίοδο της κυματομορφής ρεύματος.

Για σφάλμα φάσης προς γη:

$$I_{f0} = 3 \cdot I_0$$

Όπου I_0 το αρχικό συμμετρικό ρεύμα μηδενικής ακολουθίας (RMS), το οποίο επηρεάζεται από την υπομεταβατική αντίσταση των γεννητριών που συμβάλλουν στο σφάλμα.

Ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος: Η RMS τιμή της μη συμμετρικής κυματομορφής ρεύματος ολοκληρωμένη στο διάστημα της διάρκειας του σφάλματος (σχήμα 2.1)

$$I_F = D_f \times I_f$$

Όπου:

- I_F : Είναι το πραγματικό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος σε A
- I_f : Είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη σε A
- D_f : Είναι ο συντελεστής εξασθένησης

Μέγιστο ρεύμα πλέγματος: Η σχεδιαστική τιμή του μέγιστου ρεύματος που μπορεί να διοχετευτεί στο πλέγμα γείωσης, υπολογιζόμενη ως:

$$I_g = D_f \cdot I_r$$

Όπου:

- I_g : μέγιστο ρεύμα πλέγματος (A)
- D_f : συντελεστής απόσβεσης για τη διάρκεια του σφάλματος
- I_r : συμμετρικό ρεύμα πλέγματος RMS (A)

Συμμετρικό ρεύμα πλέγματος: Το μέρος του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος που ρέει μεταξύ πλέγματος γείωσης και γης.

$$I_g = S \cdot I_f$$

Όπου:

- I_g : συμμετρικό ρεύμα πλέγματος RMS(A)
- I_f : συμμετρικό ρεύμα σφάλματος RMS(A)
- S: συντελεστής κατανομής ρεύματος

Συντελεστής κατανομής ρεύματος σφάλματος: Παράγοντας που αναπαριστά πώς κατανέμεται το ρεύμα σφάλματος μεταξύ πολλαπλών διαδρομών. Ο αντίστροφος λόγος του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος προς το μέρος του ρεύματος που ρέει μεταξύ του πλέγματος γείωσης και της γύρω γης.

$$S = \frac{I_{grid}}{F}$$

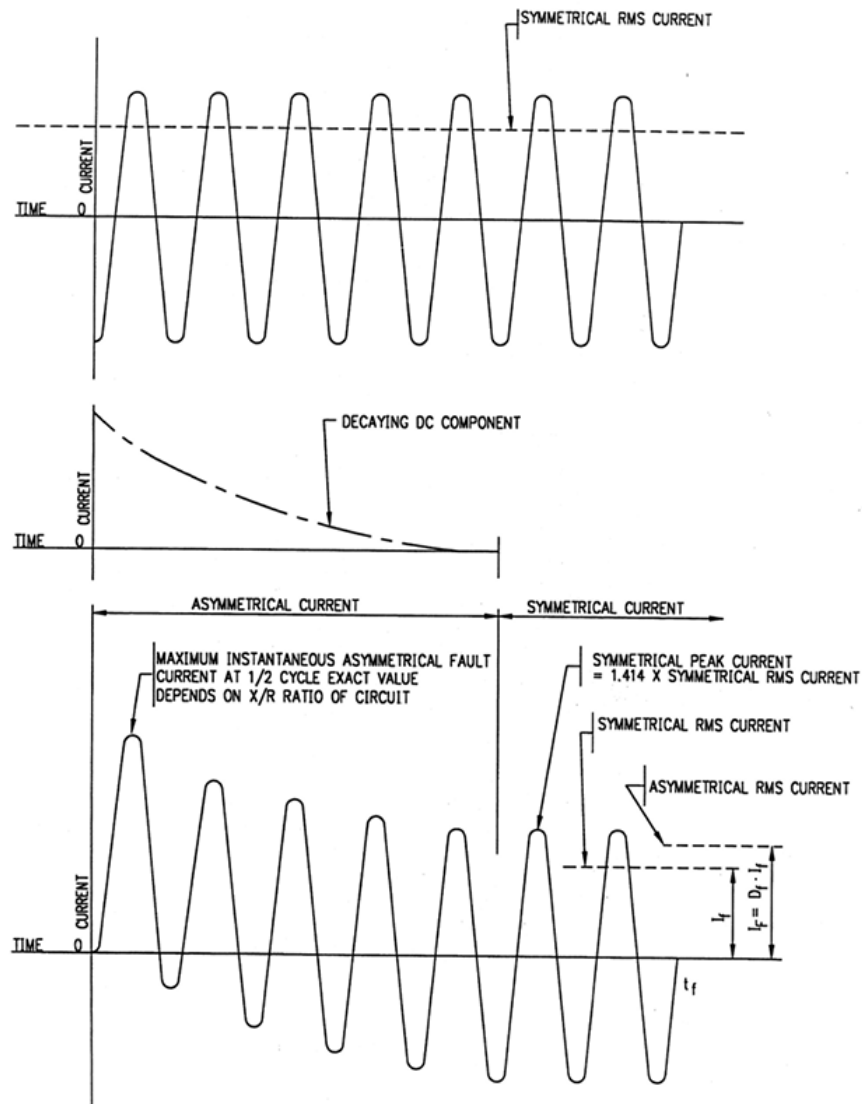
Όπου:

- S: συντελεστής κατανομής
- I: συμμετρικό ρεύμα πλέγματος(RMS) σε A
- F: ρεύμα μηδενικής ακολουθίας σε A

2.2.3 Ορισμοί Αναπτυσσόμενων Τάσεων

Ένα κρουστικό ρεύμα που έχει προκληθεί από την πτώση ενός κεραυνού, όπως είναι γνωστό από τον νόμο του Ohm, αναπτύσσει μία τάση ίση με το γινόμενο του ρεύματος επί την αντίσταση της διαδρομής που διαρρέει. Στα συστήματα γείωσης επιδιώκεται γενικά η επίτευξη μικρών τιμών αντίστασης γείωσης, με στόχο την μείωση του μέτρου των αναπτυσσόμενων τάσεων, αφού η ένταση του κεραυνού δεν μπορεί να ελεγχθεί. Αυτό, διότι οι αναπτυσσόμενες από τα ρεύματα τάσεις είναι αυτές που είναι επικίνδυνες και προκαλούν ηλεκτροπληξία στον άνθρωπο που βρίσκεται κοντά στην Α/Γ, όταν συμβαίνει ένα σφάλμα οποιουδήποτε τύπου [26]. Για αυτό, σε αυτή την υποενότητα, θα αναφερθούμε στους ορισμούς των διάφορων δυναμικών που αναπτύσσονται βάσει του προτύπου.

Άπειρη Γη: Είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε άπειρη απόσταση από το γειωτή, που ορίζεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών. Η τάση της άπειρης γης θεωρείται ίση με το μηδέν.



Σχήμα 2.1: Σχέση ανάμεσα στις πραγματικές τιμές ρεύματος σφάλματος και των τιμών των I_F , D_f , I_f για διάρκεια σφάλματος t_f [25].

Ανύψωση δυναμικού γείωσης: Η μέγιστη ηλεκτρική τάση που μπορεί να αποκτήσει ένα ηλεκτρόδιο γείωσης σε σχέση με την άπειρη γη.

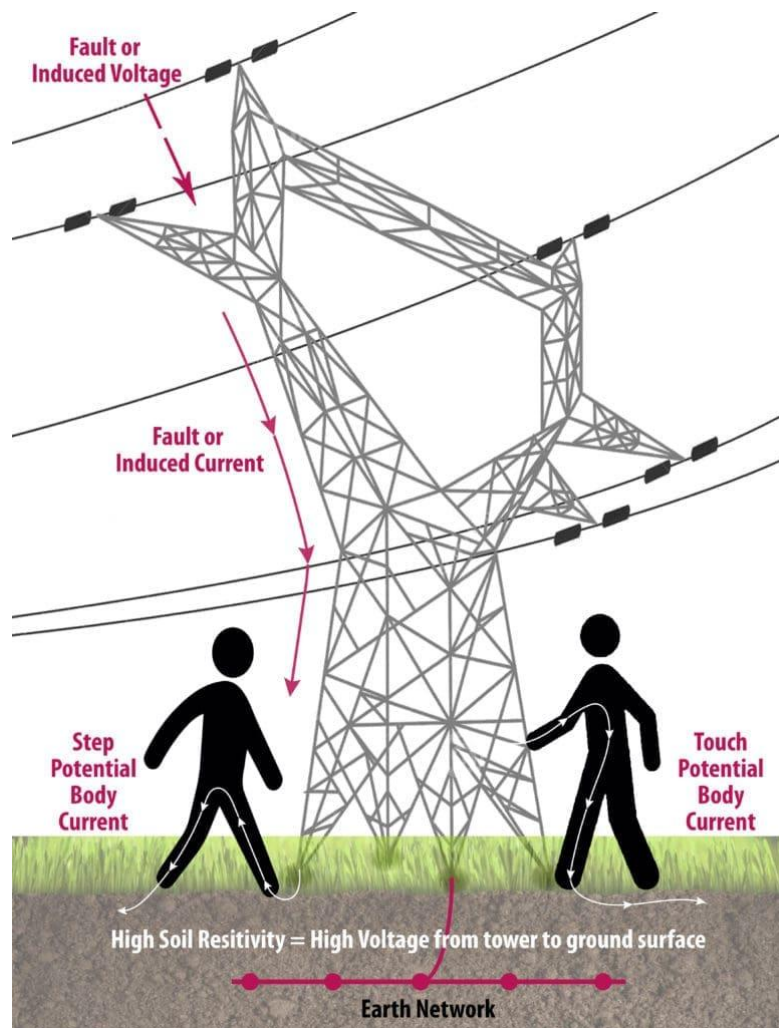
$$GPR = I_{gmax} \times R_g$$

Τάση σφάλματος: Ονομάζεται η διαφορά δυναμικού, η οποία εμφανίζεται ανάμεσα σε ένα τμήμα της εγκατάστασης, που εξαιτίας του σφάλματος βρίσκεται υπό τάση, και στην άπειρη γη.

Τάση επαφής: Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού του εδάφους ενός πλέγματος γείωσης ή ενός συστήματος και του δυναμικού επιφάνειας σε ένα σημείο, όπου ένας άνθρωπος θα μπορούσε να στεκόταν ενώ ταυτόχρονα βρίσκεται σε επαφή με μία γειωμένη δομή. Οι μετρήσεις τάσεως επαφής διακρίνονται σε ανοιχτού κυκλώματος, όπου δεν συμπεριλαμβάνεται η ισοδύναμη αντίσταση του σώματος και κλειστού κυκλώματος, όπου υπάρχει συμπερίληψη της αντίστασης του σώματος.

Τάση πλέγματος: Η μέγιστη τάση επαφής που μπορεί να εμφανιστεί εντός ενός πλέγματος γείωσης.

Βηματική Τάση: Ορίζεται η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης, η οποία εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ανθρώπου, με βήμα ανοίγματος 1m, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο.



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση της ροής ρεύματος από τον άνθρωπο λόγω βηματικής τάσης και τάσης επαφής [27]

2.3 Ανεκτό όριο ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα

Το ανθρώπινο σώμα παρουσιάζει περιορισμένη ανεκτικότητα στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος των 50 Hz ή 60 Hz. Η χρονική διάρκεια διέλευσης και το μέτρο του ρεύματος είναι οι παράγοντες που καθορίζουν τη σοβαρότητα της ηλεκτροπληξίας. Από ένα σημείο και μετά, αυξάνεται σημαντικά ο κίνδυνος πρόκλησης κοιλιακής μαρμαρυγής. Η κοιλιακή μαρμαρυγή χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά αυξημένο καρδιακό ρυθμό, ο οποίος καθιστά αδύνατη την καρδιακή συστολή, οδηγώντας ύστερα από λίγα λεπτά, σε θάνατο [28].

Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι ποσοστό 99,5% του πληθυσμού μπορεί να υποστεί ηλεκτροπληξία χωρίς να επέλθει κοιλιακή μαρμαρυγή αν για την διάρκεια και το πλάτος του ρεύματος ισχύει η παρακάτω σχέση [29], [30]

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

Όπου

$$k = \sqrt{S_B}$$

Και

$$S_B = I_B^2 \cdot t_s$$

Ο κάθε όρος με την σειρά που εμφανίζονται είναι:

- I_B : RMS τιμή του πλάτους κατά την διάρκεια της ηλεκτροπληξίας σε A
- t_s : Η διάρκεια της ηλεκτροπληξίας
- S_B : Εμπειρική σταθερά που σχετίζεται με την ενέργεια της ηλεκτροπληξίας που μπορεί να γίνει ανεκτή από το 99,5% του πληθυσμού.

Για άτομα 50kg, με βάση $S_B = 0,0135$, προκύπτει $k = 0,1162$. Άρα, για $t_s = 1 \text{ sec}$, η ανεκτή τιμή του πλάτους του ρεύματος διαμορφώνεται περίπου στα 116 mA, ενώ για $t_s = 0,1 \text{ sec}$, η τιμή φτάνει τα 367 mA.

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι αντιπροσωπευτικές για τιμές από 0,03 sec έως 3 sec και δεν ισχύουν για τιμές εκτός αυτού του εύρους.

Άλλες πειραματικές μελέτες, όπως εκείνες του πανεπιστημίου Columbia, προτείνουν ως ανώτατο όριο για την αποφυγή μαρμαρυγής τα 100 mA [31]. Τα αποτελέσματα αυτά βασίζονται σε δοκιμές σε ζώα παρόμοιας μάζας με τον άνθρωπο και διάρκεια έκθεσης 3 sec.

Πιο πρόσφατες μελέτες υποδεικνύουν την ύπαρξη ενός κατωφλίου. Για περιπτώσεις όπου η διάρκεια της ηλεκτροπληξίας είναι μικρότερη από έναν καρδιακό παλμό και για μεγαλύτερες διάρκειες, για έναν ενήλικα 50 kg, τα όρια προσδιορίζονται περίπου στα 500 mA και 50 mA αντίστοιχα για τις δύο περιπτώσεις [32], [33]. Έχουν γίνει ακόμα επιπλέον μελέτες επί του θέματος [34], [35].

Η κρίσιμη τιμή ρεύματος μαρμαρυγής φαίνεται να σχετίζεται άμεσα με τη σωματική μάζα. Το σχήμα 2.3 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ βάρους και κρίσιμου ρεύματος σε διάφορα ζώα. Σε μεταγενέστερες μελέτες που εστιάζουν σε άτομα με σωματικό βάρος 70 kg, οι εμπειρικές σταθερές προκύπτουν $S_B = 0,0272$ και $k = 0,165$, ενώ άλλες έρευνες [30], [36] κατέληξαν σε ελαφρώς διαφορετικές τιμές για το ίδιο σωματικό βάρος με $S_B = 0,0246$ και $k = 0,1568$.

Γενικά, το συμπέρασμά είναι ότι σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν εξαιρετικά ταχείες διατάξεις απόσβεσης, οι οποίες περιορίζουν δραστικά τη χρονική διάρκεια του ηλεκτρικού σφάλματος, είναι δυνατή η διέλευση σημαντικά υψηλότερων ρευμάτων χωρίς να τίθεται κίνδυνος για την ανθρώπινη ασφάλεια.

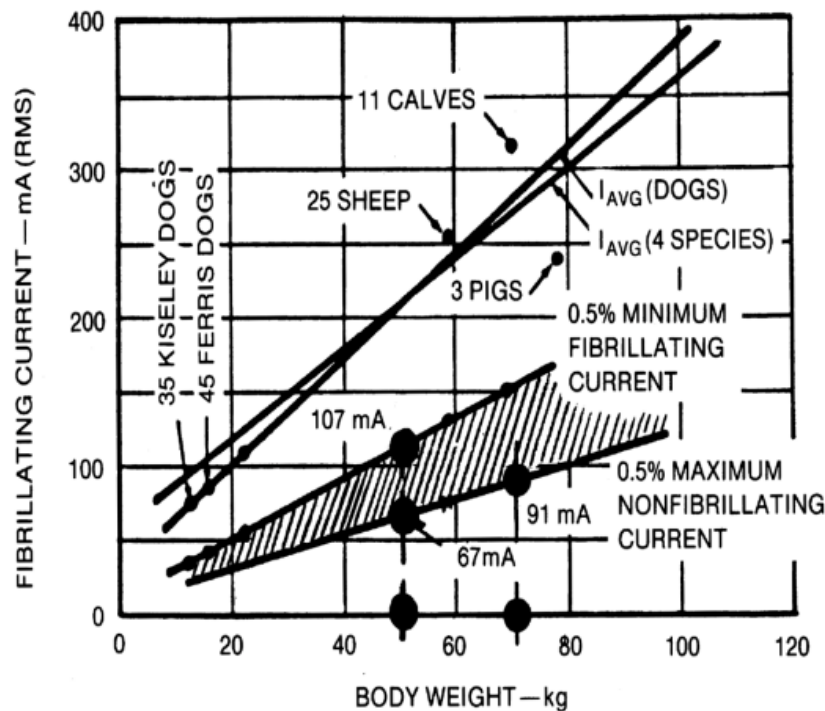
2.4 Το έδαφος ως μέσω γείωσης

2.4.1 Εισαγωγή

Οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος γείωσης, όπως το είδος του ηλεκτροδίου, το εμβαδόν εγκατάστασης και το βάθος τοποθέτησης, είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους και η επιθυμητή τιμή της συνολικής αντίστασης γείωσης. Η ειδική αντίσταση εξαρτάται άμεσα από τη φυσική σύσταση και την πυκνότητα του εδάφους. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης παρουσιάζουν ευρεία διακύμανση, καθώς σχετίζονται με τον τύπο και την κατάσταση του εδάφους όπως αν είναι υγρό, ξηρό, βραχώδες, αμμώδες, ομοιογενές ή ανομοιογενές.

2.4.2 Ειδική αντίσταση του εδάφους

Η υγρασία αποτελεί έναν παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ειδική αντίσταση του εδάφους. Το πόσο σημαντική επίδραση έχει στην αντίσταση εξαρτάται από την παρουσία διαλυμένων ιόντων ή άλλων αγωγίμων στοιχείων, που σε συνδυασμό με την υγρασία μπορεί να μετατρέψει το έδαφος σε ηλεκτρολυτικό μέσο. Με αυτόν τον τρόπο, ενισχύεται η ροή του ρεύματος, οδηγώντας σε μείωση της συνολικής ειδικής αντίστασης.



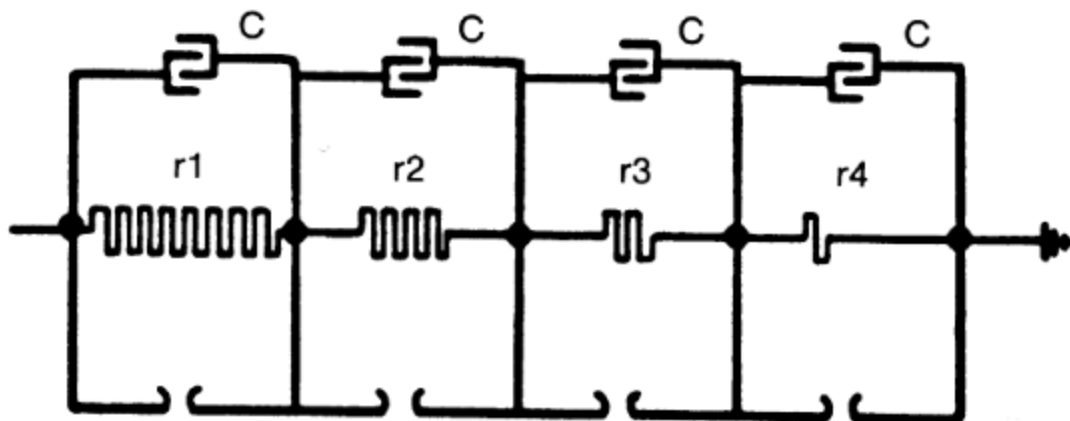
VALUE OF CONSTANT k FOR
EFFECTIVE RMS VALUES OF
 I_B ($k = I_B \sqrt{t_s}$):

$k_{70} = 0.091 \sqrt{3} = 0.157$
 $k_{50} = 0.067 \sqrt{3} = 0.116$
 $k_{50} = 0.107 \sqrt{3} = 0.185$
 FIBRILLATION

Σχήμα 2.3: Γραφική παράσταση σωματικού βάρους σε συνάρτηση με το μέτρο του ρεύματος που αν εφαρμοστεί για 3 sec προκαλεί μαρμαρυγή [25]

Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας, και ιδιαίτερα οι συνθήκες παγετού, ενδέχεται να μεταβάλλουν σημαντικά την ειδική αντίσταση του εδάφους. Για την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων, αν το επιτρέπει το υπέδαφος, εφαρμόζεται η τοποθέτηση ηλεκτροδίων γείωσης σε μεγαλύτερο βάθος, όπου οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι μικρότερες.

Η επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας είναι εντονότερη σε επιφανειακά στρώματα του εδάφους, δηλαδή σε βάθη από 0,5 m έως 1 m, συγκριτικά με βαθύτερα σημεία. Κατά την διάρκεια του έτους, οι μεταβολές σε αυτές τις παραμέτρους επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση ενός επιφανειακά τοποθετημένου γειωτή, καθιστώντας τον λιγότερο σταθερό σε σχέση με έναν κατακόρυφο γειωτή ράβδου, που φτάνει σε μεγαλύτερα βάθη.



Σχήμα 2.4: Κυκλωματική αναπαράσταση του εδάφους [25]

Ακολουθούν αναλυτικότερα οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους:

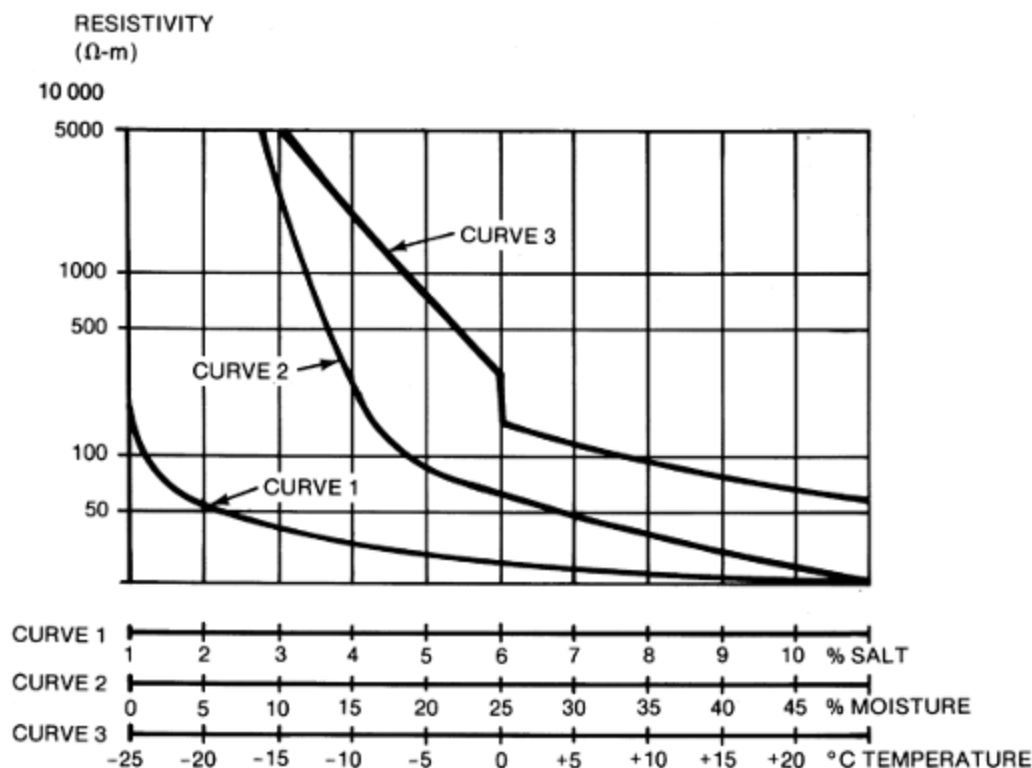
- Υλικό του εδάφους: Ανάλογα με το υλικό (Πίνακας 2.1) από το οποίο αποτελείται το έδαφος, αλλάζει και η ειδική του αντίσταση. Στον πίνακα που αναφέρεται, φαίνονται ενδεικτικά κάποιες τιμές ειδικής αντίστασης, ανάλογα με το υλικό που το απαρτίζει.
- Υγρασία: Όπως προαναφέρθηκε, η αύξηση της υγρασίας στο έδαφος συνήθως συνεπάγεται μείωση της ειδικής αντίστασης. Είναι βέβαια άξιο αναφοράς ότι, σε βάθος έως 0,5m που είναι σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα το επίπεδο υγρασίας είναι ευμετάβλητο, σε αντίθεση με βάθη μεγαλύτερα των 0,5m όπου διατηρείται σταθερά υψηλό επίπεδο υγρασίας καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Η επίδρασή της υγρασίας μειώνεται σημαντικά όταν το ποσοστό της ξεπεράσει το 22%. Πράγμα που απεικονίζεται και στο σχήμα 2.5 και φαίνεται και στο IEEE Std 142 [38].
- Θερμοκρασία: Αν μελετήσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας μεμονωμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η κινητικότητα των φορέων αγωγής πράγμα που οδηγεί στην μείωση της ειδικής αντίστασης. Ωστόσο, συνήθως η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της υγρασίας του εδάφους που μπορεί η τελική συνεισφορά αυτών των δύο παραγόντων να οδηγήσει και σε αύξηση της αντίστασης. Για αυτό και προτείνεται οι μετρήσεις αντίστασης γείωσης ενός συστήματος να γίνεται τους καλοκαιρινούς μήνες.

Τύποι Εδάφους	Τιμή Ειδικής Αντίστασης (Ωm)
Ελώδες Έδαφος	30
Πηλώδες Έδαφος	100
Υγρή Άμμος	200
Υγρά Χαλίκια	500
Ξηρή Άμμος	1000
Πετρώδες Έδαφος	3000

Τύποι Εδάφους	Μέση Τιμή Ειδικής Αντίστασης (Ωm)
Βρεγμένο Οργανικό Έδαφος	10
Πλειοψηφία Εδαφών	10^2
Στεγνό Έδαφος	10^3
Βραχώδες Υπόστρωμα	10^4

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης για διάφορα είδη εδάφους [25]

- Η κλίση της τάσης: Η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζεται από την κλίση της τάσης στην επιφάνεια του εδάφους, εφόσον αυτή δεν υπερβαίνει ένα ορισμένο κρίσιμο όριο. Το όριο αυτό εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού, αλλά συνήθως αντιστοιχεί σε τιμές μερικών kilovolts ανά εκατοστό. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, δημιουργούνται διασπάσεις στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και το ηλεκτρικό ρεύμα διεισδύει βαθύτερα στο έδαφος, αυξάνοντας το ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου έως ότου η κλίση της τάσης επανέλθει σε τιμές που το υλικό του εδάφους μπορεί να αντέξει. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται με την εμφάνιση διακένων στο διάγραμμα του σχήματος 2.4.
- Πλάτος του ρεύματος: Η ειδική αντίσταση του εδάφους στην περιοχή των ηλεκτροδίων γείωσης μπορεί να επηρεαστεί από τα ρεύματα που διαχέονται από τα ηλεκτρόδια προς το περιβάλλον έδαφος. Η ένταση της επίδρασης εξαρτάται κυρίως από τα θερμικά χαρακτηριστικά και τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους, τα οποία καθορίζουν εάν ένα ρεύμα συγκεκριμένου πλάτους και διάρκειας μπορεί να προκαλέσει σημαντική τοπική ξήρανση, οδηγώντας σε αύξηση της ειδικής αντίστασης. Ως συντηρητικό όριο για την πυκνότητα ρεύματος, προτείνεται σύμφωνα με την [37] να μην υπερβαίνονται τα $200 A/m^2$ για χρονική διάρκεια ενός δευτερολέπτου.



Σχήμα 2.5: Επίδραση αλάτων, υγρασίας και θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [25]

2.5 Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους

Οι εκτιμήσεις που βασίζονται αποκλειστικά στην ταξινόμηση του εδάφους προσφέρουν μόνο μία γενική, προσεγγιστική εικόνα της ειδικής του αντίστασης. Για τον λόγο αυτό, καθίσταται απαραίτητη η πραγματοποίηση άμεσων μετρήσεων ειδικής αντίστασης στην περιοχή εγκατάστασης. Οι μετρήσεις αυτές πρέπει να διεξάγονται σε επαρκή αριθμό σημείων, κατάλληλα κατανεμημένων εντός της προς μελέτη περιοχής.

Περιοχές όπου η ειδική αντίσταση εμφανίζει ομοιογενή κατανομή τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφη διεύθυνση είναι σπάνιες. Συνήθως το έδαφος αποτελείται από διαδοχικά στρώματα με διαφορετικά φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Ενώ οι οριζόντιες μεταβολές είναι συχνά πιο ήπιες, οι κατακόρυφες εναλλαγές στη σύσταση και την υγρασία του εδάφους μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές διακυμάνσεις στην τιμή της ειδικής αντίστασης.

Συνεπώς, η χαρτογράφηση της κατανομής της ειδικής αντίστασης ως προς το βάθος μέσω στοχευμένων μετρήσεων είναι επιβεβλημένη, ειδικά όταν εντοπίζονται τιμές τόσο υψηλές που ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα ασφάλειας στη λειτουργία του συστήματος.

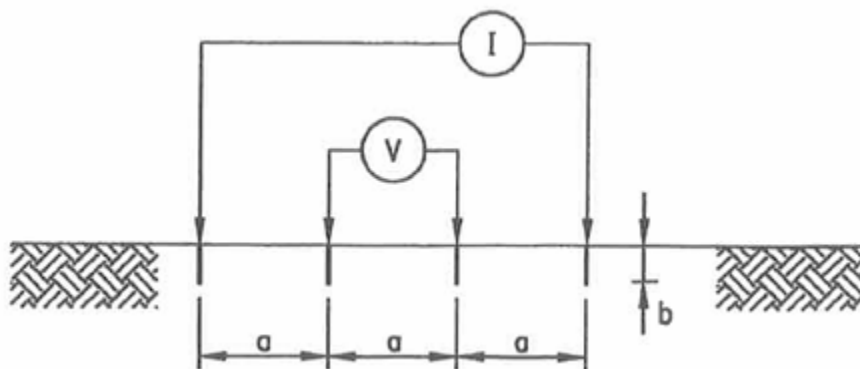
Όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις ως προς το βάθος, είναι σκόπιμο να επιλέγεται μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά τις

μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται πιο αξιόπιστη εκτίμηση της ειδικής αντίστασης σε βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους.

Η μεθοδολογία αυτή είναι αποτελεσματική διότι, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, το ρεύμα της πηγής μέτρησης διεισδύει βαθύτερα στο έδαφος καλύπτοντας ευρύτερες περιοχές τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια. Αυτό ισχύει ακόμη και όταν η διαδρομή του ρεύματος παρουσιάζει αποκλίσεις λόγω ανομοιογενών γεωλογικών συνθηκών [39].

2.5.1 Μέθοδος Wenner

Αρκετές τεχνικές μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους περιγράφονται αναλυτικά στο πρότυπο IEEE Std 81 [84]. Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος είναι η τετραπολική διάταξη Wenner, η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.6: Μέθοδος Wenner τεσσάρων ηλεκτροδίων [25]

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση τεσσάρων ηλεκτροδίων κατά μήκος ευθείας γραμμής, σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις και σε συγκεκριμένο βάθος στο έδαφος. Στη συνέχεια, μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων και διαιρείται με το ρεύμα που διέρχεται από τα δύο εξωτερικά, προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης.

Στη συνέχεια η τιμή αντίστασης R που μετρήθηκε μέσω του ακόλουθου τύπου δίνει την ειδική αντίσταση

$$\rho_{\alpha} = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Όπου:

- ρ_{α} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm
- R είναι η μετρούμενη αντίσταση σε Ω
- a είναι η απόσταση μεταξύ των μετρητικών ηλεκτροδίων σε m

- b είναι το βάθος έμπτυξης των ηλεκτροδίων σε m

Όταν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων a είναι μεγάλη σε σχέση με το βάθος τους b , τότε η παραπάνω εξίσωση προσαρμόζεται ανάλογα και γράφεται με την απλούστερη μορφή:

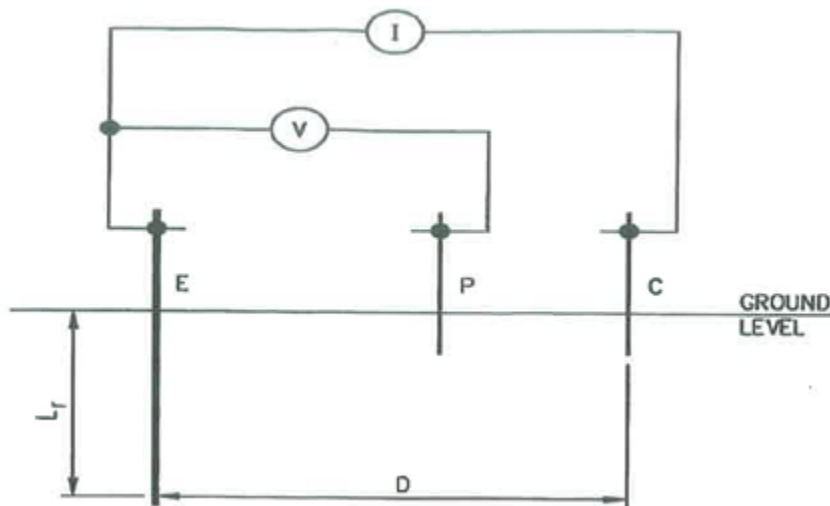
$$\rho_{\alpha} \simeq 2\pi a R$$

Όταν τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, το μεγαλύτερο ποσοστό του ρεύματος τείνει να ρέει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αντίθετα, όταν τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα πιο απομακρυσμένα, το ρεύμα διεισδύει βαθύτερα στο υπέδαφος.

Ως εκ τούτου, είναι εύλογο να θεωρηθεί ότι η μετρούμενη τιμή της ειδικής αντίστασης για μία συγκεκριμένη γεωμετρική διάταξη ηλεκτροδίων αντανακλά την ειδική αντίσταση του εδάφους σε ένα βάθος, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν έντονες αντιστροφές ή μεγάλες μεταβολές στα επιμέρους στρώματα του εδάφους.

Ο Palmer [40] έχει προτείνει μια τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου του Wenner, η οποία παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται με μεγάλο άνοιγμα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο IEEE Std 81 [84].

Μία εναλλακτική μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2.7 και περιγράφεται στο πρότυπο IEEE Std 81 [84], είναι η μέθοδος της κατευθυνόμενης ράβδου. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην αρχή της τριπολικής διάταξης ηλεκτροδίων, όπως έχει αναφερθεί σε σχετικές μελέτες [41], [42], [43].



Σχήμα 2.7: Κυκλωματικό διάγραμμα για τη μέθοδο κατευθυνόμενης ράβδου [25]

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, το βάθος τοποθέτησης της κατευθυνόμενης ράβδου στο υπό μελέτη έδαφος, μεταβάλλεται ανάλογα με το επιθυμητό βάθος μέτρησης. Οι δύο άλλες ράβδοι, οι ράβδοι αναφοράς, τοποθετούνται επιφανειακά σε ευθεία διάταξη. Η θέση της ράβδου τάσης μετακινείται μεταξύ της ράβδου δοκιμής και της ράβδου ρεύματος. Εναλλακτικά, η ράβδος τάσης μπορεί να τοποθετηθεί στην αντίθετη πλευρά ως προς τη ρέουσα ράβδο. Η προκύπτουσα φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση.

$$\rho_{\alpha} = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1}$$

Όπου:

- L_r είναι το μήκος της ράβδου σε m
- d είναι η διάμετρος της ράβδου σε m

Η γραφική απεικόνιση της μετρούμενης τιμής της ειδικής αντίστασης της ράβδου σε συνάρτηση με το μήκος διεύσυσής της, παρέχει μια χρήσιμη οπτική ένδειξη για την κατανόηση των μεταβολών της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε σχέση με το βάθος.

Πειραματικές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στην [44] επιβεβαιώνουν ότι τόσο η μέθοδος του Wenner όσο και αυτή της κατευθυνόμενης ράβδου είναι κατάλληλες για την εξαγωγή των απαραίτητων δεδομένων που απαιτούνται για την ανάπτυξη αξιόπιστου γεωλογικού μοντέλου της μελετούμενης περιοχής.

Η μέθοδος τεσσάρων σημείων του Wenner αποτελεί την πλέον διαδεδομένη τεχνική για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης. Η ευρεία χρήση της οφείλεται σε πολλούς λόγους. Πρωτίστως, η μέθοδος αυτή επιτρέπει την εξαγωγή πληροφοριών για βαθύτερα στρώματα του εδάφους χωρίς να απαιτείται η εισχώρηση των ηλεκτροδίων δοκιμής σε αυτά. Επιπλέον, δεν απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός ή πολύπλοκη διάταξη για την εκτέλεση των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα, καθώς δεν επηρεάζονται σημαντικά ούτε από την αντίσταση επαφής των ηλεκτροδίων, ούτε από τις παραμορφώσεις που ενδέχεται να προκαλέσει η τοποθέτηση τους στο έδαφος.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου κατευθυνόμενης ράβδου, αν και δεν σχετίζεται άμεσα με τη διαδικασία της μέτρησης, είναι η δυνατότητα εκτίμησης του βάθους στο οποίο είναι πρακτικά εφικτή η τοποθέτηση των ράβδων. Η γνώση του βάθους τοποθέτησης μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς ενδέχεται να εξαλείψει την ανάγκη επανασχεδιασμού του πλέγματος γείωσης.

Στην πράξη, η παρουσία σκληρών στρωμάτων στο έδαφος, όπως βραχώδεις σχηματισμοί ή συμπαγής άργιλος συχνά καθιστά αδύνατη την τοποθέτηση των ράβδων σε μεγαλύτερα βάθη, περιορίζοντας τη δυνατότητα λήψης επαρκών μετρήσεων.

Μία τεχνική πρόβλεψης της ειδικής αντίστασης σε βάθος έως και δέκα φορές μεγαλύτερο από εκείνο της γνωστής τιμής αντίστασης έχει αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία [41] και μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η βαθιά τοποθέτηση του ηλεκτροδίου μέτρησης. Ωστόσο, πριν από την εφαρμογή της, είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι πρακτικοί περιορισμοί της μεθόδου.

Ένα μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι, όταν το ηλεκτρόδιο μέτρησης τοποθετείται σε μεγάλο βάθος, είναι πιθανό να μειωθεί η αγώγιμη επαφή με το έδαφος λόγω δονήσεων ή και αυξημένου πάχους των συνδέσεων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της ειδικής αντίστασης.

Ένα πλέγμα γείωσης που έχει σχεδιαστεί με βάση αυτές τις υψηλότερες τιμές ενδέχεται να αποδειχθεί υπερβολικά συντηρητικό. Η μέθοδος κατευθυνόμενης ράβδου παρουσιάζει ορισμένη αβεβαιότητα στην τιμή της υπολογιζόμενης αντίστασης. Ο κανόνας του 62% ισχύει μόνο σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των ηλεκτροδίων και για ομοιογενές εδαφικό προφίλ. Σε μη ομοιογενή εδάφη, η υπόθεση αυτή μπορεί να επηρεάσει τη συνολική ακρίβεια των μετρήσεων, όπως αναφέρεται στο πρότυπο IEEE Std 81 [84].

Εάν χρησιμοποιηθεί το επίπεδο τμήμα της καμπύλης αντίστασης για τον προσδιορισμό της αντίστασης του ηλεκτροδίου, υπάρχει πιθανότητα να μην αποτυπωθεί η πραγματική τιμή σε περιπτώσεις μη ομοιογενούς εδάφους, εκτός αν η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου μέτρησης και του ηλεκτροδίου ρεύματος είναι ιδιαίτερα μεγάλη [45], [46].

Κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, είναι απαραίτητο να καταγράφονται παράλληλα δεδομένα θερμοκρασίας, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία τη χρονική στιγμή των μετρήσεων. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειώνονται όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που αφορούν την παρουσία θαμμένων αγώγιμων αντικειμένων στην περιοχή, καθώς ενδέχεται να επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Η παρουσία θαμμένων αγώγιμων αντικειμένων που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης, ιδίως όταν βρίσκονται αρκετά κοντά ώστε να αλλοιώσουν σημαντικά την ροή του δοκιμαστικού ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο όταν πρόκειται για μεγάλα ή εκτεταμένα μεταλλικά σώματα.

Για τον λόγο αυτό, οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης ενδέχεται να παραμορφωθούν σημαντικά σε περιοχές όπου είναι ήδη εγκατεστημένοι αγωγοί δικτύου, εκτός αν πρόκειται για μετρήσεις στην επιφάνεια ή για σημεία πολύ κοντά στο κέντρο ενός μεγάλου τετραγωνικού πλέγματος.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, συνιστάται να πραγματοποιούνται συμπληρωματικές μετρήσεις σε μικρή απόσταση εκτός του δικτύου, με προσεκτική τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση του υπάρχοντος αγωγικού συστήματος στο πρότυπο κατανομής ρεύματος. Αυτές οι βοηθητικές μετρήσεις μπορούν να παρέχουν χρήσιμες εκτιμήσεις, κυρίως όταν υπάρχουν ενδείξεις ότι το έδαφος στην ευρύτερη περιοχή είναι αρκετά ομοιογενές, αν και δεν προσφέρουν απόλυτη ακρίβεια για τις συνθήκες που επικρατούν εντός του δικτύου.

2.6 Μοντελοποίηση του εδάφους

2.6.1 Εισαγωγή

Η εκτέλεση μετρήσεων ειδικής αντίστασης στο χώρο ενδιαφέροντος αποτελεί συνήθως ένα από τα δυσκολότερα στάδια της διαδικασίας, κυρίως λόγω των πρακτικών περιορισμών του πεδίου. Ο βασικός στόχος είναι η εξαγωγή ενός εδαφικού μοντέλου, που να αναπαριστά με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το πραγματικό σημείο ενδιαφέροντος.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται τόσο κατά την κατακόρυφη, όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση, ανάλογα με την εσωτερική διαστρωμάτωση του υπεδάφους. Επιπλέον, ενδέχεται να παρατηρούνται εποχικές διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης εξαιτίας των καιρικών συνθηκών όπως αναφέρθηκε νωρίτερα.

Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι οποιοδήποτε γεωηλεκτρικό μοντέλο, που εξάγεται από μετρήσεις, αποτελεί μία προσέγγιση του πραγματικού εδάφους, και επομένως είναι απίθανο να υπάρξει πλήρης αντιστοιχία με αυτό.

Τα δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την προσομοίωση του εδάφους είναι το ομοιογενές και το διστρωματικό μοντέλο. Το διστρωματικό μοντέλο προσφέρει συνήθως μία αξιοπίστη προσέγγιση για πλήθος εδαφικών σχηματισμών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8, ένα μεγάλο ποσοστό των εδαφών μπορούν με επαρκή ακρίβεια να περιγραφούν από το διστρωματικό μοντέλο. Πιο πολύπλοκες γεωλογικές συνθήκες απαιτούν τη χρήση πολυστρωματικών μοντέλων.

Η επεξεργασία και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα, είτε με την χρήση τεχνικών ανάλυσης, αξιοποιώντας λογισμικά εργαλεία σε Η/Υ, όπως περιγράφεται στις πηγές [41], [42], [44], [47], -[56].

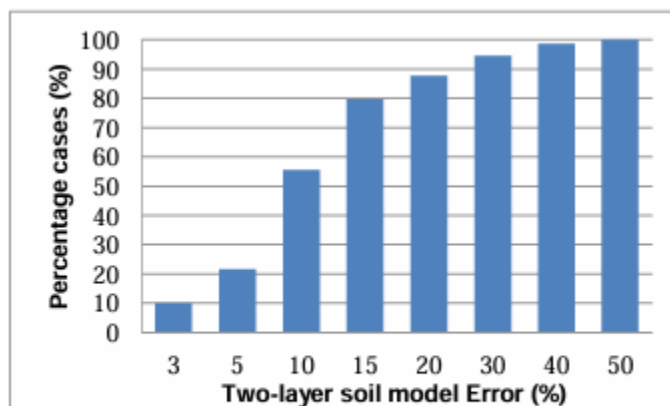


Fig. 1. Cumulative distribution of percentage error for the two-layer soil model.

Σχήμα 2.8: Πλήθος εδαφών(%) συνάρτηση του σφάλματος που προκύπτει από την διστρωματική περιγραφή τους

Το ομοιογενές μοντέλο εδάφους ενδείκνυται μόνο σε περιπτώσεις, όπου παρατηρείται μικρή διακύμανση στις μετρούμενες τιμές ειδικής αντίστασης. Σε συνθήκες εδαφικής ομοιομορφίας, οι οποίες, ωστόσο, εμφανίζονται σπάνια στην πράξη, το μοντέλο αυτό μπορεί να αποδώσει ικανοποιητική ακρίβεια. Αντίθετα, όταν οι μετρήσεις αποκαλύπτουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην ειδική αντίσταση, το ομοιογενές μοντέλο είναι απίθανο να προσφέρει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

Όπως προαναφέρθηκε, το διστρωματικό μοντέλο είναι επαρκές για μεγάλο ποσοστό των εδαφών, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από την μελέτη [57]. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα άνω στρώμα με πεπερασμένο βάθος και συγκεκριμένη τιμή ειδικής αντίστασης και ένα κάτω στρώματος απείρου βάθους με διαφορετική ειδική αντίσταση.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την εξαγωγή ισοδύναμου διστρωματικού μοντέλου, βάσει των μετρήσεων ειδικής αντίστασης που συλλέγονται στο πεδίο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το διστρωματικό μοντέλο μπορεί να προσδιοριστεί οπτικά μέσω της καμπύλης της μετρούμενης ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος (κατά τη μέθοδο κατευθυνόμενης ράβδου) ή με την απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων (κατά τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων) [58], [42], [59]. Επίσης η εξαγωγή διστρωματικών και πολυστρωματικών μοντέλων μπορεί να γίνει και με την χρήση λογισμικών [60], [49], [50], [61].

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους μπορεί να είναι τόσο έντονες, με σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων τιμών, ώστε το διστρωματικό μοντέλο να αδυνατεί να αποδώσει με επάρκεια τη γεωηλεκτρική συμπεριφορά του εδάφους.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, κρίνεται απαραίτητη η χρήση εναλλακτικών μοντέλων, όπως πολυστρωματικού, η εφαρμογή του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στις πηγές [62], [60]. Επειδή η παρούσα εργασία αφορά εδάφη που το διστρωματικό μοντέλο είναι επαρκές, θα επικεντρωθούμε σε αυτό.

2.6.2 Διστρωματικό μοντέλο

Το διστρωματικό μοντέλο μπορεί να περιγραφεί από ένα πάνω στρώμα πεπερασμένου βάθους και από ένα κάτω στρώμα άπειρου βάθους. Η απότομη μεταβολή της ειδικής αντίστασης στα όρια μεταξύ των δύο στρωμάτων μπορεί να εκφραστεί μέσω ενός συντελεστή ανάκλασης. Ο συντελεστής ανάκλασης, K , ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

Όπου

- ρ_1 η ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος σε Ωm
- ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος σε Ωm

Ενώ η πλέον ακριβής αναπαράσταση ενός συστήματος γείωσης θα απαιτούσε τη μοντελοποίηση όλων των πραγματικών διακυμάνσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους στη συγκεκριμένη τοποθεσία, κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό για τεχνοοικονομικούς λόγους.

Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, η χρήση ενός ισοδύναμου διστρωματικού μοντέλου για την προσέγγιση της συμπεριφοράς του εδάφους είναι επαρκής και ικανοποιητική για τον σχεδιασμό του συστήματος γείωσης.

Το πρότυπο IEEE Std 81 [84] παρέχει μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό των ισοδύναμων τιμών ειδικής αντίστασης τόσο για το πάνω όσο και για το κάτω στρώμα του εδάφους, καθώς και για τον υπολογισμό του βάθους του πάνω στρώματος σε διστρωματικά μοντέλα.

Επιπλέον, έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι από ερευνητές με σκοπό τον καθορισμό κατάλληλων διστρωματικών μοντέλων. Ορισμένες από αυτές αξιοποιούν την τιμή της ειδικής αντίστασης του πάνω στρώματος για τον υπολογισμό των κρίσιμων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, ενώ χρησιμοποιούν την αντίσταση του κάτω στρώματος για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης γείωσης.

Άλλες μέθοδοι βασίζονται σε τροποποιήσεις των υφιστάμενων εξισώσεων, ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας σε διστρωματικά μοντέλα. Τέτοιες μελέτες μπορούν να παρέχουν στον μελετητή πολύτιμες πληροφορίες, τόσο για την ερμηνεία των γεωλογικών χαρακτηριστικών του εδάφους, όσο και για την εκτίμηση της επίδρασης διαφορετικών μοντέλων πολυστρωματικών, διστρωματικών ή ομοιογενών, στη συμπεριφορά του συστήματος γείωσης [60], [62], [63].

2.7 Σύνθεση Αντίστασης Γείωσης

Η συνολική αντίσταση γείωσης ενός συστήματος δεν είναι ενιαία αλλά προκύπτει από τον συνδυασμό επιμέρους αντιστάσεων. Η κατανόηση αυτής της δομής είναι ουσιαστική για την σωστή εκτίμηση της αποτελεσματικότητας ενός σχεδίου γείωσης και την επιλογή των κατάλληλων μέτρων ενίσχυσης. Αναλυτικότερα, τα συστατικά που συνθέτουν την αντίσταση γείωσης είναι τα ακόλουθα:

- Αντίσταση του θαμένου συστήματος γείωσης: Περιλαμβάνει την αντίσταση των θαμμένων μεταλλικών αγωγών του συστήματος, όπως πλέγμα, βρόχοι και κάθετα ηλεκτρόδια, και εξαρτάται από τις γεωμετρικές του διαστάσεις και το υλικό κατασκευής.
- Αντίσταση των αγωγών καθόδου: Αναφέρεται στις αντιστάσεις των αγωγών, τουλάχιστον δύο για λόγους αξιοπιστίας, που συνδέουν τα αλεξικέραυνα της Α/Γ με το σύστημα γείωσης.
- Αντίσταση επαφής: Είναι η επιφανειακή αντίσταση που συναντάει το ηλεκτρικό ρεύμα κατά την ροή του από το σύστημα γείωσης προς το περιβάλλον έδαφος. Η τιμή της

εξαρτάται τόσο από τη μορφολογία και την υγρασία του εδάφους, όσο και από τη γεωμετρία της επαφής και τις συνθήκες εγκατάστασης.

Ανάλογα με τις γεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, μία η περισσότερες από αυτές τις συνιστώσες μπορεί να κυριαρχούν, καθιστώντας την ανάλυση των επιμέρους αντιστάσεων απαραίτητη για την εξαγωγή αξιόπιστων προβλέψεων. Η κυρίαρχη, συνήθως, είναι η αντίσταση του θαμμένου συστήματος γείωσης και οι άλλες δύο δεν λαμβάνονται υπόψη.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αντίσταση επαφής μεταξύ του θαμμένου συστήματος και του εδάφους, ενδέχεται να μην είναι αμελητέα και να επηρεάζει ουσιαστικά τη συνολική αντίσταση γείωσης. Αυτό παρατηρείται κυρίως όταν το σύστημα γείωσης δεν έρχεται σε πλήρη ή αποτελεσματική επαφή με το περιβάλλον έδαφος, λόγω της φύσης του εδάφους, όπως σε διαβρωμένα και αμμώδη εδάφη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το ηλεκτρικό ρεύμα συναντά πρόσθετη αντίσταση κατά τη μετάβασή του από τον αγωγό στο έδαφος.

Στη μελέτη [107], έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος για την εκτίμηση της συνολικής αντίστασης γείωσης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη και την αντίσταση επαφής. Η μεθοδολογία βασίζεται σε έναν απλοποιημένο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο προσομοιώνει ξεχωριστά τη συμπεριφορά της επαφής και του θαμμένου αγωγού. Μέσα από επαναληπτική διαδικασία, επιτυγχάνεται ταχεία και ικανοποιητικά ακριβής εκτίμηση της πραγματικής αντίστασης γείωσης, ακόμα και σε πολύπλοκα συστήματα με πολλαπλούς αγωγούς. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη φάση της μελέτης ή της αξιολόγησης υφιστάμενων εγκαταστάσεων, ειδικά όταν υπάρχουν ενδείξεις κακής επαφής με το έδαφος.

2.8 Μετρήσεις πεδίου σε σύστημα γείωσης [25]

2.8.1 Μετρήσεις της Σύνθετης Αντίστασης του Συστήματος Γείωσης

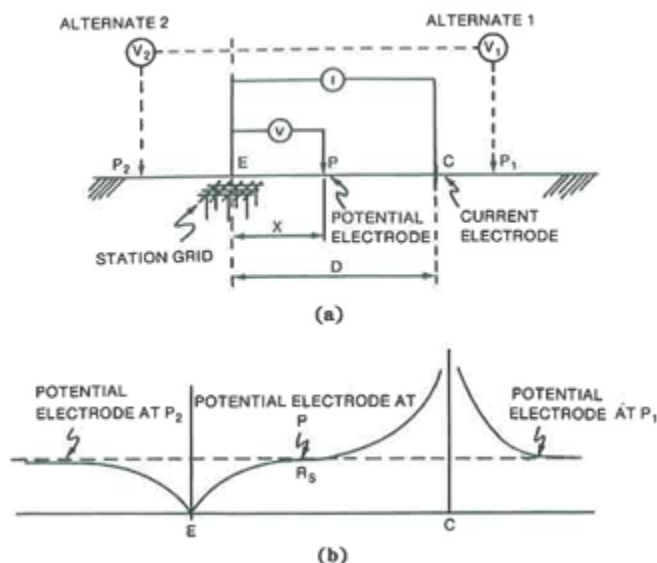
Η προσεκτική μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του συστήματος, όπως έχει κατασκευαστεί, μπορεί να είναι επιθυμητή, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους ή η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου είναι αμφίβολες. Ωστόσο, η μέτρηση αυτή δεν είναι πάντα αξιόπιστη, εάν το πλέγμα γείωσης είναι συνδεδεμένο ή επηρεάζεται από άλλες θαμμένες μεταλλικές δομές.

Αν και γίνεται αναφορά μόνο σε γενικές μεθόδους, για περισσότερες λεπτομέρειες παραπέμπεται ο αναγνώστης στο IEEE Std 81 [84]. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται σημαντικά στοιχεία από το εν λόγω πρότυπο.

Αν και αναφερόμαστε στην αντίσταση ως ωμική τιμή, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το μη ωμικό σκέλος, ειδικά όταν η τιμή της σύνθετης αντίστασης είναι κάτω από $0,5 \Omega$ και η περιοχή είναι εκτεταμένη. Το μη ωμικό αυτό στοιχείο είναι αμελητέο όταν η σύνθετη αντίσταση υπερβαίνει τα $0,5 \Omega$.

2.8.1.1 Μέθοδος Πτώσης Τάσης (Fall-of-Potential)

Η μέθοδος αυτή, έχει πολλές παραλλαγές και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα συστήματα γείωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9. Η μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση της αντίστασης του συστήματος γείωσης σε σχέση με ένα απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο γείωσης. Το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο θεωρείται ότι βρίσκεται σε «άπειρη απόσταση» από το σύστημα γείωσης, όπου η πυκνότητα ρεύματος στο έδαφος είναι πρακτικά μηδενική.



Σχήμα 2.9: (α) Μέθοδος της πτώσης δυναμικού
(β) Δυναμικό στην επιφάνεια της γης για διάφορες αποστάσεις

Αν και η μέθοδος αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη, παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες και πιθανές πηγές σφάλματος όταν εφαρμόζεται σε μεγάλα συστήματα γείωσης. Αυτές οι δυσκολίες οφείλονται κυρίως στο μεγάλο μέγεθος, την γεωμετρία του συστήματος και την ανομοιογένεια του εδάφους.

Εάν η απόσταση D είναι επαρκώς μεγάλη σε σχέση με το μέγεθος του συστήματος γείωσης, τότε το κεντρικό τμήμα της καμπύλης που προκύπτει είναι σχεδόν οριζόντιο. Ωστόσο, αυτό μπορεί να είναι παραπλανητικό, καθώς η επίπεδη μορφή της καμπύλης μπορεί να οφείλεται σε έλλειψη ευαισθησίας των οργάνων μέτρησης. Συχνά θεωρείται, αν και δεν είναι πάντα σωστό, ότι το οριζόντιο τμήμα της καμπύλης αντιστοιχεί στην πραγματική τιμή της αντίστασης R του συστήματος. Σε μεγάλα συστήματα γείωσης, είναι πρακτικά δύσκολο ή ανέφικτο να επιτευχθεί τόσο μεγάλη απόσταση D ώστε να παρουσιαστεί αυτή η οριζοντίωση στην γραφική. Σε τέτοιες συνθήκες, δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της αντίστασης, εκτός εάν η σωστή θέση του ηλεκτροδίου τάσης P είναι γνωστή. Σε εδάφη με μη ομοιογενή αντίσταση, η κατάλληλη θέση του ηλεκτροδίου P δεν μπορεί να προσδιοριστεί απλώς από το σχήμα της καμπύλης. Απαιτείται υπολογιστική προσομοίωση του συστήματος γείωσης και του κυκλώματος μέτρησης, ώστε να προσδιοριστεί η σωστή θέση του ηλεκτροδίου P.

Για την μέτρηση της αντίστασης η πηγή ρεύματος συνδέεται με το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού E και με ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος τοποθετημένο σε απόσταση εκατοντάδων μέτρων μακριά από τον υποσταθμό. Η συσκευή μέτρησης δυναμικού συνδέεται μεταξύ του πλέγματος του υποσταθμού E και του ηλεκτροδίου δυναμικού P, με τις μετρήσεις να γίνονται σε διαφορά σημεία με το ηλεκτρόδιο έξω από τον υποσταθμό. Το ηλεκτρόδιο δυναμικού μπορεί να μετακινηθεί προς το ηλεκτρόδιο ρεύματος με σταθερά βήματα και η αντίσταση που μετράται στις διάφορες θέσεις μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά συναρτήσει της απόστασης από τον υποσταθμό. Η γραφική πρέπει να προσομοιάζει την μορφή του σχήματος 2.9(b). Από το E στο P, η τάση ανά ampere του ρεύματος δοκιμής αυξάνεται, αλλά η κλίση της τάσης μειώνεται φτάνοντας έως το σημείο P, όπου και ελαχιστοποιείται. Προχωρώντας προς το C, η επίδραση του ρεύματος που διοχετεύεται μέσω του δοκιμαστικού ηλεκτροδίου ρεύματος γίνεται αισθητή και μία αύξηση στην κλίση της τάσης παρατηρείται όσο πλησιάζουμε το ηλεκτρόδιο ρεύματος. Το κομμάτι της γραφικής με την αργή, σχεδόν μηδενική, αύξηση της τάσης, αν υπάρχει, θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει μία ζώνη όπου η αλληλεπίδραση των ηλεκτροδίων δοκιμής και επιστροφής είναι μικρή. Όταν το ηλεκτρόδιο επιστροφής είναι τοποθετημένο σε μία πεπερασμένη απόσταση από το σύστημα γείωσης και το ηλεκτρόδιο δυναμικού καρφώνεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο, τότε λαμβάνεται μία ακριβής μέτρηση της τάσης. Δυστυχώς, το ακριβές σημείο που πρέπει να καρφωθεί το ηλεκτρόδιο τάσης είναι καλώς ορισμένο μόνο σε μερικές ιδανικές περιπτώσεις, όπως ημισφαιρικών ή πολύ μικρών ηλεκτροδίων θαμμένα σε ομοιόμορφο ή διστρωματικό έδαφος [45], [46].

Οι περιπτώσεις μεγάλων συστημάτων γείωσης θαμμένα σε μονοστρωματικό έδαφος υποθέτοντας ομοιόμορφη πυκνότητα ρεύματος διάχυσης στους αγωγούς, έχουν αναλυθεί στις ακόλουθες μελέτες [85], [88]. Στην πράξη, όμως, συστήματα γείωσης που αποτελούνται από περιέργες διατάξεις, από κατακόρυφα ηλεκτρόδια και οριζόντιους αγωγούς, συνήθως είναι θαμμένα σε μη ομοιόμορφα εδάφη.

Για μεγάλα πλέγματα γείωσης ο χώρος που απαιτείται μπορεί να δυσκολεύει την μέτρηση ή ακόμα και να την καθιστά αδύνατη, ειδικά όταν οι γραμμές μεταφοράς είναι πάνω από καλώδια γείωσης και οι αγωγοί προστασίας συνδέονται άμεσα στην γείωση του υποσταθμού επεκτείνοντας την περιοχή της επιρροής.

Όταν οι γραμμές προστασίας των πυλώνων διανομής, συνδέονται στο σύστημα γείωσης του υποσταθμού τότε επηρεάζεται η ροή του ρεύματος έγχυσης για την μέτρηση, με αποτέλεσμα ένα μόνο μέρος αυτού να καταλήγει στο πλέγμα γείωσης του υποσταθμού, καθώς το υπόλοιπο διοχετεύεται μέσω των πυλώνων στη γη. Αν θεωρηθεί ότι όλο το αρχικό ρεύμα διέρχεται από το πλέγμα γείωσης, τότε υπερεκτιμώνται οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής που αναπτύσσονται στον υποσταθμό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει κάποιες περιοχές να θεωρηθούν μη ασφαλείς, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους και της αχρείαστης ενίσχυσης του συστήματος.

Η μελέτη [108] παρουσιάζει έναν αλγόριθμο που επιτρέπει την εκτίμηση του μέρους του ρεύματος που εισέρχεται στο πλέγμα γείωσης του υποσταθμού. Αυτός ο αλγόριθμος είναι ένα χρήσιμο εργαλείο κατά την εκτίμηση της ασφάλειας του υποσταθμού, όταν δεν είναι δυνατή η

αποσύνδεση των καλωδίων προστασίας των γραμμών από το σύστημα γείωσης για την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι όταν το έδαφος δεν είναι ομοιόμορφο και ο διαχωρισμός δεν είναι μεγάλος σε σύγκρισή με τις διαστάσεις του συστήματος γείωσης, ο κανόνας του 61,8%, ο οποίος αντιστοιχεί στο επίπεδο τμήμα της καμπύλης, μπορεί να μην είναι πλέον εφαρμόσιμος [45], [46]. Περιοχές μεταξύ του 10% και του 90% μπορεί να είναι εξίσου πιθανές.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου πτώσης δυναμικού είναι ότι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού μπορούν να έχουν ουσιαστικά μεγαλύτερη αντίσταση από το σύστημα γείωσης που δοκιμάζεται, χωρίς να επηρεάζει ανησυχητικά την ακρίβεια της μέτρησης.

2.8.2 Μέτρηση πεδίου, πηγάδια δυναμικού, τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων

Πραγματικές δοκιμές πεδίου για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής με την έγχυση ρεύματος στο πλέγμα γείωσης μπορούν να πραγματοποιηθούν για να βοηθήσουν στην επιβεβαίωση των ασφαλών συνθηκών. Λόγω του κόστους, λίγοι διαχειριστές δικτύου είναι πιθανό να διεξάγουν αυτές τις δοκιμές σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, εάν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων τιμών αντίστασης ή γνωστές ανωμαλίες στις ειδικές αντιστάσεις του εδάφους που προκαλούν αμφιβολίες σχετικά με τις υπολογισμένες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, τότε τέτοιες δοκιμές ενδέχεται να πρέπει να γίνουν. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν οι υπολογιζόμενες τιμές είναι κοντά στα επιτρεπόμενα όρια και η περαιτέρω βελτίωση του συστήματος γείωσης για την παροχή μεγαλύτερου περιθωρίου ασφάλειας θα ήταν δύσκολη ή δαπανηρή.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να αξίζει να εγχυθεί στο σύστημα γείωσης δοκιμαστικό ρεύμα της τάξης των 100 A και να πραγματοποιηθούν πραγματικές μετρήσεις των κλίσεων δυναμικού σε επιλεγμένες θέσεις εντός του συστήματος και γύρω στην περίμετρο του. Ένα έργο του EPRI [50] περιλάμβανε μια τέτοια δοκιμή πεδίου. Το έργο περιλάμβανε σύγκριση των μετρήσεων του πεδίου με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η μέθοδος μέτρησης κρίθηκε αρκετά εφαρμόσιμη και παρείχε αξιόπιστα αποτελέσματα [89], [90].

Η βασική μέθοδος για τέτοιες μετρήσεις κλίσης τάσεων περιλαμβάνει τη διέλευση δοκιμαστικού ρεύματος μέσω του συστήματος γείωσης μέσω απομακρυσμένου ηλεκτροδίου ρεύματος, όπως στις μετρήσεις αντίστασης γείωσης, και τη μέτρηση των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής που προκύπτουν. Για να ληφθούν τα δυναμικά που υφίστανται υπό πραγματικές συνθήκες σφάλματος, οι τιμές από τη δοκιμή πολλαπλασιάζονται με τον λόγο του πραγματικού ρεύματος σφάλματος προς το δοκιμαστικό ρεύμα. Επειδή τα δυναμικά ενδιαφέροντος είναι αυτά που υπάρχουν στην επιφάνεια του εδάφους, τα ηλεκτρόδια μέτρησης που χρησιμοποιούνται είναι τύπου που πραγματοποιούν επιφανειακή επαφή.

Οι σχετικά υψηλές αντιστάσεις επαφής που εμπλέκονται γενικά αποκλείουν τη χρήση οργάνων σχεδιασμένων για μετρήσεις αντίστασης γείωσης, καθώς αυτά λειτουργούν μόνο εντός ενός περιορισμένου εύρους αντίστασης ηλεκτροδίου. Για να χρησιμοποιηθεί μέθοδος βολτομέτρου-αμπερομέτρου, είναι συνήθως απαραίτητο να χρησιμοποιείται βολτόμετρο υψηλής

εμπέδησης και ρεύματα δοκιμής επαρκώς υψηλά, ώστε να ξεπερνιούνται τα αποτελέσματα από τα προϋπάρχοντα ρεύματα εδάφους.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι μέτρησης και καταγραφής τάσεων. Χρησιμοποιώντας βολτόμετρο υψηλής εμπέδησης, είναι δυνατό να σχεδιαστούν προφίλ και ισοδυναμικές καμπύλες των τάσεων επαφής ανοικτού κυκλώματος για ολόκληρο τον υποσταθμό. Κάνοντας συντηρητικές υποθέσεις για τις αντιστάσεις σώματος και επαφής με το έδαφος, καθώς και το επιτρεπόμενο ρεύμα μέσω του σώματος, μπορεί να εκτιμηθεί η μέγιστη ασφαλής τάση επαφής και βηματική τάση.

Οι μελέτες [91], [92] έχουν περιγράψει τεχνικές μέτρησης στις οποίες προσομοιώνεται η επίδραση των πραγματικών αντιστάσεων επαφής και σώματος. Ο χειριστής φοράει λαστιχένια γάντια και παπούτσια με λαστιχένιες σόλες, εξοπλισμένα με επιφάνειες επαφής από μεταλλικό πλέγμα. Οι τάσεις μεταξύ αυτών των μεταλλικών επιφανειών επαφής μετρώνται με βολτόμετρο υψηλής εμπέδησης, το οποίο παραλληλίζεται με μια αντίσταση ίση με μία υποθετική τιμή αντίστασης σώματος και το ρεύμα μετριέται με ένα μιλιαμπερόμετρο. Έτσι, υπολογίζεται ο λόγος του ρεύματος ηλεκτροπληξίας προς το ρεύμα γείωσης. Πιο πρόσφατες δοκιμές και αποτελέσματα περιγράφονται στο [93].

Συμπεριλαμβάνοντας τις αντιστάσεις επαφής ποδιών-εδάφους ως μέρος της διαδικασίας δοκιμής, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των μεταβολών στην αντίσταση της επιφάνειας. Έτσι, ο επιπρόσθετος παράγοντας ασφαλείας που παρέχεται από προσθήκη επιφανειακών υλικών, όπως χαλίκι και άσφαλτο, περιλαμβάνεται στα αποτελέσματα της δοκιμής.

Επιπλέον πληροφορίες για την πραγματοποίηση μετρήσεων δυναμικού στο πεδίο είναι διαθέσιμες στο IEEE Std 81 [84].

2.9 Συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών

2.9.1 Εισαγωγή

Σε ένα αιολικό πάρκο, το σύστημα γείωσης έχει ως κύριο σκοπό την προστασία τόσο της ανθρώπινης ζωής, όσο και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, σε περίπτωση ενδεχόμενου σφάλματος [64]. Ωστόσο, η υψηλή ειδική αντίσταση του εδάφους, καθώς και άλλοι τοπικοί παράγοντες, καθιστούν συχνά δύσκολη την επίτευξη τιμών αντίστασης γείωσης που να συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές, δηλαδή, κάτω από το όριο των 10 Ω.

Όπως παρατηρείται στη μελέτη [110], η κλίση της περιοχής εγκατάστασης του συστήματος γείωσης επηρεάζει την απόδοσή του. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το ίδιο σύστημα γείωσης, σε ίδιο έδαφος μπορεί να παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη αντίσταση αν βρίσκεται στην κορυφή ενός βουνού, όπως μία Α/Γ, που το έδαφος εμφανίζει κλίση, σε σχέση με μία πεδιάδα που η κλίση είναι μηδενική.

Κατά συνέπεια, απαιτείται λεπτομερής μελέτη και σωστή κατασκευή, ώστε το σύστημα γείωσης να λειτουργεί με ασφάλεια και αξιοπιστία καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου.

Η εγκατάσταση νέων αιολικών πάρκων καθιστά αναγκαίο τον προσεκτικό σχεδιασμό και την κατάλληλη κατασκευή συστημάτων γείωσης, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής και απρόσκοπτη λειτουργία των ανεμογεννητριών σε κάθε χρονική στιγμή.

Αρχικά, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το πρότυπο βάσει του οποίου θα σχεδιαστεί το σύστημα γείωσης και, στη συνέχεια, να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για την προσομοίωση, όπως ο τύπος και η μορφολογία του εδάφους, η συχνότητα λειτουργίας, το τυπικό βάρος του ανθρώπινου σώματος, καθώς και ο διαθέσιμος προϋπολογισμός για τη μελέτη και την υλοποίηση του συστήματος.

Επιπλέον, πρέπει να έχουν προσδιοριστεί το ρεύμα βραχυκυκλώματος και η διαστασιολόγηση των αγωγών. Εφόσον αυτά τα δεδομένα δεν είναι άμεσα διαθέσιμα, θα πρέπει να παρέχονται επαρκείς πληροφορίες για την εκτίμησή τους.

Τέλος, θα πρέπει να προβλέπονται κατάλληλες τεχνικές για τη μείωση της συνολικής αντίστασης γείωσης και να εξασφαλίζεται ότι οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων ασφαλείας.

Η αντικεραυνική προστασία των ανεμογεννητριών ρυθμίζεται από το πρότυπο IEC 61400-24 [65]. Η αξιοπιστία και η ασφάλεια ενός συστήματος γείωσης, καθώς και οι μέθοδοι αντιμετώπισης των προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν, έχουν εξεταστεί και τεκμηριωθεί σε διάφορες μελέτες [66], -[69].

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης δεν παραμένει σταθερή σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων [113]. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα, όπως συμβαίνει σε φαινόμενα υπερτάσεων λόγω κεραυνικών πλήξεων, που τα κεραυνικά κρουστικά ρεύματα χαρακτηρίζονται από ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μηδέν έως αρκετά MHz, μεταβάλλεται και η φαινόμενη αντίσταση του συστήματος. Αυτή η συχνοεξαρτώμενη συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνες και δύσκολα υπολογιζόμενες υπερτάσεις. Πρόσφατες μελέτες [106] έχουν προτείνει αριθμητικές μεθόδους, όπως η προσαρμοστική προσέγγιση Chebyshev, για την ταχεία και ακριβή πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος γείωσης, στις συχνότητες ενδιαφέροντος, συμβάλλοντας στον ασφαλή σχεδιασμό των εγκαταστάσεων και στη βελτίωση της αξιοπιστίας των προσομοιώσεων. Η [113] υπογραμμίζει ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση των παραμέτρων του εδάφους από την συχνότητα καθώς η αντίσταση γείωσης έτσι προκύπτει μικρότερη, σε σχέση με το να θεωρηθούν ανεξάρτητες από αυτή.

Τα ρεύματα των κεραυνών έχουν μεγάλες τιμές σε μέτρο και μεγάλες κλίσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκαλούν μεγάλες ανυψώσεις της τάσης κατά την πτώση τους. Ρεύματα που κυρίως περιέχουν υψηλές συχνότητες, όπως τα κεραυνικά, έχουν την ιδιότητα να ρέουν στην επιφάνεια και να διαχέονται μακριά. Για αυτό, το σύστημα γείωσης ενισχύεται με οριζόντιους αγωγούς κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αν το μήκος των οριζόντιων αγωγών είναι από το ενεργό μήκος και πάνω, περιορίζεται ικανοποιητικά η ανύψωση δυναμικού από αυτά τα ρεύματα. Ως ενεργό μήκος ορίζεται το ελάχιστο μήκος αγωγού πέρα από το οποίο δεν υπάρχει ουσιαστική επιπλέον βελτίωση στην μείωση της τάσης. Στην μελέτη [111] παρουσιάζεται ένας τύπος για την εκτίμηση του ενεργού μήκους σε συστήματα γείωσης A/Γ.

Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα γείωσης ως ασφαλές και, κατά συνέπεια, ικανό να προστατεύει τον εξοπλισμό, είναι απαραίτητο οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής να παραμένουν εντός των προβλεπόμενων ορίων. Ο σχεδιασμός των συστημάτων γείωσης για αιολικά πάρκα παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες και, για τον σκοπό αυτό, απαιτούνται εξειδικευμένες μελέτες [70], -[80].

Η ύπαρξη υψηλού αιολικού δυναμικού στις κορυφογραμμές της Ελλάδας καθιστά τις περιοχές αυτές ιδανικές για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι οι ίδιες περιοχές παρουσιάζουν, κατά κανόνα, υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης στο έδαφος.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, έχουν μελετηθεί διάφορες διατάξεις συστημάτων γείωσης [70], -[76] προκειμένου να εντοπιστεί η βέλτιστη επιλογή, καθώς η αύξηση της αντίστασης γείωσης ενέχει τον κίνδυνο υπέρβασης των επιτρεπόμενων ορίων στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.

Η μείωση της αντίστασης γείωσης έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας και έχουν προταθεί πολλές πρακτικές λύσεις που εφαρμόζονται ευρέως. Σε ορισμένες από τις σχετικές μελέτες [64], -[70], εστιάζεται στον σχεδιασμό και αξιολόγηση ενός ασφαλούς και αξιόπιστου συστήματος γείωσης, προτείνοντας, μεταξύ άλλων, τη διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων γείωσης των ανεμογεννητριών με σκοπό τη δημιουργία ενός ενιαίου συστήματος γείωσης για το σύνολο του αιολικού πάρκου.

Ακόμα, η μελέτη [112] επικεντρώνεται στους παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της αντικεραυνικής προστασίας μιας Α/Γ, με επίκεντρο τη μελέτη του συστήματος γείωσης. Τονίζει ότι ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να αξιολογείται από, την αντίσταση χαμηλής συχνότητας, τον συντελεστή κρουστικής απόκρισης, όπως τονίζεται και στην [106], και την κατανομή δυναμικού και προτείνει όπως και στην [111] την ενίσχυση του συστήματος με οριζόντιους αγωγούς για καλύτερη προστασία.

Τέλος, ορισμένες μελέτες [78], -[81] εξετάζουν τα μεταβατικά φαινόμενα των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής που εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια κεραυνικών εκφορτίσεων στις εγκαταστάσεις των ανεμογεννητριών.

2.9.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης για αιολικό πάρκο στην Ελλάδα μπορεί να ακολουθεί μια τυποποιημένη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. **Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής του ρεύματος βραχυκυκλώματος που αναμένεται να εκδηλωθεί στο πάρκο.**
2. **Επιλογή των υποψηφίων θέσεων εγκατάστασης των ανεμογεννητριών.**
3. **Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε κάθε θέση με τη μέθοδο Wenner.**

4. **Εντοπισμός περιοχών εντός του πάρκου** που μπορούν να εκμεταλλευτούν για τη μείωση της αντίστασης γείωσης όπως υγρά ή χωμάτινα εδάφη.
5. **Δημιουργία μοντέλου** του εδάφους βάσει των μετρήσεων ειδικής αντίστασης σε κάθε επιλεγμένη θέση.
6. **Σχεδιασμός τυπικού πλέγματος γείωσης** για κάθε ανεμογεννήτρια.
7. **Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης** για κάθε ανεξάρτητο σύστημα.
8. **Υπολογισμός του ενδεχόμενου ρεύματος βραχυκυκλώματος** που θα διαρρεύσει σε κάθε σύστημα γείωσης.
9. **Προσδιορισμός των ορίων ασφαλείας για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής** σε κάθε σύστημα.
10. **Ανάλυση της κατανομής δυναμικών** στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από κάθε πλέγμα.
11. **Έλεγχος επιτεύξης των επιθυμητών τιμών:**
 - Η συνολική αντίσταση γείωσης του πάρκου να είναι $< 1 \Omega$
 - Η αντίσταση γείωσης κάθε ανεμογεννήτριας να είναι $< 10 \Omega$
 - Οι τιμές βήματος και επαφής να παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων ασφαλείας, όπως ορίζονται στο [25].
12. **Αν οι προδιαγραφές πληρούνται, η σχεδίαση θεωρείται ολοκληρωμένη** και ο μελετητής προχωράει στο βήμα 15. Διαφορετικά, συνεχίζεται στο επόμενο βήμα.
13. **Βελτιστοποίηση του συστήματος γείωσης, μέσω:**
 - αύξησης της επιφάνειας ή της πυκνότητας του πλέγματος,
 - προσθήκης κατακόρυφων ηλεκτροδίων,

- βελτίωσης του εδάφους με προσθήκη χαμηλής ειδικής αντίστασης χώματος ή βελτιωτικών εδάφους
- διασύνδεση με άλλα συστήματα γείωσης
- μείωση των ορίων εκκαθάρισης σφάλματος αφού όσο μικρότερος ο χρόνος, τόσο μεγαλύτερες είναι οι επιτρεπτές τάσεις
- χρήσης κατάλληλων επιφανειακών υλικών, όπως χαλίκι ή άσφαλτο, που μειώνουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις

14. Επανάληψη της διαδικασίας από το βήμα 4, μέχρι να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

15. Κατασκευή του συστήματος γείωσης σύμφωνα με το τελικό σχέδιο.

16. Πραγματοποίηση επιτόπιων μετρήσεων της αντίστασης γείωσης.

17. Εκτέλεση επιπλέον τεχνικών βελτιώσεων, όπου κρίνεται απαραίτητο [64].

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, τα αιολικά πάρκα συχνά εγκαθίστανται σε ορεινές περιοχές με βραχώδες έδαφος, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Ως εκ τούτου, το σύστημα γείωσης που θα προκύψει ενδέχεται να μην πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές αξιοπιστίας και ασφάλειας [82], [83].

Ένα σημείο που περιορίζει τις δυνατότητες βελτίωσης του συστήματος γείωσης είναι το γεγονός ότι η βάση της ανεμογεννήτριας είναι προκαθορισμένη, και επομένως δεδομένο είναι και το θεμελιακό της σύστημα γείωσης.

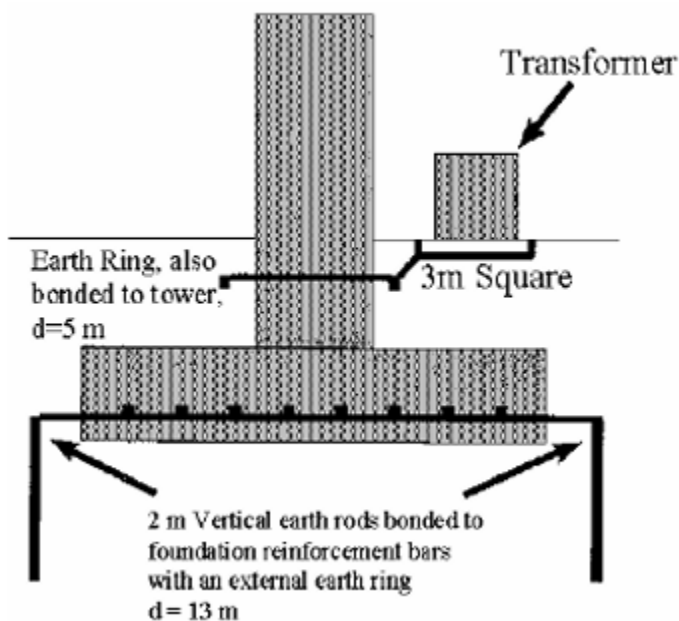
Παρόλα αυτά, είναι εφικτή η τροποποίηση και επέκταση του περιμετρικού συστήματος γείωσης, επιτυγχάνοντας αύξηση της συνολικής έκτασης του, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της συνολικής αντίστασης γείωσης. Το θεμελιακό σύστημα γείωσης θα πρέπει να ενισχύεται με τρόπο που να διατηρεί χαμηλό το κόστος, ενώ η βέλτιστη τεχνική λύση για τη μείωση της αντίστασης γείωσης μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού προσομοίωσης.

Ένας πρόσθετος αποτελεσματικός τρόπος βελτίωσης της γείωσης είναι η αξιοποίηση των χωματουργικών εργασιών που πραγματοποιούνται στην πλατεία της ανεμογεννήτριας. Σε πολλές περιπτώσεις, σχηματίζεται βρόχος στο περιμετρικό σύστημα γείωσης, αν και αυτό δεν είναι πάντα δεδομένο.

Όπως προαναφέρθηκε, η τελική τιμή της αντίστασης γείωσης, στη μόνιμη κατάσταση, εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια του συστήματος και από τη δομή του εδάφους στην περιοχή εγκατάστασης. Η ύπαρξη ενός περιμετρικού βρόχου μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, ωστόσο τείνει να αυξάνει την τιμή της μεταβατικής αντίστασης του συστήματος.

2.9.3 Σχέδιο συστήματος γείωσης ανεμογεννητριών

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το σύστημα γείωσης μιας ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται με τη τοποθέτηση ενός δακτυλιοειδούς ηλεκτροδίου γύρω από τη θεμελίωση του πύργου της. Το θεμέλιο ενισχύεται με κάθετες ράβδους, οι οποίες συνδέονται είτε απευθείας είτε μέσω του πύργου με τον εσωτερικό δακτύλιο, λειτουργώντας και αυτές ως ηλεκτρόδια γείωσης, καθώς η ειδική αντίσταση του σκυροδέματος θεωρείται κατά προσέγγιση ίση με αυτή του γύρω εδάφους [94]. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ράβδοι οπλισμού αγνοούνται στον υπολογισμό, και έτσι προκύπτουν πιο συντηρητικές τιμές για τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Για περαιτέρω μείωση της αντίστασης γείωσης, είναι δυνατό να εγκατασταθούν οριζόντιες ή κάθετα τοποθετημένες ράβδοι, συμπληρωματικά προς τον δακτύλιο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα [65], [95], μια τιμή αντίστασης γείωσης μικρότερη ή ίση των 10 Ω θεωρείται αποδεκτή τόσο για αντικεραυνική προστασία όσο και για τον περιορισμό των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.



Σχήμα 2.10: Σύστημα γείωσης A/G [64]

Στη συνέχεια, τα συστήματα γείωσης των μεμονωμένων ανεμογεννητριών μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω του μανδύα του καλωδίου της μέσης τάσης, σχηματίζοντας έτσι ένα ενιαίο σύστημα γείωσης για το σύνολο του αιολικού πάρκου. Με αυτή τη διασύνδεση επιτυγχάνεται, συνήθως, συνολική αντίσταση γείωσης του πάρκου της τάξης των 1 με 2 Ω. Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται συχνά σε περιοχές με υψηλή ειδική αντίσταση εδάφους, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την επιπρόσθετη διασύνδεση των ανεξάρτητων συστημάτων γείωσης κάθε ανεμογεννήτριας με ένα οριζόντια τοποθετημένο

ηλεκτρόδιο, για να περιορίσει το ρεύμα που διέρχεται από τον μανδύα του καλωδίου, ώστε να μην προκληθούν σε αυτό φθορές από μεγάλης τιμής ρεύματα.

Είναι επίσης απαραίτητο να προβλέπεται η δυνατότητα απομόνωσης κάθε επιμέρους συστήματος γείωσης, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί μέτρηση της αντίστασής του μεμονωμένα. Για τον σκοπό αυτό, κατά την υλοποίηση του έργου, τα επιμέρους συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών διαχωρίζονται μεταξύ τους με φρεάτια. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων, ενώ παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα ενίσχυσης του κάθε επιμέρους συστήματος γείωσης, σε περίπτωση που αυτό κριθεί απαραίτητο [64].

2.10 Συστήματα γείωσης στην εργασία

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό σύστημα γείωσης ανεμογεννήτριας (Σχήμα 2.11) με μεταβλητές διαστάσεις πλέγματος (5 περιπτώσεις). Η εργασία αποτελεί συνέχεια των εργασιών [8], [96]. Το εύρος της επιφάνειας της γείωσης στα συστήματα γείωσης που χρησιμοποιήθηκαν κυμαίνεται μεταξύ ενός και δύο στρεμμάτων αντιπροσωπεύοντας το μεγαλύτερο ποσοστό των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα. Σπανίως προκύπτει επιφάνεια μεγαλύτερη από 2 στρέμματα καθώς η πλειοψηφία των πάρκων είναι πάνω σε βουνοκορφές με περιορισμένη χωροταξική διαθεσιμότητα.

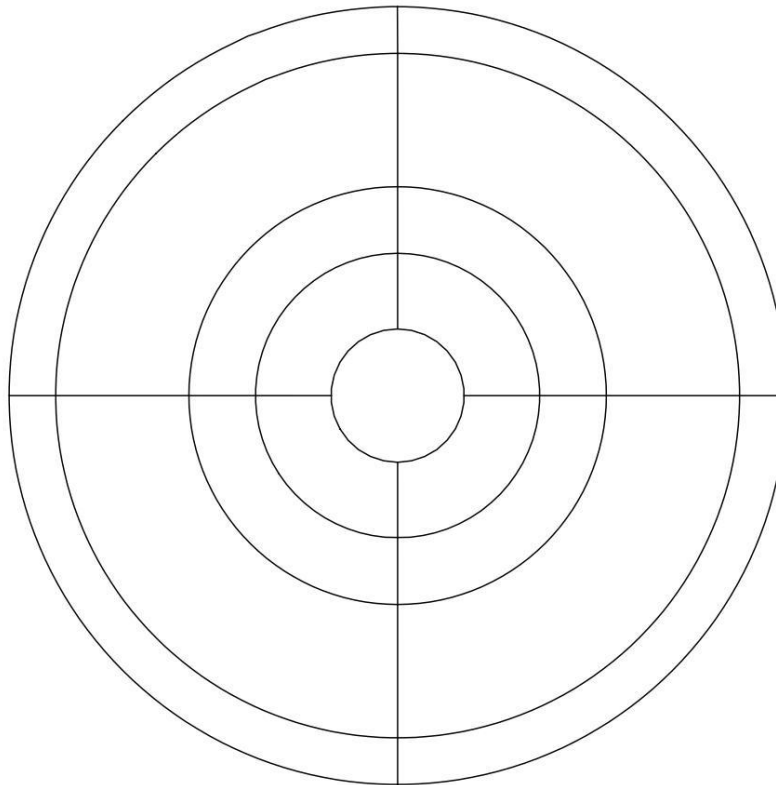
Τυπικό Σύστημα γείωσης Α/Γ

Το τυπικό σύστημα γείωσης ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 2.11 και αποτελείται από τα εξής:

- Εξωτερική γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30mm × 3.5mm ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος 2.7m με διάμετρο 16.5m.
- Μεσαία γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30mm × 3.5mm ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος 2.7m με διάμετρο 10m.
- Μεσαία γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30mm × 3.5mm ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος 0.5m με διάμετρο 7m.
- Εσωτερική γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30mm × 3.5mm ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος 0.3m με διάμετρο 3.2m.
- Τέσσερις ακτινικές γαλβανισμένες ατσάλινες ταινίες 30mm × 3.5mm ενσωματωμένες μέσα στο σκυρόδεμα συνδέουν την εσωτερική ταινία με τη μεσαία ταινία διαμέτρου 7m.
- Τέσσερις ακτινικές γαλβανισμένες ατσάλινες ταινίες 30mm × 3.5mm ενσωματωμένες μέσα στο σκυρόδεμα συνδέουν τις μεσαίες ταινίες.
- Τέσσερις ακτινικές γαλβανισμένες ατσάλινες ταινίες 30mm × 3.5mm ενσωματωμένες μέσα στο σκυρόδεμα συνδέουν την εξωτερική ταινία με τη μεσαία ταινία διαμέτρου 10m.

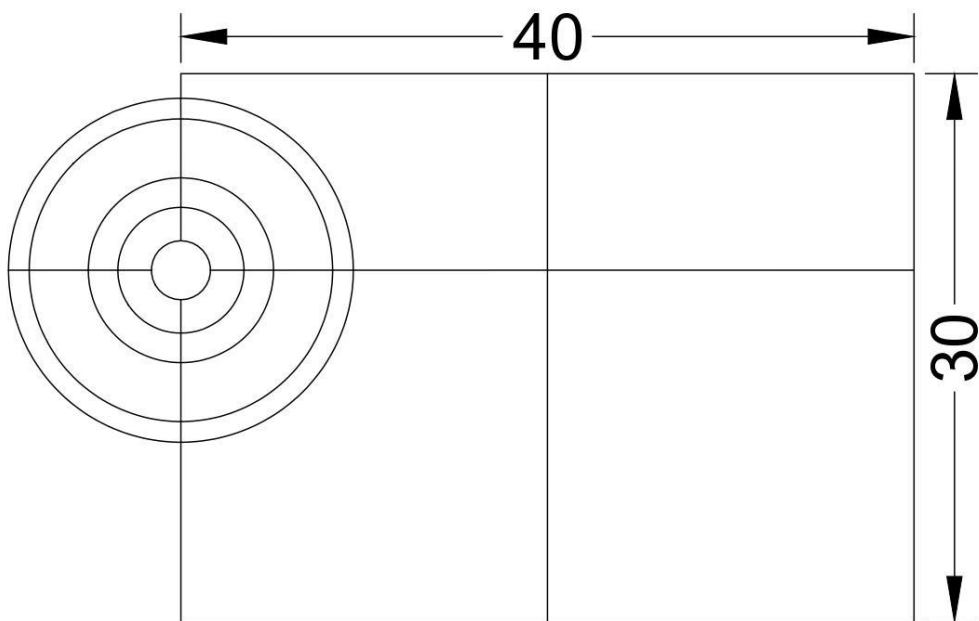
Το περιμετρικό διάγραμμα γείωσης αποτελείται από:

- Εξωτερική επικασσιτερωμένη εν θερμώ χάλκινη ταινία $25\text{mm} \times 4\text{mm}$, τοποθετημένη σε βάθος 2.8m με διάμετρο 19m.
- Τέσσερις ακτινικές επικασσιτερωμένες εν θερμώ χάλκινες ταινίες $25\text{mm} \times 4\text{mm}$, που ενώνουν την εξωτερική χαλύβδινη και την εξωτερική περιμετρική ταινία.
- Τέσσερα κατακόρυφα ηλεκτρόδια με 250μm επικάλυψη χαλκού, διάμετρο $\Phi 17$ και μήκος 3m που συνδέονται με την εξωτερική περιμετρική ταινία.

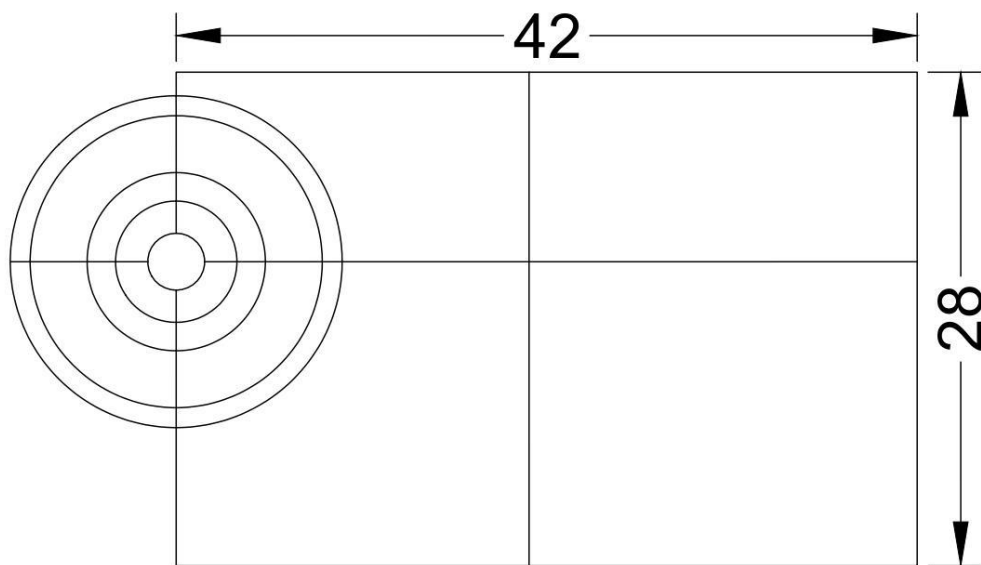


Σχήμα 2.11: Τυπικό σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη)

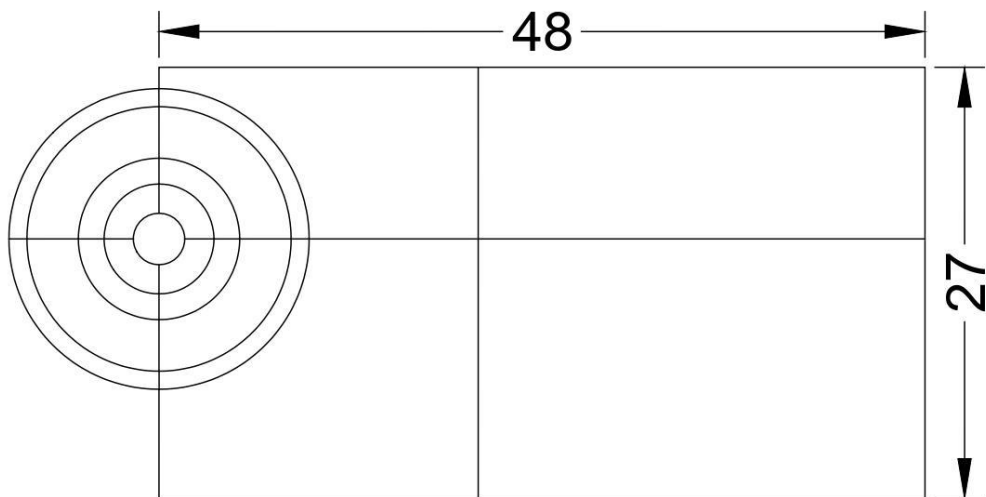
Στο παραπάνω τυπικό σύστημα γείωσης συνδέεται πλέγμα γείωσης από επικασσιτερωμένο εν θερμώ χαλκό σε βάθος 0,6m. Στα Σχήματα 2.12 – 2.16 φαίνονται τα συστήματα γείωσης που προσομοιώθηκαν και οι διαστάσεις που διαφοροποιούνται.



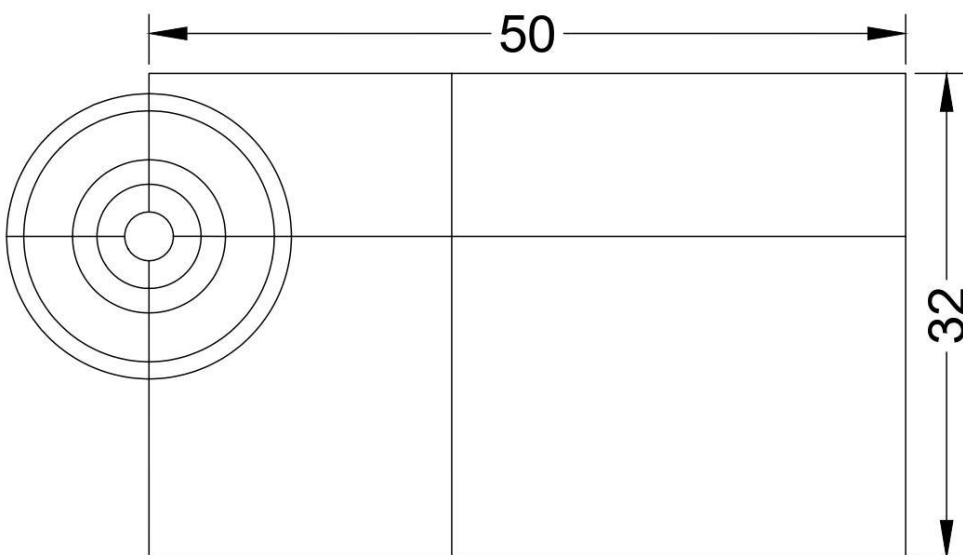
Σχήμα 2.12: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $40m \times 30m$ και συνολική επιφάνεια $1339m^2$



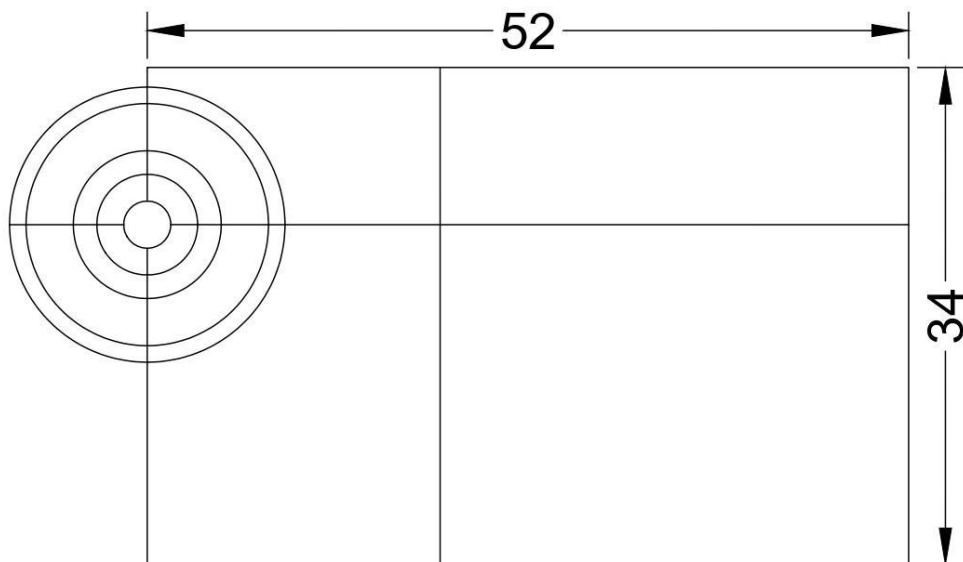
Σχήμα 2.13: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $42m \times 28m$ και συνολική επιφάνεια $1315m^2$



Σχήμα 2.14: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $48m \times 27m$ και συνολική επιφάνεια $1435m^2$



Σχήμα 2.15: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $50m \times 32m$ και συνολική επιφάνεια $1739m^2$



Σχήμα 2.16: Σύστημα γείωσης A/Γ (κάτοψη) με πλέγμα $52m \times 34m$ και συνολική επιφάνεια $1907m^2$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία εισαγωγή στο λογισμικό CDEGS. Ένα εξειδικευμένο, εμπορικό λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις της αντίστασης γείωσης του συστήματος για διαφορετικά μοντέλα εδάφους. Τα συστήματα γείωσης συνήθως προσομοιώνονται με λογισμικά όπως το CDEGS, όπως προαναφέρθηκε. Όμως, πρόσφατες μελέτες [109] παρουσιάζουν μία διαφορετική προσέγγιση με την εκτίμηση της συνολικής αντίστασης γείωσης που βασίζεται στην υπέρθεση της ηλεκτρικής επίδρασης από γραμμικές πηγές ρεύματος. Η μέθοδος θεωρεί ότι κάθε επιμέρους στοιχείο του συστήματος γείωσης μπορεί να αναπαρασταθεί ως μία στοιχειώδης γραμμική πηγή ρεύματος με συγκεκριμένο προσανατολισμό και θέση. Μέσω γεωμετρικών μετασχηματισμών και υπέρθεσης των επιρροών όλων των γραμμικών στοιχείων, και λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες προκύπτει μία αναλυτική εξίσωση για το ηλεκτρικό δυναμικό και τελικά για τη σύνθετη αντίσταση γείωσης. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή, αν και ευκολή στην υλοποίηση της αφού είναι πλήρως αναλυτική, έχει κάποιους περιορισμούς όταν έχουμε διαφορετικά υλικά εδάφους, στρώματα, γεωμετρίες επιφάνειας, πυκνότητες ιόντων και χρονικές εξαρτήσεις. Γενικά είναι χρήσιμη για μικρές ηλεκτρικές δομές που δεν εφαρμόζονται απότομης κλίσης κυματομορφές.

3.2 Το λογισμικό CDEGS [97]

Το CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis) είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό πακέτο, σχεδιασμένο για την ανάλυση κατανομής ρευμάτων, γειώσεων και ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του συστήματος και τη δομή του εδάφους. Η ανάπτυξή του γίνεται από την εταιρεία SES & Technologies Ltd. και αποτελεί εμπορικό λογισμικό.

Το CDEGS περιλαμβάνει μια σειρά επιμέρους εργαλείων, καθένα εκ των οποίων εξειδικεύεται σε διαφορετικούς τομείς ανάλυσης. Ενδεικτικά, περιλαμβάνονται:

- **AutoGround / MultiGround / MultiGroundZ:** για τον σχεδιασμό και την ανάλυση συστημάτων γείωσης
- **MultiFields και MultiLines:** για την εκτίμηση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και την ανάλυση επιδράσεων μεταξύ αγωγών
- **AutoGroundDesign και AutoGrid Pro:** για την αυτοματοποίηση σχεδιασμού συστημάτων γείωσης

- **Right-of-Way Pro:** για την αξιολόγηση παρεμβολών μεταξύ γραμμών μεταφοράς και παρακείμενων εγκαταστάσεων.

Οι βασικοί επιλυτές που ενσωματώνονται στο CDEGS είναι:

- **RESAP:** Ανάλυση ειδικής αντίστασης του εδάφους,
- **MALT:** Ανάλυση γείωσης σε χαμηλές συχνότητες,
- **MALZ:** Εκτίμηση συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης σε συχνότητες πεδίου,
- **TRALIN:** Υπολογισμός παραμέτρων γραμμών και επαγωγικών επιδράσεων,
- **SPLITS:** Ανάλυση κατανομής ρευμάτων σφάλματος και παρεμβολών,
- **HIFREQ:** Ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων,
- **FFTSES:** Εκτέλεση ταχέων μετασχηματισμών Fourier,
- **FCDIST:** Υπολογισμός της κατανομής ρευμάτων σε σενάρια σφάλματος.

Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει σύνθετα δίκτυα αγωγών και να υπολογίσει τόσο τα ηλεκτρικά όσο και τα μαγνητικά πεδία που παράγονται. Επίσης, υποστηρίζει την ανάλυση γραμμών μεταφοράς σε τρισδιάστατα γεωμετρικά μοντέλα και τη μελέτη της αλληλεπίδρασής τους με άλλα αγωγίμα στοιχεία. Η ακρίβεια και η ευελιξία του CDEGS το καθιστούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία σε μελέτες που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και την ασφάλεια συστημάτων γείωσης.

3.3 Επιλητής MALT [98]

Σε αυτή την διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο επιλητής MALT (Low Frequency Grounding / Earthing Analysis). Ο MALT είναι σχεδιασμένος για την ανάλυση συστημάτων γείωσης σε χαμηλές συχνότητες, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι αγωγοί μπορούν να θεωρηθούν ως ισοδυναμικά στοιχεία.

Στον MALT γίνεται η υπόθεση ότι οι αγωγοί και οι μεταλλικές πλάκες που αποτελούν μέρος του ίδιου ηλεκτροδίου βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό, αγνοώντας τις επαγωγικές επιδράσεις και τις πτώσεις τάσης κατά μήκος αυτών των στοιχείων. Αυτή η προσέγγιση καθιστά το εργαλείο ιδανικό για την ανάλυση ηλεκτρικά μικρών συστημάτων γείωσης, όπως αυτά που συναντώνται σε υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης, επομένως και σε μία Α/Γ.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του MALT είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης πολύπλοκων γεωλογικών δομών εδάφους. Υποστηρίζει μοντέλα εδάφους με μία ή περισσότερες οριζόντιες ή κάθετες στρώσεις, καθώς και πιο σύνθετες γεωμετρίες, όπως σφαιρικά ή κυλινδρικά στρωματοποιημένα εδάφη, εδάφη με κεκλιμένες στρώσεις ή σχήματα ελλειψοειδούς μορφής. Επιπλέον, μπορεί να προσομοιώσει περιοχές με πεπερασμένους όγκους διαφορετικής ειδικής αντίστασης, όπως περιοχές με επιχωματώσεις, φράγματα, ποτάμια ή λίμνες .

Η χρήση του MALT επιτρέπει τον υπολογισμό κρίσιμων παραμέτρων ασφαλείας, όπως οι βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, καθώς και η ανύψωση δυναμικού στο σύστημα γείωσης. Αυτές οι παράμετροι είναι σημαντικές για την αξιολόγηση της ασφάλειας των συστημάτων γείωσης και την προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού από τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

3.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Παρά τις δυνατότητες του επιλυτή MALT που αναφέρθηκαν, η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την εκτίμηση αντίστασης γείωσης σε A/Γ σε εδάφη που μοντελοποιούνται ικανοποιητικά με την διστρωματική υπόθεση. Έτσι, για το ίδιο σύστημα γείωσης πέντε διαφορετικών επιφανειών έγιναν οι προσομοιώσεις για:

- $\rho_1 = 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000, 150000$
- $\rho_2 = 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000, 150000$
- $h = 1, 2, 3, 5$

Οι υπολογιζόμενες από την προσομοίωση αντιστάσεις που προέκυψαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα Β.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή [99]

Στη στατιστική μοντελοποίηση, η ανάλυση παλινδρόμησης αναφέρεται σε ένα σύνολο μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της σχέσης μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής και μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίες θεωρούνται χωρίς σφάλμα. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές συναντώνται με διάφορους όρους στη βιβλιογραφία, όπως ερμηνευτικές μεταβλητές, προβλεπτικοί παράγοντες, συνδιακυμάνουσες ή χαρακτηριστικά (features), ιδίως στον τομέα της μηχανικής μάθησης.

Η ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιείται κυρίως για δύο σκοπούς. Αφενός, εφαρμόζεται εκτενώς στην πρόβλεψη και την εκτίμηση τιμών, πεδίο στο οποίο παρουσιάζει σημαντική σύγκλιση με τις τεχνικές της μηχανικής μάθησης. Αφετέρου, σε ορισμένες περιπτώσεις αξιοποιείται για την εξαγωγή αιτιοκρατικών συσχετίσεων μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών, όπως σε αυτή την εργασία. Ωστόσο, η παλινδρόμηση, ως στατιστική μέθοδος, περιορίζεται στην καταγραφή και ανάλυση συσχετίσεων εντός ενός δεδομένου συνόλου παρατηρήσεων. Για να αποκτήσει προγνωστική ισχύ ή να θεμελιώσει αιτιακή σχέση, απαιτείται από τον ερευνητή να τεκμηριώσει με επάρκεια είτε τη γενικευσιμότητα της συσχέτισης σε νέο πλαίσιο, είτε το αιτιώδες περιεχόμενο της σχέσης. Η δεύτερη περίπτωση έχει ιδιαίτερη σημασία όταν η ανάλυση βασίζεται σε παρατηρησιακά δεδομένα, όπου δεν υπάρχει δυνατότητα πειραματικού ελέγχου.

Στην παρούσα εργασία, η παλινδρόμηση αξιοποιείται για την εξαγωγή εμπειρικών σχέσεων μεταξύ της επιφάνειας των συστημάτων γείωσης και τις αντιστάσεις που προέκυψαν από το CDEGS για τα διάφορα γεωλογικά προφίλ. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης των μοντέλων.

4.2 Γραμμική παλινδρόμηση [100]

Στατιστικά, η γραμμική παλινδρόμηση αποτελεί ένα μοντέλο που αποσκοπεί στην εκτίμηση της σχέσης μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής, συνήθως αριθμητικής, και μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Όταν το μοντέλο περιλαμβάνει μόνο μία ανεξάρτητη μεταβλητή, αναφέρεται ως απλή γραμμική παλινδρόμηση, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, με δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές, ονομάζεται πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Είναι σημαντικό να γίνει διάκριση από τη πολυμεταβλητή γραμμική παλινδρόμηση, η οποία αφορά την πρόβλεψη περισσότερων εξαρτημένων μεταβλητών ταυτόχρονα, οι οποίες ενδέχεται να παρουσιάζουν μεταξύ τους συσχέτιση.

Στη γραμμική παλινδρόμηση, οι συσχετίσεις μεταξύ μεταβλητών περιγράφονται μέσω γραμμικών συναρτήσεων πρόβλεψης, των οποίων οι άγνωστες παράμετροι εκτιμώνται από τα

δεδομένα. Συνήθως, υποτίθεται ότι ο υπό όρους μέσος όρος της εξαρτημένης μεταβλητής, δεδομένων των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών αποτελεί μία άπειρη συνάρτηση των μεταβλητών αυτών. Όπως και σε άλλες μορφές ανάλυσης παλινδρόμησης, η γραμμική παλινδρόμηση εστιάζει στην υπό όρους κατανομή της εξαρτημένης μεταβλητής ως προς τις ανεξάρτητες, και όχι στην από κοινού κατανομή όλων των μεταβλητών, αντικείμενο που αποτελεί πεδίο της πολυμεταβλητής ανάλυσης.

Η γραμμική παλινδρόμηση αποτελεί επίσης έναν τύπο αλγορίθμου μηχανικής μάθησης, και συγκεκριμένα έναν εποπτευόμενο αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται σε σύνολα δεδομένων, μαθαίνοντας να συσχετίζει τα σημεία δεδομένων με τη βέλτιστη δυνατή γραμμική συνάρτηση, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη νέων, άγνωστων δεδομένων. Όπως στην παρούσα εργασία εκπαιδεύεται στα χαρακτηριστικά του συστήματος γείωσης και του εδάφους και προβλέπει την αντίσταση του συστήματος.

Τα γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης συνήθως εφαρμόζονται μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, όμως μπορούν να προσαρμοστούν και με εναλλακτικούς τρόπους. Ένας τέτοιος τρόπος είναι η ελαχιστοποίηση της απόκλισης προσαρμογής, σύμφωνα με κάποιον άλλο μαθηματικό κανόνα, όπως συμβαίνει στη παλινδρόμηση ελαχίστων απόλυτων αποκλίσεων (least absolute deviations). Άλλες προσεγγίσεις βασίζονται στη χρήση τροποποιημένης συνάρτησης αξιολόγησης, όπως συμβαίνει στην ridge regression (με κανονικοποίηση τύπου L2) και στη Lasso (με κανονικοποίηση τύπου L1), όπου προστίθενται όροι βαρύτητας για τη ρύθμιση των συντελεστών του μοντέλου.

Η χρήση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Mean Squared Error, MSE) ως κριτήριο αξιολόγησης της ποιότητας της προσαρμογής, σε σύνολα δεδομένων με πολλά έντονα ακραία σημεία (outliers) μπορεί να οδηγήσει σε μοντέλα που προσαρμόζονται υπερβολικά σε αυτά τα σημεία, επειδή το MSE δίνει υπερβολικό βάρος στα μεγάλα σφάλματα. Για τον λόγο αυτό, σε τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται η χρήση ανθεκτικών (robust) συναρτήσεων αξιολόγησης, που περιορίζουν την επιρροή των outliers. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την προσαρμογή μοντέλων που δεν είναι κατ' ανάγκη γραμμικά, οπότε οι όροι γραμμικό μοντέλο και μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων δεν ταυτίζονται απαραίτητα.

4.2.1 Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση [100]

Η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση επεκτείνει την απλή γραμμική παλινδρόμηση στην περίπτωση όπου η εξαρτημένη μεταβλητή επηρεάζεται από περισσότερες της μίας ανεξάρτητες μεταβλητές. Σε αυτό το πλαίσιο, το μοντέλο διατηρεί τη γραμμικότητα ως προς τις παραμέτρους, αλλά επιτρέπει την ταυτόχρονη συνεκτίμηση πολλών παραγόντων που μπορεί να επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Το μαθηματικό της υπόβαθρο αποτυπώνεται από τη σχέση:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_p X_{ip} + \varepsilon_i$$

Για κάθε παρατήρηση $i = 1, \dots, n$

Όπου:

- Y_i : η εξαρτημένη μεταβλητή για την i-οστη παρατήρηση
- X_{ij} : η τιμή της j-οστης ανεξάρτητης μεταβλητής για την i-οστη παρατήρηση
- β_0 : σταθερός όρος
- β_j : συντελεστές παλινδρόμησης που εκτιμώνται από τα δεδομένα
- ε_i : το σφάλμα της παλινδρόμησης για την i-οστη παρατήρηση

Η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση αποτελεί έναν από τους πλέον διαδεδομένους στατιστικούς μηχανισμούς ανάλυσης σχέσεων μεταξύ μεταβλητών και χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές πρόβλεψης, μοντελοποίησης και ανάλυσης εξαρτήσεων. Μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων εκτιμώνται οι τιμές των συντελεστών β_j ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική απόκλιση του μοντέλου από τα δεδομένα.

Επιπλέον, αν και το μοντέλο είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους, επιτρέπει τη χρήση μη γραμμικών μετασχηματισμών των ανεξάρτητων μεταβλητών, χωρίς αυτό να αναιρεί τον γραμμικό του χαρακτήρα. Έτσι, το μοντέλο μπορεί να περιγράψει και πιο πολύπλοκες σχέσεις, εφόσον σε αυτές χρησιμοποιηθούν σωστά οι κατάλληλοι όροι.

Η ισχύς της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης έγκειται στη δυνατότητά της να απομονώνει την επίδραση κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα τις υπόλοιπες. Αυτό επιτρέπει στον ερευνητή να κατανοήσει καλύτερα τις συνεισφορές των επιμέρους παραγόντων στο αποτέλεσμα.

4.2.2 Προϋποθέσεις Εφαρμογής Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης [100]

Η εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης βασίζεται στην ικανοποίηση ορισμένων βασικών προϋποθέσεων, προκειμένου τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης να είναι έγκυρα και αξιόπιστα. Οι προϋποθέσεις αυτές εξασφαλίζουν ότι οι εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου, μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (Ordinary Least Squares – OLS) [101], είναι αμερόληπτες, συνεπείς και με ελάχιστη διακύμανση, όπως προβλέπεται από το θεώρημα Gauss-Markov [102].

Οι βασικές υποθέσεις συνοψίζονται ως εξής:

- Γραμμικότητα: Η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και των ανεξάρτητων μεταβλητών πρέπει να είναι γραμμική ως προς τους συντελεστές. Αυτό δεν αποκλείει τη χρήση μετασχηματισμένων όρων, εφόσον το μοντέλο παραμένει γραμμικό ως προς τις παραμέτρους.

- Απουσία τέλειας πολυσυγγραμμικότητας: Οι ανεξάρτητες μεταβλητές δεν πρέπει να έχουν τέλεια ή σχεδόν τέλεια γραμμική συσχέτιση μεταξύ τους, καθώς κάτι τέτοιο οδηγεί σε αστάθεια ή αδυναμία εκτίμησης των συντελεστών.
- Ανεξαρτησία των σφαλμάτων: Τα σφάλματα μεταξύ διαφορετικών παρατηρήσεων θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητα. Η παραβίαση αυτής της υπόθεσης μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των στατιστικών ελέγχων.
- Ομοσκεδαστικότητα (σταθερή διακύμανση των σφαλμάτων): Η διασπορά των σφαλμάτων πρέπει να είναι σταθερή για όλες τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Αν η διακύμανση των σφαλμάτων μεταβάλλεται, οι εκτιμήσεις παραμένουν αμερόληπτες αλλά οι τυπικές αποκλίσεις είναι λανθασμένες.
- Κανονικότητα των σφαλμάτων: Τα σφάλματα πρέπει να ακολουθούν κανονική κατανομή, ιδίως όταν ο σκοπός της ανάλυσης είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω υποθέσεων ή η κατασκευή διαστημάτων εμπιστοσύνης. Η υπόθεση αυτή είναι λιγότερο κρίσιμη όταν το μέγεθος του δείγματος είναι μεγάλο σύμφωνα με το κεντρικό οριακό θεώρημα.
- Μηδενική μέση τιμή σφάλματος: Τα σφάλματα που προκύπτουν από την πρόβλεψη έχουν, κατά μέσο όρο, τιμή ίση με το μηδέν. Η παραβίαση αυτής της υπόθεσης σημαίνει συστηματική απόκλιση του μοντέλου από τα πραγματικά δεδομένα.

4.2.3 Λογαριθμικός Μετασχηματισμός [103]

Σε πολλές περιπτώσεις, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης δεν εμφανίζουν γραμμική συσχέτιση, γεγονός που μπορεί να δυσκολέψει τη διαδικασία προσαρμογής. Ο λογαριθμικός μετασχηματισμός είναι μία πρακτική τεχνική που βοηθά στην αντιμετώπιση αυτής της δυσκολίας, μετατρέποντας μια μη γραμμική σχέση σε πιο προσεγγιστικά γραμμική.

Ουσιαστικά, η χρήση του λογαρίθμου εφαρμόζεται όταν η εξαρτημένη μεταβλητή αυξάνεται με εκθετικό ή πολυωνυμικό τρόπο σε σχέση με τις ανεξάρτητες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η εφαρμογή ενός μετασχηματισμού όπως το $\log(Y)$, μπορεί να γραμμικοποιήσει τη σχέση, καθιστώντας δυνατή τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης με πολύ καλύτερη απόδοση.

Στην παρούσα εργασία, η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η αντίσταση γείωσης R . Η αντίσταση γείωσης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με τις γεωηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, σε έναν από τους δύο τύπους που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο έχει γίνει λογαριθμικός μετασχηματισμός στην αντίσταση γείωσης, ώστε να περιοριστεί η επίδραση της μεγάλης διακύμανσης και να διευκολυνθεί η προσαρμογή του μοντέλου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν οι μεταβλητές που μετασχηματίζονται παίρνουν θετικές τιμές. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν μηδενικές ή αρνητικές τιμές, χρησιμοποιούνται συνήθως εναλλακτικές τεχνικές, όπως ο μετασχηματισμός Box-Cox [104].

4.3 Μη Γραμμική Παλινδρόμηση [105]

4.3.1 Εισαγωγή

Η μη γραμμική παλινδρόμηση έχει παρουσιαστεί σε βάθος σε προηγούμενη εργασία του εργαστηρίου με παρόμοιο θέμα [96]. Οπότε εδώ, θα γίνει μία περιληπτική ανασκόπηση με σκοπό την παρουσίαση της στον αναγνώστη για την χρήση της στη συνέχεια της εξαγωγής του δεύτερου τύπου.

Η μη γραμμική παλινδρόμηση επεκτείνει την έννοια της γραμμικής παλινδρόμησης. Χρησιμοποιείται όταν η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών δεν μπορεί να χαρακτηριστεί με την χρήση γραμμικού μοντέλου. Τότε χρησιμοποιούνται μαθηματικές συναρτήσεις πιο σύνθετης μορφής, όπως εκθετικές, λογαριθμικές και πολυωνυμικές για την καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων.

Όπως και πριν, επιδιώκεται η περιγραφή μιας συστηματικής σχέσης ανάμεσα στις μεταβλητές, με σκοπό είτε την πρόβλεψη, είτε την κατανόηση του υποκείμενου φαινομένου. Αυτό που διαφέρει είναι το σχήμα της επιφάνειας που ταιριάζει στα δεδομένα. Αντί για επίπεδο η προσαρμογή γίνεται με επιφάνειες που απεικονίζουν πιο περίπλοκες σχέσεις.

Η μη γραμμική παλινδρόμηση εφαρμόζεται ευρέως σε φυσικές επιστήμες και τεχνικές εφαρμογές, όπως είναι και τα συστήματα γείωσης, όπου τα εμπειρικά δεδομένα ή αυτά που παίρνουμε από προσομοιώσεις εμφανίζουν μη γραμμικά μοτίβα.

Η επίλυση τέτοιων μοντέλων πραγματοποιείται με τη βοήθεια υπολογιστικών εργαλείων, όπως το MATLAB που θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο, τα οποία εφαρμόζουν αλγορίθμους βελτιστοποίησης για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Σε αντίθεση με τα γραμμικά μοντέλα, όπου η λύση προκύπτει άμεσα, στα μη γραμμικά μοντέλα οι παράμετροι προσδιορίζονται αριθμητικά, μέσω επαναληπτικών διαδικασιών.

Η αξιολόγηση ενός μη γραμμικού μοντέλου βασίζεται σε παρόμοια κριτήρια με αυτά της γραμμικής παλινδρόμησης, όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Οι αρχικές συνθήκες πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, καθώς πρέπει να ερευνάται και το ενδεχόμενο υπερπροσαρμογής, όταν το μοντέλο περιλαμβάνει πολλές ελεύθερες παραμέτρους.

4.3.2 Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση

Η μη γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση αποτελεί επέκταση της γραμμικής παλινδρόμησης, με τη διαφορά ότι η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών δεν είναι απαραίτητα γραμμική ως προς τις παραμέτρους. Σε αντίθεση με τα γραμμικά μοντέλα, όπου οι παράμετροι εμφανίζονται μόνο ως γραμμικοί συντελεστές, στα μη γραμμικά μοντέλα, μπορεί να συμμετέχουν σε άλλες πιο σύνθετες μαθηματικές εκφράσεις.

Η μαθηματική έκφραση ενός τέτοιου μοντέλου μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλές ανεξάρτητες μεταβλητές και να εκφράζεται με μια γενική εξίσωση της μορφής:

$$Y_i = f(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip}; \theta) + \varepsilon_i$$

Όπου:

- Y_i : είναι η εξαρτημένη μεταβλητή
- X_{ij} : οι ανεξάρτητες μεταβλητές για κάθε παρατήρησή i
- f : είναι μία μη γραμμική συνάρτηση ως προς τις παραμέτρους θ
- ε_i : είναι το σφάλμα της εκτίμησης

Η διαδικασία προσαρμογής ενός τέτοιου μοντέλου δεν βασίζεται σε άμεσες αλγεβρικές λύσεις, όπως στην γραμμική περίπτωση, αλλά απαιτεί αριθμητικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι του μοντέλου προσδιορίζονται μέσω επαναληπτικών διαδικασιών, όπως η μέθοδος Levenberg-Marquardt, η οποία συνδυάζει την ταχύτητα της μεθόδου Gauss-Newton με τη σταθερότητα της καθοδικής αναζήτησης και τον αλγόριθμο περιοχής εμπιστοσύνης (Trust Region Algorithm), που αντί να προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τη συνάρτηση σε όλο το χώρο, εστιάζει σε μία περιοχή εμπιστοσύνης γύρω από το τρέχον σημείο, όπου θεωρεί ότι η συνάρτηση προσεγγίζεται καλά.

Στην παρούσα διπλωματική, η μη γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση χρησιμοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο για την εξαγωγή ενός απλούστερου από τον πρώτο σε όρους τύπο. Η επιλογή τέτοιου μοντέλου μετά από δοκιμές κρίθηκε κατάλληλη, καθώς τα δεδομένα των προσομοιώσεων παρουσιάζουν μη γραμμικές συμπεριφορές και μπορούν να συμπυκνωθούν σε λιγότερους όρους καλύτερα σε σχέση με την απλή γραμμική παλινδρόμηση.

4.3.3 Η σημασία των αρχικών τιμών στη μη γραμμική παλινδρόμηση

Σε ένα μη γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης, η διαδικασία εύρεσης των παραμέτρων δεν γίνεται απευθείας με μαθηματικό τύπο όπως προείπαμε, αλλά με αριθμητικές μεθόδους. Αυτές οι μέθοδοι ξεκινούν από τις αρχικές τιμές και σε κάθε επανάληψη τείνουν στη λύση που εφάπτεται καλύτερα στα δεδομένα.

Συμπερασματικά, οι αρχικές τιμές επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα, αφού είναι το σημείο εκκίνησης της αριθμητικής μεθόδου. Αν ξεκινήσουμε με τιμές που απέχουν πολύ από τις καταλληλότερες, ο υπολογισμός, λόγω τοπικών ακροτάτων, μπορεί να τείνει σε λάθος λύση ή και η μέθοδος να αποτύχει τελείως. Με την ίδια λογική όσο πιο κοντά είναι οι αρχικές τιμές στις τιμές που κάνουν το μοντέλο να εξηγεί καλύτερα τα δεδομένα, τόσο πιο γρήγορα ο αλγόριθμος φτάνει σε αυτές τις τιμές.

Για αυτό το λόγο, πριν ξεκινήσει μία μη γραμμική παλινδρόμηση, πρέπει να υπάρχει μία γενική εικόνα του προβλήματος. Συνήθως, αυτό γίνεται με κάποιο αρχικό γράφημα των δεδομένων ή με χρήση πιο απλών μοντέλων. Για παράδειγμα, γίνεται πρώτα μία γραμμική παλινδρόμηση και βάζουμε ως αρχικές τιμές τα αποτελέσματά της. Σε πιο σύνθετα προβλήματα, μπορεί να χρειαστεί να δοκιμάσουμε διαφορετικά σημεία εκκίνησης και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα, όπως και έγινε σε αυτή την διπλωματική.

4.4 Η παλινδρόμηση σε αυτή την διπλωματική

Στις προηγούμενες ενότητες, αν και περιληπτικά, δόθηκε βάσει των πηγών που αναφέρονται, μία μαθηματική περιγραφή των εννοιών που τείνει περισσότερο στην μηχανική μάθηση. Οι παλινδρομήσεις και ειδικά η μη γραμμική, συνήθως χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση μοντέλων μέσω δεδομένων που έχουν ληφθεί από κάποιες μετρήσεις και εκ φύσεως περιέχουν σφάλματα.

Για αυτό το λόγο, όπως αναφέρεται και στις προηγούμενες εργασίες, γίνεται χρήση robust συναρτήσεων όπως είναι η bisquare. Οι ανθεκτικές συναρτήσεις αξιολόγησης όπως είναι η bisquare, χρησιμοποιούνται ώστε να μην επιτρέπουν σε σφάλματα που είναι πολύ μεγάλα να επιβαρύνουν το τελικό αποτέλεσμα διαμορφώνοντας σημαντικά το μοντέλο. Αυτό επιτυγχάνεται δίνοντας περισσότερο βάρος στις τιμές που έχουν μικρό σφάλμα σε σχέση με αυτές που έχουν μεγαλύτερο. Έτσι το μοντέλο ακολουθεί την γενική τάση των δεδομένων, οδηγώντας λοιπόν σε ένα πιο αξιόπιστο μοντέλο τόσο για τα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και για τα δοκιμής.

Τα εύρη που χρησιμοποιούνται στις εξαρτημένες μεταβλητές, όπως θα δούμε στη συνέχεια, δημιουργούν μεγάλη διακύμανση στην ανεξάρτητη μεταβλητή, δηλαδή στην αντίσταση γείωσης. Αλλά αυτή η διακύμανση είναι λογική, προκύπτει από τα δεδομένα και έχει φυσική σημασία.

Τέλος, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προβλήματα μηχανικής μάθησης, στο συγκεκριμένο πρόβλημα δεν έχουμε πρόβλημα overfitting. Το εύρος το δεδομένων είναι τέτοιο που, με βάση την εμπειρία του εργαστηρίου, είναι ελάχιστες οι περιπτώσεις στην Ελλάδα που μπορεί να μην περιλαμβάνονται στα όρια αυτά. Επομένως τα δεδομένα για την αντίσταση πάνω και κάτω στρώματος, το βάθος του πάνω στρώματος και η επιφάνεια του συστήματος γείωσης θα περιέχονται στο εύρος των δεδομένων εκπαίδευσης.

4.5 Κριτήρια αξιολόγησης τύπων

Με βάση τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και το στόχο της διπλωματικής, που είναι η εξαγωγή ενός όσο πιο απλού τύπου γίνεται, με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια ως προς τα αποτελέσματα του προσομοιωτή, επιλέχθηκαν τρία μαθηματικά κριτήρια για την αξιολόγηση του τύπου.

Το πρώτο είναι το R^2 , ένα διαδεδομένο στατιστικό εργαλείο. Χρησιμοποιείται για να δείξει πόσο ακριβής είναι η προσαρμογή στην εξήγηση της διακύμανσης των δεδομένων. Το R^2 ορίζεται από τον τύπο

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Και

$$SST = SSR + SSE$$

Όπου για το SSR (άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης) ισχύει

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

Όπου:

- w_i συντελεστής βαρύτητας
- $\hat{y}_i$ είναι το αποτέλεσμα του τύπου για την i-οστή σειρά δεδομένων
- $\bar{y}$ είναι ο μέσος όρος όλων των πραγματικών y

Το SST(συνολικό άθροισμα τετραγώνων) δίνεται από τον τύπο

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

Όπου

- w_i συντελεστής βαρύτητας
- y_i είναι η πραγματική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής
- $\bar{y}$ είναι το ίδιο με πριν

Όπου για το SSE (άθροισμα τετραγώνων λόγω του σφάλματος) ισχύει

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

Όπου:

- w_i συντελεστής βαρύτητας
- $\hat{y}_i$ είναι το αποτέλεσμα του τύπου για την i-οστή σειρά δεδομένων
- y_i είναι η πραγματική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής

Το R^2 λαμβάνει τιμές μεταξύ του 0 και του 1. Όσο πιο κοντά είναι το αποτέλεσμα στο 1, τόσο καλύτερα προσομοιάζει ο τύπος την διακύμανση. Μία τιμή 0.9765 λόγω χάρη, σημαίνει ότι ο τύπος εξηγεί το 96,65% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων γύρω από τη μέση τιμή. Τιμές από 0.9 και πάνω θεωρούνται αποδεκτές, ενώ από 0.95 και πάνω καλές. Το εργαλείο αυτό, όμως, αφορά μόνο τη διακύμανση οπότε δεν αρκεί για να δώσει μία ακριβή εικόνα για την ακρίβεια του τύπου [115] .

Το δεύτερο είναι το MARE (μέγιστο σχετικό σφάλμα). Το μέγιστο σχετικό σφάλμα δίνεται από τον τύπο

$$MARE = \max(\sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i})$$

όπου οι ορισμοί για τους όρους είναι οι ίδιοι με πριν. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε το σχετικό σφάλμα και όχι το απλό είναι επειδή έχουμε μεγάλη διακύμανση στην αντίσταση γείωσης. Για παράδειγμα 1 Ω σφάλμα όταν η πραγματική τιμή είναι 100 Ω είναι σφάλμα 1% αλλά όταν η πραγματική τιμή είναι 5 Ω είναι 20%. Έτσι, με αυτό τον υπολογισμό ο μελετητής αποκτά εικόνα για τα πιο μεγάλα σφάλμα που εμφανίζονται σε όλο το εύρος των δεδομένων.

Το βασικό, όμως, που ενδιαφέρει των μελετητή δεν είναι οι ακραίες περιπτώσεις, αλλά ο μέσος όρος. Αυτή την πληροφορία την παίρνουμε από τον τρίτο τύπο, που είναι το MERE (μέσο σχετικό σφάλμα). Το MERE δίνεται από τον τύπο

$$MERE = (\sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i})/n$$

όπου οι όροι είναι οι ίδιοι με τους προηγούμενους. Το απόλυτο χρησιμοποιείται διότι το σφάλμα μπορεί να είναι είτε θετικό είτε αρνητικό. Έτσι δεν έχουμε πρόβλημα με αλληλοαναίρεση σφαλμάτων οδηγώντας σε μικρή τιμή δίνοντας την ψευδή αίσθηση καλής ακρίβειας.

Ακόμα στο Cfitool, ένα πακέτο λογισμικού του MATLAB, που αναφέρεται στο επόμενο κεφάλαιο, εμφανίζονται και κάποια άλλα κριτήρια που χρησιμοποιούνται συχνά σε τέτοια προβλήματα. Χρησιμοποιούνται το άθροισμα των τετραγώνων λόγω του σφάλματος (SSE-Sum

of squares due to error), τους βαθμούς ελευθερίας DEF (degrees of freedom), το προσαρμοσμένο R^2 και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE-Root mean square error) [115] .

Το SSE, που αναφέρθηκε και στον ορισμό του R^2 , υπολογίζει τη συνολική απόκλιση των τιμών που προκύπτουν από τον τύπο σε σχέση με της προσομοίωσης. Όσο πιο κοντά στο 0 είναι η τιμή του, τόσο μικρότερο στοιχείο τυχαίου σφάλματος παρουσιάζει το μοντέλο και άρα είναι πιο ακριβές στις προβλέψεις.

Το προσαρμοσμένο R^2 χρησιμοποιεί το R^2 , που αναφέρθηκε προηγουμένως, και το προσαρμόζει στους βαθμούς ελευθερίας των υπολοίπων. Οι υπολειπόμενοι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται ως ο αριθμός των τιμών απόκρισης n μείον τον αριθμό των συντελεστών προς προσαρμογή m που εκτιμάται από τις τιμές απόκρισης $n = n - m$, όπου το n δείχνει τον αριθμό των ανεξάρτητων κομματιών πληροφορίας, που περιλαμβάνει n σημεία δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό του αθροίσματος των τετραγώνων. Χρησιμοποιείται συνδυαστικά με το R^2 , διότι το τελευταίο μπορεί να αυξηθεί, με την αύξηση του αριθμού των συντελεστών προς προσαρμογή, χωρίς όμως να βελτιώνει πρακτικά τον τύπο. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με το προσαρμοσμένο R^2 με την χρήση των βαθμών ελευθερίας.

Το RMSE είναι μία εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της τυχαίας συνιστώσας των δεδομένων. Όσο πιο κοντά είναι στο 0 τόσο πιο ακριβής είναι ο τύπος.

Έχοντας κάνει αυτή την ανάλυση είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην επεξεργασία των δεδομένων και στην εξαγωγή των τύπων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Τύποι Αντίστασης Γείωσης Συστήματος Α/Γ

5.1 Εισαγωγή

Εφόσον ολοκληρώθηκαν οι προσομοιώσεις, ακολούθησε το επόμενο και ουσιαστικό κομμάτι αυτής της διπλωματικής. Η εξαγωγή τύπου για την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης. Στόχος αυτής της διπλωματικής είναι η εξαγωγή ενός απλού τύπου, που να υπολογίζει με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια την αντίσταση γείωσης συστήματος της μορφής που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, για εδάφη που μπορούν να μοντελοποιηθούν ως διστρωματικά. Ο τύπος θα προκύψει από επεξεργασία των προσομοιώσεων που έγιναν στο CDEGS και παρουσιάζονται στο παράρτημα Β. Ο τύπος θα είναι της μορφής

$$R_{\gamma} = f(\rho_1, h, \rho_2, E)$$

Δηλαδή ανεξάρτητες μεταβλητές θα είναι η αντίσταση του πάνω και κάτω στρώματος, το βάθος του πάνω στρώματος και η επιφάνεια του συστήματος και αναζητείται μία σχέση που να συνδέει αυτά τα μεγέθη με την εξαρτημένη μεταβλητή, την αντίσταση του συστήματος γείωσης.

Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία τέτοιου είδους ανάλυσης δεδομένων και η εξίσωση πρέπει να βρεθεί με δοκιμές. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να αποδειχθεί ότι η εξίσωση που θα προκύψει είναι η βέλτιστη για το συγκεκριμένο πλήθος όρων. Οι δοκιμές μπορούν να είναι πιο στοχευμένες βάσει της εμπειρίας, των γνώσεων και της παρατηρητικότητας του ερευνητή.

Οι κώδικες που αφορούν αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται στο παράρτημα Α στο τέλος της παρούσας διπλωματικής.

5.2 Τύπος Cftool

Μετά από μελέτη των εργασιών [96], [8] που χρησιμοποίησαν το πακέτο λογισμικού του MATLAB Cftool, θεωρήσαμε φρόνιμο να ξεκινήσουμε από αυτό. Το Curve Fitting Toolbox του MATLAB αποτελεί ένα διαδραστικό εργαλείο για την προσαρμογή καμπυλών και επιφανειών σε πειραματικά δεδομένα. Δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να εφαρμόσει γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα, να συγκρίνει αποτελέσματα, να εκτιμήσει σφάλματα και να εξάγει μαθηματικές σχέσεις με βάση τα δεδομένα [116].

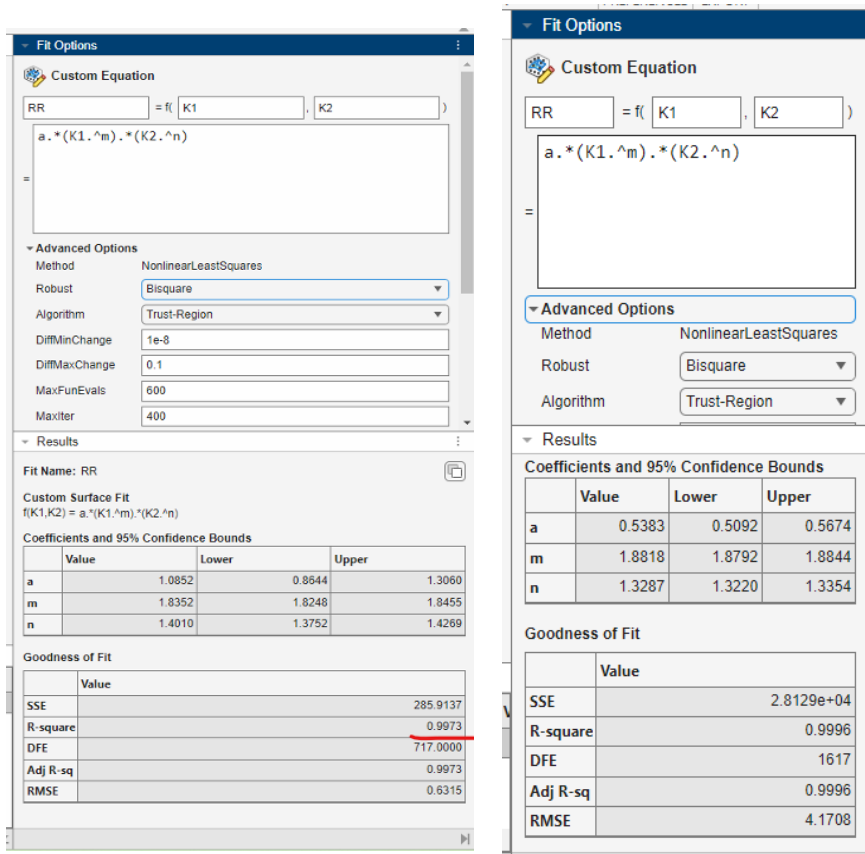
Έχοντας ολοκληρώσει το πρώτο κομμάτι των προσομοιώσεων (ειδικές αντιστάσεις: 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000 και βάθος: 1, 2, 3, 5) ξεκινήσαμε ανασκόπηση στις εργασίες [96] και [8] για την εύρεση κάποιου εναύσματος για την εξαγωγή του νέου τύπου. Στην εργασία [8] στην ενότητα 6.9.2 βρήκαμε την ακόλουθη σχέση

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

Όπου

- R είναι η αντίσταση γείωσης
- ρ_1, ρ_2 είναι οι ειδικές αντιστάσεις του πάνω και κάτω στρώματος
- h είναι το βάθος του πάνω στρώματος
- E είναι το εμβαδόν του συστήματος
- a, m, n είναι οι σταθερές που θα προσδιοριστούν από την παλινδρόμηση

Στη συνέχεια γίνεται ο ορισμός των όρων $K_1 = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2 / h}$, $K_2 = \frac{1}{E}$ και έγινε και ο μετασχηματισμός $RR = R \cdot K_1 \cdot K_2$ όπως περιγράφεται στην εργασία για την εισαγωγή του στο Cftool, από την επίλυση του οποίου προκύπτει το τελικό R. Τέλος, όλα τα παραπάνω περάστηκαν στο MATLAB και πήραμε την ακόλουθη λύση.



Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα Cftool για το πρώτο set προσομοιώσεων(αριστερά) και για το σύνολο των προσομοιώσεων(δεξιά)

Όπου βλέπουμε ένα πολύ καλό R-square 0.9973, καθώς και τα υπόλοιπα κριτήρια μετά από εξέταση φαινόταν ικανοποιητικά. Στην αρχή, θεωρήθηκε ότι πετυχαίναμε τόσο καλό R-square λόγω του πλήθους των δεδομένων επομένως προχωρήσαμε στην αύξηση των προσομοιώσεων προσθέτοντας και τις τιμές ειδικών αντιστάσεων των 5000, 10000 και 15000 Ωm διπλασιάζοντας περίπου, με αυτό τον τρόπο, το πλήθος των προσομοιώσεων.

Το αποτέλεσμα που φαίνεται στο δεξί μέρος του σχήματος 5.1 μας ξάφνιασε. Είδαμε το R-square από 0.9973, που ήταν ήδη πολύ καλή τιμή, να πηγαίνει 0.9996. Επίσης, πέρα από τα καλά αποτελέσματα στην προσαρμογή, βλέπουμε και και καλούς συντελεές αφού τα όρια τους είναι πολύ περιορισμένα. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυξάνοντας το πλήθος των επαναλήψεων για διαφορές δοκιμές αρχικών συνθηκών, όταν αυτές είναι λογικές, καταλήγουμε στην ίδια σύγκλιση. Εκεί, προβληματισμένοι και μη έχοντας ξεκάθαρη εικόνα για την ακρίβεια, αποφασίσαμε να δοκιμάσουμε τον τύπο στο excel. Στο excel είδαμε ότι παρά τα καλά αποτελέσματα στα κριτήρια προσαρμογής είχαμε διψήφια σφάλματα. Οπότε αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε το μέσο και μέγιστο σχετικό σφάλμα. Τρέχοντας τον κώδικα 1 με βάση τους συντελεστές που προκύπτουν από το Cftool βλέπουμε μέσο σχετικό σφάλμα 33.64% και μέγιστο 112.62%.

Μελετώντας τον ορισμό του R-square φαίνεται ότι το παραπάνω αποτέλεσμα είναι λογικό. Το R-square είναι ένα εργαλείο που εξηγεί την διακύμανση των δεδομένων όχι την ακρίβεια με την οποία αυτά προσεγγίζονται όπως φαίνεται και από τον ορισμό του. Προσθέτοντας τις τιμές ειδικών αντιστάσεων 5000, 10000 και 15000 Ωm είχε αποτέλεσμα πολλές νέες τιμές αντίστασης να είναι πάνω από τα 36 Ohm που είναι ο μέσος όρος, με μέγιστη τιμή τα 193.6 Ohm. Έστω και μέτρια ακριβές να είναι ο τύπος μας στα αποτελέσματα του το SST αυξάνεται σημαντικά περισσότερο από το SSE, οδηγώντας το κλάσμα να τείνει ασυμπτωτικά στο 0 και άρα το R-square να τείνει κοντά στο 1.

Καταλήγοντας σε αυτό το συμπέρασμα, συνεχίσαμε την διπλωματική προσπαθώντας να βρούμε έναν τύπο με καλύτερο μέσο και μέγιστο σχετικό σφάλμα.

5.3 Τύπος με γραμμική παλινδρόμηση

Προκειμένου να πετύχουμε ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα αποφασίσαμε να κινηθούμε διαφορετικά από τις προηγούμενες διπλωματικές και αυτή την φορά να μην χρησιμοποιήσουμε το Cftool, αλλά να δουλέψουμε με κώδικα στο MATLAB. Σε αυτό βοήθησε και το ChatGPT [117].

Το ChatGPT της OpenAI χρησιμοποιήθηκε βοηθητικά για την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση του κώδικα στο MATLAB. Η χρήση του συνέβαλε στην επίλυση προγραμματιστικών ζητημάτων, στη διαμόρφωση κατάλληλων συναρτήσεων και στη σωστή σύνταξη του κώδικα, επιτρέποντας έτσι την ταχύτερη και αποδοτικότερη υλοποίηση των προγραμμάτων που οδήγησαν στον τελικό τύπο.

Μετά από έρευνα, θεωρήσαμε σωστό να δοκιμάσουμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα μέσω κώδικα και χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση. Όπως αναφέρεται και στις προηγούμενες εργασίες, το πρόβλημα είναι σύνθετο, καθώς η εξάρτηση της αντίστασης γείωσης

από τις επιμέρους παραμέτρους, αλλά και τους συνδυασμούς αυτών, είναι αυξημένης πολυπλοκότητας. Επίσης, η προσαρμογή ενός τύπου στα δεδομένα δεν είναι ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με κάποιον αλγόριθμο, επομένως απαιτεί δοκιμές και διαίσθηση.

Μετά από αρκετές δοκιμές καταλήξαμε στον κώδικα 2. Στο πρώτο μέρος του κώδικα είναι βασικές εντολές του MATLAB για να καθαρίσει ο χώρος εργασίας από προηγούμενες εκτελέσεις και να αναγνώσει τα δεδομένα των προσομοιώσεων.

Στο δεύτερο σκέλος του κώδικα ορίζονται οι όροι, και τα ονόματά τους που θα εμφανιστούν στην εκτύπωση, όπου με δοκιμή των συνδυασμών τους θα δούμε ποιός δίνει την καλύτερη ακρίβεια. Οι όροι προέκυψαν με δοκιμές, μελέτη των δεδομένων και των εξαρτήσεων τους και χρήση της εμπειρίας του εργαστηρίου από προηγούμενες εργασίες. Τέλος, μετά από δοκιμές, παρατηρήθηκε ότι επιτυγχάνεται καλύτερη προσαρμογή αν κάνουμε λογαριθμικό μετασχηματισμό της αντίστασης γείωσης, γεγονός που οφείλεται στην μεγάλη διακύμανση που έχουν τα δεδομένα.

Στο τρίτο σκέλος σχηματίζονται οι συνδυασμοί και υπολογίζονται τα κριτήρια. Στην γραμμή 58 εμφανίζεται η μεταβλητή `max_features_to_test`. Ανάλογα την τιμή που θα δώσουμε στην μεταβλητή, προκύπτει το μέγιστο πλήθος όρων που θα συμπεριληφθούν σε έναν τύπο για να δοκιμαστεί. Στη συνέχεια, ακολουθεί ένας βρόχος στον οποίο μέσω της συνάρτησης `fitlm`, γίνεται η γραμμική παλινδρόμηση, η συνάρτηση που προκύπτει υψώνεται στην δεκάτη για να μετασχηματιστεί ξανά σε αντίσταση και υπολογίζονται τα σφάλματα.

Στο τέταρτο και τελευταίο σκέλος, γίνεται η ταξινόμηση των αποτελεσμάτων και η εκτύπωσή τους. Στην γραμμή 88 αλλάζοντας το νούμερο μπορούμε να ελέγξουμε το όριο του μέγιστου σχετικού σφάλματος, από το οποίο και πάνω, ο τύπος θα απορρίπτεται. Ύστερα, γίνεται ταξινόμηση των αποτελεσμάτων με κριτήριο το μέσο σχετικό σφάλμα και εκτυπώνονται οι 10 καλύτερες περιπτώσεις, αναφέροντας τους όρους που χρησιμοποιήθηκαν, το R-square, το μέσο σχετικό σφάλμα και το μέγιστο σχετικό σφάλμα. Από τους τύπους που εκτυπώνονται παίρνουμε αυτόν που έχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά, βάζουμε τους όρους του στον κώδικα 3, εκτυπώνονται οι συντελεστές που προκύπτουν από την γραμμική παλινδρόμηση. Οι δύο κώδικες βοήθησαν στην απλοποίηση της εκτύπωσης του πρώτου, με αποτέλεσμα την ταχύτερη ανάγνωση και βελτίωση των δοκιμών από μεριάς μας.

Τρέχοντας τις περιπτώσεις για πλήθος όρων από 2 έως 9 προκύπτουν οι ακόλουθοι υποψήφιοι τύποι. Στη στήλη «Συνδυασμός», ο πρώτος αριθμός αναφέρεται στην αρίθμηση του συνδυασμού που εκτυπώνεται όταν εκτελείται ο κώδικας και ο δεύτερος αριθμός στο όριο που χρησιμοποιήθηκε για το μέγιστο σχετικό σφάλμα. Αυτό διότι, σε περιπτώσεις όπως αυτή των 9 όρων, για μικρή βελτίωση του μέσου σφάλματος απορρίπτονται τύποι με πολύ καλύτερο μέγιστο σφάλμα.

Πλήθος όρων	R-square	Μέσο σφάλμα	Μέγιστο	Συνδυασμός
4	0,9796	13,10%	88,86%	1,100
5	0,98	12,86%	83,79%	5,100
7	0,9816	11,78%	87,78%	1,100
9	0,9827	11,59%	74,87%	4,90

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα κώδικα 2 για διαφορετικό πλήθος όρων

Οι τύποι για πλήθος 3,6 και 8 δεν παρουσιάζονται, γιατί δίνουν χειρότερα αποτελέσματα από συνδυασμούς με λιγότερους όρους. Η καλύτερη επιλογή θεωρήθηκε αυτή των τεσσάρων όρων (πέντε μαζί με τον σταθερό) καθώς σε σύγκριση με αυτόν με τους πέντε και επτά, δεν αξίζει η αύξηση των όρων για τόσο μικρή βελτίωση και στους εννέα έχουμε να μεν μείωση στο 13.99% του μέγιστου σφάλματος, αλλά και υπερδιπλασιασμό των όρων. Από τον κώδικα 3 ο τύπος προκύπτει

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = 10^{a+b*\log(\rho_2)+c*\log(\rho_1)*h+d*\log(\rho_2)*h+e*\log(\rho_1)*\log(\rho_2)}$$

Όπου:

- $a = -1.6058$
- $b = 0.79219$
- $c = 0.10157$
- $d = -0.093621$
- $e = 0.028728$

Ο τύπος είναι απλός, μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα excel με την κατάλληλη αντιστοίχιση των κελιών στις μεταβλητές και έχει καλύτερη ακρίβεια από τον προηγούμενο. Αξιοσημείωτο είναι ότι περιγράφει ικανοποιητικά και τα πέντε συστήματα, χωρίς να λαμβάνει υπόψη το εμβαδόν. Αυτό πιθανόν οφείλεται στην μεγάλη διακύμανση που εμφανίζουν οι ειδικές αντιστάσεις από 100 Ωm έως 15000 Ωm, όπου μεγαλύτερη επιρροή φαίνεται να έχει η ρ_2 καθώς εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους όρους του τύπου. Επιβεβαιώνει έτσι, και κάποιες απλές θεωρίες που χρησιμοποιούν την ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος για να εκτιμήσουν την αντίσταση γείωσης, όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Ακόμα, το καλό με τη χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης είναι ότι είναι καλώς ορισμένη, και καταλήγει πάντα στο ίδιο αποτέλεσμα.

5.4 Τύπος με μη γραμμική παλινδρόμηση

Έχοντας τελειώσει με την προσέγγιση της γραμμικής παλινδρόμησης αποφασίσαμε να στραφούμε στην ιδέα των προηγούμενων εργασιών αλλά με άλλο μέσο αυτή την φορά. Να βρούμε ένα τύπο με δύο όρους, με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια γίνεται με τη χρήση κώδικα. Επειδή θέλουμε να περιγράψουμε μία σύνθετη εξάρτηση μόνο με δύο όρους αυτή τη φορά, πρέπει να φροντίσουμε οι όροι να είναι στοχευμένοι, αλληλοσυμπληρωματικοί και καλά δομημένοι για να πάρουμε κάποιο αποτέλεσμα.

Όπως φαίνεται στον κώδικα 4, ξεκινήσαμε την επίλυση του προβλήματος αρχικά με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης, αφού ήμασταν πιο εξοικειωμένοι με αυτή από πριν. Διαβάζοντας τον κώδικα από πάνω προς τα κάτω, φορτώνουμε τα δεδομένα όπως πριν και στη συνέχεια ορίζουμε διάφορους όρους για τα K1 και K2, μετά από δοκιμές, συζήτηση και παρατήρηση. Στο επόμενο στάδιο, γίνεται η γραμμική παλινδρόμηση σε όλους τους συνδυασμούς με λογαριθμικό μετασχηματισμό, προκύπτουν οι τύποι, ανάγονται πάλι σε αντιστάσεις και υπολογίζονται τα σφάλματα. Στο τελευταίο σκέλος, γίνεται ταξινόμηση με βάση το μέσο σχετικό σφάλμα και εκτυπώνονται οι διάφοροι συνδυασμοί. Βλέπουμε ότι η καλύτερη σχέση που προκύπτει είναι

$$R(\rho_1, \rho_2, h, E) = 10^{0.0001 \cdot K1 + 0.3091 \cdot K2 + 0.8356}$$

Όπου:

- $K1 = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2 / h}$
- $K2 = \frac{\sqrt{\rho_2}}{h \cdot \sqrt{E}}$

Με R-square 0.6443, μέσο σχετικό σφάλμα 73.73% και μέγιστο σφάλμα 634.38%. Παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση η γραμμική παλινδρόμηση δεν ήταν αποτελεσματική, καθώς το αποτέλεσμα υστερεί και ως προς τα τρία κριτήρια.

Ύστερα από το παραπάνω αποτέλεσμα, δοκιμάστηκε ακριβώς το ίδιο σκεπτικό με τους ίδιους όρους στον κώδικα 5, απλά αυτή την φορά με τη χρήση μη γραμμικής παλινδρόμησης. Το πρώτο σκέλος του κώδικα είναι το ίδιο. Το επόμενο και μεγαλύτερο, σε σχέση με πριν, σκέλος αφορά την πιο πολύπλοκη πλέον μη γραμμική παλινδρόμηση. Στην αρχή, ορίζεται ότι θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση nlinfit που κάνει μη γραμμική παλινδρόμηση με τον αλγόριθμο εύρους εμπιστοσύνης (Trust Region Algorithm), καθώς και ότι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων της αριθμητικής μεθόδου θα είναι 1000. Μετά, ορίζεται η μορφή του τύπου που θα χρησιμοποιηθεί και ξεκινούν οι δοκιμές. Για να αυξήσουμε τις πιθανότητες να βρούμε τις καλύτερες αρχικές συνθήκες χρησιμοποιούμε έναν αλγόριθμο αναζήτησης (γραμμή 54). Αυτός ο αλγόριθμος στο πρώτο στάδιο κάνει μία τυχαία αναζήτηση αρχικών συνθηκών εντός κάποιων ορίων. Δοκιμάζει τις αρχικές συνθήκες και τις αξιολογεί με βάση το μέσο σχετικό σφάλμα. Είτε

βάλουμε ως κριτήριο το μέγιστο είτε το μέσο, ο βέλτιστος τύπος προκύπτει ο ίδιος για αυτό δεν μπήκε κάποιο επιπλέον κριτήριο. Αφού έχει βρει τις καλύτερες αρχικές συνθήκες από την τυχαία αναζήτηση, στη συνέχεια κάνει άλλη μία αναζήτηση με μικρότερα βήματα γύρω από αυτές τις αρχικές συνθήκες, με στόχο να βελτιστοποιήσει ακόμα περισσότερο το αποτέλεσμα. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα σφάλματα, γίνεται ταξινόμηση με βάση το μέσο σφάλμα και εκτυπώνονται τα αποτελέσματα όπως και πριν. Ο καλύτερος τύπος που προκύπτει δίνεται

$$R(\rho_1, \rho_2, h, E) = 0.236803 \cdot K1^{0.532403} \cdot K2^{0.328484}$$

Όπου:

- $K1 = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2 / h}$
- $K2 = \frac{\rho_2}{h \cdot \sqrt{E}}$

Με R-square 0.8908, μέσο σχετικό σφάλμα 36.85% και μέγιστο σφάλμα 126,57%. Βλέπουμε ότι ο τύπος είναι σχεδόν ίδιος με αυτόν που προκύπτει και από τη γραμμική παλινδρόμηση με την διαφορά ότι στο K2 δεν έχουμε την ρίζα της ειδικής αντίστασης του κάτω στρώματος. Παρατηρείται όμως ότι, με την μη γραμμική παλινδρόμηση τα αποτελέσματα είναι εμφανώς βελτιωμένα, καθώς το R-square είναι περίπου 0.9 πράγμα αξιοπρεπές για δύο όρους σε δεδομένα με τέτοια διακύμανση, το μέσο σχετικό σφάλμα υποδιπλασιάστηκε και το μέγιστο μειώθηκε περίπου κατά πέντε φορές.

Μετά από επίδειξη και συζήτηση του αποτελέσματος με τον Κ. Γκόνο, παρατήρησε ότι το 0,236803 είναι περίπου $\frac{1}{4}$, το 0.532403 είναι περίπου $\frac{1}{2}$ και το 0.328484 είναι περίπου $\frac{1}{3}$. Αφού κάναμε διάφορες δοκιμές, είδαμε, όπως φαίνεται στον κώδικα 6, πως αν κρατήσουμε τον συντελεστή κανονικοποίησης ως 0.23 και αντικαταστήσουμε τους εκθέτες με τα κλάσματα που αναφέρθηκαν, το R-square γίνεται 0.7895, το μέσο σχετικό σφάλμα 29.81% και το μέγιστο 96.99%. Δηλαδή ο τύπος εξηγεί χειρότερα την διακύμανση, αλλά είναι πιο ακριβής, που είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει.

Στη συνέχεια, στον κώδικα 7, τρέξαμε σταθμισμένη μη γραμμική παλινδρόμηση με την χρήση της bisquare, για να μειώσουμε την επίδραση των ακραίων όρων και να δούμε αν βελτιώνεται το αποτέλεσμα. Προκύπτει ο ακόλουθος τύπος

$$R = 0.136432 * K1^{0.555210} * K2^{0.390272}$$

Όπου τα K1 και K2 είναι τα ίδια με πριν. Αυτός ο τύπος έχει R-square 0.8787, μέσο σχετικό σφάλμα 25.89% και μέγιστο σφάλμα 97.78%. Βλέπουμε βελτίωση της περιγραφής της διακύμανσης περίπου 10% και μείωση του μέσου σφάλματος κατά 3.92%. Το μέγιστο σφάλμα παρέμεινε περίπου το ίδιο. Αυτός είναι ο καλύτερος τύπος που καταφέραμε να πετύχουμε, ώστε να περιγραφεί με δύο όρους και τα 5 συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Ανακεφαλαίωση

Στο πρώτο κεφάλαιο είδαμε κάποια βασικά στοιχεία για Α/Γ, αιολικά πάρκα και τις προοπτικές ανάπτυξης αυτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν βασικές έννοιες για τα συστήματα γείωσης και οι παράγοντες που διαμορφώνουν το έδαφος ως μέσο γείωσης. Ακολουθούν οι τρόποι μέτρησης της ειδικής αντίστασης και η μοντελοποίηση του εδάφους και παρουσιάστηκαν οι διαδικασίες μέτρησης ενός συστήματος γείωσης στο πεδίο. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τις ιδιαιτερότητες των συστημάτων γείωσης Α/Γ και την περιγραφή των συστημάτων της μελέτης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό CDEGS, ο προσομοιωτής MALT και τα δεδομένα για τα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στο παράρτημα Β.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στη γραμμική και μη παλινδρόμηση και σχετικές έννοιες γύρω από αυτές, καθώς εξηγούνται και οι μαθηματικές έννοιες με τις οποίες θα αξιολογηθούν οι τύποι.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξηγείται η συλλογιστική πορεία που ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία. Ξεκινάει με την αναφορά του στόχου, την ανάλυση με το εργαλείο Cftool ενός τύπου από προηγούμενη εργασία, την διαδικασία για την εξαγωγή ενός τύπου με γραμμική παλινδρόμηση και ολοκληρώνεται με την εξαγωγή ενός πιο συμπαγούς τύπου με μη γραμμική παλινδρόμηση.

6.2 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εξαγωγή ενός απλού μαθηματικού τύπου, ο οποίος θα συνδεεί, σε εδάφη που μπορούν να μοντελοποιηθούν ικανοποιητικά από το διστρωματικό μοντέλο, την ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος, το βάθος του, την ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος και την επιφάνεια του συστήματος με την αντίστασή του. Ο τύπος αυτός διαμορφώνεται έτσι ώστε με τους ίδιους συντελεστές να ισχύει για το συγκεκριμένο σύστημα γείωσης, για οποιαδήποτε επιφάνεια αυτού. Χρησιμοποιώντας έτσι τις γνώσεις μας για τις γειώσεις, την παλινδρόμηση, το MATLAB και πληθώρα δοκιμών, καταλήξαμε σε δύο τύπους. Έναν με τέσσερις όρους μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης με R-square 0,9796, μέσο σχετικό σφάλμα 13.10% και μέγιστο 88,86% και έναν πιο συμπυκνωμένο, με δύο όρους μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης με R-square 0,8787, μέσο σχετικό σφάλμα 25,89% και μέγιστο 97,78%. Πάντα τα αποτελέσματα πρέπει να τα αξιολογούμε με βάση ότι προσπαθούμε να περιγράψουμε τις περίπλοκες εξαρτήσεις που έχει η αντίσταση γείωσης από τις διάφορες μεταβλητές, ότι χρησιμοποιούμε 1620 σειρές, από 4 στήλες δεδομένων προσομοιώσεων και ο τύπος είναι καθολικός για οποιαδήποτε επιφάνεια. Επομένως, το αποτέλεσμα είναι

ικανοποιητικό, ειδικά για μία πρώτη εκτίμηση της αντίστασης γείωσης από έναν μελετητή, όπου χρησιμεύει και αυτός ο τύπος. Αξιοσημείωτο, επίσης, είναι πως ο πρώτος τύπος με τους τέσσερις όρους πετυχαίνει αυτό το αποτέλεσμα χωρίς να λαμβάνει υπόψη την επιφάνεια του συστήματος. Δηλαδή, πετυχαίνει τέτοια ακρίβεια, με την διακύμανση της επιφάνειας των συστημάτων να είναι για τα ίδια γεωηλεκτρικά χαρακτηριστικά 700 m^2 περίπου.

Το εύρος των δοκιμών είναι από $100\ \Omega\text{m}$ έως $15000\ \Omega\text{m}$ και φτάνει σε βάθος από 1m έως και 5m . Επίσης, η μικρότερη επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε ήταν περίπου $1,2$ στρέμματα ενώ η μεγαλύτερη $1,9$. Αυτό σημαίνει ότι για τα ελληνικά δεδομένα, είναι δύσκολο να βρεθεί σύστημα που να ξεπερνάει αυτή την επιφάνεια και έδαφος που τα χαρακτηριστικά του να μην είναι εντός των ορίων που προαναφέρθηκαν. Επομένως, ο τύπος, δεδομένου ότι έχει εγκατασταθεί το μελετούμενο σύστημα γείωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν παντού εκτός εξαιρέσεων. Αυτό φαίνεται και από την χρήση των τύπων σε προσομοιώσεις από κανονικά έργα, με διαφορετικές τιμές δηλαδή από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους.

W/T	$E(\text{m}^2)$	$\rho_1(\Omega\text{m})$	$\rho_2(\Omega\text{m})$	h(m)	$R_s(\Omega)$	RMSE(%)	$R_{Li}(\Omega)$	$M_E(\%)$	$R_{N_Li}(\Omega)$	$M_E(\%)$
1	1428	2830,31	6663,18	4,78	52,63	7,5	58,51	11,17	59,27	12,61
2	1941	548,07	658,48	0,98	7,05	10,18	7,29	3,42	9,30	31,97
3	1242	301	409,5	3,21	4,08	2,5	4,71	15,35	5,23	28,07
4	1390	1105	1457,43	9,5	16,22	2,5	19,95	22,97	12,58	22,42
5	1945	1206,27	8101,96	1,01	62,28	9,82	60,68	2,56	49,70	20,20
6	1375	306,67	7500,06	1,8	35,58	23,93	34,87	2,00	27,57	22,51
7	1386	1396,63	4930,23	4,74	38,26	12,32	33,78	11,70	41,25	7,82
8	1328	384,4	590,16	0,22	7,22	15,68	6,25	13,45	7,97	10,33
9	1836	975	1707,42	15,21	12,75	1,86	17,67	38,60	11,65	8,59
10	1908	1219,1	65159,91	1,21	185,33	16,92	294,11	58,70	124,5	32,82

Πίνακας 6.1: Δοκιμή τύπων σε προσομοιώσεις για πραγματικά έργα

Όπου R_s είναι η τιμή της αντίστασης από το CDEGS, RMSE είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της διστρωματικής μοντελοποίησης, R_{Li} είναι η τιμή από το πρώτο τύπο, R_{N_Li} είναι η τιμή από τον δεύτερο και M_E είναι τα σφάλματα μεταξύ της τιμής του CDEGS και των τύπων. Όπου βλέπουμε ότι οι τύποι συμπεριφέρονται όπως μετρήσαμε ακόμα και σε δεδομένα διαφορετικά από αυτά της εκπαίδευσης. Ακόμα στην τελευταία σειρά που βλέπουμε ρ_2 $65000\ \Omega\text{m}$ δεδομένου ότι είναι πολύ εκτός του εύρου εκπαίδευσης οι τύποι δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα κάτω του μέγιστου σχετικού σφάλματος τους.

Η εργασία αυτή πέρα από τους τύπους δίνει και έναν πιο αλγοριθμικό τρόπο προσέγγισης του προβλήματος. Με τροποποίηση του κώδικα για την κάθε περίπτωση, κάποιος μελλοντικός ερευνητής, ακόμα και αν έχει άλλο σύστημα και δεδομένα, αν έχει καταλήξει στους όρους που θέλει να χρησιμοποιήσει μπορεί να δοκιμάσει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, για οποιαδήποτε πλήθος όρων θέλει στον τελικό του τύπο, τόσο για γραμμική όσο και για μη γραμμική παλινδρόμηση. Ο αλγόριθμος για την αναζήτηση αρχικών συνθηκών στον κώδικα επιλογής όρων για την μη γραμμική παλινδρόμηση, με λογική οριοθέτηση αρχικών τυχαίων τιμών και επαρκές πλήθος επαναλήψεων, αυξάνει σημαντικά τις πιθανότητες το οποιοδήποτε μοντέλο να συγκλίνει πάντα στην ίδια λύση.

Ο αναγνώστης μπορεί να χρησιμοποιεί πολύ εύκολα τους παραπάνω τύπους, αν έχει δεδομένα, μόνος του, με μία αριθμομηχανή για μία περίπτωση ή με εισαγωγή σε ένα excel για περισσότερα δεδομένα.

6.3 Μελλοντικές προτάσεις

Η φυσική εξέλιξη πλέον, με τις εξελίξεις στην τεχνολογία, είναι όχι η εξαγωγή τύπου, αλλά η δημιουργία μοντέλου μηχανικής μάθησης, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, που θα κάνει τις εκτιμήσεις. Θα χάσουμε βέβαια την εποπτεία πλέον, αφού το μοντέλο θα είναι κάποιος κώδικας υλοποιημένος σε Matlab ή python, ο οποίος θα έχει εκπαιδευτεί στα δεδομένα που θα του έχουμε δώσει και στη συνέχεια θα του δίνουμε τις τιμές εισόδου και απλά θα μας επιστρέφει την τιμή αντίστασης του συστήματος. Θα έχει ενδιαφέρον πόσο καλύτερη ακρίβεια μπορούμε να πετύχουμε με την χρήση νέων τεχνικών, και την αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος όπως με την προσθήκη διαφόρων συστημάτων.

Επίσης, από την επεξεργασία των δοκιμών είδαμε ότι με πέντε μόνο επιφάνειες η εξάρτηση της αντίστασης από αυτές ήταν αμεληταία. Θα ήταν καλύτερα να ακολουθηθεί η ίδια συλλογιστική για μεγαλύτερο πλήθος επιφανειών. Αυτό βέβαια θα απαιτούσε τεράστιο όγκο προσομοιώσεων, αφού για κάθε επιφάνεια θα πρέπει να υπολογίζονται όλοι οι συνδυασμοί.

Μια ακόμα χρήσιμη περίπτωση, θα ήταν να μελετηθεί η δυνατότητα εύρεσης όρων για να χρησιμοποιηθούν στον εκτάστωτε τύπο. Σε αυτή την εργασία οι όροι προέκυψαν, βάσει εμπειρίας, μελέτης των δεδομένων και δοκιμών. Θα ήταν ωφέλιμο να αναπτυχθεί κάποια μεθοδολογία που αντλώντας πληροφορίες από τα δεδομένα και βασιζόμενοι στο πλήθος όρων που θέλουμε να έχει ο τελικός τύπος, να προτείνει τους καταλληλότερους.

Ενδιαφέρον, ακόμα, θα έχει η εξαγωγή ενός τύπου που να δείχνει πώς διαμορφώνεται η τιμή αντίστασης συνάρτηση της συχνότητας του ρεύματος σφάλματος. Η σκέψη αυτή προέκυψε μετά την μελέτη πρόσφατων δημοσιεύσεων που αναφέρουν ότι υψίσυχνα ρεύματα τείνουν να μένουν στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ χαμηλότερης συχνότητας διασκορπούνται πιο ομοιόμορφα. Θα είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί η εξάρτηση αυτή για ένα σύστημα και να προκύψει κάποιος τύπος για ένα τυπικό εύρος συχνοτήτων κεραυνικών ρευμάτων.

Τέλος, θα ήταν ακόμα πιο αποτελεσματική, η ανάπτυξη ενός τύπου που θα έχει πιο γενικευμένες μεταβλητές, όπως η επιφάνεια του πάνω και του κάτω στρώματος του συστήματος γείωσης, τα γεωηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους και θα εκτιμά την αντίσταση γείωσης

για οποιοδήποτε από τα συνηθέστερα συστήματα που χρησιμοποιούνται. Αυτό, βέβαια, θα απαιτούσε μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων από διάφορα συστήματα, αλλά αυτού του είδους αφαιρετικότητα θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για έναν μελετητή για μία αρχική εκτίμηση της αντίστασης οποιουδήποτε συστήματος, οποιασδήποτε επιφάνειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Μία Ιστορική Αναδρομή στον τομέα της Αιολικής Ενέργειας” nrg Blog. [Online] Available: <https://www.nrg.gr/el/aioliki-energeia>
- [2] “The history of wind energy” Nationalgrid. [Online] Available: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/history-wind-energy>
- [3] Ι. Ν. Κιοσκερίδης. «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος». Εκδόσεις Τζιόλα. Θεσσαλονίκη. 2019
- [4] ΜΙΧ. Π. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ “ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997
- [5]”What Components Are Inside A Wind Turbine?”, MWPS Powering The World. [Online] Available: <https://www.mwps.world/news/2011/07/27/inside-wind-turbine/>
- [6]”Wind turbines on brown sand under white clouds and blue sky during daytime” by Rabi Shasha, Unsplash. [Online] Available: <https://unsplash.com/photos/wind-turbines-on-brown-sand-under-white-clouds-and-blue-sky-during-daytime-tTv6Lo5uQVQ>
- [7]Σταύρος Παπαθανασίου, Καθ. ΕΜΠ “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΠΑΡΑΔΟΣΕΩΝ”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2023
- [8]Θεόδωρος Παναγιώτης Χ. Λιάγκας “Εκτίμηση τιμής συστημάτων γείωσης σε ανεμογεννήτριες”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2021
- [9]”Demand Connection Code”, Entso e, [Online], Available: https://www.entsoe.eu/network_codes/dcc/
- [10]”Pitch-regulated and Stall-regulated Wind Turbine”, Research hubs. [Online] Available: <https://researchhubs.com/post/engineering/wind-energy/pitch-regulated-and-stall-regulated-wind-turbine.html>
- [11]”Share of energy consumption from renewable sources in Europe”, European Environment Agency, [Online], Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from>

[12]”Requirements for Generators”, entso-e, [Online], Available:https://www.entsoe.eu/network_codes/rfg/

[14]”Κώδικας Διαχείρισης ΕΣΜΗΕ”, ΑΔΜΗΕ, [Online], Available:<https://www.admie.gr/market/system-operation-code/esmie-operation-code>

[15]”Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz”, bdew, [Online], Available:
<https://www.vde.com/resource/blob/937744/33571e5664a3b8d0d65b3be118f9ce3b/bdew--erzeugungsanlagen-am-mittelspannungsnetz---richtlinie-fuer-anschluss-und-parallelbetrieb-von-erzeugungsanlagen-am-mittelspannungsnetz-data.pdf>

[16]”Do you know how an onshore wind farm works?”, ormazabal, [Online], Available:<https://www.ormazabal.com/en-gb/do-you-know-how-an-onshore-wind-farm-works-2/>

[17]”How Do Offshore Wind Farms Work?”, New Zealand Wind Energy Association,[Online], Available:<https://www.windenergy.org.nz/offshore-wind/>

[18]”Τι απέγινε το πρώτο αιολικό πάρκο της Ευρώπης που στήθηκε το 1982 στην Κύθνο.Οι κάτοικοι αντιδρούν στις νέες ανεμογεννήτριες”, Μηχανή του Χρόνου, [Online], Available:<https://www.mixanitouxronou.gr/ti-apegine-to-proto-aioliko-parko-tis-eyropis-poy-stithike-to-1982-stin-kythno-oi-katoikoi-antidroyn-stis-nees-anemogennitries/>

[19]”The association for wind energy in Europe since 1982”, WinEUROPE, [Online], Available:https://windeurope.org/about-wind/history/?utm_source=chatgpt.com

[20]”Wind energy in Europe: 2024 Statistics and the outlook for 2025-2030”, WinEUROPE, [Online], Available:<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2024-statistics-and-the-outlook-for-2025-2030/>

[21]”Διαδικτυακός Χάρτης εν Λειτουργία Αιολικών Πάρκων”, ΕΛΕΤΕΑΝ, [Online], Available:<https://eletaen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=875b7ea838cf4fe6a937c4be90fa8edd&extent=2070592.4486%2C4027438.181%2C3489263.6936%2C5196618.9657%2C102100>

[22]”HWEA Wind Energy Statistics - 2024”, [Online], Available:<https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2025/01/2025-01-24-2024-HWEA-Statistics-Greece.pdf>

- [23]”Υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ελλάδα”, ΕΛΙΑΜΕΠ, [Online], Available:https://www.eliamep.gr/wp-content/uploads/2021/09/Social-impact-study_Alma-Economics_GR-1.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [24]”Greece Launches Offshore Wind Development Plan, Targets 4.9 GW by 2023”, [offshoreWIND.biz](https://www.offshorewind.biz), [Online], Available:https://www.offshorewind.biz/2023/11/01/greece-launches-offshore-wind-development-plan-targets-4-9-gw-by-2032/?utm_source=chatgpt.com
- [25]”IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, IEEE Std 80-2013
- [26]”ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ”, Λάμπρος Οικονόμου, Γεώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [27]”Reducing The Risk Of Step And Touch Potential”, greymatters, [Online], Available:<https://greymattersglobal.com/step-and-touch-potential/>
- [28]Towne. H. M.”Lightning arrester grounds - Parts I. II. and III.” General Electric Review. vol. 35. Pp. 173-280. Mar.-May 1932
- [29]Dalziel. C. F.”Dangerous electric currents.” AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 65. Pp. 579-585. 1123-1124. 1946
- [30]Biegelmeier. U. G. and Rotter. K. “Elektrische Widerstände und Strome in Menschlichen Korper.” E&M. vol. 89. Pp. 104-109. 1971.
- [31] Lee. W. R.”Death from electrical shock.” Proceedings of the IEEE. vol. 113. No. 1. Pp. 144-148. Jan 1966
- [32]Biegelmeier. U. G.”Die Bedeutung der Z-Schwelle des Herzkammerfilaments für die Festlegung von Berührungsspannungsgrenzen bei den Schutzmaßnahmen gegen elektrische Unfälle.” E&M. vol. 93. No. 1. Pp. 1-8. 1976
- [33]Dalziel. C. F. and Lee. W. R. “Reevaluation of lethal electric currents.” IEEE Transactions on Industry and General Applications. Vol. IGA-4. No. 5. Pp. 467-476. Oct. 1968.
- [34]Lee. W. R. “Death from electrical shock.” Proceedings of the IEEE. vol. 113. No. 1. Pp. 144-148. Jan. 1966
- [35]Kouwenhoven. W. B. et al.”AC shocks of varying parameters affecting the heart.” AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 78. Part I. pp. 163-169. 1959.

- [36] Dalziel, C. F. "Electric shock hazard." IEEE Spectrum, pp. 41-50. Feb. 1972.
- [37] Armstrong, H. R., "Grounding electrode characteristics from model tests," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 1301-1306, Dec. 1953
- [38] IEEE Std 142 - 1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book).
- [39] Manual on ground resistance testing, Publication no. 25-J, James G. Biddle Co., 1970.
- [40] Palmer, L. S., "Examples of geotechnical surveys", Proceedings of the IEE, Paper 2791-M, vol. 106, pp. 231-244, June 1959.
- [41] Blattner, C. J., "Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1758-1763, Sept/Oct 1980
- [42] Blattner, C. J., "Study of driven ground rods and four point soil resistivity data", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 101, no. 8, pp. 2837-2850, Aug. 1982
- [43] Purdy, A. B., "Accurate equations for the characteristics of rod electrodes in a homogeneous medium", Abstract A 79-027-4, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 98, no. 4, pp.1141, July/Aug. 1979.
- [44] EPRI EL-3982, Soil resistivity tests using modeling techniques, Ohio State University, May 1985
- [45] Dawalibi F. P., and Mukhedkar, D., "Ground electrode resistance measurements in non-uniform soils", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no.1, pp. 109-116, Jan. 1974
- [46] Dawalibi F. P., and Mukhedkar, D., "Resistance measurement of large grounding systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2348-2354, Nov/Dec 1979
- [47] Blattner, C. J., and Dawalibi, F., "Earth resistivity measurement interpretation techniques", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 103, no. 2, pp. 374-382, Feb. 1984

- [48] Endrenyi, J., “Evaluation of resistivity test for design of station grounds in non-uniform soil”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 84, pp. 996-970, Dec. 1963
- [49] EPRI EL-2699, Transmission line grounding, Chapter 4, (Resistivity) and Chapter 9 (Field Measurement Techniques), Safe Engineering Services, Oct. 1982
- [50] EPRI TR-100622, Substation grounding programs, vols. 1-5, May 1992
- [51] Lazzara, J., and Barbeito, N., “Simplified two-layer model substation ground grid design methodology”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1741-1750, Nov. 1990
- [52] Meliopoulos, A. P., Papalexopoulos, A. D., Webb, R., and Blattner, C. J., “Estimation of soil parameters from driven-rod measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 103, no. 9, Sept. 1994.
- [53] Moore, R., “An empirical method of interpretation of earth resistivity measurements”, American Institute of Mining Engineering, Column 164, pp. 197-231, 1945
- [54] Nahman, J. M., and Salamon, D. D., “A practical method for the interpretation of earth resistivity data obtained from driven rod tests”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 3, no. 4, pp. 1375 - 1379, Oct. 1988
- [55] Roman, I., “Some interpretations of earth resistivity data”, American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, vol. 110, pp. 183-200, 1934.
- [56] Tagg, G. F., Earth resistances, New York: Pitman, 1964
- [57] Β.Θ. Κονταργύρη, Ι.Φ. Γκόνοϋ, Ι.Α. Σταθόπουλος, Συστήματα Γείωσης Ανεμογεννητριών, Ελληνική CIGRE.
- [58] Blattner, C. J., “Analysis of soil resistivity test methods in two-layer earth”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3603-3608, Dec. 1985
- [59] IEEE Tutorial Course 86 EH0253-5-PWR, “Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety, Chapter 2, (Soil Resistivity Analysis).”
- [60] Dawalibi, F. P., and Barbeito, N., “Measurements and computations of the performance of grounding systems buried in multilayer soils”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1483-1490, Oct. 1992

- [61] Orellara, E., and Mooney, H. M. "Two and three layer master curves and auxiliary point diagrams for vertical electrical sounding using Wenner arrangement", Interciencia, Madrid, Spain, 1972
- [62] Dawalibi, F. P., Ma, J., and Southey, R. D., "Behavior of grounding systems in multilayer soils: A parametric analysis", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 9, no. 1m pp. 334-342, Jan. 1994
- [63] Thapar, B., and Gerez, V., "Equivalent resistivity of non-uniform soil for grounding design", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no 2, pp. 759-767, Apr. 1995.
- [64] Επίδραση του τρόπου υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος στις αναπτυσσόμενες τάσεις(βηματικές και επαφής) σε αιολικά πάρκα, Νικόλαος Κ. Γουβάλας, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Ιούνιος 2012
- [65] Wind energy generation systems - Part 24: Lightning protection, IEC 61400-24, ed. 2.0, 2024.
- [66] A. Ackerman, P. K. Sen, C. Oertli, "Designing safe and reliable grounding in AC substations with poor soil resistivity: An interpretation of IEEE Std. 80", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 49, no. 4, pp. 1883-1889, July/August 2013.
- [67] F. Freschi, M. Mitolo, M. Tartaglia, "Interferences phenomena between separate grounding systems", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 50, no. 4, pp. 2853-2860, July/August 2014
- [68] F. Freschi, M. Mitolo, M. Tartaglia , "An effective semianalytical method for simulating grounding grids", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 49, no. 1, pp. 256 - 263 January/February 2013.
- [69] I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Estimation of multi-layer soil parameters using genetic algorithms," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 100-106, Jan. 2005.
- [70] R. Hoerauf, "Considerations in wind farm grounding designs", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 50, no. 2, March/April 2014.
- [71] N. K. Gouvalas, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Impact study of short-circuit calculation methods on the design of a wind farm's grounding system", Renewable Energy, vol. 66, pp. 1 8, June 2014.

- [72] A. Esmaeilian, A. A. S. Akmal, M. S. Naderi, "Wind farm grounding systems design regarding the maximum permissible touch & step voltage", in Proc. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 74 – 79
- [73] H. K. Kargar, M. Sedighizadeh, A. Mosavi, "New grounding system of wind turbines", in Proc. 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2008), pp. 1 – 6.
- [74] J. Liu, F.P. Dawalibi, "Wind turbine farm network grounding design using integrated simulation methods and techniques", in Proc. 2010 International Conference on Future Power and Energy Engineering (ICFPPE), pp. 99 – 102.
- [75] H. Kazemi Karegar, M. Arabi, "New wind turbine grounding system to reduce step & touch voltage", in Proc. 2010 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010), pp. 168-171.
- [76] M. R. Ahmed, M. Ishii, "Effectiveness of interconnection of wind turbine grounding influenced by interconnection wire", in Proc. 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 1-6.
- [77] B. Markovski, L. Grcev, V. Arnavovski-Toseva, "Step and touch voltages near wind turbine grounding during lightning strokes", in Proc. 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2012), pp. 1 – 6.
- [78] V. T. Kontargyri, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Frequency response of grounding systems for wind turbine generators", in Proc. of the 14th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2005), Beijing, China, August 25-29, 2005, paper B-13.
- [79] Y. Yasuda, N. Uno, H. Kobayashi, T. Funabashi, "Surge analysis on wind farm when winter lightning strikes", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 257-262, 2008.
- [80] K. Yamamoto, S. Yanagawa, K. Yamabuki, S. Sekioka, S. Yokoyama, "Analytical surveys of transient and frequency-dependent grounding characteristics of a wind turbine generator system on the basis of field tests", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 3035 – 3043, 2010.
- [81] V. T. Kontargyri, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Study on Wind Farm Grounding System," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 4969-4977, Nov.-Dec. 2015.

- [82] Ι. Φ. Γκόνος, Β. Θ. Κονταργύρη, Γ. Π. Φώτης, Ι. Α. Σταθόπουλος, Γ. Α. Μάνος, “Σχεδίαση, ανάλυση και μέτρηση συστημάτων γείωσης σε αιολικά πάρκα”, Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 15-16 Δεκεμβρίου 2005, Ενότητα Δ: Ηλεκτρικές Μονώσεις και Γειώσεις: Δ5, σελ 201 - 208.
- [83] Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος, “Ηλεκτρικές μετρήσεις και δοκιμές σε αιολικά πάρκα”, Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 15-16 Δεκεμβρίου 2011, Ενότητα Δ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Δ2.
- [84] ”IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”, IEEE Std 81-2012
- [85] Curdts, E. B., “Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements”, AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Part I, vol. 77, pp. 767-770, Nov. 1958.
- [86] Tagg, G. F., “Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering large area”, Proceedings of IEE, vol. 111, no. 12, pp. 2118-2130, 1964.
- [87] Tagg, G. F., “Measurement of the resistance of an earth-electrode system covering large area”, Proceedings of IEE, vol. 116, no. 3, pp. 475 - 479, Nov. 1969
- [88] Tagg, G. F., “Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems”, Proceedings of IEE, vol. 117, no. 11, pp. 2185 - 2190, Nov. 1970
- [89] Meliopoulos, A. P., Patel, S., and Cokkonides, G. J., “A new method and instrument for touch and step voltage measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9., no. 3, pp. 1850 - 1860, Oct. 1994
- [90] Patel, S. G., “A complete field analysis of substation ground grid by applying continuous low voltage fault”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 8, pp. 2238 - 2243, Aug. 1985
- [91] Bodier, M, G., “Systematic investigation of potential gradients in and around a transformation substation”, Bulletin de la Société Française des Electriciens, July 1951
- [92] Langer, H., “Messungen von Erderspannungen in einem 220 kV Umspannwerk”, Electrotechnische Zeitschrift, vol. 75, no. 4, pp 97 - 105, Feb. 1954 (English translation available in AIEE No. 80 - 1961, Appendix V, pp. 91 - 102).

- [93] EPRI TR-100863, Seasonal variations of grounding parameters by field tests, SEI/Georgia Power Research Center, July 1992
- [94] E.K. Saraoja, electromagnetic analysis of grounds “Lightning Grounds”, Chapter 18 of “Lightning -Volume 2” edited by R.H. Golde, Academic Press.
- [95] BS 6651, “Lightning Protection of Structures”, 1992.
- [96] Γεώργιος Π. Κονδύλης, “ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”, Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2016
- [97] SES & technologies ltd. “CDEGS”, [Online], Available:<https://www.sestech.com/Product/Package/CDEGS>
- [98] SES & technologies ltd. “MALT”, [Online], Available:<https://www.sestech.com/en/Product/Module/MALT>
- [99] Wikipedia, “Regression analysis”, [Online], Available:https://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis
- [100] Wikipedia, “Linear regression”, [Online], Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_regression
- [101] Wikipedia, “Ordinary least squares”, [Online], Available:https://en.wikipedia.org/wiki/Ordinary_least_squares
- [102] Wikipedia, “Gauss-Markov theorem”, [Online], Available:https://en.wikipedia.org/wiki/Gauss-Markov_theorem
- [103] Wikipedia, “Elliptic surface”, Logarithmic transformations, [Online], Available:https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic_surface#Logarithmic_transformation
- [104] Wikipedia, “Power transform”, Box-Cox transformation, [Online], Available:https://en.wikipedia.org/wiki/Power_transform#Box-Cox_transformation
- [105] Bates, D.m., and Watts, D.G., “Nonlinear Regression Analysis and its applications”, Wiley, 1988
- [106] Valiollah Mashayekhi, Seyed Hossein Hesamedin Sadeghi, Rouzbeh Moini, Keyhan Sheshyekani, “An Adaptive Chebyshev Approach for Fast Computation of Grounding System

Admittance Matrix”, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 59, no. 2, April 2017

[107] Jovan Trifunovic and Miomir B. Kostic, “An Algorithm for Estimating the Grounding Resistance of Complex Grounding Systems Including Contact Resistance”, IEEE Transactions on industry applications, vol. 51, no. 6, November/December 2015

[108] Marcos Tello, Victor B. Tello, Lycas T. C. Pulz, Renato G. Ferraz, Fabio F. Vidor and Daniel S. Gazzana, “An Approach for Estimating the Ground Current in Substations Where the Overhead Guard Wire of Transmission Lines are Connected to the Grounding Grid: Model, Validation, and Practical Application”, IEEE Transactions on industry applications, vol. 60, no. 4, July/August 2024.

[109] Martin Hannig, “Calculation of the assembled grounding resistance from complex grounding systems by using analytical consideration only”, R&D, DEHN + SOHNE GmbH + [Co.KG.](#), Neumarkt, Germany

[110] Antonio Sunjerga, Farhad Rachidi, Marcos Rubinstein and Deagan Poljak, “Calculation of the Grounding Resistance of Structures Located on Elevated Terrain”, IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 61, no. 6, December 2019

[111] Morioki Kose, Saki Tanaka, Kazuo Yamamoto, Shozo Sekioka, Yoshihiro Baba and Naoto Nagaoka, “Effective Length of Counterpoises Connected to Wind Turbine Foundation”, IEEE transactions on power delivery, vol. 36, no. 6 December 2021

[112] Raghavender Goud Deshagano, Tony Auditore, Ramesh Rayudu and Ciaran P. Moore, “Factors Determining the Effectiveness of a Wind Turbine Generator Lightning Protection System”, IEEE transactions on industry applications, vol 55., no 6., November/December 2019

[113] Raghavender D. Goud, Tony Auditore, Ramesh Rayudu and Ciaran P. Moore, “Frequency Domain Analysis of a Wind Turbine Generator Earthing System for Lightning Discharge Currents”, IEEEAccess

[114] Wikipedia, “Coefficient of determination”, [Online], Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination

[115] Matlab, “Evaluating Goodness of Fit”, [Online], Available: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>

[116] MathWorks, “Curve Fitting Toolbox”, [Online], Available: <https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html>

[117] OpenAI, “Introducing ChatGPT”, [Online], Available: <https://openai.com/index/chatgpt/>

Παράρτημα Α: Κώδικες MATLAB

Κώδικας 1

```
clc;
clearvars;
% Φόρτωση δεδομένων
data = readtable('C:\Users\adiki\Desktop\Data.xlsx');
rho1 = data.rho1;
h = data.h;
rho2 = data.rho2;
E = data.E;
R = data.R;
% Υπολογισμός μεταβλητών
K1 = (rho1 .* rho2) ./ (rho1 + (rho2 ./ h));
K2 = 1 ./ E;
% Συντελεστές από το cftool
a = 0.5383;
m = 1.8818;
n = 1.3287;
% Υπολογισμός RR από το μοντέλο
R_pred = a .* (K1 .^ (m-1)) .* (K2 .^ (n-1));
% Υπολογισμός σχετικού σφάλματος για R
relative_error = abs(R_pred - R) ./ R;
% Μέσο και μέγιστο σχετικό σφάλμα σε ποσοστά
mean_relative_error = mean(relative_error) * 100;
max_relative_error = max(relative_error) * 100;
% Εμφάνιση αποτελεσμάτων
fprintf('Μέσο σχετικό σφάλμα (R): %.2f%%\n', mean_relative_error);
fprintf('Μέγιστο σχετικό σφάλμα (R): %.2f%%\n', max_relative_error);
```

Κώδικας 2

```
clc;
clearvars;
% -----
% 1. Φόρτωση Δεδομένων
% -----
data = readtable('C:\Users\adiki\Desktop\Data.xlsx');
rho1 = data.rho1;
h = data.h;
rho2 = data.rho2;
E = data.E;
R = data.R;
% -----
% 2. Δημιουργία Features
% -----
features = [ ...
            log10(rho1), ... % x1
```

```

log10(rho2), ... % x2
h, ... % x3
h.^2, ... % x4
h.^3, ... % x5
1 ./ E, ... % x6
log10(E), ... % x7
log10(rho1).* h, ... % x8
log10(rho2) .* h, ... % x9
log10(rho1) .* log10(rho2), ... % x10
(rho1 - rho2) ./ (rho1 + rho2), ... % x11
log10(rho1./rho2), ... % x12
(rho1 .* rho2) ./ (rho1 + rho2 ./ h), ... % x13
rho2 ./ (h .* sqrt(E)), ... % x14
];
feature_names = { ...
    'log10(rho1)', ...
    'log10(rho2)', ...
    'h', ...
    'h^2', ...
    'h^3', ...
    '1./E', ...
    'log10(E)', ...
    'log10(rho1)*h', ...
    'log10(rho2)*h', ...
    'log10(rho1)*log10(rho2)', ...
    '(rho1-rho2)/(rho1+rho2)', ...
    'log10(rho1/rho2)', ...
    '(rho1 .* rho2) ./ (rho1 +rho2 ./ h)', ...
    'rho2 ./ (h .* sqrt(E))', ...
};
% Target: log10(R)
Y = log10(R);
% -----
% 3. Εξέταση Συνδυασμών
% -----
max_features_to_test = 7;
results = [];
for k = 2:max_features_to_test
    comb = nchoosek(1:size(features,2), k);
    for i = 1:size(comb,1)
        selected = comb(i,:);
        X_subset = features(:, selected);
        mdl = fitlm(X_subset, Y);
        Y_pred = predict(mdl, X_subset);
        R_pred = 10.^Y_pred;
        relative_error = abs(R_pred - R) ./ R;
        mean_relative_error = mean(relative_error) * 100;
        max_relative_error = max(relative_error) * 100;
        results = [results; struct( ...

```

```

        'features', {feature_names(selected)}, ...
        'r2', mdl.Rsquared.Ordinary, ...
        'mean_error', mean_relative_error, ...
        'max_error', max_relative_error ...
    )];
end
end
% -----
% 4. Εμφάνιση Καλύτερων Συνδυασμών (φιλτραρισμένων)
% -----
% Φιλτράρισμα: κρατάμε μόνο όσα έχουν max error < 100%
valid_idx = [results.max_error] < 100;
filtered_results = results(valid_idx);
% Ταξινόμηση κατά αύξουσα σειρά μέσου σφάλματος
[~, idx] = sort([filtered_results.mean_error]);
results_sorted = filtered_results(idx);
% Εμφάνιση των Top 10
fprintf('\n--- Top 10 Φιλτραρισμένοι Συνδυασμοί ---\n');
for i = 1:min(10, numel(results_sorted))
    fprintf('\nΣυνδυασμός %d:\n', i);
    disp(results_sorted(i).features);
    fprintf('R2 = %.4f | Μέσο Σφάλμα = %.2f%% | Μέγιστο Σφάλμα = %.2f%%\n', ...
        results_sorted(i).r2, ...
        results_sorted(i).mean_error, ...
        results_sorted(i).max_error);
end
end

```

Κώδικας 3

```

clc;
clearvars;
% Φόρτωση δεδομένων
data = readtable('C:\Users\adiki\Desktop\Data.xlsx');
rho1 = data.rho1;
h = data.h;
rho2 = data.rho2;
E = data.E;
R = data.R;
% Features
X = [ ...
    log10(rho2), ...
    log10(rho1).*h, ...
    log10(rho2).*h, ...
    log10(rho1).*log10(rho2), ...
];
Y = log10(R);
% Fit
mdl = fitlm(X, Y);
% Αποτελέσματα

```

```

disp(mdl);
% Προβλέψεις
Y_pred = predict(mdl, X);
R_pred = 10.^Y_pred; % Επιστροφή από λογάριθμο
% Υπολογισμός σφαλμάτων
relative_error = abs(R_pred - R) ./ R;
mean_relative_error = mean(relative_error) * 100;
max_relative_error = max(relative_error) * 100;
fprintf('Μέσο σχετικό σφάλμα: %.2f%%\n', mean_relative_error);
fprintf('Μέγιστο σχετικό σφάλμα: %.2f%%\n', max_relative_error);

```

Κώδικας 4

```

clc;
clearvars;
% Φόρτωση δεδομένων
data = readtable('C:\Users\adiki\Desktop\Data.xlsx');
rho1 = data.rho1;
rho2 = data.rho2;
h = data.h;
E = data.E;
R = data.R;
% Τύποι για K1 και K2
K1_formulas = {
    '(rho1 .* rho2) ./ (rho1 + rho2./h)', ...
    'rho1 .* rho2', ...
    'sqrt(rho1 .* rho2)', ...
    '(rho1 .* rho2) ./ (rho1 + rho2)', ...
    'rho1 + rho2.*h'
};
K2_formulas = {
    'rho2 ./ (h .* sqrt(E))', ...
    'rho1 ./ (h .* sqrt(E))', ...
    'rho2 ./ (h .* E)', ...
    'sqrt(rho2) ./ (h .* sqrt(E))', ...
    'log(rho1 + rho2) ./ (h .* sqrt(E))'
};
results = [];
% Προσαρμογή γραμμικού μοντέλου: log10(R) = a * K1 + b * K2 + c
for i = 1:length(K1_formulas)
    for j = 1:length(K2_formulas)
        try
            K1 = eval(K1_formulas{i});
            K2 = eval(K2_formulas{j});
            % Φιλτράρισμα μη έγκυρων τιμών
            valid_idx = isfinite(K1) & isfinite(K2) & isfinite(R) & K1 > 0 & K2
> 0 & R > 0;
            K1 = K1(valid_idx);
            K2 = K2(valid_idx);

```

```

R_fit = R(valid_idx);
logR = log10(R_fit);
% Γραμμική παλινδρόμηση
X = [K1, K2];
mdl = fitlm(X, logR);
% Προβλέψεις
logR_pred = predict(mdl, X);
R_pred = 10.^logR_pred;
% Σφάλματα
rel_error = abs(R_pred - R_fit) ./ R_fit;
mean_error = mean(rel_error) * 100;
max_error = max(rel_error) * 100;
% Αποθήκευση
results = [results; struct( ...
    'K1_formula', K1_formulas{i}, ...
    'K2_formula', K2_formulas{j}, ...
    'Coefficients', mdl.Coefficients.Estimate, ...
    'R2', mdl.Rsquared.Ordinary, ...
    'MeanError', mean_error, ...
    'MaxError', max_error)];
catch
    continue;
end
end
end
% Ταξινόμηση με βάση το μέσο σφάλμα
 [~, idx] = sort([results.MeanError]);
results = results(idx);
% Εμφάνιση αποτελεσμάτων
fprintf('\n--- Γραμμική Παλινδρόμηση με log10(R) ---\n\n');
for i = 1:length(results)
    a = results(i).Coefficients(2);
    b = results(i).Coefficients(3);
    c = results(i).Coefficients(1);
    fprintf('log10(R) = %.4f*K1 + %.4f*K2 + %.4f\n', a, b, c);
    fprintf('K1 = %s\n', results(i).K1_formula);
    fprintf('K2 = %s\n', results(i).K2_formula);
    fprintf('R² = %.4f | Μέσο Σφάλμα = %.2f%% | Μέγιστο Σφάλμα = %.2f%%\n\n',
        ...
        results(i).R2, results(i).MeanError, results(i).MaxError);
end

```

Κώδικας 5

```
clc;
clearvars;
% Φόρτιση δεδομένων
data = readtable('C:\Users\adiki\Desktop\Data.xlsx');
rho1 = data.rho1;
rho2 = data.rho2;
h = data.h;
E = data.E;
R_real = data.R;
% Ορισμοί πιθανών K1 και K2
K1_formulas = {
    '(rho1 .* rho2) ./ (rho1 + rho2./h)', ...
    'rho1 .* rho2', ...
    'sqrt(rho1 .* rho2)', ...
    '(rho1 .* rho2) ./ (rho1 + rho2)', ...
    'rho1 + rho2.*h'
};
K2_formulas = {
    'rho2 ./ (h .* sqrt(E))', ...
    'rho1 ./ (h .* sqrt(E))', ...
    'rho2 ./ (h .* E)', ...
    'sqrt(rho2) ./ (h .* sqrt(E))', ...
    'log(rho1 + rho2) ./ (h .* sqrt(E))'
};
results = [];
% Παράμετροι μη γραμμικής παλινδρόμησης
opts = statset('nlinfit');
opts.MaxIter = 1000;
% Μοντέλο:  $R = a * K1^b * K2^c$ 
modelfun = @(beta, X) beta(1) .* (X.K1).^beta(2) .* (X.K2).^beta(3);
% Για κάθε συνδυασμό (K1, K2)
for i = 1:length(K1_formulas)
    for j = 1:length(K2_formulas)
        try
            % Δημιουργία K1 και K2
            K1 = eval(K1_formulas{i});
            K2 = eval(K2_formulas{j});
            % Φιλτράρισμα μη έγκυρων τιμών
            valid_idx = isfinite(K1) & isfinite(K2) & isfinite(R_real) & (K1 >
0) & (K2 > 0) & (R_real > 0);
            K1 = K1(valid_idx);
            K2 = K2(valid_idx);
            R_fit = R_real(valid_idx);
            % Δομή δεδομένων
            X_data = struct('K1', K1, 'K2', K2);
            % Τυχαία αναζήτηση + Adaptive Search
            best_mre = Inf;
            best_params = [];
```

```

num_trials = 100;
for t = 1:num_trials
    a0 = 10^(rand()*2 - 1); % [0.1,10]
    b0 = rand()*2 - 1;      % [-1,1]
    c0 = rand()*2 - 1;      % [-1,1]
    beta0 = [a0, b0, c0];
    try
        beta = nlinfit(X_data, R_fit, modelfun, beta0, opts);
        R_pred = modelfun(beta, X_data);
        rel_error = abs(R_pred - R_fit) ./ R_fit;
        mean_rel_error = mean(rel_error) * 100;
        if mean_rel_error < best_mre
            best_mre = mean_rel_error;
            best_params = beta;
        end
    catch
        continue;
    end
end
% Adaptive γύρω από το καλύτερο beta
for t = 1:20
    perturb = (rand(1,3)-0.5) .* [0.2,0.2,0.2]; % Μικρές αλλαγές
    beta0 = best_params .* (1 + perturb);
    try
        beta = nlinfit(X_data, R_fit, modelfun, beta0, opts);
        R_pred = modelfun(beta, X_data);
        rel_error = abs(R_pred - R_fit) ./ R_fit;
        mean_rel_error = mean(rel_error) * 100;
        if mean_rel_error < best_mre
            best_mre = mean_rel_error;
            best_params = beta;
        end
    catch
        continue;
    end
end
% Τελικά αποτελέσματα
a_final = best_params(1);
b_final = best_params(2);
c_final = best_params(3);
R_pred_final = modelfun(best_params, X_data);
SS_res = sum((R_fit - R_pred_final).^2);
SS_tot = sum((R_fit - mean(R_fit)).^2);
R_squared = 1 - SS_res/SS_tot;
% Σφάλματα
rel_error_final = abs(R_pred_final - R_fit) ./ R_fit;
mean_rel_error_final = mean(rel_error_final) * 100;
max_rel_error_final = max(rel_error_final) * 100;
% Αποθήκευση

```

```

        results = [results; struct( ...
            'K1_formula', K1_formulas{i}, ...
            'K2_formula', K2_formulas{j}, ...
            'a', a_final, ...
            'b', b_final, ...
            'c', c_final, ...
            'R2', R_squared, ...
            'MeanError', mean_rel_error_final, ...
            'MaxError', max_rel_error_final)];
    catch
        continue;
    end
end
end
% Ταξινόμηση κατά μέσο σφάλμα
 [~, idx] = sort([results.MeanError]);
results = results(idx);
% Εμφάνιση
fprintf('\n--- Αποτελέσματα (Μη Γραμμική Παλιγδρόμηση με Adaptive Search σε όλα
τα K1/K2) ---\n\n');
for i = 1:length(results)
    fprintf('Μοντέλο:\n');
    fprintf('R = %.6f * (K1)^{%.6f} * (K2)^{%.6f}\n', results(i).a,
results(i).b, results(i).c);
    fprintf('K1 = %s\n', results(i).K1_formula);
    fprintf('K2 = %s\n', results(i).K2_formula);
    fprintf('R² = %.4f | Μέσο Σφάλμα = %.2f%% | Μέγιστο Σφάλμα = %.2f%%\n\n',
...
        results(i).R2, results(i).MeanError, results(i).MaxError);
end

```

Κώδικας 6

```

clc;
clearvars;
% Φόρτωση δεδομένων
data = readtable('C:\Users\adiki\Desktop\Data.xlsx');
rho1 = data.rho1;
rho2 = data.rho2;
h = data.h;
E = data.E;
R_real = data.R;
% Υπολογισμός K1 και K2
K1 = (rho1 .* rho2) ./ (rho1 + rho2 ./ h);
K2 = rho2 ./ (h .* sqrt(E));
% Υπολογισμός R_pred
R_pred = 0.23 .* (K1.^(1/2)) .* (K2.^(1/3));
% Υπολογισμός R²
SS_res = sum((R_real - R_pred).^2);

```

```

SS_tot = sum((R_real - mean(R_real)).^2);
R_squared = 1 - SS_res / SS_tot;
% Σφάλματα
rel_error = abs(R_pred - R_real) ./ R_real;
mean_rel_error = mean(rel_error) * 100;
max_rel_error = max(rel_error) * 100;
% Εμφάνιση αποτελεσμάτων
fprintf('R² = %.4f\n', R_squared);
fprintf('Μέσο Σχετικό Σφάλμα = %.2f%%\n', mean_rel_error);
fprintf('Μέγιστο Σχετικό Σφάλμα = %.2f%%\n', max_rel_error);

```

Κώδικας 7

```

clc;
clearvars;
% Φόρτωση δεδομένων
data = readtable('C:\Users\adiki\Desktop\Data.xlsx');
rho1 = data.rho1;
rho2 = data.rho2;
h = data.h;
E = data.E;
R_real = data.R;
% Ορισμός K1 και K2
K1 = (rho1 .* rho2) ./ (rho1 + rho2 ./ h);
K2 = rho2 ./ (h .* sqrt(E));
% Φιλτράρισμα έγκυρων τιμών
valid_idx = isfinite(K1) & isfinite(K2) & isfinite(R_real) & (K1 > 0) & (K2 > 0) & (R_real > 0);
K1 = K1(valid_idx);
K2 = K2(valid_idx);
R_fit = R_real(valid_idx);
% Δημιουργία X δομής για το μοντέλο
X_data = struct('K1', K1, 'K2', K2);
% Μοντέλο: R = a * (K1)^b * (K2)^c
modelfun = @(beta, X) beta(1) .* (X.K1).^beta(2) .* (X.K2).^beta(3);
% Πυθμίσεις nlinfit με bisquare
opts = statset('nlinfit');
opts.MaxIter = 1000;
opts.RobustWgtFun = 'bisquare'; % Ενεργοποίηση σταθμισμένης παλινδρόμησης
% Τυχαία αναζήτηση αρχικών συνθηκών
best_mre = Inf;
best_params = [];
num_trials = 100;
for i = 1:num_trials
    a0 = 10^(rand()*2 - 1);
    b0 = rand()*4 - 2;
    c0 = rand()*4 - 2;
    beta0 = [a0, b0, c0];

```

```

try
    beta = nlinfit(X_data, R_fit, modelfun, beta0, opts);
    R_pred = modelfun(beta, X_data);
    rel_error = abs(R_pred - R_fit) ./ R_fit;
    mean_rel_error = mean(rel_error) * 100;
    if mean_rel_error < best_mre
        best_mre = mean_rel_error;
        best_params = beta;
    end
catch
    continue;
end
end
% Προσαρμογή γύρω από το καλύτερο
for i = 1:20
    perturbation = (rand(1,3)-0.5) .* [0.2, 0.2, 0.2];
    beta0 = best_params .* (1 + perturbation);

    try
        beta = nlinfit(X_data, R_fit, modelfun, beta0, opts);
        R_pred = modelfun(beta, X_data);
        rel_error = abs(R_pred - R_fit) ./ R_fit;
        mean_rel_error = mean(rel_error) * 100;
        if mean_rel_error < best_mre
            best_mre = mean_rel_error;
            best_params = beta;
        end
    catch
        continue;
    end
end
% Τελική αξιολόγηση
a_final = best_params(1);
b_final = best_params(2);
c_final = best_params(3);
R_pred_final = modelfun(best_params, X_data);
% Υπολογισμός R²
SS_res = sum((R_fit - R_pred_final).^2);
SS_tot = sum((R_fit - mean(R_fit)).^2);
R_squared = 1 - SS_res / SS_tot;
% Σφάλματα
rel_error_final = abs(R_pred_final - R_fit) ./ R_fit;
mean_rel_error_final = mean(rel_error_final) * 100;
max_rel_error_final = max(rel_error_final) * 100;
% Εμφάνιση αποτελεσμάτων
fprintf('\n--- Αποτελέσματα (Με Bisquare Βάρη) ---\n\n');
fprintf('Μοντέλο:\n');
fprintf('R = %.6f * (K1)^{%.6f} * (K2)^{%.6f}\n\n', a_final, b_final, c_final);
fprintf('R² = %.4f | Μέσο Σφάλμα = %.2f%% | Μέγιστο Σφάλμα = %.2f%%\n\n', ...

```

```
    R_squared, mean_rel_error_final, max_rel_error_final);  
fprintf('Όρισμός K1:  $(\rho_1 * \rho_2) / (\rho_1 + \rho_2/h)$ \n');  
fprintf('Όρισμός K2:  $\rho_2 / (h * \sqrt{E})$ \n');
```

Παράρτημα Β: Προσομοιώσεις

Για επιφάνεια 1315 τ.μ.:

Rho1	h	Rho2	R
100	1	100	1.2906
100	1	200	2.2835
100	1	500	4.7993
100	1	1000	8.0947
100	1	2000	12.95
100	1	3000	16.603
100	1	5000	21.959
100	1	10000	30.401
100	1	15000	35.822
100	2	100	1.2907
100	2	200	2.172
100	2	500	4.2317
100	2	1000	6.6665
100	2	2000	9.9717
100	2	3000	12.251
100	2	5000	15.424
100	2	10000	20.164
100	2	15000	23.088
100	3	100	1.2906
100	3	200	2.0599
100	3	500	3.7693
100	3	1000	5.6766
100	3	2000	8.1209
100	3	3000	9.7629
100	3	5000	12.001
100	3	10000	15.265

100	3	15000	17.262
100	5	100	1.2906
100	5	200	1.9282
100	5	500	3.2491
100	5	1000	4.6395
100	5	2000	6.3076
100	5	3000	7.3744
100	5	5000	8.8063
100	5	10000	10.85
100	5	15000	12.075
200	1	100	1.4642
200	1	200	2.5813
200	1	500	5.4984
200	1	1000	9.5986
200	1	2000	16.189
200	1	3000	21.487
200	1	5000	29.78
200	1	10000	43.918
200	1	15000	53.497
200	2	100	1.5318
200	2	200	2.5813
200	2	500	5.1382
200	2	1000	8.4633
200	2	2000	13.333
200	2	3000	17.001
200	2	5000	22.369
200	2	10000	30.848
200	2	15000	36.309
200	3	100	1.6517
200	3	200	2.5812

200	3	500	4.7951
200	3	1000	7.5387
200	3	2000	11.353
200	3	3000	14.109
200	3	5000	18.031
200	3	10000	24.002
200	3	15000	27.767
200	5	100	1.7924
200	5	200	2.5812
200	5	500	4.3856
200	5	1000	6.4982
200	5	2000	9.279
200	5	3000	11.155
200	5	5000	13.776
200	5	10000	17.613
200	5	15000	19.982
500	1	100	1.7458
500	1	200	3.0551
500	1	500	6.4532
500	1	1000	11.417
500	1	2000	20.07
500	1	3000	27.61
500	1	5000	40.473
500	1	10000	64.748
500	1	15000	83.016
500	2	100	1.9006
500	2	200	3.2354
500	2	500	6.4533
500	2	1000	10.86
500	2	2000	18.058

500	2	3000	23.959
500	2	5000	33.332
500	2	10000	49.858
500	2	15000	61.253
500	3	100	2.4576
500	3	200	3.6081
500	3	500	6.4529
500	3	1000	10.299
500	3	2000	16.33
500	3	3000	21.086
500	3	5000	28.383
500	3	10000	40.605
500	3	15000	48.815
500	5	100	3.0985
500	5	200	4.0396
500	5	500	6.4531
500	5	1000	9.6412
500	5	2000	14.39
500	5	3000	17.953
500	5	5000	23.198
500	5	10000	31.538
500	5	15000	36.872
1000	1	100	1.9698
1000	1	200	3.4917
1000	1	500	7.3212
1000	1	1000	12.907
1000	1	2000	22.835
1000	1	3000	31.897
1000	1	5000	47.994
1000	1	10000	80.949

1000	1	15000	107.44
1000	2	100	2.1667
1000	2	200	3.8013
1000	2	500	7.6588
1000	2	1000	12.907
1000	2	2000	21.72
1000	2	3000	29.377
1000	2	5000	42.317
1000	2	10000	66.667
1000	2	15000	85.009
1000	3	100	3.5261
1000	3	200	4.9152
1000	3	500	8.2583
1000	3	1000	12.906
1000	3	2000	20.599
1000	3	3000	27.08
1000	3	5000	37.694
1000	3	10000	56.768
1000	3	15000	70.549
1000	5	100	5.1761
1000	5	200	6.197
1000	5	500	8.9621
1000	5	1000	12.906
1000	5	2000	19.283
1000	5	3000	24.45
1000	5	5000	32.492
1000	5	10000	46.396
1000	5	15000	55.775
2000	1	100	2.1592
2000	1	200	3.9397

2000	1	500	8.3633
2000	1	1000	14.642
2000	1	2000	25.813
2000	1	3000	36.081
2000	1	5000	54.985
2000	1	10000	95.988
2000	1	15000	131.01
2000	2	100	2.3726
2000	2	200	4.3334
2000	2	500	9.042
2000	2	1000	15.318
2000	2	2000	25.813
2000	2	3000	35.05
2000	2	5000	51.383
2000	2	10000	84.635
2000	2	15000	111.29
2000	3	100	5.208
2000	3	200	7.0522
2000	3	500	11.064
2000	3	1000	16.517
2000	3	2000	25.812
2000	3	3000	33.923
2000	3	5000	47.952
2000	3	10000	75.388
2000	3	15000	96.217
2000	5	100	9.2899
2000	5	200	10.352
2000	5	500	13.377
2000	5	1000	17.924
2000	5	2000	25.813

2000	5	3000	32.595
2000	5	5000	43.857
2000	5	10000	64.983
2000	5	15000	80.467
3000	1	100	2.2438
3000	1	200	4.1738
3000	1	500	9.0288
3000	1	1000	15.823
3000	1	2000	27.754
3000	1	3000	38.72
3000	1	5000	59.029
3000	1	10000	104.18
3000	1	15000	143.98
3000	2	100	2.4592
3000	2	200	4.5919
3000	2	500	9.8728
3000	2	1000	16.906
3000	2	2000	28.524
3000	2	3000	38.72
3000	2	5000	56.9
3000	2	10000	95.135
3000	2	15000	126.95
3000	3	100	6.509
3000	3	200	8.8581
3000	3	500	13.446
3000	3	1000	19.467
3000	3	2000	29.689
3000	3	3000	38.718
3000	3	5000	54.648
3000	3	10000	87.081

3000	3	15000	113.08
3000	5	100	13.384
3000	5	200	14.466
3000	5	500	17.585
3000	5	1000	22.387
3000	5	2000	31.059
3000	5	3000	38.719
3000	5	5000	52.003
3000	5	10000	77.915
3000	5	15000	97.475
5000	1	100	2.3227
5000	1	200	4.4165
5000	1	500	9.8492
5000	1	1000	17.458
5000	1	2000	30.551
5000	1	3000	42.447
5000	1	5000	64.533
5000	1	10000	114.18
5000	1	15000	159.49
5000	2	100	2.5373
5000	2	200	4.8463
5000	2	500	10.833
5000	2	1000	16.006
5000	2	2000	32.354
5000	2	3000	43.918
5000	2	5000	64.533
5000	2	10000	108.6
5000	2	15000	146.89
5000	3	100	8.4033
5000	3	200	11.791

5000	3	500	17.63
5000	3	1000	24.576
5000	3	2000	36.081
5000	3	3000	46.272
5000	3	5000	64.529
5000	3	10000	102.99
5000	3	15000	135.4
5000	5	100	21.577
5000	5	200	22.68
5000	5	500	25.88
5000	5	1000	30.985
5000	5	2000	40.396
5000	5	3000	49.037
5000	5	5000	64.531
5000	5	10000	96.413
5000	5	15000	122.25
10000	1	100	2.3901
10000	1	200	4.6454
10000	1	500	10.796
10000	1	1000	19.698
10000	1	2000	34.917
10000	1	3000	48.447
10000	1	5000	73.212
10000	1	10000	129.07
10000	1	15000	180.4
10000	2	100	2.602
10000	2	200	5.0747
10000	2	500	11.863
10000	2	1000	21.667
10000	2	2000	38.013

10000	2	3000	52.004
10000	2	5000	76.588
10000	2	10000	129.07
10000	2	15000	175.25
10000	3	100	11.089
10000	3	200	16.807
10000	3	500	26.04
10000	3	1000	35.261
10000	3	2000	49.152
10000	3	3000	61.133
10000	3	5000	82.583
10000	3	10000	129.06
10000	3	15000	169.61
10000	5	100	42.038
10000	5	200	43.154
10000	5	500	46.449
10000	5	1000	51.761
10000	5	2000	61.97
10000	5	3000	71.629
10000	5	5000	89.621
10000	5	10000	129.06
10000	5	15000	162.98
15000	1	100	2.4143
15000	1	200	4.7335
15000	1	500	11.219
15000	1	1000	20.869
15000	1	2000	37.575
15000	1	3000	52.375
15000	1	5000	79.114
15000	1	10000	138.77

15000	1	15000	193.6
15000	2	100	2.6249
15000	2	200	5.1597
15000	2	500	12.296
15000	2	1000	22.959
15000	2	2000	41.232
15000	2	3000	57.019
15000	2	5000	84.53
15000	2	10000	142.62
15000	2	15000	193.6
15000	3	100	12.508
15000	3	200	19.98
15000	3	500	32.545
15000	3	1000	44.29
15000	3	2000	60.424
15000	3	3000	73.728
15000	3	5000	97.335
15000	3	10000	148.44
15000	3	15000	193.59
15000	5	100	62.491
15000	5	200	63.616
15000	5	500	66.921
15000	5	1000	72.332
15000	5	2000	82.881
15000	5	3000	92.955
15000	5	5000	111.94
15000	5	10000	155.3
15000	5	15000	193.59

Για επιφάνεια 1339 τ.μ.:

Rho1	h	Rho2	R
100	1	100	1.2898
100	1	200	2.2809
100	1	500	4.7915
100	1	1000	8.0809
100	1	2000	12.932
100	1	3000	16.58
100	1	5000	21.929
100	1	10000	30.381
100	1	15000	35.769
100	2	100	1.2898
100	2	200	2.1696
100	2	500	4.2256
100	2	1000	6.6573
100	2	2000	9.9602
100	2	3000	12.237
100	2	5000	15.411
100	2	10000	20.149
100	2	15000	23.073
100	3	100	1.2898
100	3	200	2.0582
100	3	500	3.7668
100	3	1000	5.6748
100	3	2000	8.1177
100	3	3000	9.7635
100	3	5000	12.002
100	3	10000	15.267
100	3	15000	17.266
100	5	100	1.2898
100	5	200	1.9274

100	5	500	3.2488
100	5	1000	4.6402
100	5	2000	6.3098
100	5	3000	7.377
100	5	5000	8.81
100	5	10000	10.854
100	5	15000	12.08
200	1	100	1.4641
200	1	200	2.5796
200	1	500	5.4917
200	1	1000	9.583
200	1	2000	16.162
200	1	3000	21.454
200	1	5000	29.737
200	1	10000	43.859
200	1	15000	53.443
200	2	100	1.5316
200	2	200	2.5797
200	2	500	5.1316
200	2	1000	8.4511
200	2	2000	13.315
200	2	3000	16.979
200	2	5000	22.346
200	2	10000	30.821
200	2	15000	36.25
200	3	100	1.6511
200	3	200	2.5796
200	3	500	4.7911
200	3	1000	7.5336
200	3	2000	11.35

200	3	3000	14.106
200	3	5000	18.031
200	3	10000	24.004
200	3	15000	27.77
200	5	100	1.7912
200	5	200	2.5796
200	5	500	4.3838
200	5	1000	6.4975
200	5	2000	9.2805
200	5	3000	11.158
200	5	5000	13.78
200	5	10000	17.62
200	5	15000	19.99
500	1	100	1.7465
500	1	200	3.0552
500	1	500	6.4491
500	1	1000	11.404
500	1	2000	20.039
500	1	3000	27.565
500	1	5000	40.405
500	1	10000	64.659
500	1	15000	82.898
500	2	100	1.9013
500	2	200	3.2356
500	2	500	6.4492
500	2	1000	10.848
500	2	2000	18.032
500	2	3000	23.924
500	2	5000	33.287
500	2	10000	49.801

500	2	15000	61.186
500	3	100	2.4575
500	3	200	3.6072
500	3	500	6.4489
500	3	1000	10.291
500	3	2000	16.319
500	3	3000	21.074
500	3	5000	28.374
500	3	10000	40.589
500	3	15000	48.818
500	5	100	3.0964
500	5	200	4.0367
500	5	500	6.4491
500	5	1000	9.6368
500	5	2000	14.387
500	5	3000	17.954
500	5	5000	23.201
500	5	10000	31.549
500	5	15000	36.885
1000	1	100	1.9708
1000	1	200	3.493
1000	1	500	7.3204
1000	1	1000	12.898
1000	1	2000	22.809
1000	1	3000	31.851
1000	1	5000	47.916
1000	1	10000	80.812
1000	1	15000	107.27
1000	2	100	2.1675
1000	2	200	3.8026

1000	2	500	7.658
1000	2	1000	12.898
1000	2	2000	21.696
1000	2	3000	29.338
1000	2	5000	42.256
1000	2	10000	66.575
1000	2	15000	84.898
1000	3	100	3.5264
1000	3	200	4.9151
1000	3	500	8.2556
1000	3	1000	12.898
1000	3	2000	20.582
1000	3	3000	27.057
1000	3	5000	37.669
1000	3	10000	56.75
1000	3	15000	70.532
1000	5	100	5.1727
1000	5	200	6.1928
1000	5	500	8.9558
1000	5	1000	12.898
1000	5	2000	19.274
1000	5	3000	24.443
1000	5	5000	32.488
1000	5	10000	46.404
1000	5	15000	55.79
2000	1	100	2.16
2000	1	200	3.9416
2000	1	500	8.3657
2000	1	1000	14.641
2000	1	2000	25.796

2000	1	3000	36.046
2000	1	5000	54.917
2000	1	10000	95.832
2000	1	15000	130.8
2000	2	100	2.3732
2000	2	200	4.3349
2000	2	500	9.0441
2000	2	1000	15.316
2000	2	2000	25.797
2000	2	3000	35.016
2000	2	5000	51.317
2000	2	10000	84.513
2000	2	15000	111.13
2000	3	100	5.2086
2000	3	200	7.0528
2000	3	500	11.063
2000	3	1000	16.511
2000	3	2000	25.796
2000	3	3000	33.897
2000	3	5000	47.912
2000	3	10000	75.337
2000	3	15000	96.164
2000	5	100	9.284
2000	5	200	10.345
2000	5	500	13.367
2000	5	1000	17.912
2000	5	2000	25.797
2000	5	3000	32.578
2000	5	5000	43.838
2000	5	10000	64.976

2000	5	15000	80.478
3000	1	100	2.2444
3000	1	200	4.1756
3000	1	500	9.0327
3000	1	1000	15.825
3000	1	2000	27.745
3000	1	3000	38.695
3000	1	5000	58.966
3000	1	10000	104.02
3000	1	15000	143.75
3000	2	100	2.4597
3000	2	200	4.5933
3000	2	500	9.8765
3000	2	1000	16.91
3000	2	2000	28.515
3000	2	3000	38.695
3000	2	5000	56.845
3000	2	10000	95.002
3000	2	15000	126.77
3000	3	100	6.5097
3000	3	200	8.8591
3000	3	500	13.446
3000	3	1000	19.463
3000	3	2000	29.675
3000	3	3000	38.694
3000	3	5000	54.604
3000	3	10000	87.01
3000	3	15000	113.01
3000	5	100	13.381
3000	5	200	14.457

3000	5	500	17.573
3000	5	1000	22.372
3000	5	2000	31.038
3000	5	3000	38.695
3000	5	5000	51.976
3000	5	10000	77.895
3000	5	15000	97.464
5000	1	100	2.3232
5000	1	200	4.418
5000	1	500	9.8539
5000	1	1000	17.465
5000	1	2000	30.552
5000	1	3000	42.436
5000	1	5000	64.491
5000	1	10000	114.04
5000	1	15000	159.26
5000	2	100	2.5377
5000	2	200	4.8475
5000	2	500	10.837
5000	2	1000	19.013
5000	2	2000	32.356
5000	2	3000	43.908
5000	2	5000	64.492
5000	2	10000	108.48
5000	2	15000	146.69
5000	3	100	8.4042
5000	3	200	11.792
5000	3	500	17.632
5000	3	1000	24.576
5000	3	2000	36.072

5000	3	3000	46.253
5000	3	5000	64.489
5000	3	10000	102.91
5000	3	15000	135.29
5000	5	100	21.563
5000	5	200	22.666
5000	5	500	25.864
5000	5	1000	30.964
5000	5	2000	40.368
5000	5	3000	49.003
5000	5	5000	64.491
5000	5	10000	96.369
5000	5	15000	122.21
10000	1	100	2.3903
10000	1	200	4.6464
10000	1	500	10.8
10000	1	1000	19.708
10000	1	2000	34.93
10000	1	3000	48.456
10000	1	5000	73.204
10000	1	10000	128.98
10000	1	15000	180.23
10000	2	100	2.6022
10000	2	200	5.0754
10000	2	500	11.866
10000	2	1000	21.675
10000	2	2000	38.026
10000	2	3000	52.018
10000	2	5000	76.58
10000	2	10000	128.98

10000	2	15000	175.08
10000	3	100	11.09
10000	3	200	16.808
10000	3	500	26.043
10000	3	1000	35.264
10000	3	2000	49.151
10000	3	3000	61.125
10000	3	5000	82.556
10000	3	10000	128.98
10000	3	15000	169.48
10000	5	100	42.012
10000	5	200	43.127
10000	5	500	46.42
10000	5	1000	51.727
10000	5	2000	61.928
10000	5	3000	71.58
10000	5	5000	89.558
10000	5	10000	128.98
10000	5	15000	162.89
15000	1	100	2.4145
15000	1	200	4.7342
15000	1	500	11.222
15000	1	1000	20.878
15000	1	2000	37.593
15000	1	3000	52.395
15000	1	5000	79.125
15000	1	10000	138.72
15000	1	15000	193.47
15000	2	100	2.625
15000	2	200	5.1602

15000	2	500	12.299
15000	2	1000	22.967
15000	2	2000	41.248
15000	2	3000	57.039
15000	2	5000	84.549
15000	2	10000	142.58
15000	2	15000	193.48
15000	3	100	12.509
15000	3	200	19.982
15000	3	500	32.549
15000	3	1000	44.296
15000	3	2000	60.427
15000	3	3000	73.727
15000	3	5000	97.313
15000	3	10000	148.37
15000	3	15000	193.47
15000	5	100	62.453
15000	5	200	63.577
15000	5	500	66.903
15000	5	1000	72.285
15000	5	2000	82.827
15000	5	3000	92.892
15000	5	5000	111.86
15000	5	10000	155.19
15000	5	15000	193.47

Για επιφάνεια 1435 τ.μ.:

Rho1	h	Rho2	R
100	1	100	1.2329
100	1	200	2.1785

100	1	500	4.5838
100	1	1000	7.753
100	1	2000	12.478
100	1	3000	16.011
100	1	5000	21.243
100	1	10000	29.574
100	1	15000	34.928
100	2	100	1.2329
100	2	200	2.0733
100	2	500	4.0509
100	2	1000	6.4258
100	2	2000	9.6311
100	2	3000	11.865
100	2	5000	14.992
100	2	10000	19.685
100	2	15000	22.595
100	3	100	1.2328
100	3	200	1.9692
100	3	500	3.6185
100	3	1000	5.4737
100	3	2000	7.8682
100	3	3000	9.4902
100	3	5000	11.702
100	3	10000	14.952
100	3	15000	16.932
100	5	100	1.2329
100	5	200	1.8463
100	5	500	3.1271
100	5	1000	4.4878
100	5	2000	6.1307

100	5	3000	7.1842
100	5	5000	8.6089
100	5	10000	10.642
100	5	15000	11.863
200	1	100	1.404
200	1	200	2.4657
200	1	500	5.2457
200	1	1000	9.1675
200	1	2000	15.506
200	1	3000	20.627
200	1	5000	28.679
200	1	10000	42.487
200	1	15000	51.937
200	2	100	1.4693
200	2	200	2.4657
200	2	500	4.9058
200	2	1000	8.1019
200	2	2000	12.852
200	2	3000	16.38
200	2	5000	21.639
200	2	10000	29.985
200	2	15000	35.388
200	3	100	1.5803
200	3	200	2.4656
200	3	500	4.5876
200	3	1000	7.2371
200	3	2000	10.947
200	3	3000	13.645
200	3	5000	17.504
200	3	10000	23.404

200	3	15000	27.158
200	5	100	1.7106
200	5	200	2.4657
200	5	500	4.2032
200	5	1000	6.2543
200	5	2000	8.9756
200	5	3000	10.818
200	5	5000	13.405
200	5	10000	17.218
200	5	15000	19.572
500	1	100	1.6896
500	1	200	2.9346
500	1	500	6.1643
500	1	1000	10.893
500	1	2000	19.158
500	1	3000	26.387
500	1	5000	38.765
500	1	10000	62.39
500	1	15000	80.056
500	2	100	1.8429
500	2	200	3.1103
500	2	500	6.1643
500	2	1000	10.366
500	2	2000	17.267
500	2	3000	22.953
500	2	5000	32.129
500	2	10000	48.155
500	2	15000	59.324
500	3	100	2.3629
500	3	200	3.4554

500	3	500	6.1641
500	3	1000	9.846
500	3	2000	15.659
500	3	3000	20.266
500	3	5000	27.368
500	3	10000	39.341
500	3	15000	47.451
500	5	100	2.9581
500	5	200	3.8551
500	5	500	6.1643
500	5	1000	9.2314
500	5	2000	13.831
500	5	3000	17.303
500	5	5000	22.439
500	5	10000	30.653
500	5	15000	35.921
1000	1	100	1.924
1000	1	200	3.3792
1000	1	500	7.02
1000	1	1000	12.329
1000	1	2000	21.785
1000	1	3000	30.433
1000	1	5000	45.838
1000	1	10000	77.533
1000	1	15000	103.14
1000	2	100	2.1213
1000	2	200	3.6858
1000	2	500	7.3467
1000	2	1000	12.329
1000	2	2000	20.733

1000	2	3000	28.062
1000	2	5000	40.51
1000	2	10000	64.259
1000	2	15000	81.902
1000	3	100	3.4074
1000	3	200	4.7258
1000	3	500	7.9016
1000	3	1000	12.328
1000	3	2000	19.692
1000	3	3000	25.926
1000	3	5000	36.186
1000	3	10000	54.738
1000	3	15000	68.228
1000	5	100	4.9436
1000	5	200	5.9162
1000	5	500	8.5531
1000	5	1000	12.329
1000	5	2000	18.463
1000	5	3000	23.459
1000	5	5000	31.272
1000	5	10000	44.879
1000	5	15000	54.094
2000	1	100	2.127
2000	1	200	3.8479
2000	1	500	8.0725
2000	1	1000	14.04
2000	1	2000	24.657
2000	1	3000	34.432
2000	1	5000	52.458
2000	1	10000	91.677

2000	1	15000	125.31
2000	2	100	2.3421
2000	2	200	4.2426
2000	2	500	8.7409
2000	2	1000	14.693
2000	2	2000	24.657
2000	2	3000	33.455
2000	2	5000	49.059
2000	2	10000	81.02
2000	2	15000	106.77
2000	3	100	5.0612
2000	3	200	6.8149
2000	3	500	10.623
2000	3	1000	15.803
2000	3	2000	24.656
2000	3	3000	32.41
2000	3	5000	45.876
2000	3	10000	72.372
2000	3	15000	92.593
2000	5	100	8.8757
2000	5	200	9.8873
2000	5	500	12.769
2000	5	1000	17.106
2000	5	2000	24.657
2000	5	3000	31.173
2000	5	5000	42.032
2000	5	10000	62.544
2000	5	15000	77.68
3000	1	100	2.2192
3000	1	200	4.0978

3000	1	500	8.7585
3000	1	1000	15.225
3000	1	2000	26.561
3000	1	3000	36.986
3000	1	5000	56.32
3000	1	10000	99.417
3000	1	15000	137.52
3000	2	100	2.4364
3000	2	200	4.5187
3000	2	500	9.5973
3000	2	1000	16.286
3000	2	2000	27.302
3000	2	3000	36.986
3000	2	5000	54.308
3000	2	10000	90.914
3000	2	15000	121.53
3000	3	100	6.3485
3000	3	200	8.588
3000	3	500	12.944
3000	3	1000	18.66
3000	3	2000	28.378
3000	3	3000	36.985
3000	3	5000	52.223
3000	3	10000	83.408
3000	3	15000	108.56
3000	5	100	12.789
3000	5	200	13.819
3000	5	500	16.79
3000	5	1000	21.4
3000	5	2000	29.649

3000	5	3000	36.986
3000	5	5000	49.75
3000	5	10000	74.805
3000	5	15000	93.816
5000	1	100	2.3061
5000	1	200	4.3606
5000	1	500	9.6198
5000	1	1000	16.896
5000	1	2000	29.346
5000	1	3000	40.649
5000	1	5000	61.643
5000	1	10000	108.93
5000	1	15000	152.17
5000	2	100	2.5223
5000	2	200	4.7942
5000	2	500	10.606
5000	2	1000	18.429
5000	2	2000	31.103
5000	2	3000	42.066
5000	2	5000	61.644
5000	2	10000	103.66
5000	2	15000	140.31
5000	3	100	8.2341
5000	3	200	11.481
5000	3	500	17.037
5000	3	1000	23.629
5000	3	2000	34.554
5000	3	3000	44.242
5000	3	5000	61.641
5000	3	10000	98.461

5000	3	15000	129.63
5000	5	100	20.619
5000	5	200	21.671
5000	5	500	24.718
5000	5	1000	29.581
5000	5	2000	38.551
5000	5	3000	46.805
5000	5	5000	61.643
5000	5	10000	92.315
5000	5	15000	117.29
10000	1	100	2.3809
10000	1	200	4.6121
10000	1	500	10.635
10000	1	1000	19.24
10000	1	2000	33.792
10000	1	3000	46.667
10000	1	5000	70.2
10000	1	10000	123.29
10000	1	15000	172.16
10000	2	100	2.5939
10000	2	200	5.0446
10000	2	500	11.71
10000	2	1000	21.213
10000	2	2000	36.858
10000	2	3000	50.159
10000	2	5000	73.467
10000	2	10000	123.29
10000	2	15000	167.27
10000	3	100	10.937
10000	3	200	16.468

10000	3	500	25.306
10000	3	1000	34.074
10000	3	2000	47.258
10000	3	3000	58.629
10000	3	5000	79.016
10000	3	10000	123.28
10000	3	15000	162.05
10000	5	100	40.175
10000	5	200	41.238
10000	5	500	44.378
10000	5	1000	49.436
10000	5	2000	59.162
10000	5	3000	68.371
10000	5	5000	85.531
10000	5	10000	123.29
10000	5	15000	155.86
15000	1	100	2.408
15000	1	200	4.7099
15000	1	500	11.096
15000	1	1000	20.489
15000	1	2000	36.56
15000	1	3000	50.688
15000	1	5000	76.125
15000	1	10000	132.81
15000	1	15000	184.93
15000	2	100	2.6193
15000	2	200	5.1385
15000	2	500	12.182
15000	2	1000	22.594
15000	2	2000	40.209

15000	2	3000	55.286
15000	2	5000	81.428
15000	2	10000	136.51
15000	2	15000	184.93
15000	3	100	12.378
15000	3	200	19.658
15000	3	500	31.743
15000	3	1000	42.94
15000	3	2000	58.268
15000	3	3000	70.887
15000	3	5000	93.3
15000	3	10000	141.89
15000	3	15000	184.92
15000	5	100	59.724
15000	5	200	60.796
15000	5	500	63.942
15000	5	1000	69.096
15000	5	2000	79.148
15000	5	3000	88.744
15000	5	5000	107
15000	5	10000	148.24
15000	5	15000	184.93

Για επιφάνεια 1739 τ.μ.:

Rho1	h	Rho2	R
100	1	100	1.1557
100	1	200	2.0349
100	1	500	4.2817
100	1	1000	7.2666
100	1	2000	11.766

100	1	3000	15.161
100	1	5000	20.235
100	1	10000	28.387
100	1	15000	33.662
100	2	100	1.1557
100	2	200	1.938
100	2	500	3.7967
100	2	1000	6.0565
100	2	2000	9.1464
100	2	3000	11.32
100	2	5000	14.383
100	2	10000	19.011
100	2	15000	21.901
100	3	100	1.1557
100	3	200	1.8463
100	3	500	3.4124
100	3	1000	5.1982
100	3	2000	7.5318
100	3	3000	9.1232
100	3	5000	11.303
100	3	10000	14.53
100	3	15000	16.498
100	5	100	1.1557
100	5	200	1.7366
100	5	500	2.9654
100	5	1000	4.2879
100	5	2000	5.8995
100	5	3000	6.9429
100	5	5000	8.3534
100	5	10000	10.375

100	5	15000	11.592
200	1	100	1.3249
200	1	200	2.3114
200	1	500	4.8981
200	1	1000	8.5633
200	1	2000	14.533
200	1	3000	19.395
200	1	5000	27.104
200	1	10000	40.47
200	1	15000	49.701
200	2	100	1.3875
200	2	200	2.3115
200	2	500	4.5861
200	2	1000	7.5933
200	2	2000	12.113
200	2	3000	15.508
200	2	5000	20.602
200	2	10000	28.767
200	2	15000	34.084
200	3	100	1.486
200	3	200	2.3113
200	3	500	4.3051
200	3	1000	6.8248
200	3	2000	10.396
200	3	3000	13.021
200	3	5000	16.797
200	3	10000	22.606
200	3	15000	26.336
200	5	100	1.6021
200	5	200	2.3114

200	5	500	3.9595
200	5	1000	5.9309
200	5	2000	8.5758
200	5	3000	10.378
200	5	5000	12.934
200	5	10000	16.707
200	5	15000	19.047
500	1	100	1.6165
500	1	200	2.7772
500	1	500	5.7786
500	1	1000	10.174
500	1	2000	17.886
500	1	3000	24.661
500	1	5000	36.333
500	1	10000	58.831
500	1	15000	75.803
500	2	100	1.7676
500	2	200	2.9466
500	2	500	5.7786
500	2	1000	9.69
500	2	2000	16.162
500	2	3000	21.538
500	2	5000	30.283
500	2	10000	45.732
500	2	15000	56.599
500	3	100	2.2396
500	3	200	3.2547
500	3	500	5.7784
500	3	1000	9.2316
500	3	2000	14.739

500	3	3000	19.145
500	3	5000	25.991
500	3	10000	37.659
500	3	15000	45.616
500	5	100	2.7721
500	5	200	3.6107
500	5	500	5.7785
500	5	1000	8.6831
500	5	2000	13.086
500	5	3000	16.437
500	5	5000	21.44
500	5	10000	29.498
500	5	15000	37.714
1000	1	100	1.8641
1000	1	200	3.2329
1000	1	500	6.6245
1000	1	1000	11.557
1000	1	2000	20.349
1000	1	3000	28.411
1000	1	5000	42.817
1000	1	10000	72.668
1000	1	15000	96.98
1000	2	100	2.0618
1000	2	200	3.5352
1000	2	500	6.9376
1000	2	1000	11.557
1000	2	2000	19.38
1000	2	3000	26.242
1000	2	5000	37.967
1000	2	10000	60.567

1000	2	15000	77.543
1000	3	100	3.2549
1000	3	200	4.4793
1000	3	500	7.43
1000	3	1000	11.557
1000	3	2000	18.463
1000	3	3000	24.355
1000	3	5000	34.125
1000	3	10000	51.983
1000	3	15000	65.105
1000	5	100	4.6357
1000	5	200	5.5441
1000	5	500	8.0106
1000	5	1000	11.557
1000	5	2000	17.366
1000	5	3000	22.137
1000	5	5000	29.655
1000	5	10000	42.88
1000	5	15000	51.89
2000	1	100	2.0847
2000	1	200	3.7283
2000	1	500	7.6938
2000	1	1000	13.249
2000	1	2000	23.115
2000	1	3000	32.202
2000	1	5000	48.982
2000	1	10000	85.635
2000	1	15000	117.24
2000	2	100	2.3018
2000	2	200	4.1236

2000	2	500	8.3485
2000	2	1000	13.875
2000	2	2000	23.115
2000	2	3000	31.293
2000	2	5000	45.861
2000	2	10000	75.935
2000	2	15000	100.37
2000	3	100	4.8681
2000	3	200	6.5098
2000	3	500	10.047
2000	3	1000	14.86
2000	3	2000	23.114
2000	3	3000	30.373
2000	3	5000	43.051
2000	3	10000	68.249
2000	3	15000	87.66
2000	5	100	8.3275
2000	5	200	9.2715
2000	5	500	11.963
2000	5	1000	16.021
2000	5	2000	23.114
2000	5	3000	29.271
2000	5	5000	39.595
2000	5	10000	59.31
2000	5	15000	73.99
3000	1	100	2.1867
3000	1	200	3.9983
3000	1	500	8.407
3000	1	1000	14.445
3000	1	2000	24.985

3000	1	3000	34.672
3000	1	5000	52.643
3000	1	10000	92.81
3000	1	15000	128.45
3000	2	100	2.4062
3000	2	200	4.4223
3000	2	500	9.2378
3000	2	1000	15.475
3000	2	2000	25.689
3000	2	3000	34.672
3000	2	5000	50.785
3000	2	10000	85.042
3000	2	15000	113.9
3000	3	100	6.1361
3000	3	200	8.2336
3000	3	500	12.29
3000	3	1000	17.603
3000	3	2000	26.642
3000	3	3000	34.67
3000	3	5000	48.941
3000	3	10000	78.406
3000	3	15000	102.37
3000	5	100	12.001
3000	5	200	12.971
3000	5	500	15.736
3000	5	1000	20.044
3000	5	2000	27.771
3000	5	3000	34.671
3000	5	5000	46.743
3000	5	10000	70.653

3000	5	15000	88.964
5000	1	100	2.284
5000	1	200	4.2872
5000	1	500	9.3207
5000	1	1000	16.165
5000	1	2000	27.772
5000	1	3000	38.279
5000	1	5000	57.786
5000	1	10000	101.74
5000	1	15000	142.05
5000	2	100	2.5022
5000	2	200	4.7251
5000	2	500	10.309
5000	2	1000	17.676
5000	2	2000	29.466
5000	2	3000	39.631
5000	2	5000	57.787
5000	2	10000	96.901
5000	2	15000	131.21
5000	3	100	8.0098
5000	3	200	11.076
5000	3	500	16.274
5000	3	1000	22.396
5000	3	2000	32.547
5000	3	3000	41.559
5000	3	5000	57.784
5000	3	10000	92.316
5000	3	15000	121.77
5000	5	100	19.349
5000	5	200	20.335

5000	5	500	23.179
5000	5	1000	27.721
5000	5	2000	36.107
5000	5	3000	43.837
5000	5	5000	57.785
5000	5	10000	86.832
5000	5	15000	110.68
10000	1	100	2.3687
10000	1	200	4.5681
10000	1	500	10.423
10000	1	1000	18.641
10000	1	2000	32.329
10000	1	3000	44.346
10000	1	5000	66.245
10000	1	10000	115.57
10000	1	15000	161.01
10000	2	100	2.583
10000	2	200	5.0044
10000	2	500	11.509
10000	2	1000	20.618
10000	2	2000	35.352
10000	2	3000	47.749
10000	2	5000	69.376
10000	2	10000	115.57
10000	2	15000	156.46
10000	3	100	10.731
10000	3	200	16.02
10000	3	500	24.34
10000	3	1000	32.549
10000	3	2000	44.793

10000	3	3000	55.361
10000	3	5000	74.3
10000	3	10000	115.57
10000	3	15000	151.86
10000	5	100	37.709
10000	5	200	38.697
10000	5	500	41.637
10000	5	1000	46.357
10000	5	2000	55.441
10000	5	3000	64.043
10000	5	5000	80.106
10000	5	10000	115.57
10000	5	15000	146.36
15000	1	100	2.3996
15000	1	200	4.6785
15000	1	500	10.934
15000	1	1000	19.992
15000	1	2000	35.236
15000	1	3000	48.494
15000	1	5000	72.226
15000	1	10000	124.93
15000	1	15000	173.36
15000	2	100	2.6118
15000	2	200	5.1103
15000	2	500	12.031
15000	2	1000	22.112
15000	2	2000	38.871
15000	2	3000	53.028
15000	2	5000	77.374
15000	2	10000	128.44

15000	2	15000	173.36
15000	3	100	12.2
15000	3	200	19.222
15000	3	500	30.68
15000	3	1000	41.168
15000	3	2000	55.453
15000	3	3000	67.189
15000	3	5000	88.013
15000	3	10000	133.21
15000	3	15000	173.35
15000	5	100	56.067
15000	5	200	57.059
15000	5	500	60.005
15000	5	1000	64.853
15000	5	2000	74.199
15000	5	3000	83.162
15000	5	5000	100.22
15000	5	10000	138.86
15000	5	15000	173.36

Για επιφάνεια 1907 τ.μ.:

Rho1	h	Rho2	R
100	1	100	1.1163
100	1	200	1.963
100	1	500	4.1307
100	1	1000	7.0239
100	1	2000	11.409
100	1	3000	14.735
100	1	5000	19.723
100	1	10000	27.795

100	1	15000	33.029
100	2	100	1.1163
100	2	200	1.8699
100	2	500	3.6694
100	2	1000	5.871
100	2	2000	8.8983
100	2	3000	11.044
100	2	5000	14.088
100	2	10000	18.669
100	2	15000	21.553
100	3	100	1.1163
100	3	200	1.784
100	3	500	3.307
100	3	1000	5.0558
100	3	2000	7.3551
100	3	3000	8.9291
100	3	5000	11.109
100	3	10000	14.306
100	3	15000	16.275
100	5	100	1.1163
100	5	200	1.6802
100	5	500	2.8809
100	5	1000	4.1823
100	5	2000	5.7781
100	5	3000	6.8122
100	5	5000	8.2153
100	5	10000	10.231
100	5	15000	11.445
200	1	100	1.2836
200	1	200	2.2327

200	1	500	4.724
200	1	1000	8.2615
200	1	2000	14.048
200	1	3000	18.779
200	1	5000	26.311
200	1	10000	39.446
200	1	15000	48.599
200	2	100	1.3448
200	2	200	2.2327
200	2	500	4.4255
200	2	1000	7.3388
200	2	2000	11.742
200	2	3000	15.063
200	2	5000	20.071
200	2	10000	28.177
200	2	15000	33.426
200	3	100	1.4374
200	3	200	2.2326
200	3	500	4.1618
200	3	1000	6.6141
200	3	2000	10.112
200	3	3000	12.692
200	3	5000	16.423
200	3	10000	22.218
200	3	15000	25.896
200	5	100	1.5466
200	5	200	2.2326
200	5	500	3.8339
200	5	1000	5.7619
200	5	2000	8.3646

200	5	3000	10.148
200	5	5000	12.679
200	5	10000	16.431
200	5	15000	18.762
500	1	100	1.5769
500	1	200	2.6941
500	1	500	5.5816
500	1	1000	9.815
500	1	2000	17.252
500	1	3000	23.801
500	1	5000	35.12
500	1	10000	57.046
500	1	15000	73.673
500	2	100	1.7267
500	2	200	2.8602
500	2	500	5.5816
500	2	1000	9.3496
500	2	2000	15.609
500	2	3000	20.83
500	2	5000	29.355
500	2	10000	44.491
500	2	15000	55.218
500	3	100	2.1748
500	3	200	3.1507
500	3	500	5.5814
500	3	1000	8.9199
500	3	2000	14.268
500	3	3000	18.567
500	3	5000	25.279
500	3	10000	36.776

500	3	15000	44.646
500	5	100	2.6771
500	5	200	3.4858
500	5	500	5.5815
500	5	1000	8.4008
500	5	2000	12.699
500	5	3000	15.99
500	5	5000	20.912
500	5	10000	28.891
500	5	15000	34.061
1000	1	100	1.8308
1000	1	200	3.1538
1000	1	500	6.4179
1000	1	1000	11.163
1000	1	2000	19.63
1000	1	3000	27.4
1000	1	5000	41.308
1000	1	10000	70.242
1000	1	15000	93.9
1000	2	100	2.0285
1000	2	200	3.4534
1000	2	500	6.7238
1000	2	1000	11.163
1000	2	2000	18.699
1000	2	3000	25.33
1000	2	5000	36.695
1000	2	10000	58.711
1000	2	15000	75.318
1000	3	100	3.1723
1000	3	200	4.3496

1000	3	500	7.1873
1000	3	1000	11.163
1000	3	2000	17.84
1000	3	3000	23.554
1000	3	5000	33.071
1000	3	10000	50.56
1000	3	15000	63.465
1000	5	100	4.4792
1000	5	200	5.3542
1000	5	500	7.7332
1000	5	1000	11.163
1000	5	2000	16.802
1000	5	3000	21.453
1000	5	5000	28.81
1000	5	10000	41.824
1000	5	15000	50.741
2000	1	100	2.0604
2000	1	200	3.6616
2000	1	500	7.4909
2000	1	1000	12.836
2000	1	2000	22.327
2000	1	3000	31.073
2000	1	5000	47.24
2000	1	10000	82.616
2000	1	15000	113.23
2000	2	100	2.2787
2000	2	200	4.057
2000	2	500	8.1373
2000	2	1000	13.448
2000	2	2000	22.327

2000	2	3000	30.199
2000	2	5000	44.255
2000	2	10000	73.39
2000	2	15000	97.154
2000	3	100	4.7638
2000	3	200	6.3446
2000	3	500	9.746
2000	3	1000	14.375
2000	3	2000	22.326
2000	3	3000	29.336
2000	3	5000	41.619
2000	3	10000	66.142
2000	3	15000	85.114
2000	5	100	8.0488
2000	5	200	8.9584
2000	5	500	11.552
2000	5	1000	15.466
2000	5	2000	22.326
2000	5	3000	28.296
2000	5	5000	38.339
2000	5	10000	57.62
2000	5	15000	72.047
3000	1	100	2.168
3000	1	200	3.942
3000	1	500	8.2153
3000	1	1000	14.032
3000	1	2000	24.17
3000	1	3000	33.49
3000	1	5000	50.795
3000	1	10000	89.504

3000	1	15000	123.92
3000	2	100	2.3887
3000	2	200	4.3676
3000	2	500	9.0407
3000	2	1000	15.043
3000	2	2000	24.855
3000	2	3000	33.49
3000	2	5000	49.006
3000	2	10000	82.096
3000	2	15000	110.08
3000	3	100	6.0205
3000	3	200	8.0433
3000	3	500	11.945
3000	3	1000	17.053
3000	3	2000	25.749
3000	3	3000	33.489
3000	3	5000	47.279
3000	3	10000	75.857
3000	3	15000	99.213
3000	5	100	11.601
3000	5	200	12.535
3000	5	500	15.2
3000	5	1000	19.351
3000	5	2000	26.814
3000	5	3000	33.489
3000	5	5000	45.2
3000	5	10000	68.503
3000	5	15000	86.429
5000	1	100	2.2712
5000	1	200	4.2449

5000	1	500	9.154
5000	1	1000	15.769
5000	1	2000	26.941
5000	1	3000	37.048
5000	1	5000	55.816
5000	1	10000	98.151
5000	1	15000	137
5000	2	100	2.4905
5000	2	200	4.6853
5000	2	500	10.143
5000	2	1000	17.267
5000	2	2000	28.602
5000	2	3000	38.365
5000	2	5000	55.817
5000	2	10000	93.497
5000	2	15000	126.65
5000	3	100	7.8865
5000	3	200	10.854
5000	3	500	15.861
5000	3	1000	21.748
5000	3	2000	31.507
5000	3	3000	40.177
5000	3	5000	55.814
5000	3	10000	89.2
5000	3	15000	117.77
5000	5	100	18.705
5000	5	200	19.648
5000	5	500	22.396
5000	5	1000	26.771
5000	5	2000	34.858

5000	5	3000	42.324
5000	5	5000	55.815
5000	5	10000	84.009
5000	5	15000	107.27
10000	1	100	2.3616
10000	1	200	4.5424
10000	1	500	10.302
10000	1	1000	18.308
10000	1	2000	31.538
10000	1	3000	43.112
10000	1	5000	64.179
10000	1	10000	111.63
10000	1	15000	155.36
10000	2	100	2.5766
10000	2	200	4.981
10000	2	500	11.393
10000	2	1000	20.285
10000	2	2000	34.534
10000	2	3000	46.461
10000	2	5000	67.238
10000	2	10000	111.63
10000	2	15000	151
10000	3	100	10.617
10000	3	200	15.773
10000	3	500	23.819
10000	3	1000	31.723
10000	3	2000	43.496
10000	3	3000	53.657
10000	3	5000	71.873
10000	3	10000	111.63

10000	3	15000	146.68
10000	5	100	36.458
10000	5	200	37.41
10000	5	500	40.244
10000	5	1000	44.792
10000	5	2000	53.542
10000	5	3000	61.835
10000	5	5000	77.332
10000	5	10000	111.63
10000	5	15000	141.48
15000	1	100	2.3946
15000	1	200	4.66
15000	1	500	10.84
15000	1	1000	19.71
15000	1	2000	34.507
15000	1	3000	47.307
15000	1	5000	70.157
15000	1	10000	120.85
15000	1	15000	167.45
15000	2	100	2.6074
15000	2	200	5.0938
15000	2	500	11.944
15000	2	1000	21.838
15000	2	2000	38.131
15000	2	3000	51.8
15000	2	5000	75.217
15000	2	10000	124.27
15000	2	15000	167.45
15000	3	100	12.1
15000	3	200	18.98

15000	3	500	30.102
15000	3	1000	40.217
15000	3	2000	53.962
15000	3	3000	65.244
15000	3	5000	85.264
15000	3	10000	128.75
15000	3	15000	167.44
15000	5	100	54.213
15000	5	200	55.164
15000	5	500	58.004
15000	5	1000	62.677
15000	5	2000	71.684
15000	5	3000	80.313
15000	5	5000	96.757
15000	5	10000	134.07
15000	5	15000	167.45