



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

## Εκτίμηση τιμής συστημάτων γείωσης σε ανεμογεννήτριες

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Παναγιώτης Χ. Λιάγκας

**Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

**Επιβλέπων :** Κατερίνα Δαμιανάκη  
Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021





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

**Εκτίμηση τιμής συστημάτων γείωσης σε ανεμογεννήτριες**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Θεόδωρος Παναγιώτης Χ. Λιάγκας**

**Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

**Επιβλέπων :** Κατερίνα Δαμιανάκη  
Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13<sup>η</sup> Ιουλίου 2021.

.....  
Ιωάννης Γκόνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Φραγκίσκος Τοπαλής  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021



.....  
Θεόδωρος Παναγιώτης Χ. Λιάγκας

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

Copyright © Θεόδωρος Παναγιώτης Λιάγκας, 2021.

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.



*Στους γονείς μου, Χαράλαμπο και Κυριακή,  
στην αδερφή μου, Ευαγγελία και  
στον άνθρωπό μου, την Πάρασκευή.*





# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσονται πρωτότυπες στρατηγικές και νέα μαθηματικά μοντέλα σε θέματα γείωσης ανεμογεννητριών (Α/Γ). Αρχικά, πραγματοποιείται μία σύντομη ανάλυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), όπου παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά τους, καθώς και η ανάπτυξή τους τα τελευταία έτη. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στο ελληνικό ενεργειακό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής και στη συσχέτιση μεταξύ ΑΠΕ και ευστάθειας των ΑΠΕ, ενώ περιγράφονται συνοπτικά οι διάφορες μορφές ΑΠΕ.

Ακολούθως, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αιολική ενέργεια και τις Α/Γ. Περιγράφεται το αιολικό δυναμικό σε Ελλάδα και Ευρώπη, καθώς και οι κύριες κατηγορίες Α/Γ. Παράλληλα, αναλύονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, που διέπουν μία Α/Γ, καθώς και οι κατηγορίες συντήρησης της, ενώ περιγράφεται και η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου.

Κατόπιν, γίνεται μία ανασκόπηση στα θέματα των γειώσεων. Παρουσιάζονται ορισμένες βασικές έννοιες και ορισμοί, που είναι χρήσιμοι για την κατανόηση και τη συνέχεια της εργασίας. Έπειτα γίνεται εκτενής αναφορά στα εδάφη και ιδίως στην ειδική αντίσταση του εδάφους, στους τρόπους πειραματικής μέτρησής της, στα μοντέλα προσομοίωσης των εδαφών και στην ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης.

Στη συνέχεια, δίνεται βάση στη σημαντικότητα του ορθού σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης, αναλύοντας τους βασικούς παράγοντες, που διέπουν τη σχεδίαση του, ενώ σημαντική αναφορά γίνεται και στα πλέγματα γείωσης, περιγράφοντας το σχεδιασμό και τη σύνδεσή τους.

Υστερα, αναλύονται τα συστήματα γείωσης των Α/Γ. Περιγράφεται εκτενώς η ανάλυση και ο σχεδιασμός των συστημάτων γείωσης για Α/Γ και παρουσιάζονται συγκεκριμένα συστήματα γείωσης, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στις προσομοιώσεις. Παρουσιάζεται η συχνότητα του κεραυνικού πλήγματος Α/Γ, όπως και η αντικεραυνική τους προστασία. Τέλος, απεικονίζεται η διάταξη του συστήματος γείωσης μίας Α/Γ, παραθέτοντας και εικόνες, λήψη των οποίων έγινε κατά την εξέλιξη του έργου.

Ακολουθεί μαθηματική ανασκόπηση στη μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης για πολλές μεταβλητές. Αρχικά, περιγράφεται το πρόβλημα και εξηγείται σύντομα η διαδικασία της εύρεσης ενός μη γραμμικού μαθηματικού μοντέλου, που περιγράφει ένα φυσικό πρόβλημα. Ταυτόχρονα, το πρόβλημα τυποποιείται μαθηματικά και στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος, που γίνεται η προσαρμογή των τεσσάρων μαθηματικών μοντέλων στις μετρήσεις. Τέλος, γίνεται αναφορά στη διαδικασία ποσοτικοποίησης της ποιότητας της προσαρμογής με στόχο να διαπιστωθεί, αν οι νέες αυτές μαθηματικές σχέσεις και η προσαρμογή τους ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις που έχουν τεθεί.

Επιπροσθέτως αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά του λογισμικού *CDEGS* και των επιλυτών *MALZ* και *MALT*, που θα χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις της αντίστασης γείωσης των Α/Γ. Στη συνέχεια, εξηγείται αναλυτικά η διαδικασία της εισαγωγής των δεδομένων στο λογισμικό, της προσομοίωσης καθώς και της εξαγωγής των αποτελεσμάτων, δηλαδή της αντίστασης γείωσης των Α/Γ ανάλογα με τον τύπο του συστήματος γείωσης, που χρησιμοποιήθηκε.

Επιπλέον, περιγράφεται η μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για την εύρεση ενός γενικού μαθηματικού μοντέλου, το οποίο να ισχύει για τους τρεις πρώτους τύπους γείωσης, με εξαιρετική ακρίβεια, μεταβάλλοντας μόνο τους σταθερούς όρους του μοντέλου κατά περίπτωση. Με βάση την παραπάνω διαδικασία, δημιουργήθηκαν δύο νέες μαθηματικές σχέσεις με περισσότερες παραμέτρους εισόδου. Στη συνέχεια, εξηγείται αναλυτικά και ανά περίπτωση η διαδικασία της προσαρμογής των προσομοιώσεων από κάθε τύπο γείωσης στην κάθε εξίσωση, προκειμένου να υπολογισθούν οι παράμετροι του εκάστοτε μαθηματικού μοντέλου.

Τέλος, γίνεται μνεία στην ερευνητική συμβολή της εργασίας, σε πιθανές μελλοντικές προτάσεις της και συζητώνται τα συμπεράσματά της. Διακρίνεται, έτσι, η συμβολή της εργασίας στη διευκόλυνση των μελετών γείωσης Α/Γ και στην πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης πριν την εγκατάσταση μιας Α/Γ.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Συστήματα Γείωσης, Γείωση Ανεμογεννήτριας, Αντίσταση Γείωσης, Ειδική Αντίσταση Εδάφους, Διοστρωματικό Μοντέλο Εδάφους, MATLAB, Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση, CDEGS, MALZ, MALT

# ABSTRACT

The main scope of this diploma thesis is the development of original strategies and new mathematical models in wind turbine (W/T) grounding. Initially, a brief analysis of Renewable Energy Sources (RES) is performed, which lists some of their characteristics, as well as their development in recent years. Furthermore, there is a reference to the Greek energy mix of electricity generation and the correlation between RES and stability of RES, while the various forms of RES are briefly described.

Subsequently, special emphasis is given to wind energy and W/T. The wind potential in Greece and Europe is described, as well as the main categories of W/T. In parallel, the functional characteristics that govern a W/T are analyzed, as well as its maintenance categories, while the operation of a wind farm is described.

Additionally, a review of the grounding issues is made. Key concepts and definitions are thoroughly presented that are useful for understanding and continuing the work. Extensive reference is made to soils, soil resistivity, methods of experimental measurement, soil simulation models and to the interpretation of resistivity measurements.

Furthermore, it is important to emphasize the correct design of an earthing system, analyzing the basic factors that govern its design, while important reference is made to the earthing grids, describing their design and connection.

Moreover, the grounding systems of the W/T are analyzed. The analysis and design of grounding systems for W/T are described in detail and specific grounding systems are presented for further use in the simulations. The frequency of lightning strike W/T is presented, as well as their lightning protection. Finally, the layout of the grounding system of a W/T is illustrated, listing images taken during the progress of the project.

Following the above, there is a mathematical review of regression analysis for many variables. First, the problem is described and the process of finding a nonlinear mathematical model, describing a physical problem, is briefly explained. At the same time, the problem is mathematically standardized and then the way in which the four mathematical models are adapted to the measurements is analyzed. Finally, reference is made to the process of quantifying the quality of adaptation in order to determine whether these new mathematical relations and their adaptation meet the requirements that have been set.

In addition, there is a reference to the main features of the *CDEGS* software, such as *MALZ* and *MALT*, which will be used to simulate the ground resistance of the W/T. Next, the process of entering the data in the software, the simulation as well as the output of the results is explained in detail. Of course, the output is the value of the ground resistance of the W/T depending on the type of grounding system.

Furthermore, there is a precise description of the methodology followed in order to find a general mathematical model which applies to the first three types of grounding. Changing only the fixed terms of the model on a case-by-case basis. Based on the above procedure, two new mathematical models with more input parameters were created. Then, the process of adapting the simulations from each type of ground to each equation is explained in detail and in each case, to calculate the parameters of each mathematical model.

Finally, there is a reference to the contribution of the research and its possible future applications and its practical results. Therefore, the contribution of the research in facilitating the grounding studies and predicting the grounding resistance before the installation of a RES unit is evident.

## **KEY WORDS**

Grounding Systems, Wind Turbine Grounding, Ground Resistance, Ground Resistivity, Two-Layer Soil Model, MATLAB, Regression Analysis, CDEGS, MALZ, MALT

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των σπουδών μου στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Μέσα σε ένα διάστημα 5 ετών επιτεύχθηκαν δύσκολοι στόχοι, κατακτήθηκαν γνώσεις και εμπειρίες, ενώ κατάφερα να φέρω εις πέρας ένα εκ των μεγάλων ονείρων μου, τελειώνοντας τις σπουδές μου σε αυτή τη Σχολή.

Στην προσπάθεια της επιτυχούς περάτωσης των σπουδών μου έλαβα αμέριστη καθοδήγηση και ιδίως στήριξη από πολλούς ανθρώπους, τους οποίους θα έχω για πάντα στο νου και τις αναμνήσεις μου και στους οποίους χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Γκόνου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την εμπιστοσύνη, που μου έδειξε, και τη δυνατότητα να ασχοληθώ ερευνητικά με ένα τόσο ενδιαφέρον και καιριο θέμα. Τον ευχαριστώ, ακόμη, από καρδιάς για την έμπνευση και όλες τις γνώσεις, που μου μετέδωσε, μέσω της διδασκαλίας του, αλλά και για την ευρύτερη καθοδήγηση και στήριξή του τα τελευταία έτη. Η αδιάκοπη ενθάρρυνση, καθώς και οι πολύτιμες συμβουλές του, από τα πρώτα κιάλας έτη των σπουδών μου, υπήρξε κινητήρια δύναμη της προσπάθειάς μου.

Ευχαριστώ, επίσης, τον κ. Φραγκίσκο Τοπαλή, Καθηγητή ΕΜΠ, για τη διδασκαλία του πάνω στους θεμελιώδεις τομείς των Υψηλών Τάσεων και της Τεχνολογίας Φωτισμού.

Επιπροσθέτως, ευχαριστώ τον κ. Σταύρο Παπαθανασίου, Καθηγητή ΕΜΠ, για τη διδασκαλία του, την όρεξή του και τη σημαντική συμβολή του στη θεμελίωση του προσωπικού μου ενδιαφέροντος στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Πολλές ευχαριστίες, οφείλω ιδιαίτερος στην κ. Κατερίνα Λαμιανάκη, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, για την άψογη συνεργασία μας και την ειλικρινή διάθεσή της να βοηθήσει σε οποιαδήποτε δυσκολία παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Την ευχαριστώ για την ουσιαστική και διαρκή βοήθεια, που μου παρείχε πρόθυμα και ακούραστα καθ' όλη τη διάρκεια. Της εύχομαι, πραγματικά, τα καλύτερα στη συνέχεια της ακαδημαϊκής και επαγγελματικής της πορείας.

Ακόμα, ευχαριστώ βαθύτατα τους γονείς μου για όλη την αγάπη και αδιάλειπτη στήριξή τους από τη μικρή μου ηλικία μέχρι σήμερα. Την αδερφή μου, Ευαγγελία, φοιτήτρια Φαρμακευτικής του ΕΚΠΑ, με την οποία περάσαμε μαζί τα τελευταία πέντε όμορφα έτη και στην οποία εύχομαι επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών της. Την αρραβωνιαστικιά μου, Παρασκευή, η οποία με στηρίζει συνεχώς σε κάθε μου βήμα και με βοηθάει να γίνω η καλύτερη εκδοχή του εαυτού μου, όπως και την οικογένειά της, για την αγάπη τους. Θα ήθελα να ευχαριστήσω, ακόμα, τους φίλους μου για τις όμορφες αναμνήσεις και την πραγματική τους αγάπη και στήριξη. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Θεό, που είναι δίπλα μου και με βοηθάει σε κάθε βήμα, φωτίζοντάς μου το δρόμο.

Θεόδωρος Παναγιώτης Λιάγκας  
Ιούλιος 2021



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	i
ABSTRACT .....	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	vii

Πρόλογος .....	xi
----------------	----

<b>Κεφάλαιο 1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....</b>	<b>1</b>
--	----------

1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Χαρακτηρικά Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας .....	1
1.3 Διεθνής Ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας .....	2
1.4 Ενεργειακή Πολιτική σε Ευρώπη και Ελλάδα .....	6
1.5 Ελληνικό Ενεργειακό Μείγμα Ηλεκτροπαραγωγής .....	8
1.6 Συσχέτιση ΑΠΕ & Ευστάθειας ΣΗΕ .....	8
1.7 Αιολική Ενέργεια .....	11
1.8 Ηλιακή Ενέργεια & Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο .....	11
1.9 Υδροηλεκτρική Ενέργεια .....	17
1.10 Βιομάζα & Βιοενέργεια .....	20
1.11 Γεωθερμία .....	21
1.12 Κυματική Ενέργεια .....	23

<b>Κεφάλαιο 2: Αιολική Ενέργεια &amp; Ανεμογεννήτριες .....</b>	<b>25</b>
---	-----------

2.1 Εισαγωγή .....	25
2.2 Αιολικό Δυναμικό στην Ευρώπη .....	26
2.3 Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα .....	28
2.4 Λειτουργία Ανεμογεννητριών .....	32
2.5 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών .....	33
2.6 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά & Συντήρηση Ανεμογεννητριών .....	36
2.7 Λειτουργία Αιολικού Πάρκου .....	38

<b>Κεφάλαιο 3: Συστήματα Γείωσης .....</b>	<b>39</b>
--	-----------

3.1 Εισαγωγή .....	39
3.2 Ορολογία Συστημάτων Γείωσης .....	39
3.3 Βασικές Ένοιες .....	42
3.4 Είδη & Μέθοδοι Γειώσεων .....	44
3.5 Ηλεκτρόδιο Γείωσης .....	45
3.6 Ειδική Αντίσταση Εδάφους .....	45
3.7 Μετρήσεις Ειδικής Αντίστασης Εδάφους .....	47
3.8 Ερμηνεία Μετρήσεων Ειδικής Αντίστασης Εδάφους .....	51
3.8.1 Υπόθεση Ομοιόρφου Εδάφους .....	52

3.8.2	Υπόθεση Ανομοιόρφου Εδάφους .....	53
3.9	Ασφάλεια Συστημάτων Γείωσης .....	53
3.10	Ανεκτό Όριο Ρεύματος από το Ανθρώπινο Σώμα .....	57
3.11	Τυχαίο Κύκλωμα Γείωσης .....	60
<b>Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης .....</b>		<b>67</b>
4.1	Εισαγωγή .....	67
4.2	Βασικές Παράμετροι στο Σχεδιασμό Συστημάτων Γείωσης .....	67
4.3	Πλέγματα Γείωσης.....	68
4.4	Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης με Πλέγμα .....	69
4.5	Σύνδεση Πλεγμάτων Γείωσης .....	70
4.6	Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης σε Δύσκολες Συνθήκες .....	71
4.7	Επικινδυνότητα Κεραυνών & Αντικεραυνική Προστασία .....	72
<b>Κεφάλαιο 5: Συστήματα Γείωσης Ανεμογεννητριών .....</b>		<b>75</b>
5.1	Εισαγωγή .....	75
5.2	Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης Αιολικού Πάρκου .....	76
5.3	Κατασκευή Συστημάτων Γείωσης Ανεμογεννήτριας .....	78
5.4	Διαφοροποιήσεις των Συστημάτων Γείωσης Ανεμογεννητριών .....	79
5.5	Συχνότητα Κεραυνικού Πλήγματος Ανεμογεννητριών .....	86
5.6	Αντικεραυνική Προστασία Ανεμογεννητριών .....	91
5.7	Απεικόνιση Συστημάτων Γείωσης Ανεμογεννητριών .....	96
<b>Κεφάλαιο 6: Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση .....</b>		<b>101</b>
6.1	Εισαγωγή .....	101
6.2	Μη Γραμμικά Μοντέλα .....	102
6.3	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων για Μη Γραμμικά Μοντέλα .....	103
6.4	Εκτίμηση Παραμέτρων Μη Γραμμικού Συστήματος .....	105
6.4.1	Μέθοδος Γραμμικοποίησης .....	106
6.4.2	Μέθοδος της πιο Ταχείας Καθόδου .....	108
6.4.3	Μέθοδος Συμβιβασμού του <i>Marquardt</i> .....	110
6.4.4	Άλλες Μέθοδοι .....	110
6.5	Διαστήματα Εμπιστοσύνης .....	111
6.6	Σημαντικότητα Αρχικών Τιμών & Αρχικές Τιμές <i>θ<sub>0</sub></i> .....	112
6.7	Ανθεκτική Παλινδρόμηση .....	112
6.8	Καταλληλότητα Προσαρμογής .....	113
6.9	Προσαρμογή Γραμμικής Μεταβολής στη Μελέτη μας .....	116
6.9.1	Μαθηματική Έκφραση Γειώσεων Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ .....	116
6.9.2	Μαθηματική Έκφραση Γείωσης Ανεμογεννητριών Δ Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους .....	118
6.9.3	Μαθηματική Έκφραση Γείωσης Ανεμογεννητριών Δ Μοντέλου Εμβαδών- Μηκών Δύο Στρωμάτων .....	119
<b>Κεφάλαιο 7: Προσομοιώσεις &amp; Επεξεργασία Μετρήσεων .....</b>		<b>121</b>
7.1	Εισαγωγή .....	121
7.2	Επιλύτης <i>MALZ</i> .....	123



7.3	Προσομοίωση με το Λογισμικό <i>CDEGS</i> .....	124
7.3.1	Εισαγωγή Δεδομένων στο Λογισμικό <i>CDEGS</i> .....	125
7.3.2	Πραγματοποίηση Προσομοίωσης & Εξαγωγή Αποτελεσμάτων .....	125
7.4	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με Επιλύτη <i>MALZ</i> .....	127
7.5	Επιλύτης <i>MALT</i> .....	145
7.6	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με Επιλύτη <i>MALT</i> .....	148
<b>Κεφάλαιο 8: Μέθοδοι Βελτιστοποίησης των Αποτελεσμάτων με Χρήση του Λογισμικού <i>MATLAB</i> .....</b>		<b>203</b>
8.1	Εισαγωγή .....	203
8.2	Μεθοδολογία για τις Γειώσεις Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ .....	204
8.3	Προσαρμογή στο Μοντέλο της Γείωσης Ανεμογεννητριών Α .....	208
8.4	Προσαρμογή στο Μοντέλο της Γείωσης Ανεμογεννητριών Β .....	212
8.5	Προσαρμογή στο Μοντέλο της Γείωσης Ανεμογεννητριών Γ .....	218
8.6	Μεθοδολογία για τη Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ & Προσαρμογή Μοντέλων .....	222
8.7	Κώδικας <i>MATLAB</i> στη Μελέτη μας .....	231
8.7.1	Γειώσεις Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ .....	231
8.7.2	Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους .....	231
8.7.3	Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων ...	231
<b>Κεφάλαιο 9: Επίλογος .....</b>		<b>233</b>
9.1	Σύνοψη .....	233
9.2	Συμπεράσματα .....	234
9.2.1	Γειώσεις Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ .....	234
9.2.2	Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους .....	236
9.2.3	Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων ...	238
9.3	Μελλοντικές Προτάσεις για Έρευνα .....	240
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>		<b>243</b>



# Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της δομής του εδάφους στην τιμή της αντίστασης γείωσης σε τυπικά συστήματα γείωσης, που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών.

Μελετώνται τέσσερα διαφορετικά συστήματα γείωσης σε ανεμογεννήτριες. Χρησιμοποιώντας λογισμικό προσομοίωσης μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης γείωσης για διάφορους τύπους εδαφών σε μοντέλο διστρωματικού εδάφους. Επιπρόσθετα, επιχειρείται να δοθούν προσεγγιστικοί μαθηματικοί τύποι για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση με την ειδική αντίσταση των δύο στρωμάτων του διστρωματικού εδάφους, καθώς και με το βάθος του πρώτου στρώματος. Στους τύπους αυτούς προσαρμόζονται νέα μαθηματικά μοντέλα με περισσότερες παραμέτρους με στόχο ξανά την εύρεση της αντίστασης γείωσης.

Η χρησιμότητα μιας τέτοιας μελέτης είναι ιδιαίτερα σημαντική. Με την ολοκλήρωσή της, ο κάθε μελετητής έργων ανεμογεννητριών, δίνοντας ως είσοδο την αντίσταση του εδάφους ή/και άλλες παραμέτρους, καθώς και τον τύπο της εγκατάστασης, θα μπορεί να γνωρίζει με ακρίβεια και εκ των προτέρων, αν η αντίσταση γείωσης για την εγκατάστασή του είναι αποδεκτή ή αν θα πρέπει να γίνουν επιπλέον παρεμβάσεις προς μείωση της αντίστασης γείωσης.



# Κεφάλαιο 1

## Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

### 1.1 Εισαγωγή

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας, που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες και υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια, τα εκλυόμενα αέρια από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα βιοαέρια.

### 1.2 Χαρακτηριστικά Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, «φιλικές» προς το περιβάλλον, που δεν αποδесμεύουν διοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες και άλλα ραδιενεργά ή τοξικά απόβλητα. Το γεγονός αυτό καθιστά τις ΑΠΕ μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων, που αντιμετωπίζει η γη. Εντούτοις πέρα από πλεονεκτήματα, οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα.

#### Πλεονέκτημα των ΑΠΕ [1]:

- Συμβολή στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας μειώνει τη συμμετοχή άλλων μορφών ενέργειας, που εκπέμπουν καυσαέρια και αέρια θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Τα πιο συνήθη αέρια του θερμοκηπίου είναι  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $HFC_5$ ,  $PFC_5$ ,  $SF_6$ .
- Συνεισφορά στην αναζωογόνηση οικονομικά υποβαθμισμένων περιοχών με τη προσέλκυση επενδύσεων και τη δημιουργία θέσεων εργασίας σχετικές με τις ΑΠΕ.
- Συμβολή στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικές, μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ορυκτά καύσιμα.
- Συνεισφορά στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού και της ενεργειακής ανεξαρτησίας σε εθνικό επίπεδο, μιας και κάθε κράτος έχει τη δυνατότητα να παράξει ενέργεια μέσω ΑΠΕ.

- Αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, αφού οι μονάδες παραγωγής ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από υψηλή γεωγραφική διασπορά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό επίπεδο και τη δυνατότητα ανακούφισης των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας από τα μεγάλα κέντρα παραγωγής στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης. Στην Ελλάδα, τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση της Πελοποννήσου.

### **Μειονεκτήματα των ΑΠΕ [1]:**

- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, ηλιακής και της υδροηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής, στην οποία εγκαθίστανται οι ΑΠΕ.
- Ο συντελεστής απόδοσης των μέσων συλλογής ΑΠΕ είναι χαμηλός, για αυτό μέχρι στιγμής χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές.
- Η δυνατότητα παραγωγής των ΑΠΕ δεν είναι απόλυτα προβλέψιμη βραχυπρόθεσμα. Συνεπώς, δεν αποδίδουν πάντα τις ποσότητες ενέργειας, τις οποίες έχουν δεσμευθεί να δώσουν.
- Το κόστος παραγωγής ανά *KWh* είναι υψηλότερο σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, ιδίως στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών. Ταυτόχρονα, παρά το υψηλό κόστος παραγωγής, ο πάροχος ενέργειας βάσει πολιτικής, εντάσσει κατά προτεραιότητα τις ΑΠΕ στο σύστημα, όταν αυτές μπορούν να παράξουν ενέργεια.
- Για τους λόγους 3 και 4 γίνεται σαφές, ότι άλλες μονάδες βάσης λειτουργούν ως εφεδρικές και αρκετές φορές κάτω από την ονομαστική δυνατότητα παραγωγής. Οι μονάδες αυτές λειτουργούν υπό συνθήκες, που τις καθιστούν οικονομικά βιώσιμες. Όλα τα παραπάνω αναγκάζουν τον πάροχο να χρεώνει τους καταναλωτές με τέλος ΑΠΕ.

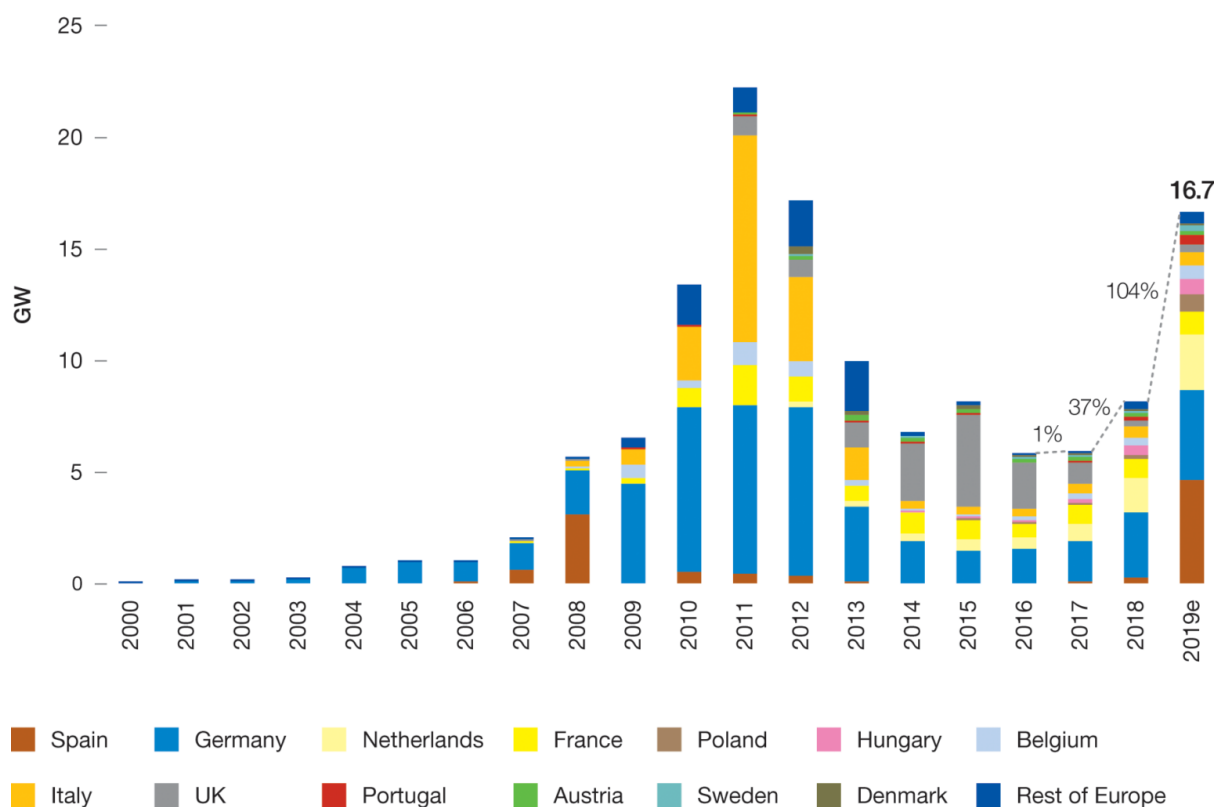
Όλα τα ανωτέρω χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, το περιβαλλοντικό κίνημα των τελευταίων δεκατιών, καθώς και η ανεπτυγμένη οικολογική συνείδηση των τελευταίων ετών έχουν κάνει τις ΑΠΕ ιδιαίτερα δημοφιλείς. Ταυτόχρονα, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει αναγνωρίσει τις ΑΠΕ ως ενέργεια του μέλλοντος και έδωσε κίνητρα για την ανάπτυξη πάρκων ΑΠΕ στην Ευρώπη.

## **1.3 Διεθνής Ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Ο χώρος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει υποστεί εκ βάθρων μεταβολές σε διεθνές επίπεδο τις τελευταίες δεκαετίες. Κυρίαρχο χαρακτηριστικό των αλλαγών αυτών αποτελεί η μαζική διεξόδυση των ΑΠΕ στα επιμέρους δίκτυα.

Η επείγουσα ανάγκη για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, όπως και η σταδιακή μείωση των συνολικών αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων έχουν στρέψει την προσοχή της διεθνούς κοινότητας σε εναλλακτικούς τρόπους αξιοποίησης φυσικών πόρων για παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι μέθοδοι αυτοί λειτουργούν αδιάκοπα, χωρίς να υπάρχει ανησυχία μελλοντικής εξάλειψης των αξιοποιούμενων αυτών πόρων, και με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον.

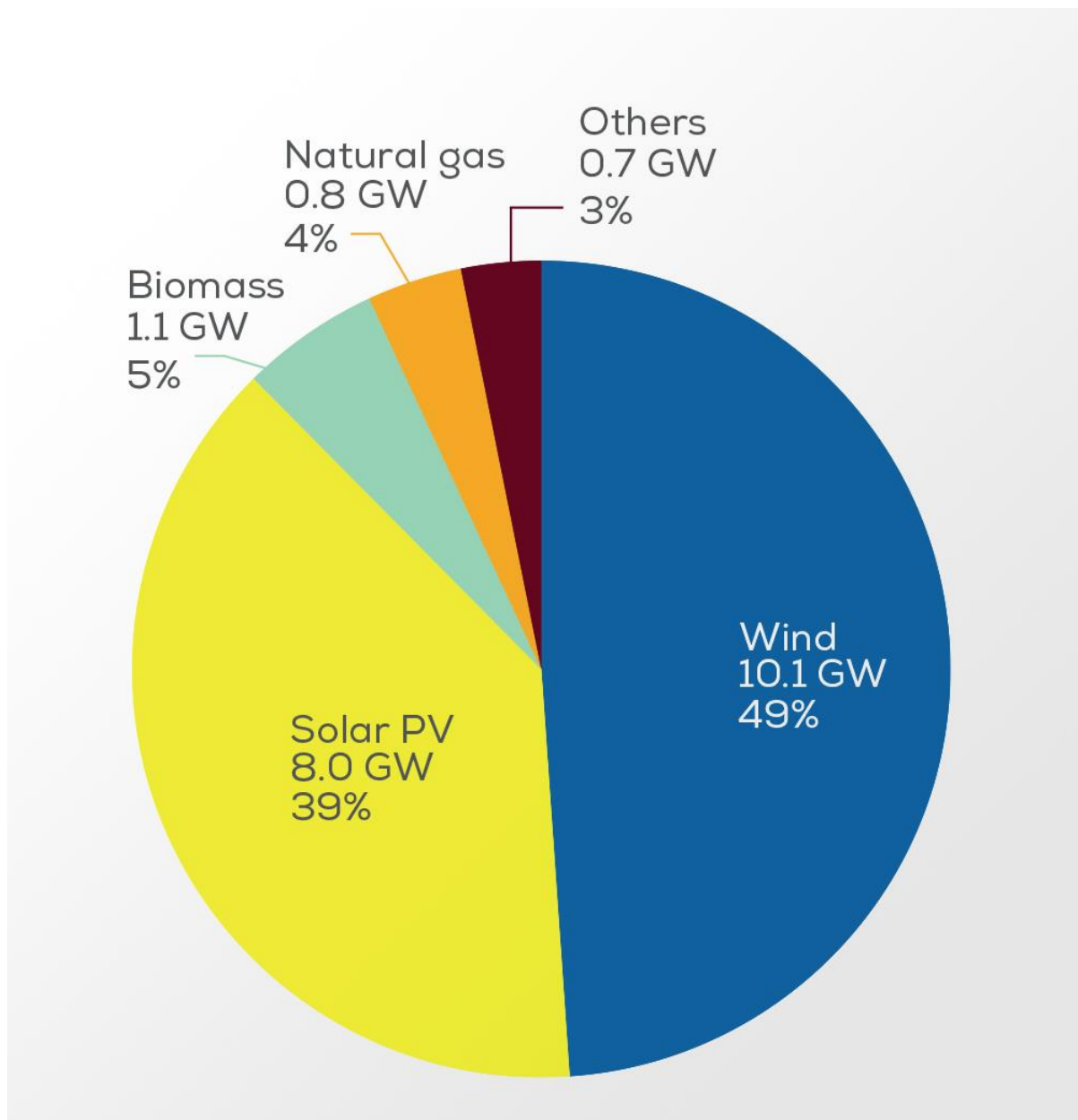
Οι φυσικοί αυτοί πόροι εκθέτονται συνοπτικά κυρίως στον άνεμο και τον ήλιο, που παρέχουν αιολική και ηλιακή ενέργεια αντίστοιχα, μέχρι να μετατραπούν τελικώς σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο ρυθμός διείσδυσης των τεχνολογιών αυτών στα ενεργειακά συστήματα παρουσιάζει σημαντική αύξηση τα τελευταία περίπου δέκα χρόνια. Παρακάτω απεικονίζεται η εξέλιξη στην αγορά των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο από τη *SolarPower Europe* [2]:



**Σχήμα 1.1:** Εγκαθισταμένη Φ/Β ισχύς σε χώρες της Ευρώπης για τα έτη 2000-2019 [2]

Όπως παρουσιάζεται και παραπάνω, τα Φ/Β παρουσιάζουν ανοδική πορεία τις τελευταίες δεκαετίες με σημαντικές επιδοτήσεις και πριμοδοτήσεις για παραγωγούς να εμφανίζονται συνεχώς στο προσκήνιο. Ωστόσο, εξαιτίας της μείωσης των επιδοτούμενων τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β, η εξάπλωση τους περιορίστηκε.

Στην Ελλάδα, οι περικοπές παραγωγής σταθμών ΑΠΕ αυξήθηκαν τα τελευταία έτη, με αποτέλεσμα την περιορισμό της εγκατάστασης νέων Φ/Β. Εντούτοις, η ανάπτυξη των ΑΠΕ δείχνει πρόσφατα να επανεκκινείται δυναμικά και να είναι στο επίκεντρο επενδύσεων. Αισιόδοξο είναι και το μέλλον για τις ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Όλο και περισσότερα αιολικά πάρκα, σε στεριά και θάλασσα, δημιουργούνται με τους ευρωπαϊκούς δείκτες να προβάλλουν την αιολική ισχύ ως την πλέον ανερχόμενη ΑΠΕ. Σύμφωνα με στοιχεία της *WindEurope* για το 2018, η αιολική ισχύς κατείχε το υψηλότερο ποσοστό ισχύος, που εγκαταστήθηκε (Σχήμα 1.2), ενώ το 14% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρισμού της Ευρώπης καλύπτεται από την αιολική ενέργεια (Σχήμα 1.3) [3]:



**Σχήμα 1.2:** Μορφές Ισχύος που εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη το 2018 [3]

Οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται για το γνώρισμα της «μη συνεχούς διαθεσιμότητας», μιας και η πρωτογενής πηγή διακατέχεται από στοχαστικότητα και αρκετές φορές από ολική μη διαθεσιμότητα (π.χ. άπνοια ή υπερβολικά δυνατός άνεμος για τις Α/Γ ή νυχτερινές ώρες για Φ/Β). Αυτό γεννά την ανάγκη αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ΑΠΕ τις ώρες υψηλής διαθεσιμότητας παραγωγής με στόχο να αποδοθεί στο φορτίο τις ώρες αυξημένης ζήτησης. Έτσι, η αποθήκευση αυτής της ενέργειας συντελεί στην έμμεση αύξηση της διαθεσιμότητας των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ αρκετές φορές καλείται να συνδράμει και σε επικουρικές υπηρεσίες στην ποιότητα και τη συχνότητα.



## EUROPEAN WIND ENERGY GENERATION | 2018

**14%**

of EU's electricity demand

**24%**

Average capacity factor

41% 28% 24% 21% 19%



Highest wind energy penetration rates

ONSHORE

**160 GW**

onshore wind capacity

**12%**

onshore wind of EU's electricity demand

**22%**

average onshore wind capacity factor

OFFSHORE

**18.5 GW**

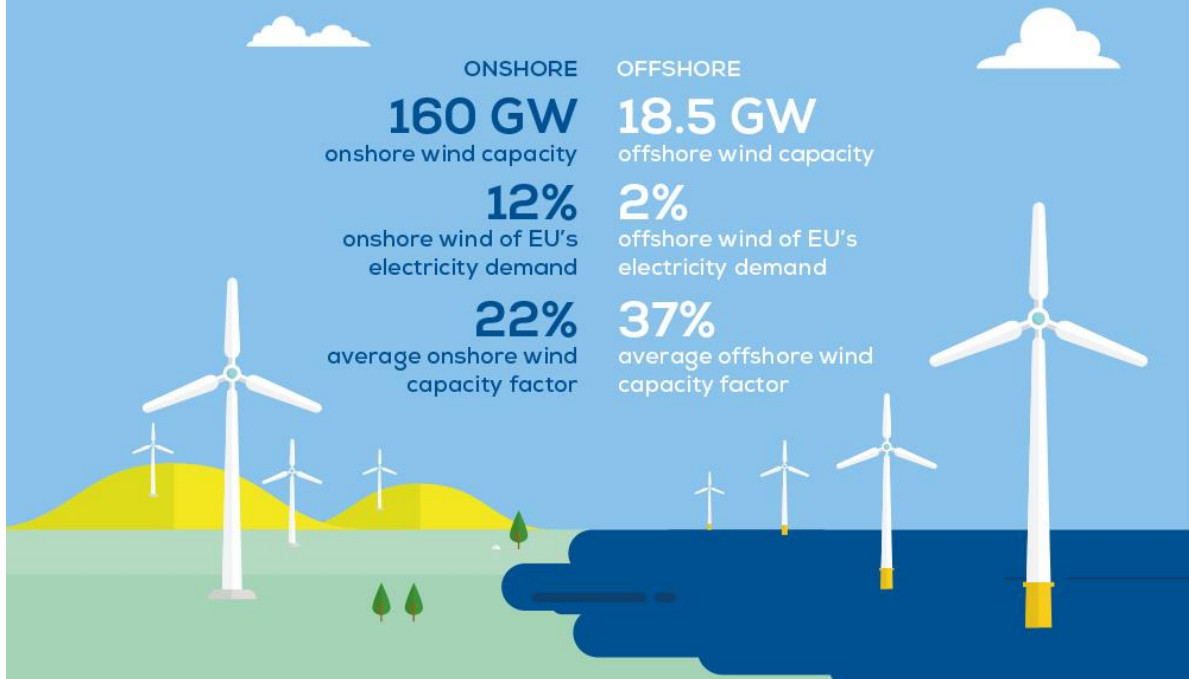
offshore wind capacity

**2%**

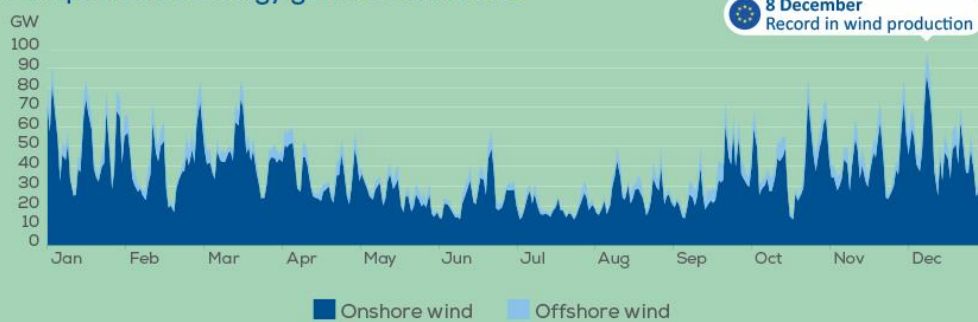
offshore wind of EU's electricity demand

**37%**

average offshore wind capacity factor



### European wind energy generation in 2018



Data refers to EU Member States only

**Σχήμα 1.3:** Αποτελέσματα της Αιολικής Ενέργειας στην Ευρώπη για το 2018 [3]

Από την άλλη μεριά, τα ορυκτά καύσιμα (π.χ. λιγνίτης, φυσικό αέριο κ.τ.λ.), που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή είναι συνήθως «συνεχούς διαθεσιμότητας» και μόνο μέλημα για την επάρκεια τους είναι ο έγκαιρος ανεφοδιασμός στις μονάδες παραγωγής, που τα αξιοποιούν. Οι ΑΠΕ βοηθούν την ενεργειακή αυτονομία των κρατών, καθώς ο ήλιος και ο άνεμος είναι πόροι σχεδόν παντού διαθέσιμοι. Αυτό αποτελεί και έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες θεμελίωσης των ΑΠΕ σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η οικονομική δυσχέρεια απαιτεί την ενεργειακή αυτάρκεια. Σε αντίθεση, αρνητικό παράγοντα για το παραγωγικό μοντέλο των κρατών, που αξιοποιούν σε υψηλό βαθμό ορυκτά καύσιμα, αποτελεί η ενεργειακή τους εξάρτηση από χώρες, οι οποίες έχουν μεγάλα αποθέματα των συγκεκριμένων καυσίμων.

## 1.4 Ενεργειακή Πολιτική σε Ευρώπη & Ελλάδα

Σήμερα, η Ευρώπη καλείται να αντιμετωπίσει μία σειρά από ποικίλες προκλήσεις [4]:

- Αστάθεια των ενεργειακών τιμών
- Αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια
- Επιδίωξη δραστικής μείωσης των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου
- Διαταραχές στον ενεργειακό εφοδιασμό

Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι θα πρέπει να υπάρξει σημαντική μείωση του ανίκτυπου του τομέα της ενέργειας στο περιβάλλον και την κλιματική αλλαγή. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η ενεργειακή πολιτική της ΕΕ βασίζεται στους ακόλουθους βασικούς πυλώνες:

- Αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής
- Ασφάλεια εφοδιασμού
- Βιωσιμότητα και ανταγωνιστικότητα

Η ιδέα για μία Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Ένωση έχει ήδη εφαρμοσθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Αυτό έχει ως στόχο να εξασφαλίζεται, σε όλους τους πολίτες και τις επιχειρήσεις της ΕΕ, μία οικονομικά προσιτή, φιλική προς το περιβάλλον και ιδίως ασφαλής ενέργεια. Η ενεργειακή πολιτική της ΕΕ περιλαμβάνει ένα Πλάνο Δράσης (*Action Plan*) για την ενέργεια και το κλίμα με στόχους, που έχουν διαμοιρασθεί για το 2020, 2030 και 2050:

### Στόχοι 2020, οι επονομαζόμενοι στόχοι «20-20-20»:

- Μείωση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.
- Αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ τουλάχιστον κατά 20% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας.
- Βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά τουλάχιστον 20%.

## Στόχοι 2030:

- Μείωση εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου κατά 40% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.
- Αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ τουλάχιστον κατά 32% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας.
- Βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας τουλάχιστον κατά 32,5%.
- Προώθηση ηλεκτρικών διασυνδέσεων σε ποσοστό 15%. Πιο συγκεκριμένα, το 15% της ενέργειας, που παράγεται στην ΕΕ, πρέπει να μπορεί να μεταφέρεται και προς άλλες χώρες της ΕΕ.

## Στόχοι 2050:

- Μείωση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου κατά 80-95% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.

Αδήριτη καθίσταται η ανάγκη θέσπισης στόχων, τόσο σε κρατικό όσο και σε διακρατικό επίπεδο, αναφορικά με την παγκόσμια δυσχερή κατάσταση, που επικρατεί με την κλιματική αλλαγή. Στο πλαίσιο χάραξης κοινής ενιαίας Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής, κάθε κράτος-μέλος της ΕΕ καλείται να ικανοποιήσει κάποιους συγκεκριμένους στόχους, κατά βάση κοινούς σύμφωνα με τους παραπάνω στόχους. Εντούτοις, είναι σαφές πως υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε χώρας ως προς τους διαθέσιμους εγχώριους πόρους, όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα, η παραγωγή υδρογονανθράκων κ.τ.λ.

Οι στόχοι αναφορικά με την ενεργειακή πολιτική της Ελλάδας ταυτίζονται με αυτούς της ΕΕ:

- Συνεισφορά των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας τουλάχιστον κατά 20% μέχρι το τέλος του 2020, δηλαδή 2% μεγαλύτερος από το στόχο 18% της ΕΕ.
- Συνεισφορά των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας για ψύξη και θέρμανση τουλάχιστον κατά 20% μέχρι το τέλος του 2020.
- Συνεισφορά των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στις μεταφορές τουλάχιστον κατά 10% μέχρι το τέλος του 2020.
- Μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% μέχρι το 2020 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 και τουλάχιστον 40% μείωση μέχρι το 2030.
- Τουλάχιστον 32% επίτευξη του μεριδίου της κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ για το 2030 (δεσμευτικός στόχος σε επίπεδο ΕΕ).
- Τουλάχιστον 32,5% βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας για το 2030 (δεσμευτικός στόχος σε επίπεδο ΕΕ).
- Μείωση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου κατά 16% μέχρι το 2030, σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα εκπομπών του έτους 2005 (για τους τομείς εκτός του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών).
- Συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας τουλάχιστον κατά 30% μέχρι το 2030.
- Εξοικονόμηση τουλάχιστον 30% στην τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2030.

Καθίσταται έτσι σαφές, ότι η Ελλάδα βαδίζει ολοταχώς μακριά από λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής και άλλα ρυπογόνα είδη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που διαδραματίζουν τον πιο καθοριστικό ρόλο στις εκπομπές  $CO_2$  και άλλων αερίων του θερμοκηπίου.

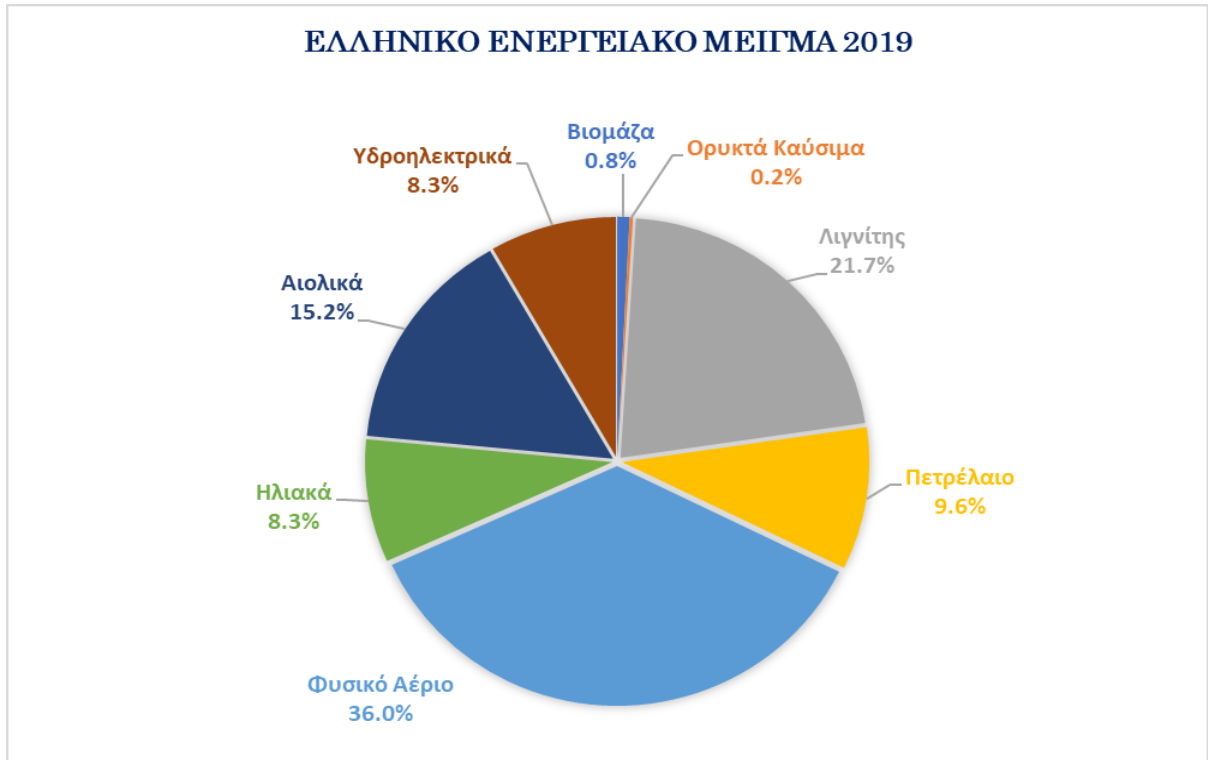
## 1.5 Ελληνικό Ενεργειακό Μείγμα Ηλεκτροπαραγωγής

Η Ελλάδα είναι μία χώρα, που παραδοσιακά στήριζε την ηλεκτροπαραγωγή της στο λιγνίτη. Ως μονάδες βάσης χρησιμοποιούνταν οι λιγνιτικές μονάδες, με τα φορτία αιχμής να καλύπτονται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ) και μονάδες φυσικού αερίου, με τις μονάδες ΑΠΕ να έχουν μικρή έως τώρα συμμετοχή στο ενεργειακό μείγμα. Ωστόσο, η αύξηση των επιβαλλόμενων προστίμων στις εκπομπές  $CO_2$  σε συνδυασμό με τους αυστηρούς στόχους της ΕΕ για όλα τα κράτη-μέλη έστρεψε τα βλέμματα στην παραγωγή όλων και περισσότερων μονάδων ΑΠΕ. Έτσι, τα τελευταία έτη αλλάζει άρδην το Ελληνικό Ενεργειακό Μείγμα με κάλυψη σημαντικού ποσοστού του να καλύπτεται από ΑΠΕ, στις οποίες εντάσσονται και οι ΥΗΣ [5]. Στόχος είναι μέχρι το 2023 να αποσυρθούν όλες οι εν λειτουργία λιγνιτικές μονάδες με εξαίρεση αυτή της Πτολεμαΐδας (Πτολεμαΐδα V), η λειτουργία της οποίας θα σταματήσει το 2028 [6]. Αν τα παραπάνω καταφέρουν να γίνουν πραγματικότητα, τότε υπολογίζεται ότι η Ελλάδα το 2030 θα είναι μία χώρα, που θα βρίσκεται στη μετα-λιγνίτη εποχή. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο θα διαδραματίσει βέβαια και η διαδικασία αδειδότησης για επενδύσεις ΑΠΕ, που στην Ελλάδα, σε αντίθεση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, είναι μία διαδικασία που διαρκεί έως και πολλά χρόνια. Παρακάτω (Σχήμα 1.4, 1.5) απεικονίζεται το ενεργειακό μείγμα παραγωγής της Ελλάδας για το 2019 και το υπολοιπόμενο ελληνικό ενεργειακό μείγμα για το ίδιο έτος, σύμφωνα με [5]:

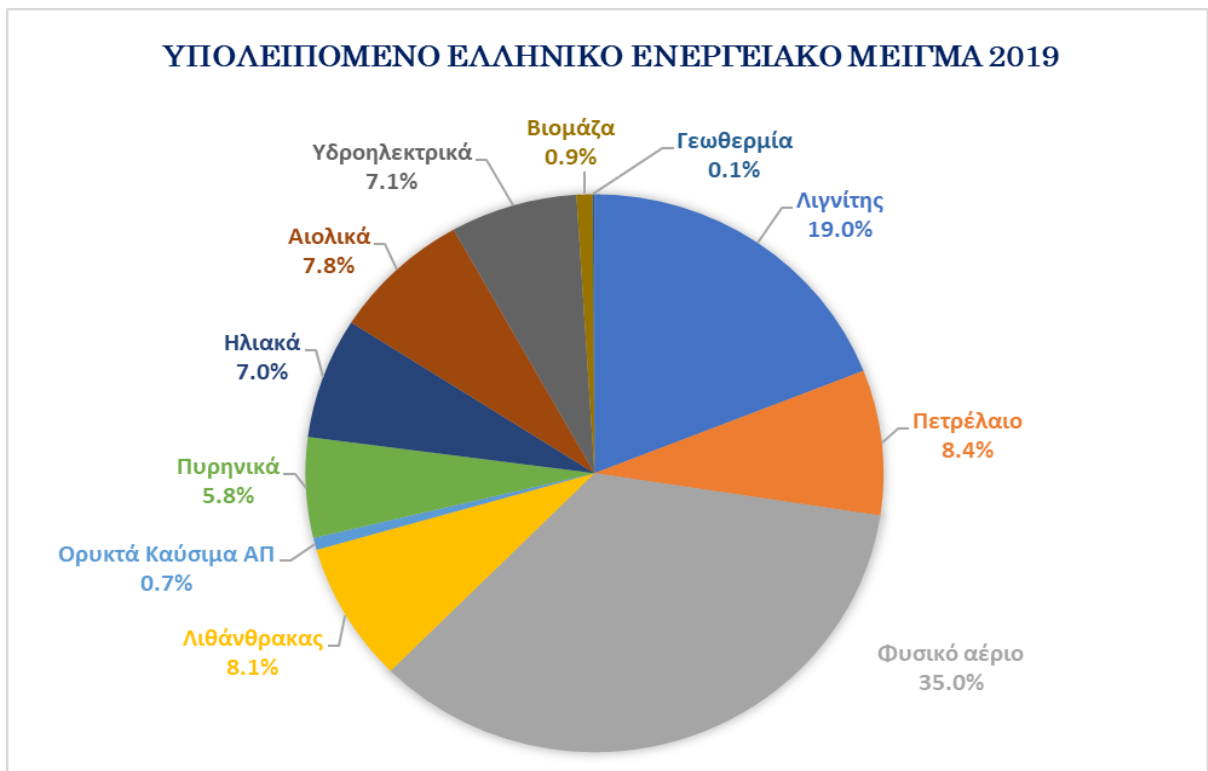
## 1.6 Συσχέτιση ΑΠΕ & Ευστάθειας ΣΗΕ

Η διαχρονική πρόκληση και ανάγκη για ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι η συνεχής διατήρηση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης, δηλαδή η ακριβής κάλυψη του φορτίου. Αν για κάποιο λόγο η ισορροπία αυτή διαταραχθεί, προκαλούνται μεταβατικά φαινόμενα στη συχνότητα των ΣΗΕ, τα οποία σε συνδυασμό με την ήδη στοχαστική φύση του συνεχώς μεταβαλλόμενου φορτίου σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, ενισχύουν την ανισορροπία στο ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται παραδοσιακά σε μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες. Εξαιτίας της στιβαρής τους φύσης και των μεγάλων μαζών, που χαρακτηρίζουν τους κινούμενους τους άξονες, οι μονάδες αυτές προσδίδουν αδράνεια στο δίκτυο. Παράλληλα πραγματοποιείται απευθείας σύνδεση της ηλεκτρικής μηχανής στο σύστημα, με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να συνδέεται με την ηλεκτρική συχνότητα της τάσης.



**Σχήμα 1.4:** Ελληνικό Ενεργειακό Μείγμα για το Έτος 2019

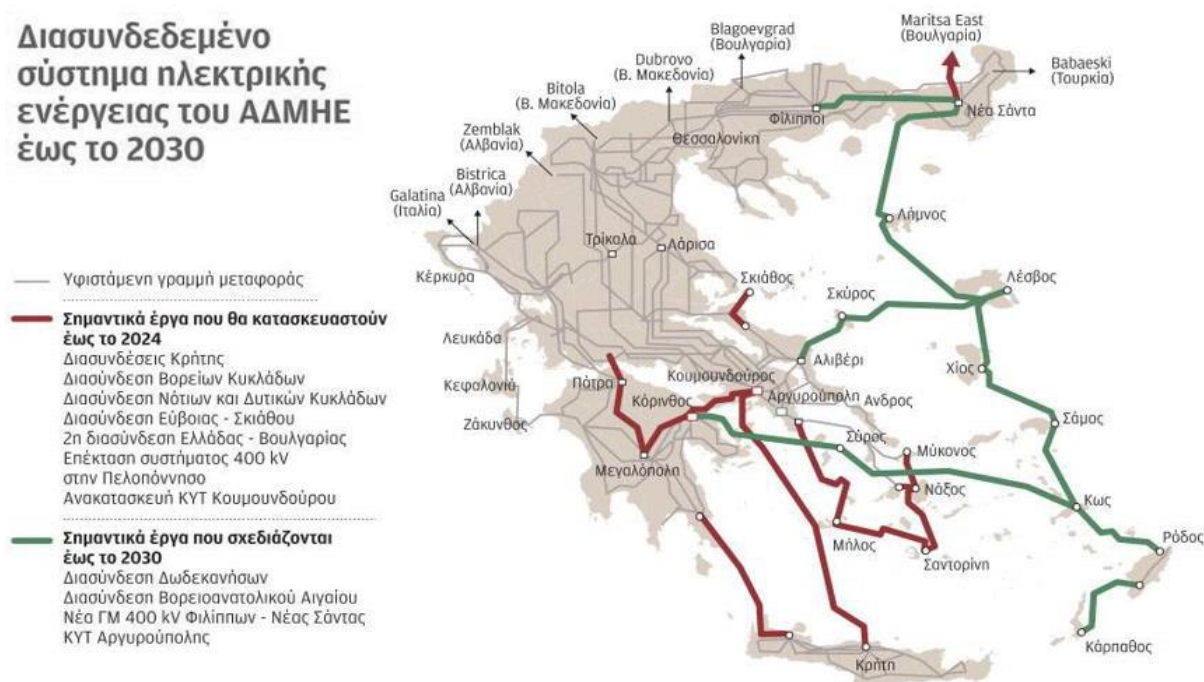


**Σχήμα 1.5:** Υπολειπόμενο Ελληνικό Ενεργειακό Μείγμα για το Έτος 2019

Με αυτόν τον τρόπο, οι γεννήτριες συνεισφέρουν σε αυξομειώσεις φορτίου (που αντιστοιχούν αντιστρόφως σε αυξομειώσεις στη συχνότητα) μέσω μεταβολών στην αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στις στρεφόμενες μάζες τους. Η δυνατότητα αυτή ονομάζεται Συγχρονη Αδρανειακή Απόκριση (*Synchronous Inertial Response, SIR*) [7].

Για να μπορέσουν να αντιδράσουν οι σύγχρονες γεννήτριες σε απότομες μεταβολές με τον τρόπο της αδρανειακής απόκρισης, θα πρέπει να βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, κάτι που φυσικά εξασφαλίζεται όταν τηρούνται τα τεχνικά τους ελάχιστα. Αυξημένη αδράνεια προσδίδεται σε ένα ηλεκτρικό σύστημα από την απευθείας σύνδεση πολλών σύγχρονων γεννητριών, κάνοντας τις διαταραχές στο ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης να έχουν μικρή επίπτωση στην ηλεκτρική του συχνότητα. Από την άλλη μεριά, η παρουσία διασυνδέσεων μεταξύ ηλεκτρικών συστημάτων οδηγεί σε ένα πρακτικά ενιαίο σύστημα με υψηλή αδράνεια και μία συχνότητα. Τα μη διασυνδεδεμένα δίκτυα, αποτελούν αντιθέτως συστήματα περισσότερο επιρρεπή σε μεταβολές, μιας και διαθέτουν σημαντικά μικρότερη συνολική αδράνεια. Τέτοιου είδους δίκτυα συναντώνται ευρέως στην Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στα νησιά του Αιγαίου, γνωστά και ως αυτόνομα νησιωτικά συστήματα ή Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ). Ακολουθεί το πλάνο του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) για τη διασύνδεση σημαντικού μέρους των Ελληνικών ΜΔΝ εντός των επόμενων ετών [8]. Στόχος των διασυνδέσεων ΜΔΝ είναι η αποδοτικότερη και οικονομικότερη ηλεκτροδότηση των νησιών αυτών με ισχυροποίηση της ευστάθειας των απομονωμένων δικτύων τους. Εντούτοις, αποτελούν επενδύσεις υψηλών κεφαλαίων, αφού απαιτούν την κατασκευή υποβρύχιων διασυνδέσεων πολλών χιλιομέτρων. Για αυτό το λόγο, αναζητούνται διεθνώς και εναλλακτικοί τρόποι τοπικής ισχυροποίησης απομονωμένων ηλεκτρικών συστημάτων.

### Διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του ΑΔΜΗΕ έως το 2030



Σχήμα 1.6 : Διασυνδεδεμένο Δίκτυο ΑΔΜΗΕ έως το Έτος 2018 [8]

Εξαιτίας της προνομιακής γεωγραφικής τους θέσης, τα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα της Ελλάδας ευνοούν εξαιρετικά την υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ σε αυτά.

Το ηλιακό (Σχήμα 1.7), καθώς και το αιολικό δυναμικό (Σχήμα 1.8) της Ελλάδας είναι ένα από τα καλύτερα στον ευρωπαϊκό χώρο. Αυτό φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, αποδεικνύοντας και τη γεωστρατηγική θέση, που κατέχει η Ελλάδα στον ευρωπαϊκό χάρτη των ΑΠΕ [9]:

## 1.7 Αιολική Ενέργεια

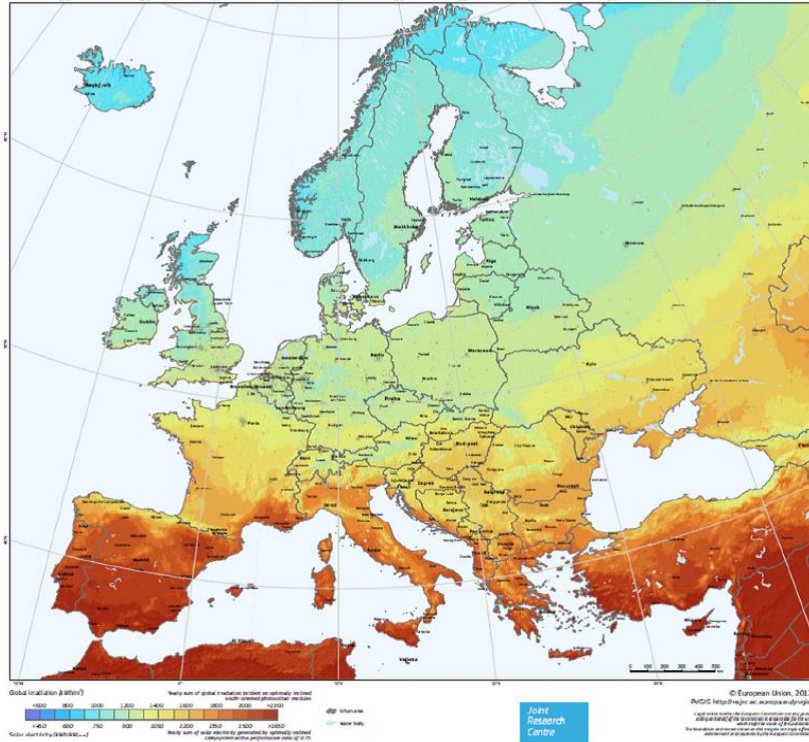
Ο άνεμος έχει τη δυνατότητα να περιστρέψει ανεμόμυλους ή ανεμοτροχούς, να προωθήσει ιστιοφόρα οχήματα ή πλοία και γενικώς να κινήσει αντικείμενα, δίνοντας έτσι ενέργεια. Η ενέργεια αυτή, που παράγεται από την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, ονομάζεται αιολική ενέργεια και πήρε το όνομα τους από τον Αίοιο, που κατά τους αρχαίους Έλληνες, υπήρξε ο ορισμένος από το Δία ταμίας των ανέμων. Η ενέργεια των ανέμων ή αιολική ενέργεια είναι η μορφή ενέργειας, που έμμεσα δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ανέμων. Εξαιτίας της ιδιότητας του θερμού αέρα να διαστέλλεται, με συνέπεια να μειώνεται το βάρος και η πυκνότητά του, οι θερμές μάζες αέρα παρουσιάζουν ανοδική κίνηση. Αντίθετα με τις θερμές μάζες, ο ψυχρός αέρας έχει την ιδιότητα να μετακινείται προς τα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, που έχουν κενωθεί. Η αιολική ενέργεια, εκτενή ανάλυση της οποίας θα συναντήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο, συγκαταλέγεται στις καθαρές ή πράσινες μορφές ενέργειας, μιας και αποτελεί μία ήπια μορφή ενέργειας, που δεν προκαλεί ή εκπέμπει ρύπους ούτε αέρια του θερμοκηπίου. Ο αέρας, το καύσιμο δηλαδή για την παραγωγή ηλεκτρισμού, είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν, κάνοντας έτσι την αιολική ενέργεια μία ιδιαίτερα ελκυστική λύση. Παράλληλα, τα οικονομικά οφέλη μίας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοπρόσεκτα.

## 1.8 Ηλιακή Ενέργεια & Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

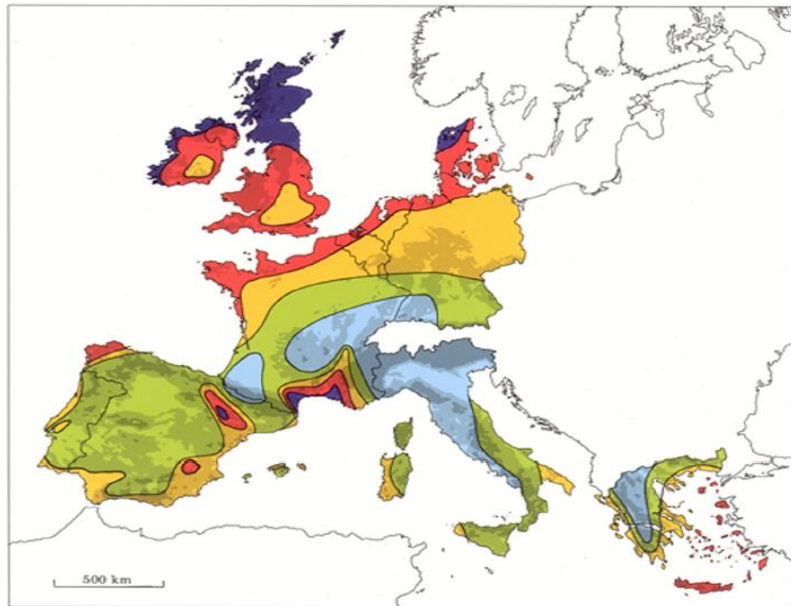
Η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη παντού στη γη σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, που υπερτερούν στην ενεργειακή πίτα. Είναι μία μορφή ενέργειας ελεύθερη και ανεπηρέαστη από τις αυξανόμενες τιμές ενέργειας. Βρίσκει εφαρμογή στη θέρμανση, το φωτισμό και την παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω φωτοβολταϊκών και θερμικών εφαρμογών. Παρά το γεγονός, ότι ο ήλιος εκπέμπει ημερησίως υψηλή ποσότητα ενέργειας, ελάχιστο μέρος της ενέργειας αυτής εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων ή κυψελών εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Παράλληλα, για την παραγωγή θερμότητας συλλέγεται ηλιακή ενέργεια, ιδίως για τη θέρμανση νερού και τη μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση ατμοστροβίλων.

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



Σχήμα 1.7: Ηλιακό Δυναμικό της Ευρώπης, παρατηρώντας την Προνιμιόχο Θέση των Νησιών του Αιγαίου [9]



Wind resources <sup>1</sup> at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain <sup>2</sup>		Open plain <sup>3</sup>		At a sea coast <sup>4</sup>		Open sea <sup>5</sup>		Hills and ridges <sup>6</sup>	
$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Σχήμα 1.8: Αιολικό Δυναμικό της Ευρώπης, παρατηρώντας την Προνιμιόχο Θέση των Νησιών του Αιγαίου [9]



Φυσικά, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της φωτοβολταϊκής μεθόδου παρουσιάζει κυρίως πλεονεκτήματα, ωστόσο παρατηρούνται και κάποια μειονεκτήματα.

### Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκής ενέργειας

- Δεν απαιτεί εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας για να λειτουργήσει, σε αντίθεση με τους κοινούς σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Δεν είναι ρυπογόνος
- Δεν χρειάζεται βοήθεια από μηχανές
- Δεν απαιτεί πολλή συντήρηση

### Μειονεκτήματα φωτοβολταϊκής ενέργειας

- Η τροφοδοσία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος από ηλιακή ακτινοβολία είναι μεταβαλλόμενη και ακολουθεί απρόβλεπτες και απότομες διακυμάνσεις μεταξύ μίας μέγιστης και μίας μηδενικής τιμής, κάτι το οποίο δεν ισχύει σε άλλα συστήματα μετατροπής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η παραγωγή ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού πάρκου να είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη.
- Δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον, ενώ ένα μέρος από την ακτινοβολία, που διεισδύει, συμβάλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί με ποικίλους τρόπους. Ένας από τους πιο σημαντικούς είναι διαμέσου του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Κατά το φαινόμενο αυτό μετατρέπεται άμεσα το φως σε ηλεκτρική ενέργεια σε ατομικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, υλικά με φωτοηλεκτρική επίδραση απορροφούν φωτόνια από το φως και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα και κατά συνέπεια ηλεκτρική ενέργεια.

Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού έχει την ικανότητα να απορρηφθεί σε ένα χημικό δεσμό και ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, να δημιουργείται μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ηλεκτρόνια και οπές) πέρα από τις συγκεντρώσεις, που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

Καθώς οι φορείς κυκλοφορούν στο στερεό και με την προϋπόθεση, ότι δεν θα επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης  $p-n$ , οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου της. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $n$  και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $p$ , έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων της διόδου. Η εκδήλωση της τάσης μεταξύ των δύο όψεων του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αποτελεί μία πηγή ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Το κυριότερο ημιαγώγιμο υλικό, που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι το πυρίτιο (*Si*), επειδή βρίσκεται σε μεγάλη αφθονία στη φύση. Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από δισκία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει υψηλό κόστος κατασκευής και βαθμό απόδοσης πλαισίου έως 18-19%. Από την άλλη, το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο έχει χαμηλότερο κόστος κατασκευής και βαθμό απόδοσης πλαισίου έως 16% περίπου. Πέρα από τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά στοιχεία υπάρχουν και τα άμορφα. Αυτά αποτελούνται από μία ενιαία επιφάνεια και όχι από διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως στα προηγούμενα. Έχουν χαμηλότερη απόδοση (5-10%), αλλά είναι αρκετά πιο οικονομικά, απλώς για να δώσουν την ίδια ισχύ με τα μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά στοιχεία χρειάζονται μεγαλύτερη επιφάνεια.

Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το γερμάνιο (*Ge*) και το σελήνιο (*Se*).

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα πλαίσια, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και τις μπαταρίες. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται στα κάτωθι:

- Απλό ή ανεξάρτητο φωτοβολταϊκό σύστημα
- Φωτοβολταϊκό σύστημα με αποθήκευση σε μπαταρίες
- Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στον οργανισμό κοινής ωφελείας
- Φωτοβολταϊκό σύστημα σε επίπεδο εργοστασίου παραγωγής ενέργειας
- Υβριδικά ή μεικτά συστήματα

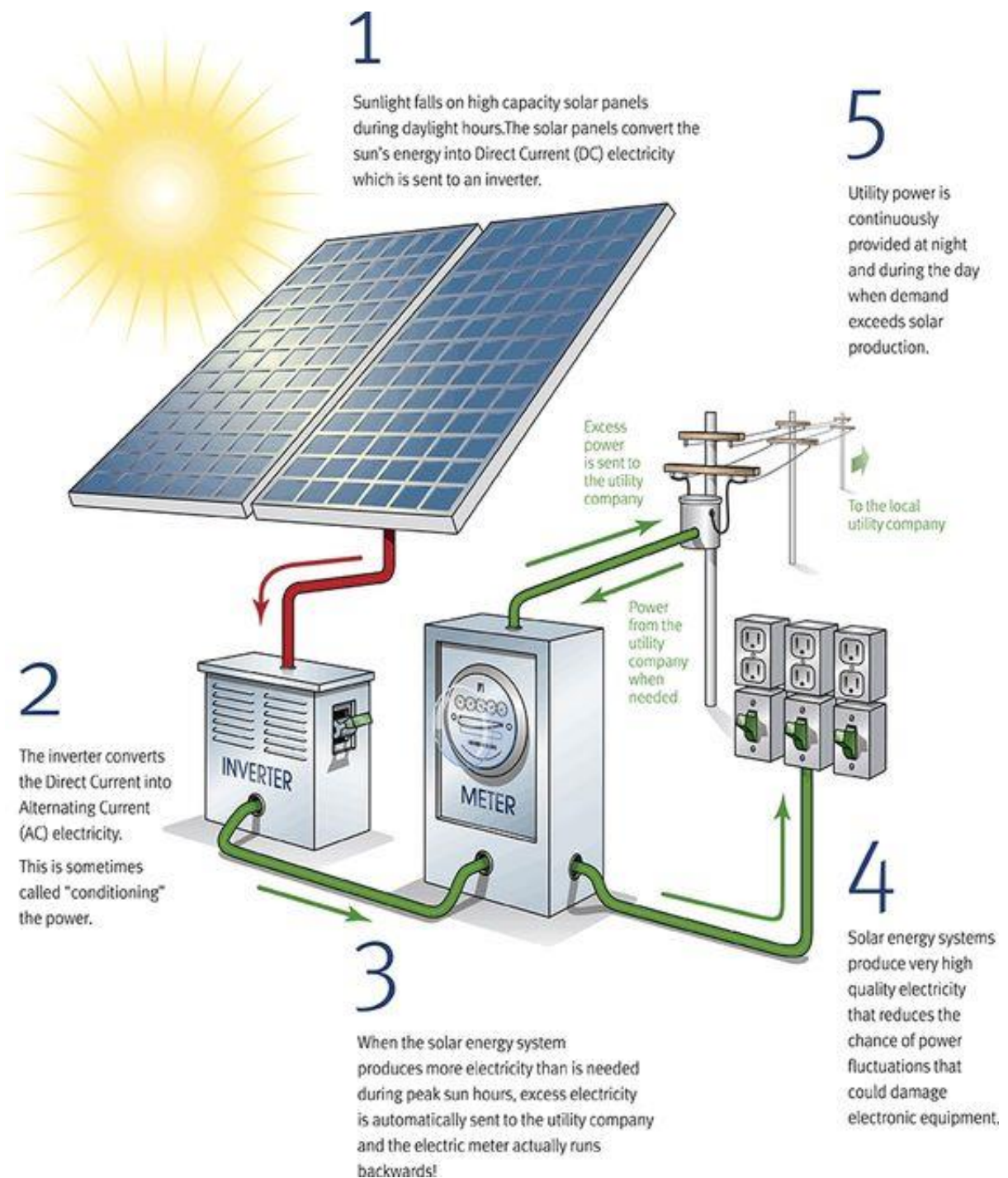
Ο ήλιος παρέχει πάνω από 1000 *Watts* ανά τετραγωνικό μέτρο, δηλαδή ένα μέτρο πλάτος και ένα μέτρο ύψος. Ένα φωτοβολταϊκό του ενός τετραγωνικού μπορεί να παράγει περίπου 160 *Watts/h* αν αποτελείται από μονοκρυσταλλικά, 140 *Watts/h* αν αποτελείται από πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία και περίπου 80 *Watts/h* αν πρόκειται για άμορφο πυρίτιο.

Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά κύτταρα και πολλά φωτοβολταϊκά πάνελ συγκροτούν μία συστοιχία. Η σύνδεση τους γίνεται είτε σε σειρά είτε παράλληλα ανάλογα με το συνδυασμό τάσης, έντασης και φυσικά τη συνολική ισχύ, που χρειάζεται να επιτύχει το κάθε σύστημα. Έτσι, ένα φωτοβολταϊκό με ονομαστική ισχύ 100 *Wp* βγάζει έξοδο περίπου 20 *V* και 5 *A* ( $20 \cdot 5 = 100$ ). Αν πρόκειται για παράδειγμα για 10 φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 100 *Wp* το καθένα, συνδεδεμένα σε σειρά, τότε έχουν συνολική τάση περίπου 200 *V* και ένταση 5 *A*. Αν είναι συνδεδεμένα παράλληλα τότε έχουν συνολική τάση 20 *V* και ένταση 50 *A*. Και στις δύο περιπτώσεις, η συνολική ισχύς θα είναι 1000 *Wp*. Συνεπώς, η σύνδεση σε σειρά προτιμάται για παραγωγή υψηλότερης τάσης, ενώ η παράλληλη σύνδεση για την παραγωγή υψηλότερης τιμής έντασης ρεύματος.

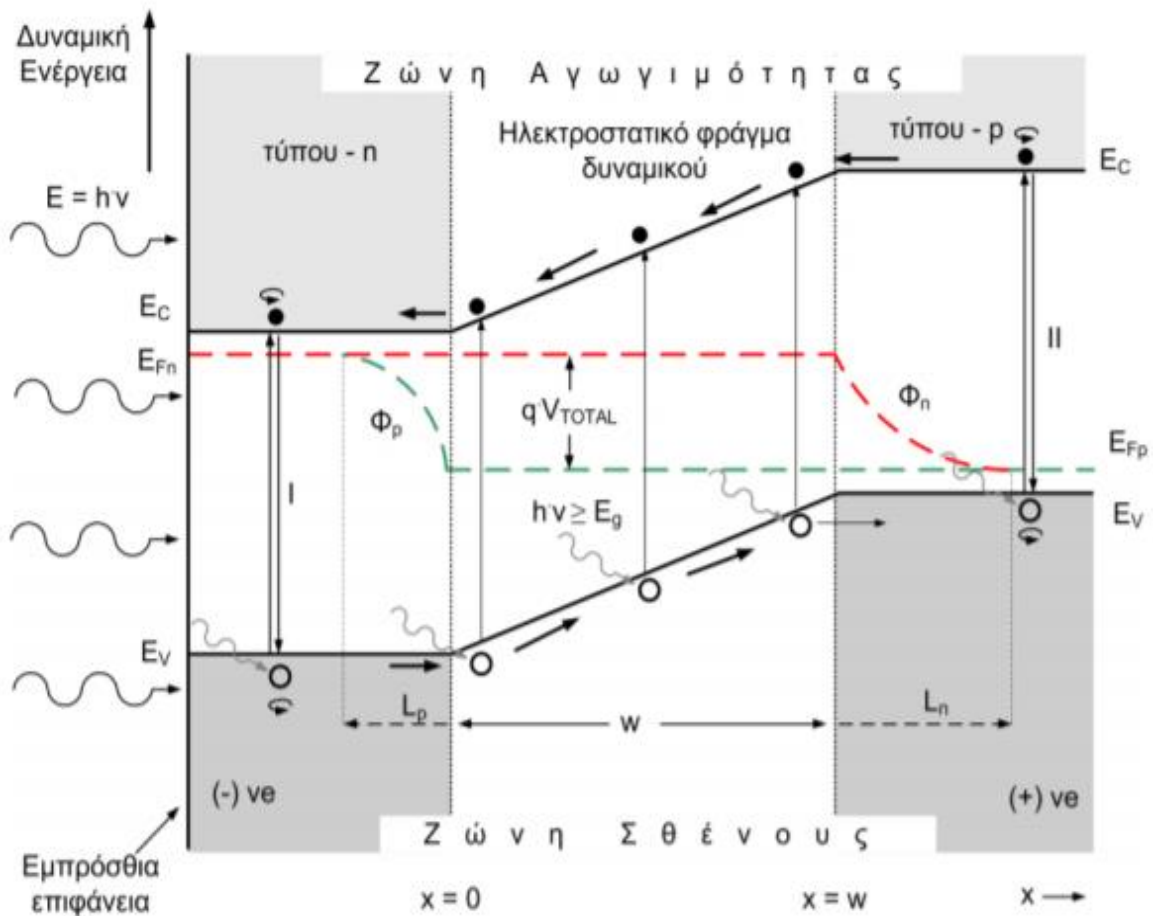
Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ακολουθεί τα ακόλουθα βήματα εγκατάστασης:

- Επιλογή θέσης εγκατάστασης
- Επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Επιλογή μετατροπέων

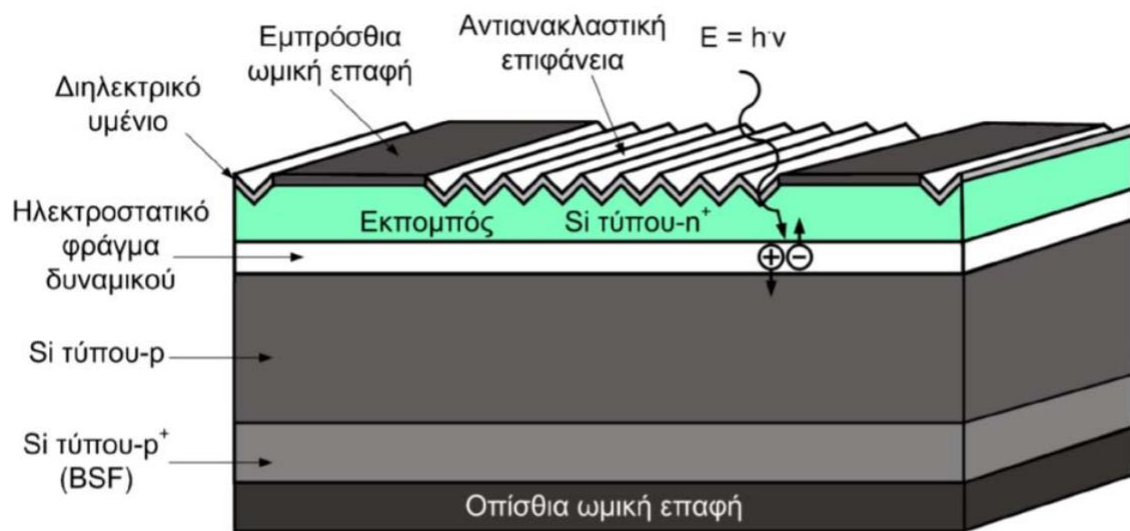
- Εκπόνηση ενεργειακής μελέτης και επιλογή τρόπου στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Διερεύνηση βέλτιστης χωροθέτησης προς επίτευξη μέγιστης απόδοσης και αποφυγής σκιάσεων
- Εκκίνηση αδειοδοτικής διαδικασίας
- Συμμετοχή (ή όχι) σε ανταγωνιστική διαδικασία για υπογραφή σύμβασης λειτουργικής ενίσχυσης



**Σχήμα 1.9:** Στάδια Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Φαινομένου



**Σχήμα 1.10:** Διάγραμμα Δυναμικής Ενέργειας Ηλεκτρονίων-Απόστασης για μία Φωτιζόμενη Δίοδο *p-n* στη Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας [10]



**Σχήμα 1.11:** Τυπική Γεωμετρία Συμβατικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου Πυριτίου [10]

## 1.9 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Επί εκατοντάδες χρόνια, η ενέργεια του νερού χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των μηχανών. Με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιούνται οι υδατοπτώσεις. Αφορά τη δυναμική ενέργεια, που περικλείει το νερό, κατά τη διαδικασία του κύκλου του και μετατρέπεται σε κινητική, κατά τη μετακίνηση του σε χαμηλότερα υψομετρικά επίπεδα. Η ενέργεια αυτή δεσμεύεται και χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρισμού, εξυπηρετώντας παράλληλα και άλλες ανάγκες, όπως ανακοπή χειμάρρων, ύδρευση, άδρευση. Συνεπώς, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από την ποσότητα του νερού του ταμιευτήρα. Για αυτό το λόγο, μόνο σε περιοχές με πλούσιες πηγές, σημαντικές βροχοπτώσεις και κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση είναι δυνατό να κατασκευαστούν υδροηλεκτρικά έργα.

Είναι μία διαδικασία, όπου η ροή του νερού χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός στροβίλου συνδεδεμένου με μία γεννήτρια. Χρησιμοποιείται συνήθως συμπληρωματικά με άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας.



**Σχήμα 1.12:** Το *Three Gorges Dam* στην Κίνα, είναι το μεγαλύτερο Υδροηλεκτρικό Φράγμα παγκοσμίως

Οι σταθμοί που αξιοποιούν την υδροηλεκτρική ενέργεια ονομάζονται Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΥΗΣ) και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- *Μεγάλης Κλίμακας*, που απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών με σημαντικές επιπτώσεις για το περιβάλλον.

- *Μικρής Κλίμακας*, που εγκαθίστανται δίπλα σε κανάλια ή ποτάμια και η λειτουργία τους έχει λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

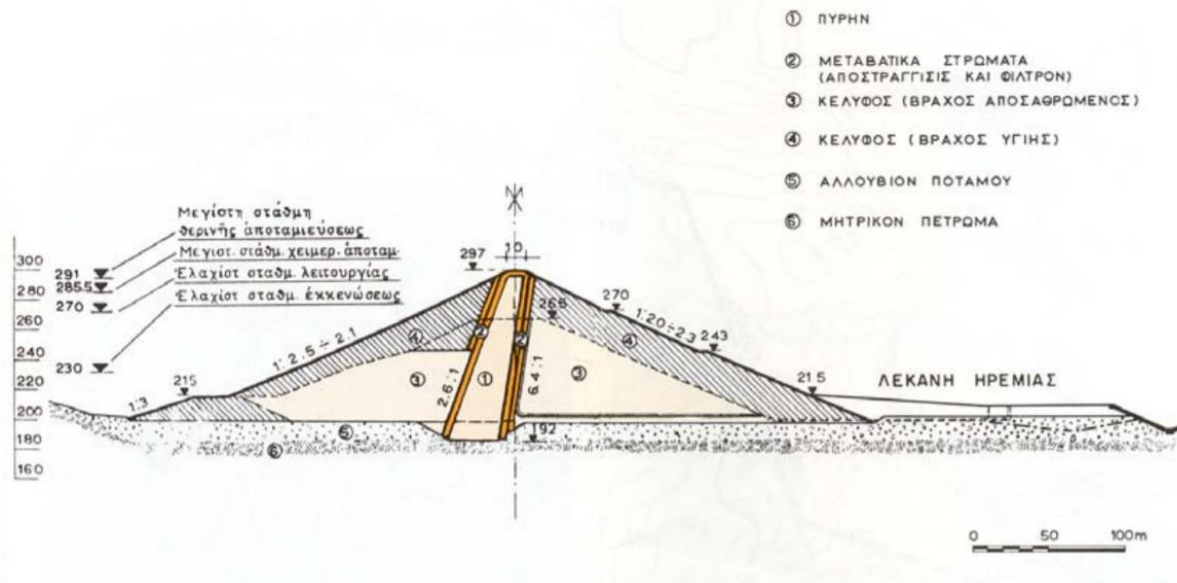


**Σχήμα 1.13:** Το *Itaipu Dam* στη Βραζιλία



**Σχήμα 1.14:** Τεχνητή Λίμνη Πολύφυτου

## ΤΥΠΙΚΗ ΔΑΤΟΜΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ



Σχήμα 1.15: Τυπική Δατομή Φράγματος Πολύφουτου [11]

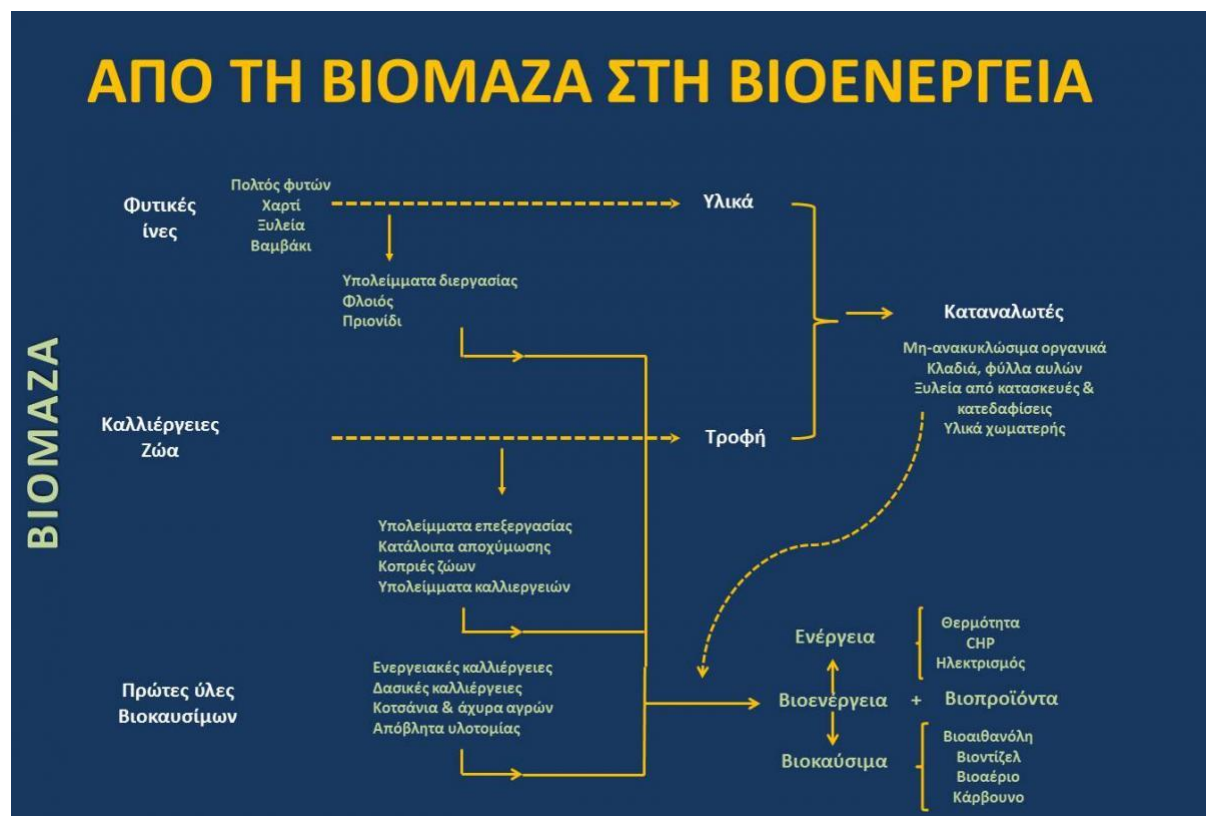


Σχήμα 1.16: Υδροηλεκτρικός Σταθμός Πολύφουτου

Ο ΥΗΣ *Itaipu Dam* (Σχήμα 1.13) βρίσκεται στη Βραζιλία και έχει ικανότητα παράγωγης 14GW, που είναι περίπου όση η εγκατεστημένη ισχύς ολόκληρης της Ελλάδας. Ένας από τους μεγαλύτερους υδροηλεκτρικούς σταθμούς στην Ελλάδα βρίσκεται στο Πολύφυτο (Σχήμα 1.14). Πρόκειται για έναν ΥΗΣ, που βρίσκεται 45km νοτιοανατολικά της Κοζάνης και αποτελείται από Ταμιευτήρα, τη Σήραγγα Εκτροπής, το Φράγμα, τον Υπερχειλιστή, την Υδροληψία, τη Σήραγγα Προσαγωγής, τον Υδροηλεκτρικό Σταθμό, τη Δεξαμενή Αναπλάσεως και το Φρέαρ υπό πίεση.

## 1.10 Βιομάζα & Βιοενέργεια

Μία άλλη μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η βιομάζα, που αποτελεί απόρροια της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια διαμέσου μίας σειράς διεργασιών φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης. Μέσω της βιομάζας δίνεται η δυνατότητα να αναπτυχθούν νέα φυτά, που με τη σειρά τους θα παράγουν νέα βιομάζα. Αυτός είναι και ο λόγος, που καθιστά τη βιομάζα μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η χρήση της συμβάλει στην επίτευξη όχι μόνο της παραγωγής βιο-καυσίμων, αλλά βοηθά τα οικοσυστήματα να προσαρμοστούν στην κλιματική αλλαγή [12].

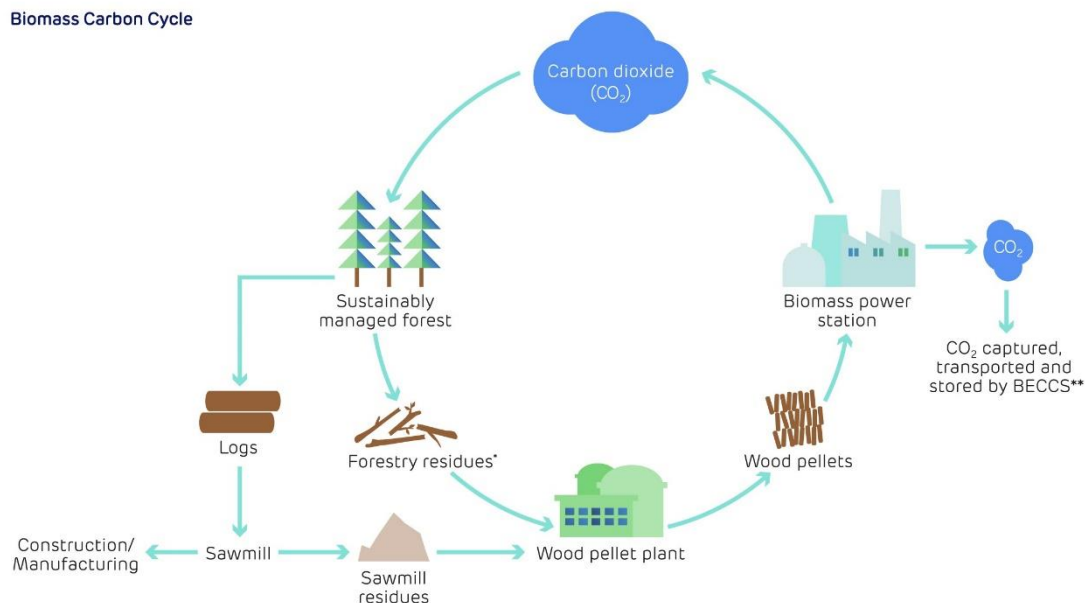


Σχήμα 1.17: Από τη Βιομάζα στη Βιοενέργεια

Η βιομάζα μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών είτε με απευθείας καύση της είτε με μετατροπή της σε στερεά, υγρά και αέρια βιοκαύσιμα μέσω βιομηχανικών ή θερμοχημικών διεργασιών.



Η βιομάζα αποτελείται από ενώσεις, που έχουν βασικά χημικά στοιχεία τον άνθρακα, το υδρογόνο και το οξυγόνο. Τα στοιχεία αυτά παράγονται από νερό ( $H_2O$ ) και διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) και με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας, που απορροφούν, μετατρέπονται σε περιεχόμενη χημική ενέργεια. Οι ζωικοί οργανισμοί προσλαμβάνουν την ενέργεια αυτή με την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Η ενέργεια, που περιέχεται στη φυτική και ζωική βιομάζα, αποδίδεται, έπειτα από επεξεργασία, ως καύσιμη ύλη. Με τον τρόπο αυτό, η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με επιπλέον  $CO_2$ , μιας και αυτό ανακυκλώνεται.



Σχήμα 1.18: Ενεργειακός Κύκλος Βιομάζας [13]

## 1.11 Γεωθερμία

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η μετατροπή της θερμικής ενέργειας, που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και αφού μετατραπεί σε μηχανική μετατρέπεται τελικώς σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην πραγματικότητα, η γεωθερμία αναφέρεται σε έναν αριθμό διαφορετικών τεχνολογιών, που εκμεταλλεύονται τη θερμοκρασία των γεωθερμικών πόρων. Όσο πλησιάζουμε προς τον πυρήνα της γης τόσο αυξάνεται και η θερμοκρασία.

Οι βασικοί παράμετροι για την αξιοποίηση της γεωθερμίας είναι το πόσο εύκολα μπορεί να εξαχθεί η θερμότητα από το εκάστοτε βάθος και το πόσο υψηλή είναι η θερμοκρασία σε συνάρτηση με το βάθος. Η γεωθερμία αποτελεί μία σχετικά οικονομική μορφή ενέργειας και παρουσιάζει το πλεονέκτημα, ότι δουλεύει αδιάκοπα σε αντίθεση με άλλες μορφές ενέργειας, όπως η αιολική και η παλιρροιακή ενέργεια. Εντούτοις, η δυνατότητα αυτή περιορίζεται σε ενεργά σεισμικές περιοχές. Μία άλλη μέθοδος παραγωγής γεωθερμίας γίνεται χρησιμοποιώντας αντλίες θερμότητας των υπόγειων υδάτων. Στα συστήματα αυτά, το νερό κυκλοφορεί μέσα από το έδαφος σε ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου  $50^\circ F$ ) για να θερμαίνουν άμεσα τα κτίρια, όποτε χρήζουν υποστήριξης.

Ωστόσο, οι αντλίες θερμότητας χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία των κινητήρων τους, αλλά η παραγωγή θερμότητας είναι έως και πέντε φορές υψηλότερη από ό,τι η ηλεκτρική ενέργεια εισόδου [14].



**Σχήμα 1.19:** Εργοστάσιο Παραγωγής Ηλεκτρισμού από Γεωθερμία στο *Nesjavellir* της Ισλανδίας [15]

Τα περιβαλλοντικά οφέλη της γεωθερμίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Μικρή απαίτηση γης
- Αποτελεί τοπική μορφή ενέργειας με συνέπεια την οικονομική ανάπτυξη της γεωθερμικής επιφάνειας
- Συνεχής παροχή ενέργειας με υψηλό συντελεστή λειτουργίας, που αγγίζει ποσοστό άνω του 90%
- Μικρό σχετικά λειτουργικό κόστος, αν και το κόστος παγίων είναι αυξημένο σε σχέση με τις συμβατικές πηγές.
- Συμβολή στην επίτευξη των στόχων της Λευκή Βίβλου της Ευρωπαϊκής Ένωσης και του Πρωτοκόλλου του Κιότο.
- Συμβολή στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης μίας χώρας με τον περιορισμό των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων.

## 1.12 Κυματική Ενέργεια

Η κυματική ενέργεια αναλύεται σε ενέργεια από παλίρροιες, ενέργεια από κύματα, ενέργεια από ωκεανούς και την ωσμωτική ενέργεια. Στην **ενέργεια από παλίρροιες** γίνεται εκμετάλλευση της βαρύτητας του ήλιου και της σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Καθώς ανεβαίνει, το νερό αποθηκεύεται και αναγκάζεται να περάσει μέσα από μία τουρμπίνα για να ξανακατέβει, παράγοντας με αυτό τον τρόπο ηλεκτρισμό. Με τον όρο **ενέργεια από κύματα** νοείται η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των κυμάτων της θάλασσας.

Στην **ενέργεια από ωκεανούς** γίνεται εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων και τέλος στην **ωσμωτική ενέργεια** παρατηρείται ανάμειξη θαλασσινού και γλυκού νερού με αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Το πιο σύνηθες παράδειγμα ωσμωτικής ενέργειας συμβαίνει, όταν ένα ποτάμι καταλήγει στη θάλασσα.

Η παλιρροιακή ενέργεια είναι παρόμοια με την υδροηλεκτρική ενέργεια, που επεξηγήθηκε παραπάνω. Όπως και με την υδροηλεκτρική ενέργεια, έτσι και η παλιρροιακή ενέργεια παράγεται από το συνδυασμό νερού και ροής. Η κατασκευή φράγματος (Σχήμα 1.20) κατά μήκος του στομίου μίας εισόδου νερού αποτελεί μία σημαντική μέθοδο για την αξιοποίηση της παλιρροιακής ενέργειας. Όταν η παλίρροια έρχεται και φεύγει, το νερό μπορεί να ρέει και στις δύο κατευθύνσεις, και έτσι η ενέργεια παράγεται από τη ροή σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η απόσταση αλλάζει συνεχώς με τις παλοίρροιες από τη μέγιστη υψομετρική διαφορά μεταξύ υψηλής και χαμηλής παλίρροιας.



# Κεφάλαιο 2

## Αιολική Ενέργεια & Ανεμογεννήτριες

### 2.1 Εισαγωγή

Από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας καθίσταται δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με προσιτό κόστος. Οι Α/Γ έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση τη δεκαετία του 1890 σε Ευρώπη και Αμερική. Ωστόσο, ποικίλοι τύποι Α/Γ άρχισαν να αναπτύσσονται μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση το 1973, χρησιμοποιώντας τη σύγχρονη αεροδυναμική τεχνολογία. Το πρώτο αιολικό πάρκο της Ευρώπης εγκαταστάθηκε στην Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στο νησί της Κύθνου το 1982 και περιελάμβανε πέντε Α/Γ των 20KW [16].

Το κόστος εγκατάστασης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μία Α/Γ άρχισε να μειώνεται το χρονικό διάστημα 1980 έως 2000. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μείωση του κόστους έως και 80%, το οποίο συνεχίζει να μειώνεται, γεγονός που καθιστά σιγά σιγά τις Α/Γ μία από τις πιο συμφέρουσες πρωτογενείς πηγές ισχύος.

Για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται Α/Γ.

Μία Α/Γ αποτελείται από δύο μέρη [16]:

- Το *μετατροπέα*, που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια. Ο αιολικός μετατροπέας σε μία ανεμογεννήτρια ονομάζεται δρομέας ή ρότορας. Η δυναμική απόκριση του δρομέα και η αεροδυναμική του σχεδίαση έχουν καθοριστική επίδραση στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του ανέμου.
- Την *ηλεκτρογεννήτρια*, που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια στον άξονά της σε ηλεκτρική.

Η εγκατάσταση των Α/Γ γίνεται σε ομάδες, σχηματίζοντας ένα αιολικό πάρκο. Κάποια από τα πλεονεκτήματα των αιολικών πάρκων έναντι μίας μεμονωμένης Α/Γ είναι:

- Η μειωμένη διακύμανση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος εξαιτίας της μεταβλητότητας του ανέμου.

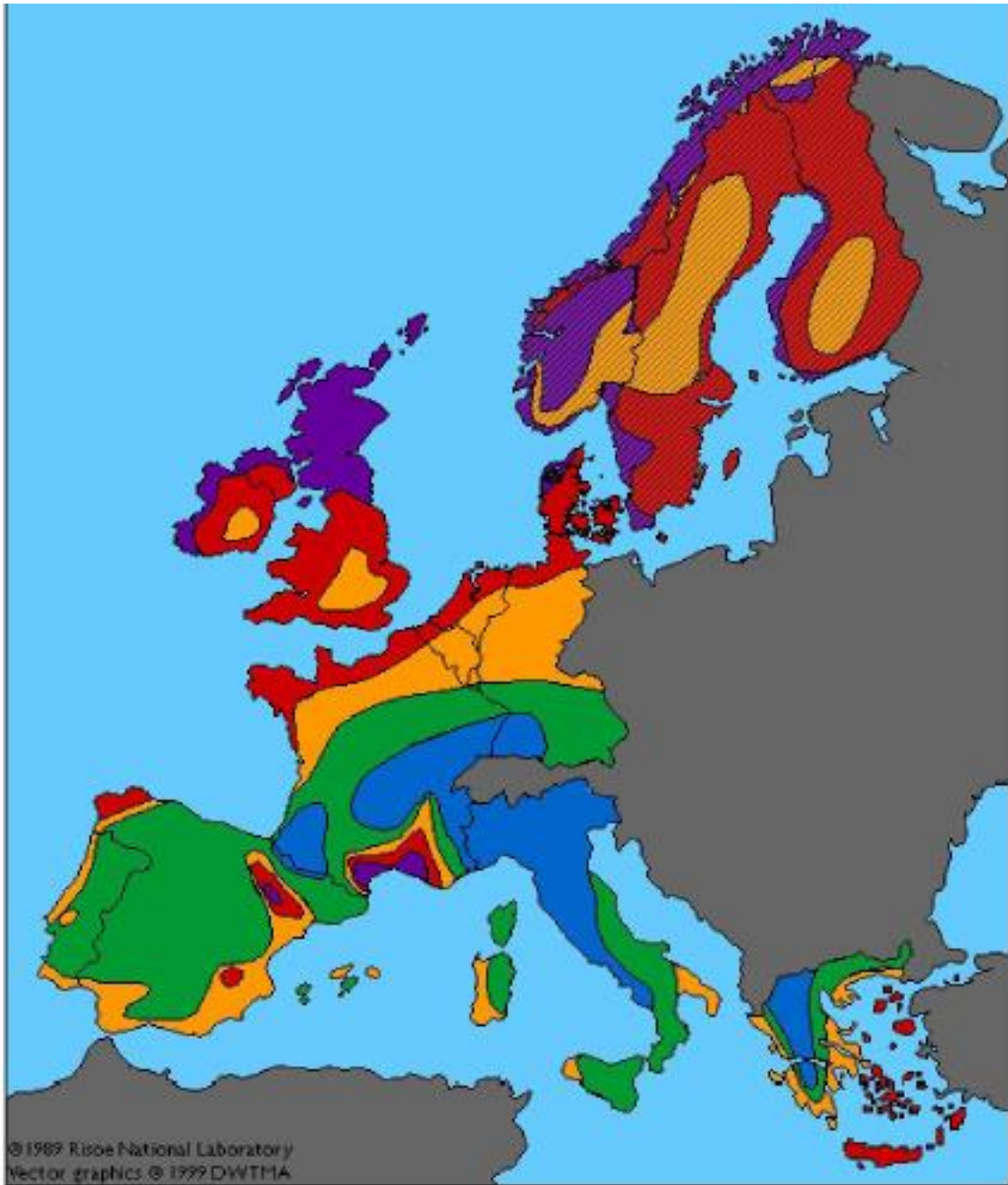
- Η σχετικά μικρή επιφάνεια εγκατάστασης δίχως να εμποδίζεται η περαιτέρω εκμετάλλευση της γης, είτε γεωργική είτε κτηνοτροφική.

Οι Α/Γ σε ένα αιολικό πάρκο θα πρέπει να τοποθετούνται σε κατάλληλη απόσταση με στόχο να υπάρχει μικρή αεροδυναμική επίδραση μεταξύ τους. Συνέπεια αυτού είναι η μείωση της συνολικά παραγόμενης ενέργειας και η αύξηση των στροβιλισμών του ανέμου. Η απόσταση μεταξύ των Α/Γ είναι επί το πλείστον 8 έως 12 φορές τη διάμετρο του δρομέα προς τη διεύθυνση του ανέμου και 2 έως 4 φορές τη διάμετρο του δρομέα κατά την εγκάρσια διεύθυνση του ανέμου [16].









## 2.2 Αιολικό Δυναμικό στην Ευρώπη

Σύμφωνα με Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (*EWEA*), η εγκατεστημένη ισχύς σε αιολική ενέργεια ξεπέρασε το όριο των  $100GW$  [17]. Το ποσό αυτό αντιστοιχεί στην παραγωγή ενέργειας από 39 πυρηνικούς σταθμούς και μπορεί να παράγει ετησίως ηλεκτρική ενέργεια, που καλύπτει την κατανάλωση περίπου 57 εκατομμυρίων νοικοκυριών. Διαχρονικά, η ΕΕ βρίσκεται ιδιαίτερα υψηλά στον τομέα της αιολικής ενέργειας, καταρρίπτοντας ακόμα και αισιόδοξους στόχους, που η ίδια έχει θέσει κατά καιρούς. Πιο συγκεκριμένα, το έτος 2010 η τελική πραγματική ισχύς ήταν υπερδιπλάσια του στόχου, που είχε τεθεί, φτάνοντας την συνολικά τα  $84,6GW$  και το έτος 2012 ρα  $106GW$ . Ταυτόχρονα, τα κράτη της ΕΕ βρίσκονται σε εξίσου υψηλό επίπεδο τεχνολογίας και τεχνογνωσίας αναφορικά με την αιολική ενέργεια, με εταιρείες κατασκευαστών να βρίσκονται στις κορυφαίες δέκα σε διεθνές επίπεδο. Υπολογίζεται, ότι ο κλάδος της αιολικής ενέργειας σε επίπεδο ΕΕ απασχολεί άμεσα και έμμεσα περί τους 200-250 χιλιάδες υπαλλήλους, είτε με πλήρη εργασία είτε με ημιαπασχόληση.

Ο χάρτης του αιολικού δυναμικού της Ευρώπης, από το *RISO National Laboratory*, δίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2.1) [18]. Το μωβ και το κόκκινο χρώμα απεικονίζουν τις περιοχές με υψηλό αέρα, ενώ το πράσινο και μπλε τις περιοχές με χαμηλό αέρα. Στη βόρεια θάλασσα έχει το υψηλότερο αιολικό δυναμικό και εκεί παρατηρούνται και οι περισσότερες *offshore* ανεμογεννήτριες. Οι μέγιστες τιμές των τάξεων του ανέμου βρίσκονται κατά κύριο λόγο στο νότιο τμήμα της Σκαδιναβίας και στην ευρύτερη περιοχή εντός και περιμετρικά του Ηνωμένου Βασιλείου. Υψηλό δυναμικό εντοπίζεται αντίστοιχα στη δυτική πλευρά της Γαλλίας, την Ισλανδία, την Κορσική, τη Σαρδηνία κ.α. Στην Ελλάδα παρατηρείται ότι ο πολύς αέρας είναι στο Αιγαίο Πέλαγος και ιδίως στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων, χωρίς αυτό να είναι απόλυτο μιας και υπάρχουν και άλλες αρκετές καλές θέσεις στη Στερεά Ελλάδα και την Πελοπόννησο.



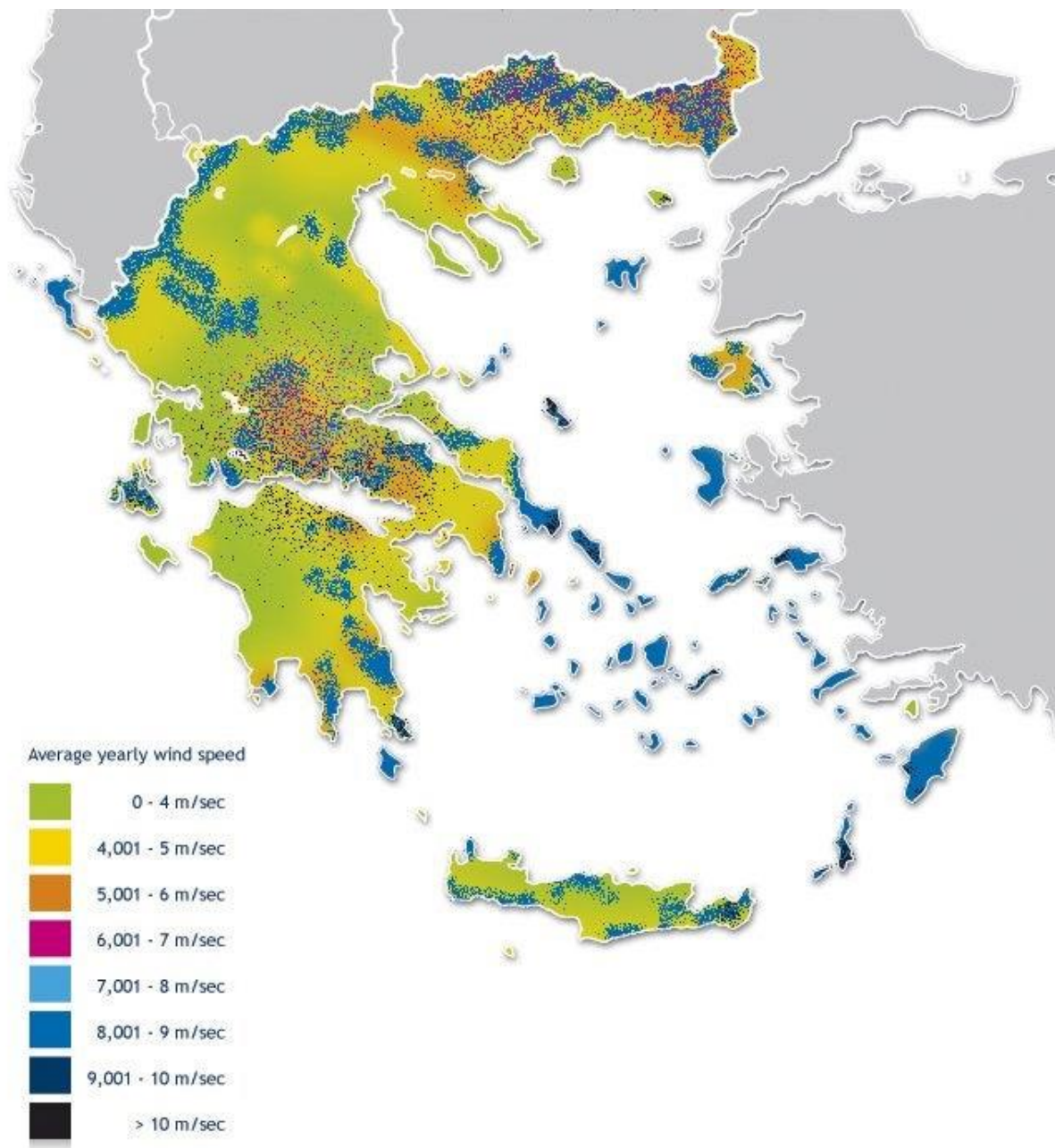
Wind resources at 50 meters above ground level for five different topographic conditions:  
 1) Sheltered terrain, 2) Open plain, 3) At a coast, 4) Open sea and 5) Hills and ridges.

	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							

Σχήμα 2.1: Χάρτης Αιολικού Δυναμικού της Ευρώπης [18]

## 2.3 Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα

Ο χάρτης του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας, από το *Global Energy Network*, απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2.2). Όπως φαίνεται οι ορεινοί όγκοι (Ανατολική και Νοτιοανατολική Πελοπόννησος, Ανατολική Θράκη και Εύβοια) και οι νησιωτικές περιοχές (νησιά τους Αιγαίου και Κρήτη) εμφανίζουν το υψηλότερο αιολικό δυναμικό [19].

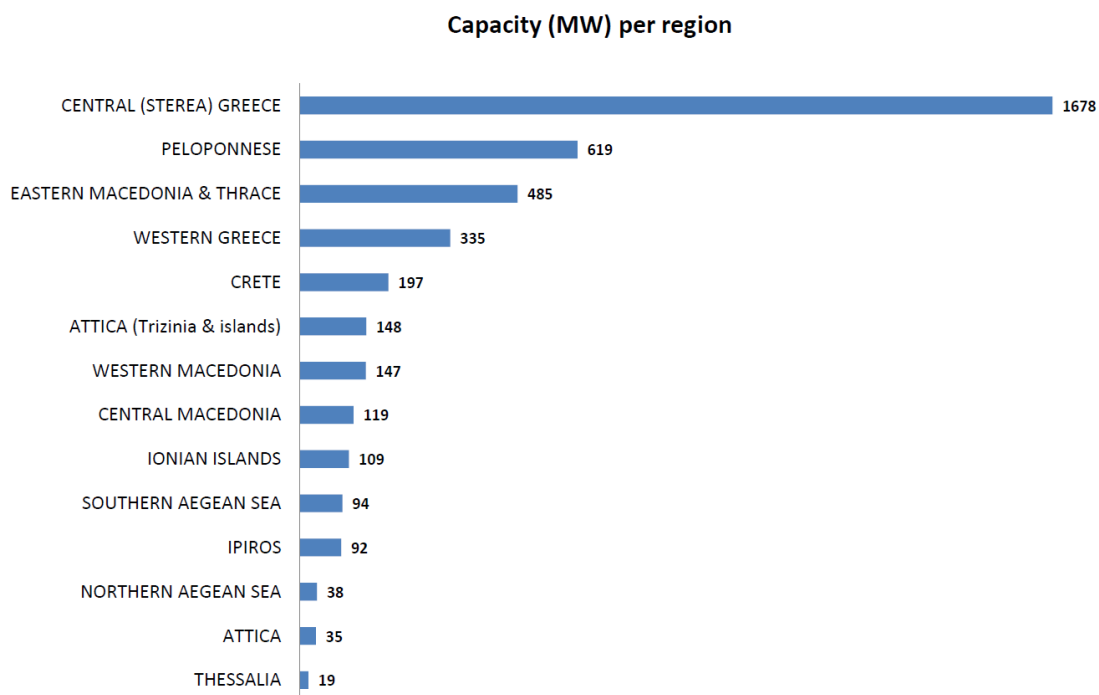
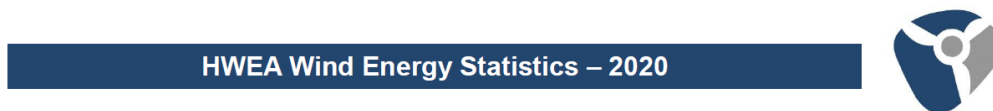


**Σχήμα 2.2:** Χάρτης Αιολικού Δυναμικού της Ελλάδας [19]

Οι προσπάθειες για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με στόχο την ηλεκτροπαραγωγή ξεκίνησαν από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οπότε εγκαταστήθηκε και το πρώτο αιολικό πάρκο της Ευρώπης στην Κύθνο.



Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 δόθηκε μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας με τη διευκόλυνση επενδύσεων από τους ιδιώτες. Από τότε έως και σήμερα, πολλά αιολικά πάρκα έχουν εγκατασταθεί σε περιοχές, όπως στην Εύβοια, την Κρήτη, την Άνδρο, την Χίο, τη Σάμο και σε πολλά άλλα μέρη του Ελλαδικού χώρου.



**Σχήμα 2.3:** Εγκατεστημένη Αιολική Ισχύς σε Περιφέρειες της Ελλάδας για το Έτος 2020 [20]

Παρά το πλούσιο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας αντιμετωπίζει αρκετά προβλήματα στη χώρα μας. Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, που παρατηρείται τα τελευταία έτη, δεν συμβαδίζει με τον πλούτο της αιολικής μας δύναμης. Η έλλειψη διασύνδεσης με το δίκτυο του συστήματος των ΜΔΝ, που αποτελούν και τις πλέον αποδοτικότερες περιοχές της Ελλάδας με ταχύτητες ανέμου που αγγίζουν τα 9m/s, αποτελεί τη βασική δυσκολία για μία πλήρη εκμετάλλευση του δυναμικού αυτού. Ταυτόχρονα, η έντονη εποχικότητα, που αποτελεί το κυρίαρχο χαρακτηριστικό της αιολικής ενέργειας, αυξάνει το κόστος παραγωγής της kWh και περιορίζει τη διαθεσιμότητα.

Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από μία μεγάλη ακτογραμμή και ένα τεράστιο πλήθος νησιών. Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα μας ευδοκίμει εξαιτίας των ισχυρών ανέμων, που πνέουν ιδίως στις παράλιες και νησιωτικές περιοχές. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται, ότι αντιπροσωπεύει περίπου το 15% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της Ελλάδας. Παρά το γεγονός ότι το δυναμικό αυτό παραμένει επί το πλείστον ανεκμετάλλευτο, προσπάθειες για ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα έχουν ήδη αρχίσει.



**Σχήμα 2.4:** Ελληνικός Χάρτης Εγκατεστημένης Αιολικής Ισχύος σε Περιφέρειες της Ελλάδας για το Έτος 2020 [20]

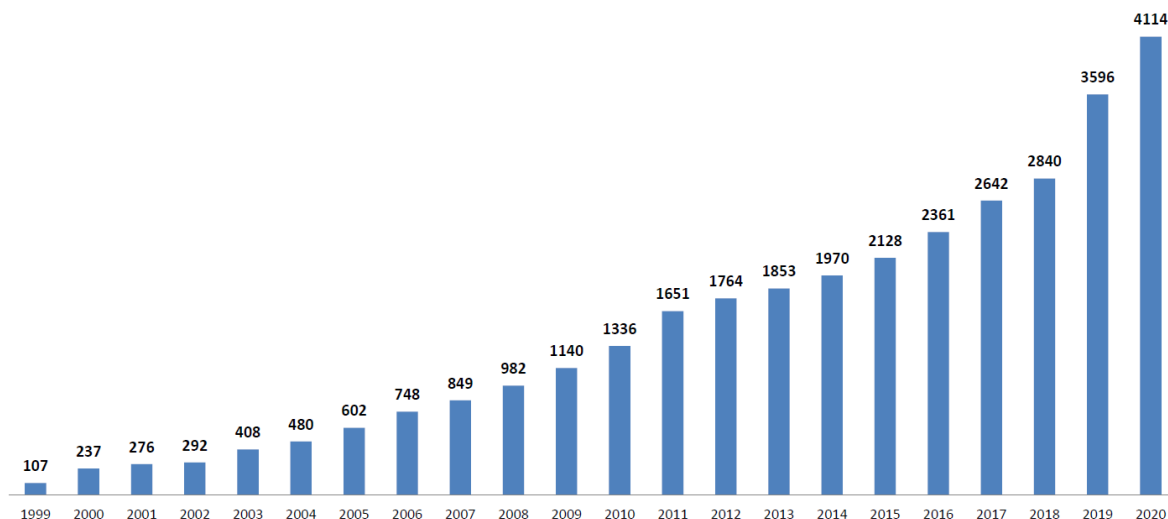
Παράλληλα, η πολιτική της ΕΕ αναφορικά με τις ΑΠΕ, που ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις που αφορούν ήπιες μορφές ενέργειας, επιταχύνουν τη διαδικασία αυτή. Εσωτερικά, ο αναπτυξιακός νόμος 3299/04, σε συνδυασμό με το νόμο 3486/06 για ΑΠΕ, παρέχει ισχυρά κίνητρα, ακόμα και για μικρής κλίμακας επενδύσεις, που αφορούν την αιολική ενέργεια.

Η κατασκευή των Α/Γ αποτελεί ένα αντικείμενο οικονομικά και τεχνολογικά προσιτό στις μεγάλες βιομηχανίες της Ελλάδας, κάνοντας τις μελλοντικές προοπτικές για την ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας ιδιαίτερα αισιόδοξες. Ταυτόχρονα, η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε πολλά σημεία της χώρας μας βρίσκεται σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα παραγωγής ενέργειας και αν αυτό εκμεταλλευτεί ορθά μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας. Ποικίλες εκτιμήσεις εκθέτουν τη δυνατότητα για εγκατάσταση και λειτουργία αιολικών μονάδων συνολικής ισχύος 3GW τόσο στην ενδοχώρα (άμεση ενίσχυση και βελτίωση του διασυνδεδεμένου δικτύου της χώρας) όσο και στο νησιωτικό σύμπλεγμα, με δυνατότητα να καλυφθεί το 25-35% των αναγκών της Ελλάδας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στα παράκτια και τα θαλάσσια αιολικά πάρκα στην Ελλάδα. Στη θάλασσα πνέουν εντονότεροι άνεμοι και η παραγόμενη ενέργεια μεταβάλλεται ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου.



## Total capacity to the grid (MW) per year



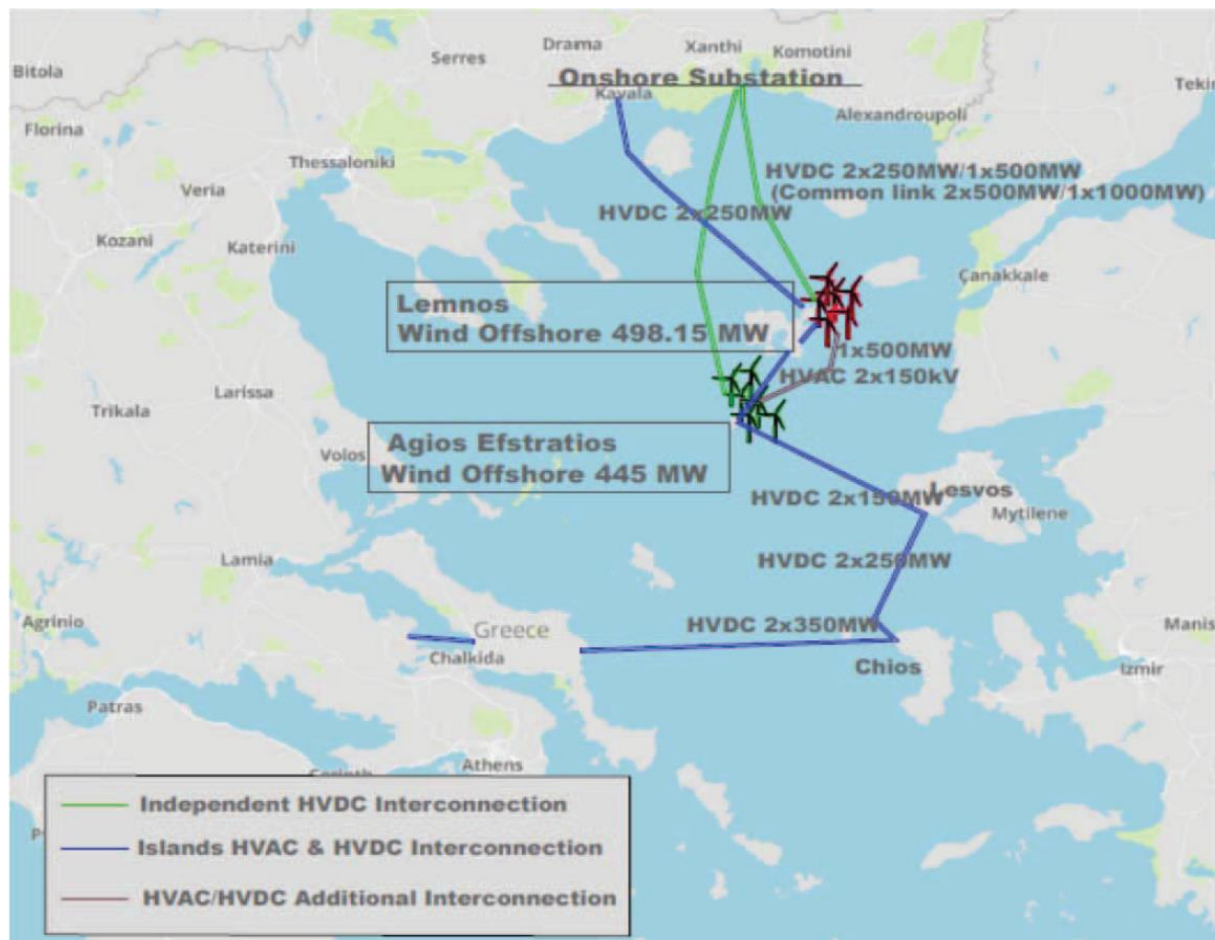
**Σχήμα 2.5:** Συνολική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Α/Γ στο Ελληνικό Δίκτυο από το Έτος 1999 έως το Έτος 2020 [20]

Μία θαλάσσια Α/Γ εκτιμάται ότι μπορεί να παράγει αρκετή ενέργεια μέσα σε έναν χρόνο, ώστε να καλύψει τις ανάγκες περίπου 1500 νοικοκυριών, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να περιορίσει κατά 35000tn την παραγωγή του  $CO_2$ . Συνυπολογίζοντας το χρόνο ζωής τους, που είναι 25 έτη μεγαλύτερος στη θάλασσα, προκύπτει πόση υψίστης σημασίας είναι η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας για την προστασία του περιβάλλοντος.

Σε πολλά ελληνικά νησιά, οι κάτοικοι αντιδρούν στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων, σκεπτόμενοι το αρνητικό αντίκτυπο, που ενδέχεται να έχουν στον τουρισμό. Σε αυτή την περίπτωση, λύση στο πρόβλημα έρχονται να δώσουν τα *offshore* Αιολικά Πάρκα, που βρίσκουν ιδιαίτερη αναγνωρισιμότητα στη Σκαδιναβία και τη Γερμανία, και κατασκευάζονται μέσα στη θάλασσα σε μέρη με ιδιαίτερα υψηλό αιολικό δυναμικό. Το Αιγαίο Πέλαγος αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, και προσφέρεται για τέτοιου είδους χρήση. Υπολογίζεται ότι το θαλάσσιο αιολικό πάρκο έχει τη δυνατότητα να παράγει ετησίως μέχρι και 40% περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα από ότι ένα χερσαίο αιολικό πάρκο.

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) στη Λήμνο έχει δώσει την άδεια για την κατασκευή του τρίτου μεγαλύτερου θαλάσσιου αιολικού πάρκου στον κόσμο (Σχήμα 2.6), αποτελούμενο από 81 Α/Γ με συνολική ισχύ 498,15MW [21]. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα ακριβή επένδυση συνολικού ύψους 2 δισεκατομμυρίων ευρώ. Η εγκατάσταση του έργου θα γίνει βορειοανατολικά της νήσου σε απόσταση 2km από την ακτή, ώστε να μην προκαλεί οπτική όχληση. Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχτηκε εξαιτίας του ανεμολογικού της δυναμικού και του μικρού της βάθους, μιας και όσο αυξάνεται το βάθος τόσο αυξάνεται γεωμετρικά και το κόστος κατασκευής για ένα υπεράκτιο πάρκο.

Η σύνδεση θα επιτευχθεί διαμέσου υποθαλάσσιου καλωδίου μήκους περίπου 120km, που θα φτάνει στα παράλια της Ξάνθης και από εκεί θα ενώνεται με το υπόλοιπο εθνικό σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας.



Σχήμα 2.6: Θαλάσσιο Αιολικό Πάρκο στη Λήμνο & Υποθαλάσσια Σύνδεση με Νομό Ξάνθης [22]

## 2.4 Λειτουργία Ανεμογεννητριών

Η Α/Γ είναι μία μηχανή, που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια της Α/Γ, που είναι συνδεδεμένα με έναν περιστρεφόμενο άξονα, ο οποίος περνάει σε ένα κιβώτιο μετάδοσης κίνησης. Αυτό το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής, ο οποίος κινεί μία γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Έπειτα από εξέταση διαφόρων γεωλογικών, τοπογραφικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων επιλέγεται η θέση, όπου θα τοποθετηθεί η Α/Γ. Παράλληλα, συνυπολογίζονται τα χαρακτηριστικά και οι συνεχείς μετρήσεις του ανέμου στο σημείο, όπου θα τοποθετηθεί η Α/Γ ή το αιολικό πάρκο.

Πιο συγκεκριμένα, με στόχο τη βέλτιστη επιλογή τοποθεσίας για την εγκατάσταση της Α/Γ και την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας λαμβάνονται μετρήσεις της ταχύτητας, της διεύθυνσης, του στροβιλισμού και των αναταράξεων του ανέμου. Μόλις γίνει εντοπισμός της κατάλληλης τοποθεσίας, τοποθετούνται μερικές δεκάδες Α/Γ και δημιουργείται έτσι ένα αιολικό πάρκο.

Η ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από αυτές τις Α/Γ, διαμοιράζεται στο τοπικό δίκτυο και διανέμεται στους καταναλωτές. Για να μπορέσει μία Α/Γ να παράγει ηλεκτρισμό, θα πρέπει η μέση ταχύτητα του ανέμου να είναι περίπου  $15\text{km/h}$ . Σε αυτή την περίπτωση, που η ένταση του ανέμου ενισχυθεί υπερβολικά πολύ, η Α/Γ διαθέτει ένα σύστημα πέδησης, που περιορίζει την περιστροφή των πτερυγίων και έτσι περιορίζεται η φθορά και αποφεύγεται η καταστροφή της.

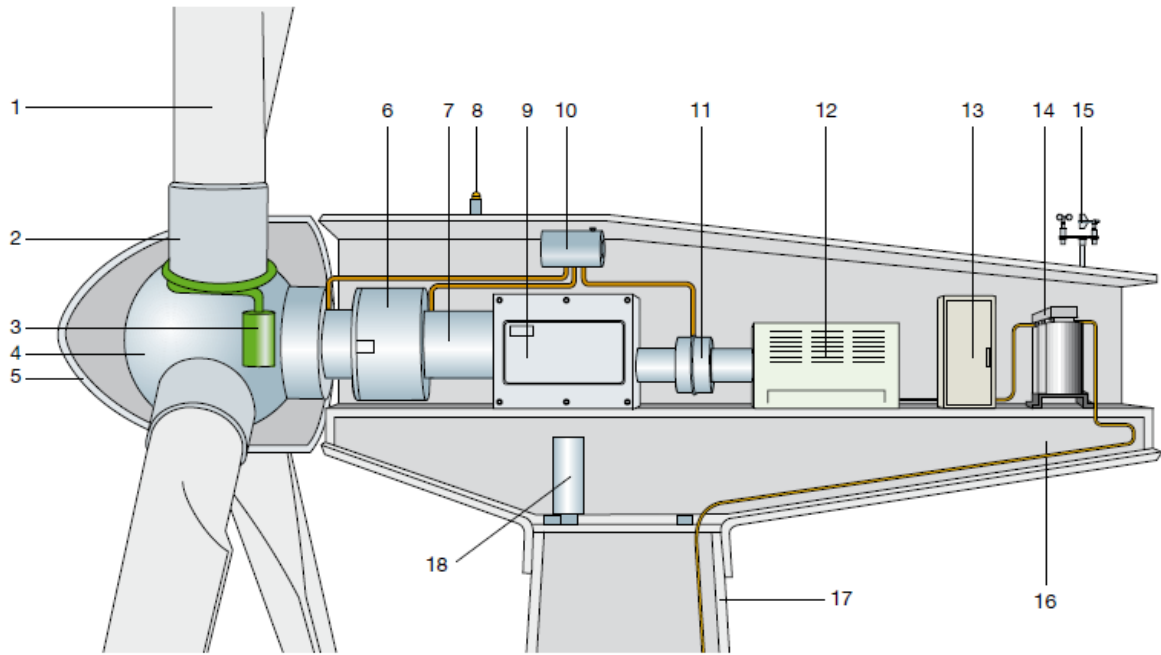
Καθώς η ανεμογεννήτρια περιστρέφεται παράγει ηλεκτρισμό και πιο συγκεκριμένα εναλασσόμενη τάση (400-1000V). Η τάση, που παράγει, ανυψώνεται στον υποσταθμό, που συνοδεύει κάθε Α/Γ, και τις περισσότερες φορές βρίσκεται στη βάση της με στόχο να συνδεθεί με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στη συνέχεια, μετασχηματίζεται σε ακόμα υψηλότερες τιμές στους ηλεκτρικούς υποσταθμούς της ΔΕΗ από τους μετασχηματιστές τάσης. Οι αγωγοί μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κατασκευασμένοι από χαλκό ή αλουμίνιο συγκεκριμένης διατομής, ώστε να υπάρχει μικρότερη αντίσταση στη μεταφορά ρεύματος. Η υψηλή τάση μέσω των αγωγών μεταφοράς καταλήγει σε έναν άλλον υποσταθμό, όπου οι μετασχηματιστές του υποβιβάζουν την υψηλή σε χαμηλή εναλασσόμενη τάση για να φτάσει στους καταναλωτές προς χρήση.

Η ισχύς, που αποδίδει μία Α/Γ, είναι συνάρτηση του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, της πυκνότητας του ανέμου και των τεχνικών χαρακτηριστικών του συγκροτήματος. Ο λόγος για τον οποίο οι Α/Γ τοποθετούνται πάντα στην κορυφή υψηλών πύργων είναι διότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος. Ωστόσο, κάποιοι θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι για την παραγωγή ωφέλιμου έργου μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο το 53,9% της συνολικής ενέργειας του ανέμου. Η γεννήτρια, σύγχρονη ή ασύγχρονη, παράγει την ηλεκτρική ενέργεια και τροφοδοτεί την κατανάλωση. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι χρονικά ασυνεχής, διότι ακολουθεί την παροχή του ανέμου, ενώ η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τις ώρες της ημέρας, την εποχή, την κοινωνική και οικονομική δομή των καταναλωτών.

## 2.5 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

Ανάλογα με τον προσανατολισμό τους ως προς τη ροή του ανέμου, οι σύγχρονες Α/Γ διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- *Ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα*, ο οποίος διατηρείται παράλληλος με τη διεύθυνση του ανέμου και με την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 2.7)
- *Ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα*, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους και τη διεύθυνση του ανέμου



**Σχήμα 2.7:** Τυπική Δομή Ανεμογεννήτριας με Οριζόντιο Άξονα [23]:

- 1 - Πτερύγια,
- 2 - Στήριξη Πτερυγίων,
- 3 - Μηχανισμός Κλίσης Πτερυγίων,
- 4 - Πλήμνη,
- 5 - Περίβλημα Πλήμνης,
- 6 - Στήριξη Δρομέα,
- 7 - Άξονας Χαμηλής Ταχύτητας Δρομέα,
- 8 - Φώτα Σήμανσης,
- 9 - Κιβώτιο Ταχυτήτων,
- 10 - Υδραυλικό Σύστημα,
- 11 - Φρένο,
- 12 - Ηλεκτρογεννήτρια,
- 13 - Ηλεκτρολογικός Πίνακας,
- 14 - Μετασχηματιστής,
- 15 - Ανεμόπτερα,
- 16 - Περίβλημα Ατράκτου,
- 17 - Πύργος,
- 18 - Μηχανισμός Προσαντολισμού Ατράκτου

Πιο αναλυτικά, σε μία τυπική Α/Γ οριζοντίου άξονα, ο δρομέας αποτελείται από το μηχανικό άξονα, στο ένα άκρο του οποίου συνδέεται η πλήμνη και στο άλλο η ηλεκτρογεννήτρια. Τις περισσότερες φορές η γεννήτρια συνδέεται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο προσαρμόζει την αργή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, στην υψηλότερη ονομαστική ταχύτητα της γεννήτριας. Στον άξονα της ηλεκτρογεννήτριας τοποθετείται υποχρεωτικά το μηχανικό φρένο, που συνήθως έχει τη μορφή δίσκου, αντίστοιχο με τα δισκόφρενα των αυτοκινήτων.

Στις Α/Γ πολύ μεγάλης ισχύος, το φρένο σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ακινητοποιεί το στρεφόμενο σύστημα, μόνο όταν η Α/Γ είναι εκτός λειτουργίας, ακόμα και όταν η ταχύτητα του ανέμου έχει τη μέγιστη τιμή της. Στις μικρότερης ισχύος Α/Γ, το φρένο συνήθως διαστασιολογείται ώστε να σταματά το δρομέα, κατά τη λειτουργία της Α/Γ στην πλήρη ισχύ.

Τα πτερύγια στηρίζονται στην πλήμνη είτε σταθερά είτε με τη δυνατότητα να στρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονά τους. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης και η ηλεκτρογεννήτρια προστατεύονται από ένα περίβλημα, που ονομάζεται άτρακτος και τοποθετείται πάνω στον πύργο, ο οποίος στηρίζει την πλήρη ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.

Με βάση τον αριθμό των πτερυγίων του δρομέα τους, οι Α/Γ οριζοντίου άξονα διακρίνονται σε μονόπτερες, δίπτερες και τρίπτερες. Ο δρομέας με τρία πτερύγια είναι ο πλέον διαδεδομένος, καθώς εμφανίζει την καλύτερη μηχανική και αεροδυναμική συμπεριφορά. Μάλιστα, το 99% των εγκατεστημένων Α/Γ οριζοντίου άξονα, φέρει τρία πτερύγια.

Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα έχουν το πλεονέκτημα, ότι το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια και άλλα μέρη της Α/Γ τοποθετούνται στο έδαφος και έτσι δεν χρειάζεται η κατασκευή του πύργου στήριξης. Παράλληλα, δεν απαιτείται και κάποιο σύστημα προσανατολισμού. Εντούτοις, οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν κάποια πρακτικά μειονεκτήματα, που επικεντρώνονται στο γεγονός, ότι το κάτω μέρος του δρομέα βρίσκεται πολύ κοντά στο έδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να έχουν μέτρια συνολική απόδοση. Ταυτόχρονα, ο δρομέας δεν αναπτύσσει ροπή εκκίνησης. Λόγω των καλωδίων στήριξης, απαιτείται σχετικά μεγάλη επιφάνεια και συναντώνται αρκετές δυσκολίες κατά τη διάρκεια της μηχανικής συντήρησης. Αυτά τα μειονεκτήματα οδήγησαν στην επικράτηση των Α/Γ οριζοντίου άξονα, ιδίως τριών πτερυγίων.

Μία άλλη βασική διάκριση των σύγχρονων Α/Γ είναι σε:

- *Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών*, που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο και η ταχύτητα περιστροφής τους εξαρτάται από τη συχνότητα του δικτύου και όχι από την ταχύτητα του ανέμου. Λειτουργούν έτσι σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Οι Α/Γ αυτές δεν εκμεταλλεύονται με το βέλτιστο τρόπο την αεροδυναμική ροπή, λόγω των σταθερών στροφών, με αποτέλεσμα να έχουν χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με τις γεννήτριες μεταβλητών στροφών.
- *Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών*, που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος AC/DC/AC, όπου ο ρυθμός περιστροφής τους μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Τις περισσότερες φορές, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών χρησιμοποιούν τον έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Με τη λειτουργία των μεταβλητών στροφών, η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στην εκάστοτε ταχύτητα του ανέμου.

Εξαιτίας της καταπόνησης των μηχανικών μερών, της χαμηλής ποιότητας ισχύος εξόδου και του χαμηλού αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουν αντικαταστήσει τις Α/Γ σταθερών στροφών. Με στόχο τη μείωση του αεροδυναμικού θορύβου της καταπόνησης των μηχανικών μερών της Α/Γ, οι Α/Γ μεταβλητών στροφών μπορούν να ελεγχθούν καταλλήλως ώστε να λειτουργούν με υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου.

Ανάλογα τώρα με την εφαρμογή, την οποία χρησιμοποιούνται, οι Α/Γ διακρίνονται σε:

- *Συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας*, όπου η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η εγκατάσταση ενός μετατροπέα, όχι όμως η αποθήκευση της ενέργειας σε μπαταρίες.
- *Αυτόνομες*, που είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται μπαταρίες για την αποθήκευση της ενέργειας, καθώς και εγκατάσταση ενός μετατροπέα συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

Μία ακόμα διάκριση των Α/Γ αφορά και τον τύπο γεννήτριας με τον οποίο είναι εφοδιασμένες και τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται στο δίκτυο:

- Ασύγχρονη γεννήτρια μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδότησης
- Ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού, σταθερών στροφών απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο
- Ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, μεταβλητών στροφών, μεταβλητής αντίστασης απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο
- Σύγχρονη γεννήτρια μεταβλητών στροφών με τύλιγμα διέγερσης ή μόνιμη μαγνήτη και μετατροπέας AC/DC/AC στο στάτη για σύνδεση στο δίκτυο

## 2.6 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά & Συντήρηση Ανεμογεννητριών

Τα κυρίαρχα λειτουργικά χαρακτηριστικά, που διέπουν μία ανεμογεννήτρια είναι:

- *Ταχύτητα Εκκίνησης*: Πρόκειται για την ταχύτητα του ανέμου, στην οποία η Α/Γ αρχίζει να παράγει ισχύ. Η ταχύτητα αυτή είναι μεγαλύτερη από αυτή, που απαιτείται για να αρχίσουν να στρέφονται τα πτερύγια.
- *Ταχύτητα Αποκοπής*: Τη στιγμή, που η ταχύτητα του ανέμου θα περάσει την ταχύτητα αποκοπής διακόπτεται η λειτουργία της Α/Γ για αποφυγή υπερφόρτισής της.
- *Ονομαστική Ταχύτητα*: Πρόκειται για την ταχύτητα του ανέμου, υπό την οποία μπορεί να παραχθεί η ονομαστική ισχύς.
- *Ονομαστική Ισχύς*: Πρόκειται για τη μέγιστη ισχύ, που μπορεί να παραχθεί συνεχώς κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας.

Μία επιπλέον βασική παράμετρος για την εύρυθμη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου είναι η συντήρηση των Α/Γ. Η συντήρηση περιλαμβάνει ποικίλους επιτόπιους ελέγχους όλων των εξαρτημάτων και των συνδέσεων με το δίκτυο σε τακτική βάση, επιδιόρθωση βλαβών και αντικατάσταση των εξαρτημάτων, που αστόχησαν ή συμπλήρωσαν τον χρόνο ζωής τους. Ένας πολύ βασικός παράγοντας, που καθορίζει την αστοχία ή το ατύχημα, είναι οι δονήσεις, που δέχονται κατά κύριο λόγο τα πτερύγια και μπορούν να προκαλέσουν μετατόπιση υλικών, αποκόλληση κάποιων συνδέσμων και μερικό ή ολικό σπάσιμο των πτερυγίων.



Πιθανή βλάβη σε μία Α/Γ μπορεί να προκαλέσει και η σκόνη. Η σκόνη, με τη μορφή γύρης, χνουδιών, σπόρων ή εντόμων, μπορεί να παρεμποδίσει τη ροή του αέρα και να μειώσει την ψύξη.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αύξηση της θερμοκρασίας διαφόρων μηχανικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων, όπως είναι η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ή το κιβώτιο ταχυτήτων. Για την εξάλειψη αυτών των προβλημάτων και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας λειτουργικής αστοχίας είναι απαραίτητη η εκτέλεση κατάλληλης προληπτικής συντήρησης. Η συντήρηση των Α/Γ μπορεί να χωριστεί σε υποκατηγορίες ανάλογα με το λόγο, για τον οποίο γίνονται:

- *Προληπτική Συντήρηση:* Πρόκειται για μία συντήρηση, που περιλαμβάνει ποικίλες εργασίες, ελέγχους και δραστηριότητες σε διάφορα μέρη των Α/Γ. Εκτός των άλλων καθίσταται σημαντική και για τη βελτίωση της λειτουργίας των Α/Γ. Για παράδειγμα, αν δεν εκτελεστεί η λίπανση των κινούμενων μερών, που περιλαμβάνεται στην προληπτική συντήρηση, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές συνέπειες ακόμα και σε βραχυπρόθεσμες λειτουργίες.
- *Έγκαιρη Συντήρηση:* Βασίζεται στην ανάλυση συγκεκριμένων στοιχείων για μία έγκαιρη ανίχνευση των μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας. Εκτελείται επίσης τακτικά, αναλύοντας ορισμένα δεδομένα, τα οποία οι τεχνικοί καταχωρούν και προσφέρουν έτσι τη δυνατότητα ανάλυσης και σύγκρισής τους. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν αξιοσημείωτα συμπεράσματα όσον αφορά την εξέλιξη κάποιων μεταβλητών. Έτσι επιτρέπεται ο προγραμματισμός διορθωτικών εργασιών με την ελάχιστη δυνατή επίδραση στην παραγωγικότητα κάθε Α/Γ.
- *Προαιρετική Συντήρηση:* Ασχολείται κατά κύριο λόγο με την ανάλυση των υπαρχόντων βλαβών και την προέλευσή τους. Ταυτόχρονα, εστιάζει στην αναγνώριση και τη διόρθωση των αιτιών των βλαβών τόσο στα εξαρτήματα όσο και στη διαδικασία εγκατάστασης της Α/Γ. Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι για την πρόληψη αυτού του είδους των σφαλμάτων, όπως τροποποιήσεις στο σχεδιασμό, βελτίωση των διαδικασιών συντήρησης και βελτιώσεις στην εκπαίδευση του προσωπικού συντήρησης.

Ανεξαρτήτως του είδους της συντήρησης, το πρώτο βήμα, που εκτελείται με την άφιξη στο αιολικό πάρκο, είναι ο έλεγχος της κατάστασης κάθε Α/Γ. Αν μία Α/Γ δεν λειτουργεί εξαιτίας μίας βλάβης, τότε χρήζει διορθωτικής ενέργειας. Η διορθωτική συντήρηση σε μία Α/Γ είναι μια διαδικασία κατά την οποία εκτελούνται οι απαιτούμενες εργασίες συντήρησης με στόχο τη διόρθωση πιθανών σφαλμάτων, την αντικατάσταση εξαρτημάτων και τη διόρθωση οποιασδήποτε αστοχίας έχει προκύψει. Πρόκειται για μία διεργασία αρκετά πολύπλοκη και ανάλογα με το είδος της βλάβης, πολλές φορές και χρονοβόρα.

Οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες, το μέγεθος των παρατηρούμενων βλαβών και άλλοι παράμετροι μπορεί να καθυστερήσουν σημαντικά μία συντήρηση. Η καθυστέρηση πραγματοποίησης μίας συντήρησης ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα λειτουργίας, για αυτό κρίνεται σκόπιμο να αποθηκεύονται δεδομένα και να αναλύονται συστηματικά. Ο αριθμός των ωρών λειτουργίας μίας Α/Γ, η παραγωγική της ικανότητα, ο μέσος χρόνος μεταξύ των παρατηρούμενων βλαβών και ο μέσος χρόνος επιδιόρθωσής τους αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικές πληροφορίες για ένα αιολικό πάρκο.

## 2.7 Λειτουργία Αιολικού Πάρκου

Η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου αρχίζει τη στιγμή, που ο άνεμος κινεί τα πτερύγια μίας Α/Γ συμβάλλοντας στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Το ρεύμα αυτό διαμέσου καλωδίων μεταβαίνει στον υποσταθμό, που βρίσκεται στη βάση κάθε Α/Γ. Εκεί η γίνεται μετατροπή της τάσης από χαμηλή σε μέση.

Στη συνέχεια διαμέσου του δικτύου Μέσης Τάσης (ΜΤ) μεταβαίνει στον κεντρικό υποσταθμό ΜΤ, όπου γίνεται συλλογή του ρεύματος από όλες τις Α/Γ του πάρκου και κατόπιν μεταφέρεται στον υποσταθμό Υψηλής Τάσης (ΥΤ). Εκεί, η τάση μετατρέπεται σε υψηλή και εν τέλει διοχετεύεται στο εθνικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας διαμέσου της γραμμής διασύνδεσης ΥΤ.

Η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται καθημερινά με ένα εποπτικό σύστημα ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA). Το SCADA συνδέει όλα τα δομικά μέρη ενός αιολικού πάρκου με έναν κεντρικό υπολογιστή, μέσω του οποίου δίνεται η δυνατότητα σε έναν χειριστή να επιβλέπει τη λειτουργία του πάρκου. Ταυτόχρονα, το σύστημα αποθηκεύει τις πληροφορίες αυτές, συμβάλλοντας στον εντοπισμό αστοχιών και προβλημάτων λειτουργίας συγκεκριμένων αιολικών μηχανών.

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1197/1991, η τοποθέτηση αλεξικεραύνων εξασφαλίζει την αντικεραυνική προστασία των εγκαταστάσεων του πάρκου. Ο αριθμός τους καθορίζεται από σχετική μελέτη. Παράλληλα, για λόγους πυρασφάλειας, αφαιρείται η βλάστηση γύρω από όλους τους υποσταθμούς σε όλη την περίοδο λειτουργίας της αιολικής εγκατάστασης, ενώ τοποθετείται χαλίκι στην επιφάνεια του εδάφους, ώστε να γίνεται αποστράγγιση των υδάτων.

Για την επίτευξη γείωσης θάβεται μεταλλικό πλέγμα κάτω από του υποσταθμούς διαχείρισης ρεύματος, ενώ όλος ο ηλεκτρικός εξοπλισμός τοποθετείται πάνω σε σε πλάκες σκυροδέματος. Γύρω από όλες τις εγκαταστάσεις τοποθετείται περίφραξη με ψηλούς μεταλλικούς φράκτες για την αποφυγή πρόσβασης σε μη εξουσιοδοτημένα άτομα ή άγριων ζώων στους χώρους του πάρκου.

# Κεφάλαιο 3

## Συστήματα Γείωσης

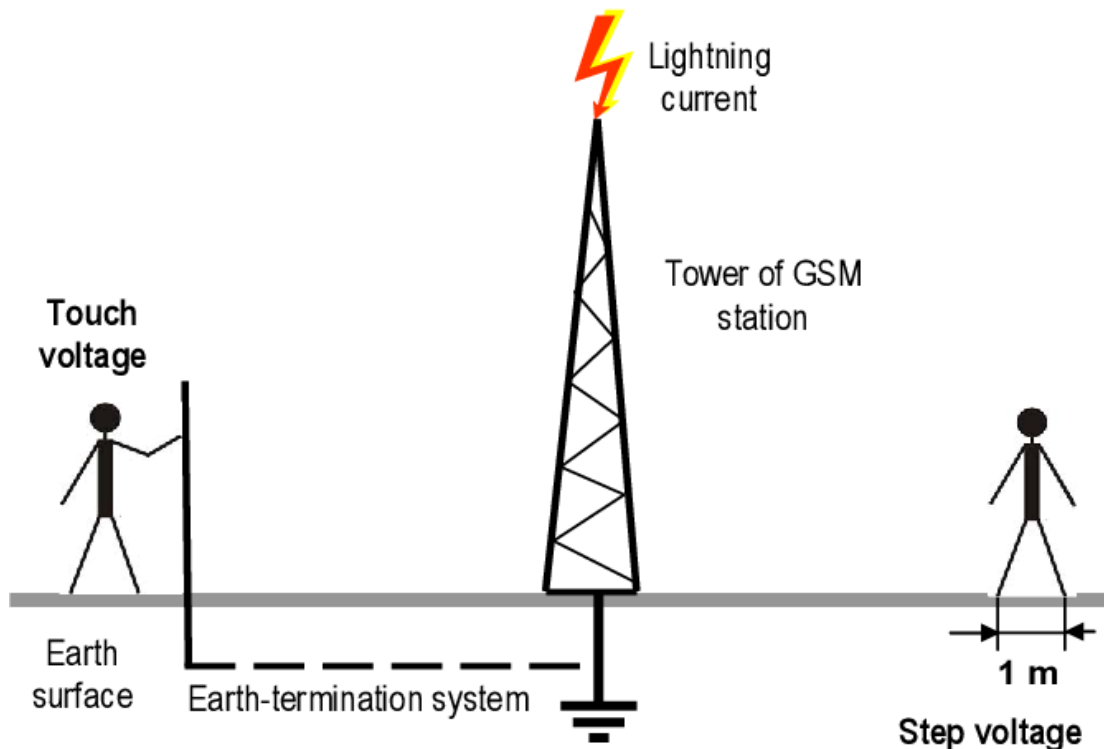
### 3.1 Εισαγωγή

Η ορθή λειτουργία ενός συστήματος γείωσης για οικιακή ή βιομηχανική χρήση, καθώς και στην περίπτωση κατασκευής ενός υποσταθμού ΥΤ είναι εξαιρετικά μεγάλης σημασίας. Στον παρόν κεφάλαιο δίνεται αναλυτικά η ορολογία και βασικές έννοιες, που αφορούν τα συστήματα γείωσης, είδη και μέθοδοι γειώσεων, η δομή και ειδική αντίσταση εδάφους, καθώς και η ασφάλεια γειώσεων και το ανεκτό όριο ρεύματος από το ανθρώπινο σώμα. Η ορολογία, που χρησιμοποιήθηκε, βασίζεται στο πρότυπο *IEEE Std 80-2013* [24].

### 3.2 Ορολογία Συστημάτων Γείωσης

- *Γείωση (Ground)*: Με τον όρο γείωση ορίζεται μια αγωγή σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, με την οποία ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή εξοπλισμός συνδέεται με τη γη ή με ένα αγωγίμο στοιχείο μεγάλης έκτασης που παίζει το ρόλο της γης,
- *Ηλεκτρόδιο Γείωσης (Ground Electrode)*: Ονομάζεται ένας αγωγός τοποθετημένος μέσα στη γη, ο οποίος χρησιμοποιείται για να συλλέγει το ρεύμα γης ή το διαρρέον ρεύμα προς γη.
- *Κυρίως Ηλεκτρόδιο Γείωσης (Primary Ground Electrode)*: Ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, που είναι προσαρμοσμένο ή σχεδιασμένο για την αποφόρτιση του ρεύματος σφάλματος προς γη στο έδαφος, συνήθως με ένα συγκεκριμένο πρότυπο αποφόρτισης, όπως απαιτείται από το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης.
- *Αγωγός Γείωσης*: Ονομάζεται η αγωγή σύνδεση ανάμεσα στο σημείο του υπό γείωση κυκλώματος και του γειωτή.
- *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.
- *Ρεύμα Γης (Ground Current)*: Ορίζεται το ρεύμα, που ρέει από ή προς τη γη ή το ισοδύναμο γης.

- *Σύστημα Γείωσης (Grounding System)*: Εμπεριέχει όλες τις διασυνδεδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής.
- *Γειωμένο*: Ένα κύκλωμα, σύστημα ή συσκευή μαζί με μία γείωση για τη δημιουργία ενός κυκλώματος επιστροφής γης και τη διατήρηση του δυναμικού του σχεδόν ίσου με το δυναμικό της γης.
- *Τάση Επαφής (Touch Voltage)*: Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού του εδάφους ενός πλέγματος γείωσης ή ενός συστήματος και στο δυναμικό επιφάνειας σε ένα σημείο, όπου ένας άνθρωπος θα μπορούσε να στεκόταν ενώ ταυτόχρονα ευρίσκεται σε επαφή με μία γειωμένη δομή. Οι μετρήσεις τάσεως επαφής διακρίνονται σε «ανοικτού κυκλώματος», όπου δεν συμπεριλαμβάνεται η ισοδύναμη αντίσταση του σώματος στο κύκλωμα μέτρησης και «κλειστού κυκλώματος», όπου η ισοδύναμη αντίσταση του σώματος συμπεριλαμβάνεται στο κύκλωμα μέτρησης.
- *Βηματική Τάση (Step Voltage)*: Ορίζεται η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης, η οποία εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ανθρώπου, που κάνει βήμα ανοίγματος 1m, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο.



**Σχήμα 3.1:** Απεικόνιση Τάσης Επαφής και Βηματικής Τάσης [25]

- *Κάλυμα Γείωσης (Ground Mat)*: Ονομάζεται ένα σύστημα κοντινών μεταξύ τους γυμνών αγωγών ή μία συμπαγής μεταλλική πλάκα, που τοποθετείται συνήθως σε μικρά βάθη πάνω από ένα πλέγμα γείωσης ή αλλού στην επιφάνεια της γης με στόχο να υπάρχει ένα παραπάνω προστατευτικό μέτρο, που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο έκθεσης σε βηματικές τάσεις ή τάσεις επαφής σε μία κρίσιμη λειτουργική περιοχή ή σε μέρη, που χρησιμοποιούνται συνήθως από ανθρώπους.

Κάποιες συνηθισμένες μορφές καλύμματος γείωσης είναι τα πλέγματα καλωδιώσεων, που τοποθετούνται ακριβώς κάτω από το υλικό της επιφάνειας, ή οι γειωμένες μεταλλικές σχάρες, που τοποθετούνται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

- *Τάση Σφάλματος*: Ονομάζεται η διαφορά δυναμικού, η οποία εμφανίζεται ανάμεσα σε ένα τμήμα της εγκατάστασης, που εξαιτίας του σφάλματος βρίσκεται υπό τάση και σε ένα απομακρυσμένο σημείο με μηδενικό δυναμικό.
- *Λόγος X/R*: Είναι ο λόγος αντίδρασης προς αντίσταση για το σύστημα. Αφορά το ρυθμό αποσύνθεσης κάθε DC συνιστώσας. Ένας υψηλός λόγος X/R υποδεικνύει μικρό ρυθμό αποσύνθεσης και υψηλή σταθερά χρόνου.
- *Μέγιστο Ρεύμα Πλέγματος (Maximum Grid Current)*: Είναι η τιμή του μέγιστου ρεύματος πλέγματος, που προκύπτει από το σχεδιασμό του πλέγματος και τις συνιστώσες του προβλήματος γείωσης:

$$I_G = D_f \times I_g \quad (3.1)$$

Όπου

$I_G$  : Μέγιστο Ρεύμα Πλέγματος σε A

$D_f$  : Συντελεστής Ελάττωσης για τη Συνολική Διάρκεια Σφάλματος,  $t_f$  , σε s

$I_g$  : Ενεργός RMS Τιμή Συμμετρικού Ρεύματος στο Πλέγμα σε A

- *Ανύψωση Δυναμικού Γης (Ground Penetrating Radar-GPR)*: Είναι το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό, το οποίο μπορεί να πάρει ένα ηλεκτρόδιο γείωσης όσον αφορά ένα απομακρυσμένο σημείο γείωσης, το οποίο θεωρείται ως δυναμικό της απομακρυσμένης γης. Το δυναμικό αυτό είναι ίσο με το μέγιστο ρεύμα του πλέγματος πολλαπλασιασμένο επί την αντίσταση του πλέγματος.
- *Μεταβατικό δυναμικό περιβλήματος*: Πρόκειται για ιδιαίτερα ταχέα μεταβατικά φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα στο γειωμένο περίβλημα των συστημάτων υποσταθμών με μόνωση αερίου. Τις περισσότερες φορές, τα καλώδια γείωσης είναι επαγωγικά στις συχνότητες, που μας ενδιαφέρουν, ώστε να εμποδίσουν την εμφάνιση μεταβατικού δυναμικού περιβλήματος.
- *Συμμετρικό ρεύμα σφάλματος*: Είναι το μέρος του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος προς γη, που ρέει ανάμεσα στο πλέγμα γείωσης και στην περιβάλλουσα γη.

$$I_g = S_f \times I_f \quad (3.2)$$

Όπου

$I_g$  : Ενεργός RMS Τιμή Συμμετρικού Ρεύματος σε A

$S_f$  : Συντελεστής Εξασθένησης Ρεύματος Σφάλματος

$I_f$  : Ενεργός RMS Τιμή Συμμετρικού Ρεύματος προς Γη σε A

- *Ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος:* Χαρακτηρίζεται η *RMS* τιμή της μη συμμετρικής κυματομορφής ρεύματος ολοκληρωμένη στο χρονικό διάστημα του σφάλματος.

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{D}_f \times \mathbf{I}_f \quad (3.3)$$

Όπου

$\mathbf{I}_F$  : Πραγματικό Μη Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος σε  $A$

$\mathbf{D}_f$  : Συντελεστής Εξασθένισης

$\mathbf{I}_f$  : *RMS* Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος προς Γη σε  $A$

- *Συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη:* Η μέγιστη *RMS* τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος μετά την αρχή ενός σφάλματος προς γη. Αντιπροσωπεύει την *RMS* τιμή της συμμετρικής συνιστώσας στο πρώτο ημικύκλιο μιας τρέχουσας κυματομορφής, που αναπτύσσεται μετά την αρχή του σφάλματος σε χρόνο ίσο με το μηδέν. Για σφάλματα φάσης προς γη:

$$\mathbf{I}_{f(0^+)} = 3\mathbf{I}_0'' \quad (3.4)$$

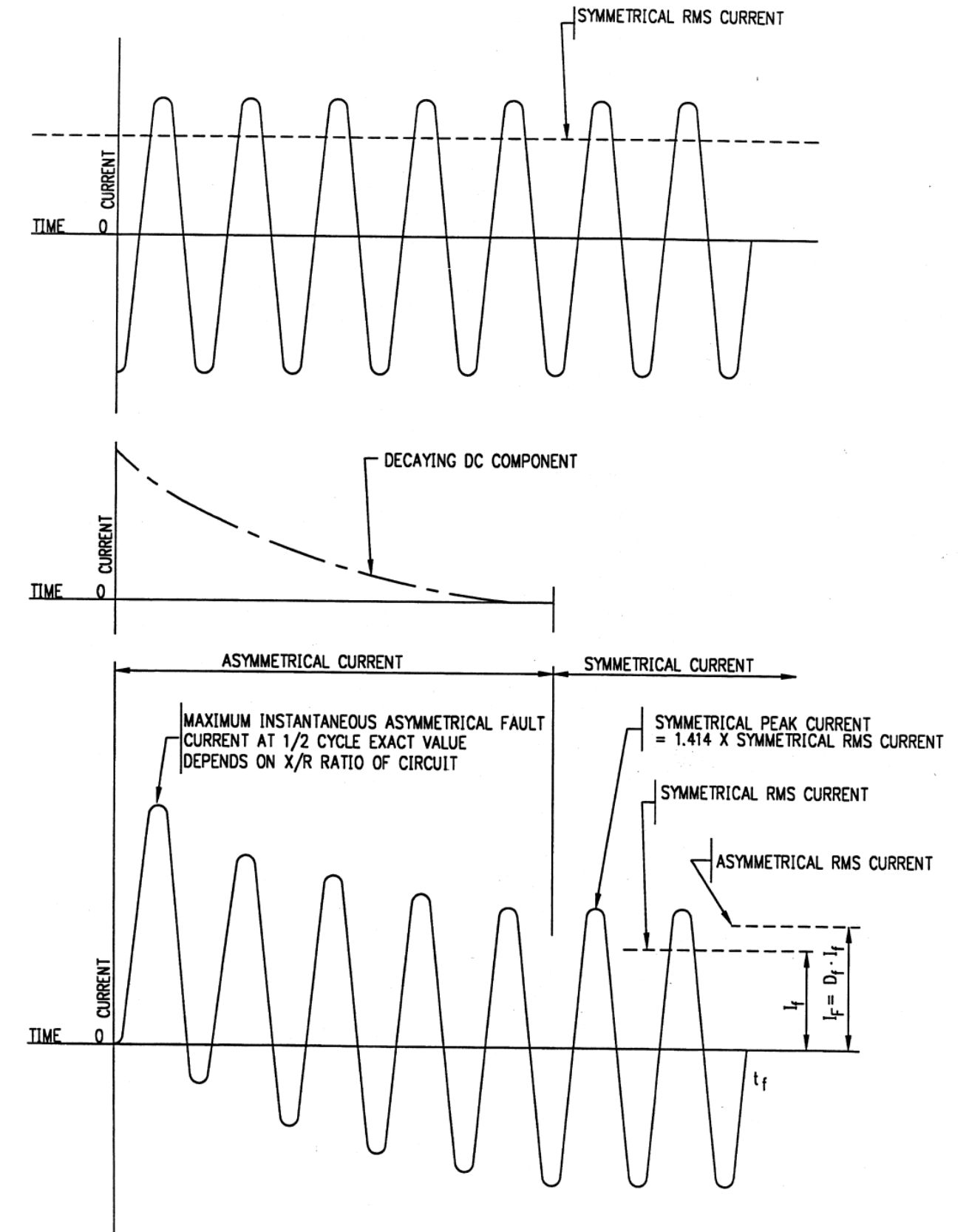
Όπου

$\mathbf{I}_{f(0^+)}$  : Αρχικό *RMS* Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος προς Γη

$\mathbf{I}_0''$  : *RMS* Τιμή Συμμετρικού Ρεύματος Μηδενικής Ακολουθίας, που αναπτύσσεται μετά την Έναρξη ενός Σφάλματος, υποδεικνύοντας την Υπομεταβατική Αντίδραση των Περιστρεφόμενων Μηχανών, που συμβάλλουν στο Σφάλμα

### 3.3 Βασικές Έννοιες

Η γείωση αποτελεί αναμφίβολα ένα από τα σημαντικότερα μέρη της κατασκευής των κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, καθώς και υποσταθμών και Α/Γ. Με τον όρο γείωση ορίζεται ουσιαστικά μία αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος. Στόχος της γείωσης είναι να εκφορτίζει ηλεκτρικά ρεύματα στη γη διαμέσου του ηλεκτροδίου της γείωσης, το οποίο και βρίσκεται εντός της γης. Για κάποιες τιμές εφόρτισης ρεύματος, η αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στο σημείο σύνδεσης του ηλεκτροδίου και σε ένα απομακρυσμένο σημείο της γης προς την εκφόρτιση ρεύματος. Για αυτό το λόγο, η τιμή της αντίστασης του ηλεκτροδίου είναι ωμική και όχι κάποιο είδος επιφανειακής αντίστασης. Το ηλεκτρόδιο γείωσης παρέχει μία αντίσταση γείωσης από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το έδαφος. Η αντίσταση αυτή είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο, το υλικό του ηλεκτροδίου γείωσης είναι επικασσιτερωμένος χαλκός.



**Σχήμα 3.2:** Σχέση ανάμεσα στις Πραγματικές Τιμές Ρεύματος Σφάλματος και των Τιμών των  $I_F$ ,  $D_f$ ,  $I_f$  για διάρκεια σφάλματος  $t_f$  [24]

Για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα και η λειτουργία ενός συστήματος γείωσης, σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος, θα πρέπει το σύστημα να παραμένει ασφαλές. Θα πρέπει να παρέχεται απαγωγή του ρεύματος και εκτόνωσή του στη γη, έτσι ώστε να προστατεύει τους ανθρώπους, που εργάζονται ή κινούνται στο χώρο, από ηλεκτροπληξία. Για να γίνει αυτό εφικτό, θα πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος να είναι χαμηλή, όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μηδέν, ώστε το ρεύμα να οδηγείται στη γη διαμέσου της γείωσης, διατηρώντας τις μέγιστες τιμές της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής, που δημιουργούνται, κάτω από προκαθορισμένα όρια.

## 3.4 Είδη & Μέθοδοι Γειώσεων

Με βάση το σκοπό ύπαρξής τους, οι γειώσεις διακρίνονται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- *Γείωση λειτουργίας*: Πρόκειται για τη γείωση ενός τμήματος της εγκατάστασης, που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας και αυτή με τη σειρά της διακρίνεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες:
  - *Άμεση*, αφού περιλαμβάνει μόνο την αντίσταση γείωσης
  - *Έμμεση*, αφού πλην της αντίστασης γείωσης, περιλαμβάνει και ωμικές, χωρητικές και επαγωγικές αντιστάσεις.

*Στις γειώσεις λειτουργίας δεν εμπεριέχονται οι ανοικτές γειώσεις. Με τον όρο ανοικτή γείωση ορίζεται η παρεμβολή σπινθηριστή ή ασφαλείας διάσπασης στη γραμμή της γείωσης. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η γείωση ουδέτερου κόμβου ενός μετασχηματιστή.*

- *Γείωση προστασίας*: Είναι η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης, που δεν βρίσκονται υπό τάση και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων, που μπορούν να έρθουν σε επαφή. Στόχος της γείωσης προστασίας είναι η μείωση τάσεων επαφής.

*Χαρακτηριστικά παραδείγματα γειώσεων προστασίας είναι η γείωση όλων των μεταλλικών μερών σε μία εγκατάσταση, όπως το μεταλλικό περίβλημα του θερμοσίφωνα, και η γείωση των μεταλλικών μερών ενός υποσταθμού μέσης τάσης.*

- *Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας*: Αποτελεί τη σύνδεση με τη γη των προστατευτικών αντικεραυνικών εγκαταστάσεων με στόχο τη διοχέτευση σε αυτή κεραυνικών ρευμάτων και χρησιμεύει στην ασφάλεια των ανθρώπων στο χώρο, που έχει κατασκευαστεί. Παραδείγματα τέτοιων γειώσεων είναι οι γειώσεις των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας και οι γειώσεις αλεξικέραυνων.

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται είναι:

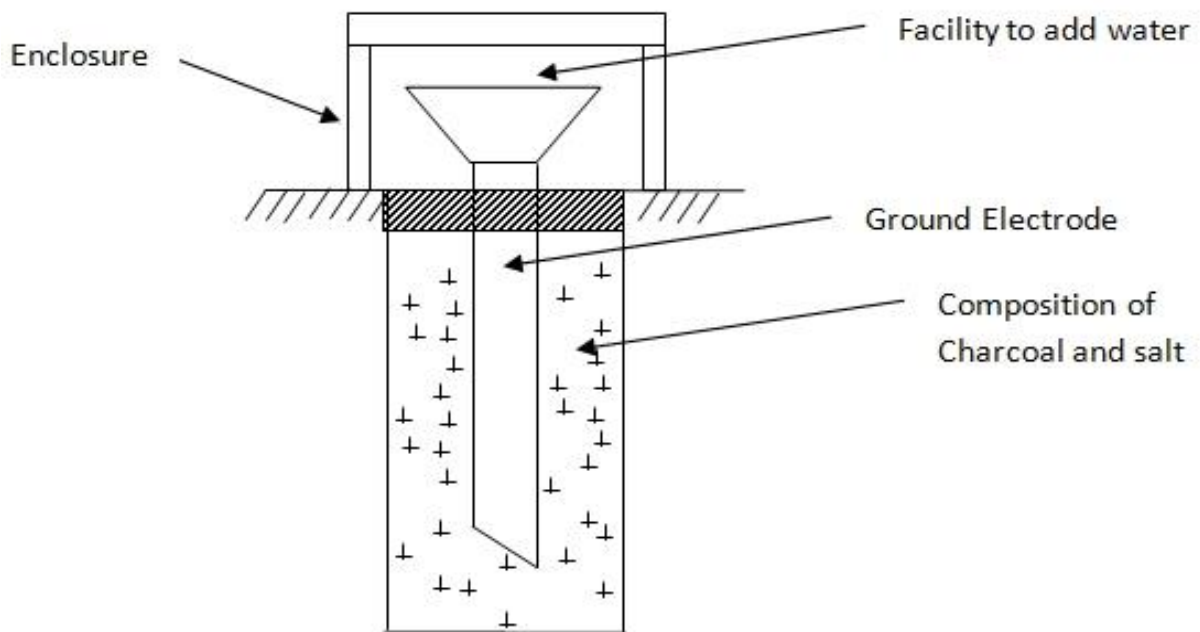
- *Η άμεση γείωση*, με απ' ευθείας αγώγιμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης, όπως η πλάκα γείωσης.
- *Η ουδέτερωση*, η αγώγιμη δηλαδή σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό ή άλλο γειωμένο αγωγό φάσης δικτύου



- Μέσω διακόπτη διαφυγής, για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης

### 3.5 Ηλεκτρόδιο Γείωσης

Είναι το σύστημα ενός ή περισσότερων αγωγών, τοποθετημένων μέσα στο έδαφος σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος. Η τοποθέτηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η διάχυση του κεραυνικού ρεύματος ή του ρεύματος σφάλματος στη γη με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση Ηλεκτροδίου Γείωσης [26]

### 3.6 Ειδική Αντίσταση Εδάφους

Η ειδική αντίσταση εδάφους και η επιδιωκόμενη τιμή της αντίστασης γείωσης είναι οι δύο κύριοι παράγοντες, που καθορίζουν το είδος, το εμβαδόν της επιφάνειας και το βάθος του ηλεκτροδίου γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από τη σύσταση και την πυκνότητα του, ενώ μετριέται με γέφυρα 4 ηλεκτροδίων. Οι ειδικές αντιστάσεις και τα εδάφη ποικίλουν. Υπάρχει ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων και ειδικών αγωγιμοτήτων, καθώς και υγρά, ξηρά, βραχώδη, αμμώδη, ομοιογενή και ανομοιογενή εδάφη. Όσο πιο βραχώδες και ξηρό είναι ένα έδαφος, τόσο πιο υψηλή η τιμή της ειδικής αντίστασης.

Η υγρασία αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα, που επηρεάζει την ειδική αντίσταση εδάφους. Η υγρασία από μόνη της δεν αποτελεί πρωτεύον κριτήριο για την τιμή της ειδικής αντίστασης.

Αν όμως η υγρασία περιέχει συστατικά, τα οποία την καθιστούν έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση της αντίστασης εδάφους.

Οι εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ιδίως ο παγετός, μπορεί να προκαλέσει διακύμανση της αντίστασης εδάφους. Τέτοιου είδους μεταβολές αντιμετωπίζονται με χρήση ηλεκτροδίων γείωσης σε μεγάλο βάθος.

Η θερμοκρασία και η επίδραση της υγρασίας είναι υψηλότερη σε μικρά βάθη, από 0.5 ως 1m παρά σε μεγαλύτερα βάθη. Κατά τη διάρκεια του έτους, ένας επιφανειακός γειωτής παρουσιάζει το μειονέκτημα της σταθερότητας της αντίστασης σε σχέση με ένα γειωτή ράβδου.

Πιο αναλυτικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους είναι:

- *Είδος Εδάφους:* Όπως προαναφέρθηκε, το έδαφος αποτελεί σημαντικό κριτήριο για τον καθορισμό της τιμής της ειδικής αντίστασης. Στον πίνακα, που ακολουθεί, παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές ειδικές αντιστάσεις για ποικίλα εδάφη σε αύξουσα σειρά:

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

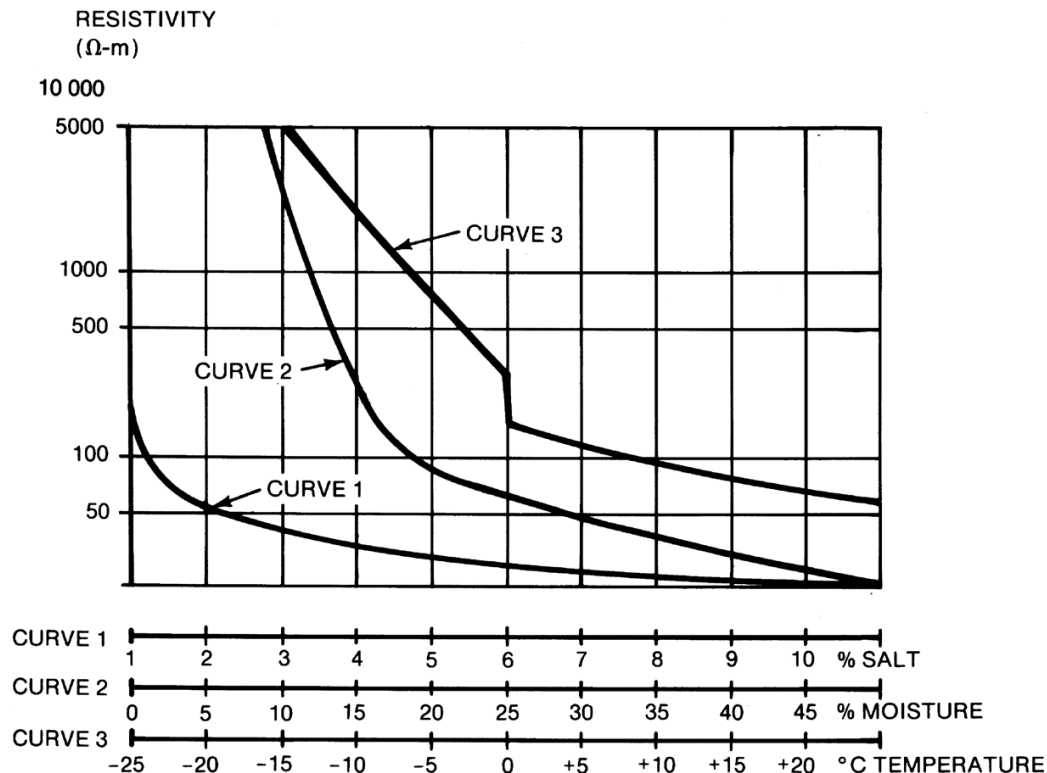
**Πίνακας 3.1 :** Εύρος Τιμών Ειδικής Αντίστασης για Διάφορους Τύπους Εδάφους

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

**Πίνακας 3.2 :** Εύρος Μέσων Τιμών Ειδικής Αντίστασης για Διάφορους Τύπους Εδάφους

- *Υγρασία:* Όσο αυξάνεται η υγρασία του εδάφους τόσο μειώνεται η τιμή της ειδικής αντίστασης. Η υγρασία, όμως αποτελεί ένα σχετικό παράγοντα υπολογισμού, μιας και το έδαφος μπορεί να είναι ξηρό στην επιφάνεια του εδάφους και σε βάθος κάτω του 0.5m να διατηρείται υγρό σε όλη τη διάρκεια του έτους. Για αυτό το λόγο, ενεργό μήκος θεωρείται, σε πασσαλωμένους γειωτές ράβδους, αυτό κάτω του 0.5m.

- *Θερμοκαρασία:* Η ειδική αντίσταση αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Την περίοδο του χειμώνα και ιδίως τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, η τιμή της αντίστασης εδάφους είναι υψηλότερη, ενώ το καλοκαίρι, τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, είναι χαμηλότερη.
- *Μορφή Τάσης:* Παρατηρείται αύξηση της αντίστασης σε γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m και στις κρουστικές τάσεις. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις ονομάζεται και κρουστική αντίσταση. Η άνοδος της αντίστασης λαμβάνει μέρος στο μέτωπο τάσης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0.3/30μs, η αντίσταση θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από 3 ως 26Ω.



**Σχήμα 3.4:** Επίδραση Υγρασίας, Θερμοκρασίας και Άλατος στην Ειδική Αντίσταση Εδάφους [24]

## 3.7 Μετρήσεις Ειδικής Αντίστασης Εδάφους

Οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους πρέπει να γίνονται σε καθορισμένο αριθμό σημείων στην τοποθεσία. Εδάφη, που μπορεί να έχουν ομοιόμορφη κατανομή ειδικής αντίστασης σε όλη την περιοχή προς εξέταση, όπως οι θέσεις των υποσταθμών, και σε ένα σημαντικό βάθος είναι ιδιαίτερα σπάνιες. Τις περισσότερες φορές, παρατηρούνται αρκετά στρώματα, καθέ ένα από τα οποία έχει διαφορετική ειδική αντίσταση. Παράλληλα, κάποιες φορές υπάρχουν αλλαγές στο οριζόντιο επίπεδο, αλλά συγκριτικά με τις κάθετες αλλαγές είναι ομαλότερες.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους, ώστε να καθοριστούν τυχόν διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Αν οι διακυμάνσεις είναι μεγάλες, ο αριθμός των μετρήσεων αυτών πρέπει να είναι μεγαλύτερος. Αν παρατηρηθεί σημαντική μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος, τότε κρίνεται επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο εύρος χώρου στους καθετήρες ομοαξονικών καλωδίων, ώστε να γίνει εκτίμηση της ειδικής αντίστασης σε βαθύτερα στρώματα. Αυτό είναι επιτεύξιμο, μιας και όσο αυξάνεται ο χώρος των καθετήρων, το ρεύμα της πηγής δοκιμών εισέρχεται ολοένα και περισσότερο στις απομακρυσμένες περιοχές, τόσο σε οριζόντιες όσο και σε κάθετες κατευθύνσεις, ανεξάρτητα από το πόσο διαστρέφεται ο διάδρομος εξαιτίας των μεταβαλλόμενων συνθηκών εδάφους.

Οι τεχνικές μετρήσεων περιγράφονται επαρκώς στο *IEEE Std 80-2013* [27].

#### Μέθοδος 4 Σημείων *Werner* [24]

Η πιο διαδεδομένη τεχνική μετρήσεων ειδικής αντίστασης εδάφους είναι η μέθοδος 4 σημείων του *Werner*. Ένας από τους λόγους, που την καθιστούν την πιο δημοφιλή μέθοδο είναι το γεγονός, ότι αποκτά δεδομένα για την ειδική αντίσταση εδάφους σε βαθύτερα στρώματα χωρίς να οδηγήσει τα ηλεκτρόδια δοκιμής στα στρώματα αυτά. Παράλληλα, δεν χρειάζεται βαρύς εξοπλισμός για να γίνουν οι δοκιμές με τη μέθοδο *Werner*, ενώ ταυτόχρονα τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από την αντίσταση ηλεκτροδίων δοκιμής ή από τις τρύπες, που δημιουργούνται κατά την οδήγηση των ηλεκτροδίων δοκιμής μέσα στο έδαφος. Εν ολίγοις, τέσσερα ηλεκτρόδια οδηγούνται σε ευθεία γραμμή προς τη γη, σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις  $a$  και οδηγούνται σε ένα βάθος  $b$ . Έπειτα, μετριέται η τάση μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων και διαιρείται με το ρεύμα μεταξύ των δύο εξωτερικών ηλεκτροδίων δίνοντας την τιμή της αντίστασης  $R$ .

Έπειτα υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση εδάφους από την ακόλουθη σχέση:

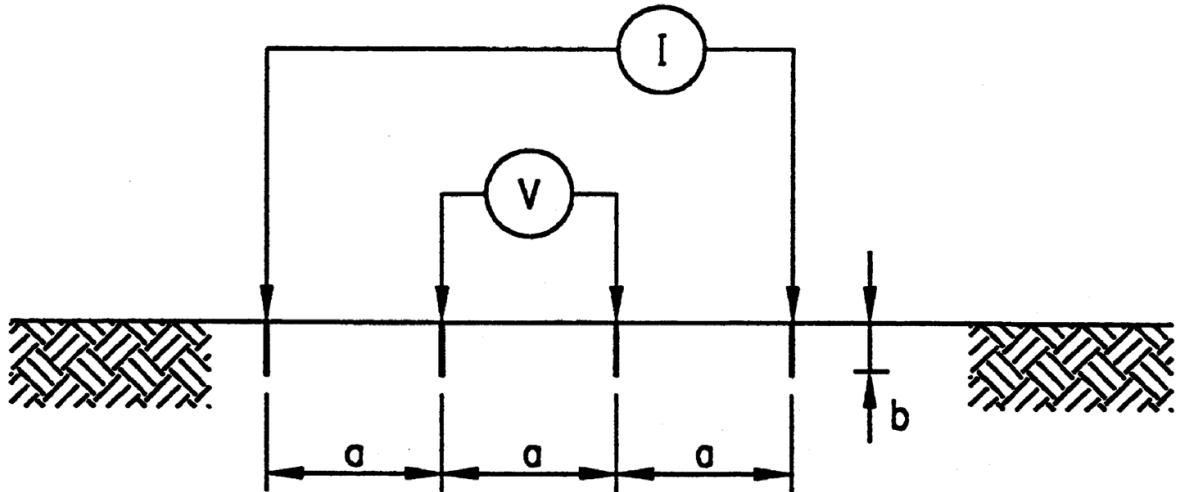
$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3.5)$$

Σε περιπτώσεις, όπου τα ηλεκτρόδια διεισδύουν στο έδαφος σε μικρό μόνο βάθος, το  $b$  είναι μικρό σε σύγκριση με το  $a$  και η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως:

$$\rho_a \cong 2\pi a R$$

Όπου

- $\rho_a$ : Ειδική Αντίσταση Εδάφους σε  $\Omega m$
- $R$ : Μετρούμενη Αντίσταση σε  $\Omega$
- $a$ : Απόσταση μεταξύ Γειτωνικών Ηλεκτροδίων σε  $m$
- $b$ : Βάθος Ηλεκτροδίων σε  $m$



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση Μεθόδου 4 Σημείων του *Werner* [24]

Όταν τα ηλεκτρόδια είναι περιορισμένα σε μικρό χώρο, το ρεύμα τείνει να ρέει κοντά στην επιφάνεια. Όταν όμως τα ηλεκτρόδια είναι απομακρυσμένα μεταξύ τους, διεισδύει περισσότερο ρεύμα βαθύτερα. Έτσι, μια λογική προσέγγιση είναι να θεωρήσουμε ότι η μετρούμενη ειδική αντίσταση για μία δεδομένη χωροταξία ηλεκτροδίων αντιπροσωπεύει την ειδική αντίσταση εδάφους σε ένα βάθος  $a$ , όταν οι αντιθέσεις των στρωμάτων του εδάφους δεν είναι υπερβολικές.

### Μέθοδος Καθοδηγούμενης Ράβδου [24]

Αποτελεί μία άλλη μέθοδο μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους και βασίζεται στη μέθοδο των τριών σημείων και όχι των τεσσάρων, όπως η *Werner*.

Σε αυτή τη μέθοδο, το βάθος  $L_r$  της καθοδηγούμενης ράβδου, που βρίσκεται στο έδαφος προς εξέταση μεταβάλλεται. Οι υπόλοιπες δύο ράβδοι, γνωστοί και ως ράβδοι αναφοράς, οδηγούνται σε ευθεία γραμμή σε ρηχά βάρη. Η τοποθεσία της ράβδου τάσης παρουσιάζει μεταβολές μεταξύ της τρέχουσας ράβδου και της ράβδου εξέτασης. Εναλλακτικά, η ράβδος τάσης μπορεί να τοποθετηθεί σε θέση απέναντι από την τρέχουσα ράβδο.

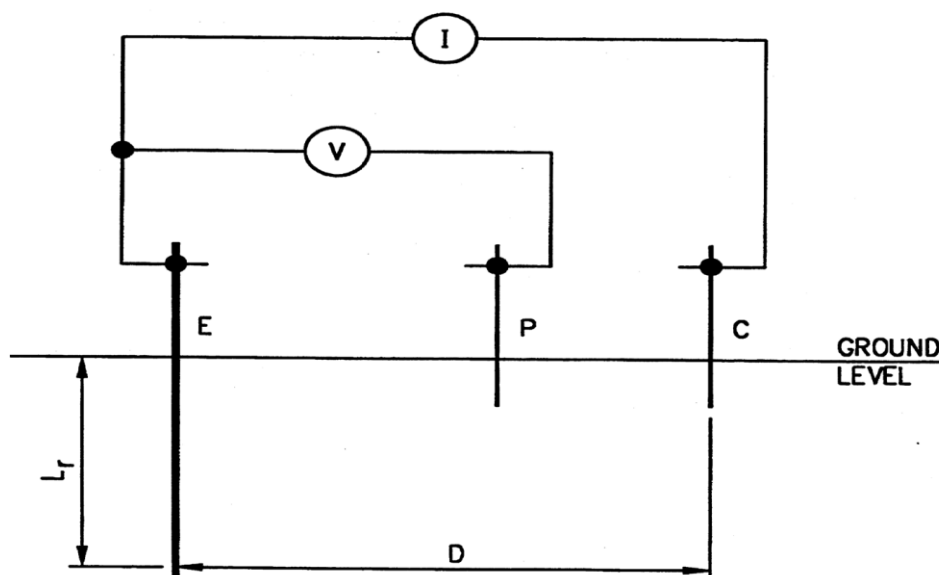
Η εμφανής ειδική αντίσταση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (3.6)$$

Όπου

- $\rho_a$  : Ειδική Αντίσταση Εδάφους σε  $\Omega m$
- $L_r$  : Μήκος Ράβδου σε  $m$
- $R$  : Μετρούμενη Αντίσταση σε  $\Omega$
- $d$  : Διάμετρος Ράβδου σε  $m$

Η γραφική παράσταση της μετρούμενης ειδικής αντίστασης  $\rho_\alpha$  σε συνάρτηση με το μήκος της ράβδου  $L_r$  παρέχει μία οπτική βοήθεια για τον προσδιορισμό των διακυμάνσεων της τιμής της ειδικής αντίστασης της γης με το βάθος. Δοκιμές, που έλαβαν μέρος στο [28], απέδειξαν ότι είτε η μέθοδος 4 σημείων Wenner είτε η μέθοδος της καθοδηγούμενης ράβδου μπορούν να δώσουν τις απαιτούμενες πληροφορίες για να αναπτυχθεί το μοντέλο εδάφους.



**Σχήμα 3.6:** Απεικόνιση Μεθόδου Κατευθυνόμενης Ράβδου [24]

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου κατευθυνόμενης ράβδου περιλαμβάνεται η δυνατότητα να καθορισθεί το βάθος, στο οποίο πρέπει να οδηγηθούν οι ράβδοι. Αν γνωρίζουμε αν και πόσο βαθιά στη γη μπορούν να οδηγηθούν οι ράβδοι, μπορεί να μας απαλλάξει από την υποχρέωση να επανασχεδιάσουμε το πλέγμα της γείωσης. Συνήθως, εξαιτίας των σκληρών στρωμάτων στο έδαφος (βραχώδη εδάφη), καθίσταται αδύνατη η οδήγηση των ράβδων βαθύτερα με αποτέλεσμα να μην παίρνουμε ικανοποιητικά δεδομένα. Μία τεχνική για την πρόβλεψη της ειδικής αντίστασης πρόβλεψη της ειδικής αντίστασης εδάφους σε βάθος 10 φορές το βάθος της γνωστής τιμής ειδικής αντίστασης έχει αναπτυχθεί στο [29]. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις, όπου το ηλεκτρόδιο μέτρησης δεν μπορεί να οδηγηθεί βαθιά. Εντούτοις, ο χρήστης οφείλει να μελετήσει τους πρακτικούς περιορισμούς πριν τη χρησιμοποίησει. Ωστόσο, σημαντικός περιορισμός της συγκεκριμένου μεθόδου είναι, ότι όταν το ηλεκτρόδιο μέτρησης οδηγηθεί βαθιά στο έδαφος μπορεί να χάσει την επαφή με το έδαφος εξαιτίας των δονήσεων και της μεγαλύτερης διαμέτρου των συνδέσμων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μετρούνται υψηλότερες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Έτσι ένα πλέγμα γείωσης, το οποίο έχει σχεδιαστεί με αυτές τις τιμές, μπορεί να είναι αρκετά συντηρητικό.

Η μέθοδος της καθοδηγούμενης ράβδου εμφανίζει μία αβεβαιότητα στην τιμή της αντίστασης. Ο κανόνας του 62% ισχύει μόνο για υψηλή διασπορά ηλεκτροδίων και ομοιόμορφο έδαφος. Σε ανομοιόμορφα εδάφη αυτή η υπόθεση μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα των μετρήσεων, όπως περιγράφεται στο IEEE Std 80-2013 [27]. Αν για τον προσδιορισμό της αντίστασης του ηλεκτροδίου μέτρησης χρησιμοποιηθεί το επίπεδο τμήμα της καμπύλης μπορεί να μην δώσει τη σωστή αντίσταση σε μη ομοιόμορφο έδαφος και να μην εξαχθεί καθόλου εκτός αν η διασπορά του ηλεκτροδίου μέτρησης και του τρέχοντος ηλεκτροδίου είναι πολύ μεγάλη [30],[31].

Στα αρχεία μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να περιλαμβάνονται δεδομένα θερμοκρασίας και πληροφορίες αναφορικά με την υγρασία εδάφους την ώρα των μετρήσεων. Παράλληλα, πρέπει να καταγράφονται όλα τα δεδομένα αναφορικά με τα θαμμένα αγώγιμα αντικείμενα στην περιοχή. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να επηρεάσουν ή να αχρηστεύσουν μετρήσεις, που γίνονται με τις μεθόδους που περιγράφηκαν αν είναι αρκετά κοντά ώστε να μεταβάλλουν το πρότυπο της ροής του ρεύματος δοκιμής. Συνήθως αυτό παρατηρείται σε μεγάλα ή μακριά αντικείμενα. Για παράδειγμα, σε μία περιοχή που έχει ήδη εγκατεστημένους αγωγούς δικτύου, οι μετρήσεις ειδικής αγωγιμότητας είναι πιθανότερο να αλλοιωθούν, εκτός αν πρόκειται για μετρήσεις κοντά στο κέντρο ενός πολύ μεγάλου τετραγωνικού πλέγματος ή για μετρήσεις μικρού βάθους. Στις περιπτώσεις αυτές, πρέπει να παρθούν προσεγγιστικές μετρήσεις σε μία μικρή απόσταση έξω από το δίκτυο, με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του δικτύου στο πρότυπο ροής του ρεύματος.

Ειδικότερα, στην περίπτωση που υπάρχουν ενδείξεις ότι το έδαφος είναι σε όλη την περιοχή ομοιόμορφο, οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσεγγίσεις αν και μπορεί να είναι αμφισβητήσιμες ως προς τις συνθήκες μέσα στο δίκτυο.

## 3.8 Ερμηνεία Μετρήσεων Ειδικής Αντίστασης Εδάφους

Βασικός σκοπός είναι να εξαχθεί ένα μοντέλο εδάφους, που προσεγγίζει όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά το πραγματικό έδαφος. Η τιμή της ειδικής αντίστασης μεταβάλλεται πλευρικά και σε σχέση με το βάθος ανάλογα με τη διαστρωμάτωση του εδάφους. Είναι πιθανό να προκύψουν και εποχικές διακυμάνσεις στην ειδική αντίσταση του εδάφους εξαιτίας της μεταβλητότητας των καιρικών συνθηκών, όπως φαίνεται στο [32].

Τα δύο συνήθη μοντέλα, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης, είναι το ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους και το διστρωματικό.

- Το *ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους* χρησιμοποιείται αποκλειστικά στις περιπτώσεις που υπάρχει μικρή διακύμανση στη μετρούμενη ειδική αντίσταση.

*Σε ομογενείς συνθήκες εδάφους, το μοντέλο αυτό μπορεί να είναι αρκετά ακριβές. Ωστόσο, αν υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις μετρήσεις, θεωρείται απίθανο να δοθούν ακριβή αποτελέσματα.*

- Το *διστρωματικό μοντέλο εδάφους* αποτελεί συνήθως μία καλή προσέγγιση για μία πληθώρα δομών εδάφους [33], ενώ τα πολυστρωματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για πιο πολύπλοκα εδάφη. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης μπορεί να γίνει χειροκίνητα, αλλά και με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, όπως παρουσιάζεται στα [28],[29],[38],[39],[97],[98],[100],[104],[105],[106],[108],[109],[111],[115]. Το διστρωματικό μοντέλο αποτελείται από ένα άνω στρώμα πεπερασμένου βάθους με διαφορετική ειδική αντίσταση και από ένα κάτω στρώμα άπειρου βάθους. Υπάρχουν πολλές τεχνικές για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου διστρωματικού μοντέλου από τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης που παίρνονται από τον αγρό.

Πολλές φορές, ένα διαστρωματικό μοντέλο μπορεί να προσεγγιστεί από την οπτική επιθεώρηση του γραφήματος της μετρημένης ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος των μετρήσεων καθοδηγούμενης ράβδου ή του γραφήματος της μετρημένης ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με τη χωροταξία των ηλεκτροδίων στη μέθοδο των τεσσάρων σημείων [98],[101],[102]. Υπάρχουν διαθέσιμα λογισμικά στη βιομηχανία, που μπορούν επίσης να εξάγουν διστρωματικά και πολυστρωματικά μοντέλα εδάφους [34],[38],[103],[106].

Η διακύμανση στην ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να παρουσιάζει ελάχιστα και μέγιστα τέτοια ώστε να καθιστά το διστρωματικό μοντέλο αδύνατο να παράγει ένα ακριβές μοντέλο. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό μοντέλο εδάφους, όπως ένα πολυστρωματικό μοντέλο, όπως εξηγείται στα [34],[35].

### 3.8.1 Υπόθεση Ομοιόμορφου Εδάφους

Το ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όταν υπολογιστικά εργαλεία για διστρωματικά ή πολυστρωματικά μοντέλα δεν είναι διαθέσιμα. Το άνω όριο του σφάλματος σε όλες τις σχετικές παραμέτρους γείωσης απαιτεί ιδιαίτερη προσπάθεια να εκτιμηθεί, αλλά όταν η αντίθεση μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων ειδικών αντιστάσεων είναι μικρή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μέση ειδική αντίσταση ως μία πρώτη εκτίμηση για τον προσδιορισμό της τάξης των πλατών.

Η προσεγγιστική ομοιόμορφη ειδική αντίσταση εδάφους μπορεί να υπολογισθεί παίρνοντας τον αριθμητικό μέσο όρο των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων:

$$\rho_{\alpha(av1)} = \frac{\rho_{\alpha(1)} + \rho_{\alpha(2)} + \rho_{\alpha(3)} + \dots + \rho_{\alpha(n)}}{n} \quad (3.7)$$

Όπου

$\rho_{\alpha(1)}, \rho_{\alpha(2)}, \rho_{\alpha(3)}, \dots, \rho_{\alpha(n)}$ : Δεδομένα Μετρήσεων των Ειδικών Αντιστάσεων που Έχουν Παρθεί με Διαφορετικές Χωροταξίες στη Μέθοδο των Τεσσάρων Σημείων ή με Διαφορετικά Βάθη στη Μέθοδο Καθοδηγούμενης Ράβδου σε  $\Omega m$

$n$ : Συνολικός Αριθμός Μετρήσεων

Το μεγαλύτερο μέρος των εδαφών δεν πληροί τις προϋποθέσεις της παραπάνω εξίσωσης. Όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται σημαντικά, είναι δύσκολο να αναπτυχθεί ένα ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους.

Οι εξισώσεις των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων βασίζονται αρκετές φορές σε ομοιόμορφα μοντέλα εδάφους. Ωστόσο, έχουν γίνει προσπάθειες να αναπτυχθεί ένας τρόπος ώστε να προσεγγίζονται αναμοιόμορφα εδάφη με μοντέλα ομοιόμορφων εδαφών [24]. Ένας τέτοιος τρόπος περιλαμβάνει τη χρήση του μέσου ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος για τους υπολογισμούς των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων και τη χρήση του μέσου και κάτω στρώματος για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του συστήματος. Επιπλέον πληροφορίες αναφορικά με την ερμηνεία των μετρημένων δεδομένων εδάφους και την επιρροή των ομοιόμορφων, διστρωματικών, πολυστρωματικών μοντέλων εδάφους στις παραμέτρους γείωσης μπορούν να παράσχουν οι εργασίες [34],[35],[36],[37],[38].



### 3.8.2 Υπόθεση Ανομοιόμορφου Εδάφους

Το ανομοιόμορφο μοντέλο εδάφους αποτελεί μία διαφορετική προσέγγιση. Για παράδειγμα, είναι πιθανό από μετρήσεις σε αγρό, οι οποίες έχουν παρθεί με μεγάλο εύρος χωροταξίας των ηλεκτροδίων, να εξαχθεί μία διαστρωμάτωση της γης σε δύο ή περισσότερα στρώματα κατάλληλου πάχους, που θα λαμβάνουν υπόψη τις διακυμάνσεις των μετρήσεων [39].

Το διστρωματικό μοντέλο μπορεί να περιγραφεί από ένα άνω στρώμα πεπερασμένου βάθους πάνω από ένα κάτω στρώμα απείρου βάθους. Η ξαφνική αλλαγή της τιμής της ειδικής αντίστασης στα όρια κάθε στρώματος εδάφους περιγράφεται από το συντελεστή ανάκλασης  $K$ , που ορίζεται:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (3.8)$$

Όπου

$\rho_1$  : Ειδική Αντίσταση του Άνω Στρώματος Εδάφους σε  $\Omega\text{m}$

$\rho_2$  : Ειδική Αντίσταση του Κάτω Στρώματος Εδάφους σε  $\Omega\text{m}$

Η ορθή αντιπροσώπευση ενός συστήματος γείωσης βασίζεται στις πραγματικές διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που επικρατούν στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Ωστόσο, η μοντελοποίηση όλων αυτών των διακυμάνσεων σπάνια κρίνεται οικονομικά ανεκτή ή τεχνικά εφικτή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αντιπροσώπευση ενός ηλεκτροδίου εδάφους, που βασίζεται σε ένα ισοδύναμο διστρωματικό μοντέλο εδάφους, είναι ικανοποιητική για το σχεδιασμό ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης.

Το πρότυπο *IEEE Std 81* παρουσιάζει μεθόδους για τον προσδιορισμό των ισοδύναμων ειδικών αντιστάσεων του άνω και κάτω στρώματος του εδάφους και του βάθους του άνω στρώματος για ένα τέτοιο μοντέλο.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για τον καθορισμό ενός διστρωματικού μοντέλου, αξιοποιώντας και την αντίσταση του άνω στρώματος για υπολογισμούς τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων και το κάτω στρώμα για την αντίσταση γείωσης, καθώς και μέθοδοι που τροποποιούν τα παραπάνω μοντέλα ώστε να χρησιμοποιηθούν σε διστρωματικά μοντέλα. Τέτοιες μεθοδολογίες παρέχουν στο σχεδιαστή περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με την ερμηνεία των εδάφων και την επίδραση των ομοιόμορφων, διστρωματικών, πολυστρωματικών μοντέλων [34],[35],[37].

## 3.9 Ασφάλεια Συστημάτων Γείωσης

Ένα σύστημα γείωσης για να θεωρείται ασφαλές θα πρέπει να ικανοποιεί δύο στόχους:

- Να μειώνεται ο κίνδυνος για ένα άτομο, στην περιοχή των γειωμένων εγκαταστάσεων, που εκτίθεται στον κίνδυνο θανατηφοράς ηλεκτροπληξίας
- Να προσφέρει τα μέσα για τη μεταφορά των ηλεκτρικών ρευμάτων προς τη γη κάτω από κανονικές συνθήκες και συνθήκες σφάλματος χωρίς να υπερβαίνεται κανένα λειτουργικό όριο ή όριο στον εξοπλισμό ή να επηρεάζεται δυσμενώς η συνέχεια της υπηρεσίας.

Ανάλογα με τη σκοπιμότητα της γείωσης, αυτή διακρίνεται:

- Στη *σκόπιμη γείωση*, που αποτελείται από ηλεκτρόδια γείωσης που είναι θαμμένα σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης.
- Στην *τυχαία γείωση*, που γίνεται προσωρινά από ένα άτομο, το οποίο εκτίθεται σε ένα δυναμικό στην περιοχή της γειωμένης εγκατάστασης.

Επικρατεί μεταξύ των ανθρώπων η λανθασμένη εντύπωση, ότι μπορούν να ακουμπήσουν κάθε γειωμένο αντικείμενο με ασφάλεια. Δεν υπάρχει απλή σχέση ανάμεσα στην αντίσταση συστήματος γείωσης και στο μέγιστο ρεύμα, που μπορεί να πλήξει έναν άνθρωπο. Μια χαμηλή αντίσταση γείωσης σε έναν υποσταθμό δεν εγγυάται απαραίτητα την ασφάλεια, συνεπώς τον καθιστά πιθανά επικίνδυνο, ενώ ένας άλλος υποσταθμός με υψηλή αντίσταση μπορεί να είναι λιγότερο επικίνδυνος ή να γίνει λιγότερο επικίνδυνος με προσεκτικό σχεδιασμό. Για παράδειγμα, αν ένας υποσταθμός τροφοδοτείται από μία εναέρια γραμμή χωρίς μόνωση ή ουδέτερο αγωγό, είναι σημαντική μία μικρή αντίσταση δικτύου.

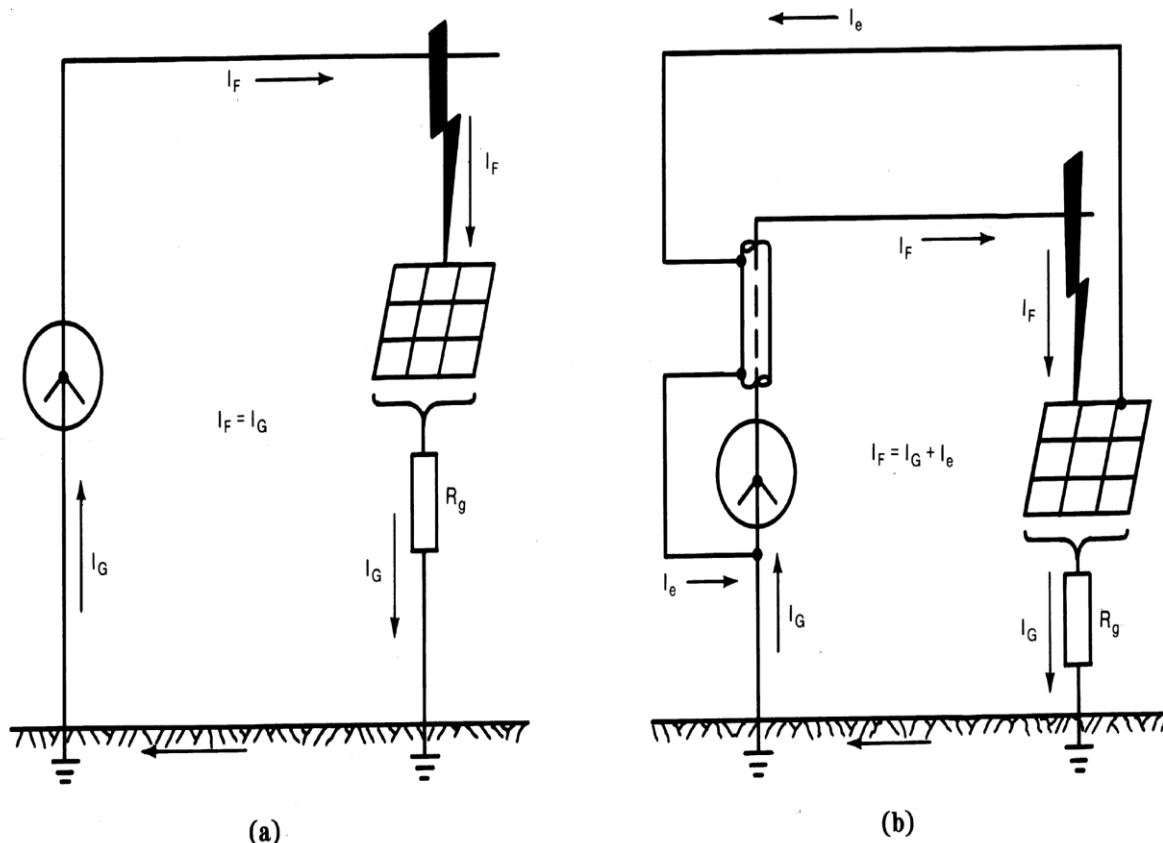
Η πλειοψηφία των συνολικών ρευμάτων σφάλματος προς γη εισέρχονται στη γη προκαλώντας μία απότομη αύξηση στο τοπικό δυναμικό εδάφους (Σχήμα 3.6). Αν γίνει χρήση ενός ζυγού με μόνωση αερίου ή ενός ουδέτερου αγωγού ή υπόγειου κόμβου καλωδίων τότε ένα μέρος του ρεύματος σφάλματος επιστρέφει μέσω αυτής της μεταλλικής οδού κατευθείαν στην πηγή. Εφόσον η μεταλλική αυτή σύνδεση παρέχει μία χαμηλής αντίστασης οδό παράλληλη στο κύκλωμα επιστροφής, η ανύψωση τελικά του τοπικού δυναμικού είναι τελικά μικρότερου πλάτους (Σχήμα 3.6).

Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση του μέρους σφάλματος, που εισέρχεται στη γη, μέσα στην περιοχή του υποσταθμού χρήζει περαιτέρω ανάλυσης.

Αν για παράδειγμα, τα τοπικά χαρακτηριστικά του εδάφους, η γεωμετρία και η τοποθεσία των ηλεκτροδίων, καθώς και άλλοι παράγοντες συμβάλλουν σε μία ιδιαίτερα μεγάλη κλίση του δυναμικού στην επιφάνεια της γης, το σύστημα γείωσης μπορεί να θεωρηθεί ακατάλληλο παρά την ικανότητά του να μεταφέρει το ρεύμα σφάλματος σε διάρκεια και μέτρα, που είναι επιτρεπτά από τους ηλεκτρονόμους προστασίας.

## Πιθανές συνθήκες κινδύνου

Κατά τη διάρκεια των τυπικών συνθηκών σφαλμάτων προς γη, η ροή του ρεύματος προς γη είναι πιθανό να δημιουργήσει κλίσεις δυναμικού γύρω ή μέσα στον υποσταθμό. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.8) απεικονίζεται αυτή η επίδραση για έναν υποσταθμό με ένα απλό τετραγωνικό πλέγμα γείωσης σε ομογενές έδαφος.

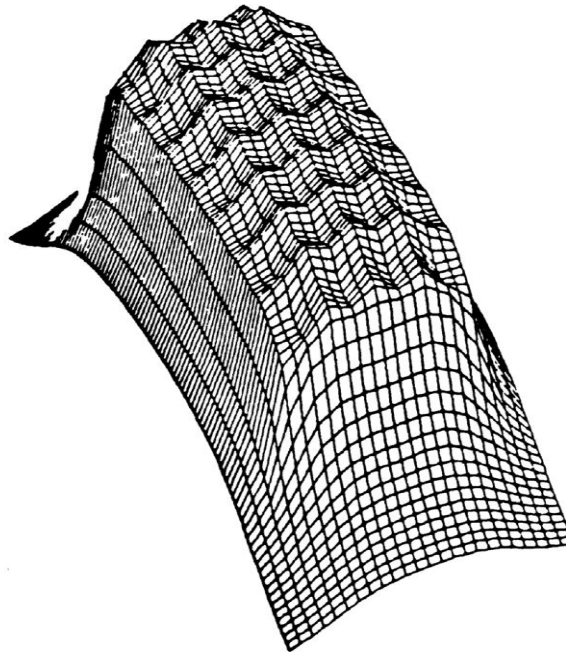
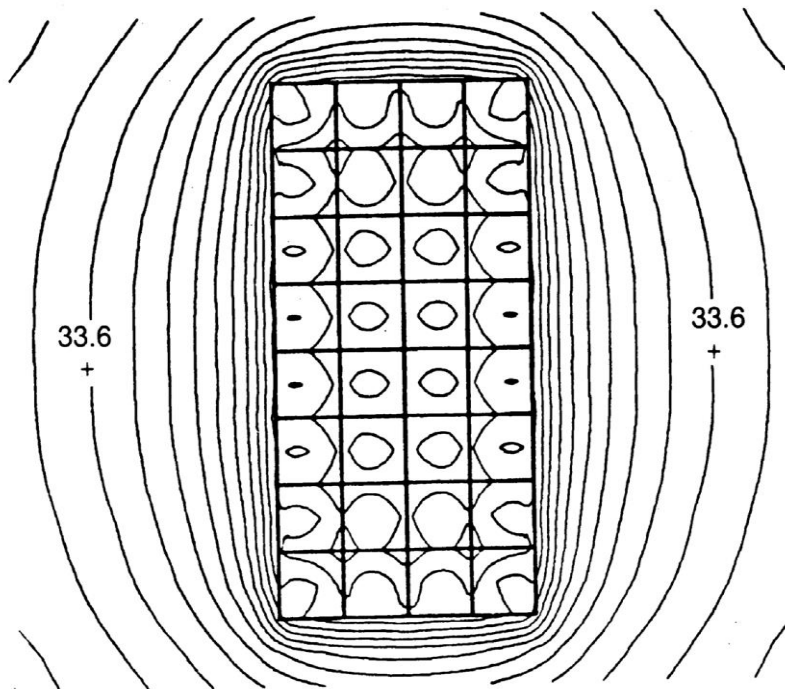


**Σχήμα 3.7:** Υποσταθμός σε Σφάλμα με ή χωρίς Πολλαπλές Γειώσεις [24]

Κατά το σχεδιασμό είναι απαραίτητο να παρθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις, διότι αν δεν παρθούν υπάρχει η περίπτωση, οι μέγιστες κλίσεις των δυναμικών κατά μήκος της επιφάνειας της γης να έχουν ικανό πλάτος κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος προς γη και να θέσουν σε κίνδυνο μία ανθρώπινη ζωή στην περιοχή αυτή. Παράλληλα, ελοχεύει ο κίνδυνος να αναπτυχθούν υψηλές τάσεις ανάμεσα στις γειωμένες δομές και τα πλαίσια εξοπλισμού στη γειτονική γη.

Ατυχήματα ηλεκτροπληξίας μπορεί να προκληθούν από τις ακόλουθες δυσμενείς συνθήκες:

- Ειδική αντίσταση εδάφους και κατανομή των ρευμάτων προς γη με τέτοιο τρόπο ώστε οι υψηλές κλίσεις δυναμικού να συμβαίνουν σε σημεία της επιφάνειας της γης.
- Υψηλό σχετικά ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με την επιφάνεια του συστήματος γείωσης και της αντίστασής του με την απομακρυσμένη γη.
- Παρουσία ενός ανθρώπου σε τέτοιο θέση, σημείο και ώρα ώστε το σώμα του να γεφυρώσει δύο σημεία με υψηλή διαφορά δυναμικού.
- Απουσία επαρκούς αντίστασης επαφής ή άλλης (σε σειρά) αντίστασης ώστε να μειωθεί το ρεύμα μέσω του σώματος σε ασφαλή τιμή κάτω από τις συνθήκες 2 και 3.
- Διάρκεια σφάλματος και επαφής του σώματος και συνεπώς της ροής του ρεύματος διαμέσου του ανθρώπινου σώματος για επαρκή χρόνο ώστε να προκληθεί ζημιά στην ένταση του ρεύματος.



**Σχήμα 3.8:** Ισοδυναμικά Γραφήματα Τυπικού Πλέγματος Γείωσης [24]

Η σχετικά μικρή τιμή της συχνότητας των σφαλμάτων οφείλεται ιδίως στη μικρή πιθανότητα των συμπτώσεων όλων των δυσμενών συνθηκών που εξηγήθηκαν παραπάνω.

## 3.10 Ανεκτό Όριο Ρεύματος από το Ανθρώπινο Σώμα [24]

Η διάρκεια και το πλάτος του ηλεκτρικού ρεύματος που άγεται διαμέσου του ανθρώπινου σώματος στη συχνότητα των  $50\text{Hz}$  (ή  $60\text{Hz}$ ) πρέπει να είναι μικρότερο από την τιμή που μπορεί να προκαλέσει κοιλιακή μαρμαρυγή στην καρδιά ενός ανθρώπου. Η κοιλιακή μαρμαρυγή αποτελεί το συνηθέστερο μηχανισμό του αιφνίδιου καρδιακού θανάτου [40]. Είναι η σοβαρότερη μορφή κοιλιακής ταχυαρρυθμίας. Ο καρδιακός παλμός είναι τόσο έντονος, μεγαλύτερος από 300 παλμοί ανά λεπτό, που ουσιαστικά δεν επιτελείται καρδιακή συστολή. Αν δεν αποκατασταθεί άμεσα, επέρχεται θάνατος μέσα σε μόλις λίγα λεπτά [41].

Η χρονική διάρκεια, για την οποία ένα ρεύμα των  $50\text{Hz}$  (ή  $60\text{Hz}$ ), μπορεί να γίνει ανεκτό από το ανθρώπινο σώμα σχετίζεται με το πλάτος του. Με βάση αποτελέσματα των [42] και [43], περίπου το 99,5% των ανθρώπων μπορούν να αντέξουν τη διέλευση ενός ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς κοιλιακή μαρμαρυγή, με διάρκεια και πλάτος που καθορίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (3.9)$$

Όπου

$$k = \sqrt{S_B}$$

και

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

$S_B$  : Εμπειρική σταθερά που σχετίζεται με την ενέργεια της ηλεκτροπληξίας που μπορεί να γίνει ανεκτή από ένα συγκεκριμένο ποσοστό του πληθυσμού.

$I_B$  : *RMS* τιμή του πλάτους του ρεύματος που ρέει μέσω του σώματος σε  $A$

$t_s$  : Διάρκεια της έκθεσης στο ρεύμα σε  $s$

Πιο συγκεκριμένα, με βάση το [42], η ενέργεια ηλεκτροπληξίας που μπορεί να επιβιώσει το 99,5% των ανθρώπων με βάρος  $50\text{kg}$  είναι  $S_B = 0,0135$ . Έτσι θα είναι  $k_{50} = 0,1162$  και το επιτρεπόμενο ρεύμα θα είναι:

$$\text{Για σώμα } 50\text{kg} : \quad I_B = \frac{0,1162}{\sqrt{t_s}} \quad (3.10)$$

Η τιμή ρεύματος από την παραπάνω εξίσωση και για  $50kg$  θα είναι  $116mA$  για  $t_s = 1s$  και  $367mA$  για  $t_s = 0,1s$ .

Οι εξισώσεις αυτές ισχύουν για δοκιμές από  $0,03s$  ως  $3s$  και όχι για πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες διάρκειες.

Με την πάροδο των χρόνων έχουν προταθεί διαφορετικές τιμές για το  $I_B$ . Ως όριο για την κοιλιακή μαρμαρυγή προτείνεται τα  $100mA$  σύμφωνα με το [44]. Η τιμή αυτή προέκυψε από πειράματα, που έλαβαν χώρα στο πανεπιστήμιο *Columbia*.

Στα πειράματα αυτά, ζώα με παρόμοιο βάρος με τον άνθρωπο υπέστησαν ηλεκτροπληξία διάρκειας  $3s$ . Πιο πρόσφατα πειράματα δείχνουν την παρουσία δύο διακριτών κατωφλίων: ένα στο οποίο η διάρκεια του σφάλματος είναι μικρότερη από τη διάρκεια ενός χτύπου της καρδιάς και ένα άλλο για το οποίο η διάρκεια του ρεύματος είναι μεγαλύτερη από ένα χτύπο της καρδιάς. Για έναν ενήλικα άνθρωπο  $50kg$  τα [45],[46] προτείνουν τιμές κατωφλίου  $500mA$  και  $50mA$  αντίστοιχα. Άλλες μελέτες σε αυτό το θέμα έχουν επίσης γίνει [47],[48].

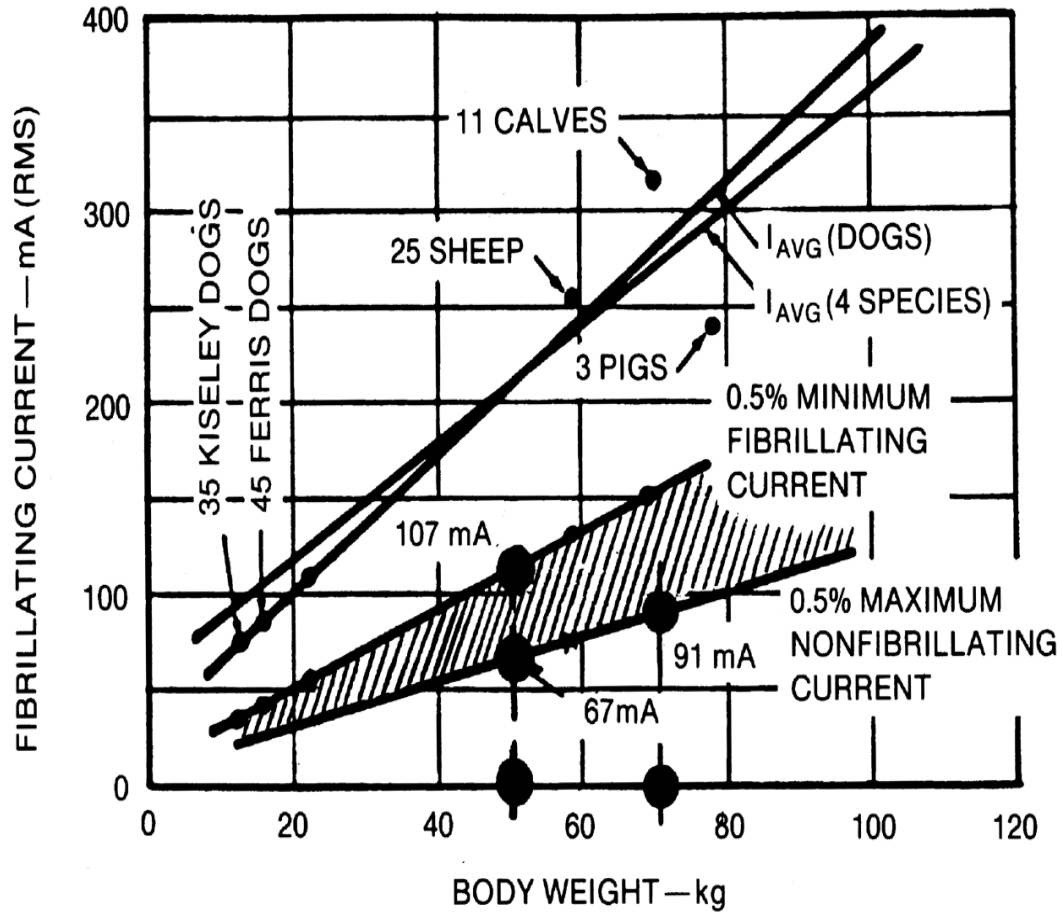
Υποτίθεται ότι το ρεύμα της μαρμαρυγής είναι συνάρτηση του ατομικού σωματικού βάρους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.9). Το σχήμα αυτό απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του σωματικού βάρους και του κρίσιμου ρεύματος για διάφορα είδη ζώων και μία  $0,5\%$  κοινή περιοχή κατωφλίου για τα θηλαστικά.

Σε μία πιο σύγχρονη μελέτη, σε μελέτες που έγιναν για βάρος τώρα  $70kg$  οι προηγούμενες σταθερές θα είναι τώρα  $S_B = 0,0272$  και  $k = 0,165$  και ισχύουν για το  $99,5\%$  του πληθυσμού.

Άλλες έρευνες [43],[49] έδειξαν για τα ίδια κιλά ( $70kg$ )  $S_B = 0,0246$  και  $k = 0,1568$ .

$$\text{Για σώμα } 70kg : \quad I_B = \frac{0,1568}{\sqrt{t_s}} \quad (3.11)$$

Η παραπάνω εξίσωση απεικονίζει, ότι όπου λειτουργούν ταχύτατες συσκευές προστασίας, που περιορίζουν τη διάρκεια του σφάλματος, υπάρχει η δυνατότητα να επιτραπούν πολύ μεγαλύτερα ρεύματα που διαπερνούν το σώμα. Επαφίεται στην κρίση του μελετητή να χρησιμοποιήσει το χρόνο της εφεδρικής προστασίας, το χρόνο κάθαρσης των πρωτευόντων ηλεκτρονόμων υψηλής ταχύτητας, ως τη βάση για τον υπολογισμό.



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 3.9:** Ρεύμα Μαρμαρυγής σε συνάρτηση με το Σωματικό Βάρος για Διάφορα Ζώα σύμφωνα με Ηλεκτροπληξία Διάρκειας 3s [24]

## 3.11 Τυχαίο Κύκλωμα Γείωσης [24]

### Η Αντίσταση του Ανθρώπινου Σώματος

Το ανθρώπινο σώμα μπορεί να προσεγγιστεί ως μία ωμική αντίσταση για  $AC$  ή  $DC$  ρεύματα συχνότητας  $50Hz$  (ή  $60Hz$ ). Η διαδρομή του ρεύματος θεωρείται είτε από το ένα πόδι στο άλλο είτε από το ένα χέρι και στα δύο πόδια. Η εσωτερική αντίσταση του σώματος κυμαίνεται κάπου στα  $300\Omega$ , ενώ οι τιμές της αντίστασης του σώματος όπου συμπεριλαμβάνεται και η αντίσταση του δέρματος κυμαίνονται από  $500\Omega$  έως  $3000\Omega$  [42],[50]. Φυσικά, η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος εμφανίζει μείωση αν υπάρχει τρύπα ή ζημιά γενικά στο δέρμα στο σημείο επαφής.

Για την επίτευξη της εργασίας, οι αντιστάσεις σε σειρά με την αντίσταση του σώματος θεωρούνται ως εξής:

1. Οι αντιστάσεις επαφής των χεριών και των ποδιών είναι ίσες με μηδέν
2. Οι αντιστάσεις των παπουτσιών και των γαντιών είναι και αυτές ίσες με μηδέν

Από εδώ και στο εξής θα χρησιμοποιηθεί η τιμή της αντίστασης  $R_B = 1000\Omega$  και θα αναπαριστά την αντίσταση ανθρώπινου σώματος από το χέρι προς το πόδι, από το ένα χέρι στο άλλο ή από το ένα πόδι στο άλλο.

### Οδοί Ρεύματος μέσα στο Ανθρώπινο Σώμα

Η παραπάνω τιμή της αντίστασης  $R_B = 1000\Omega$  σχετίζεται με διαδρόμους, όπως αυτοί μεταξύ του χεριού και ενός ή και των δύο ποδιών, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος περνάει από μέρη του σώματος με ζωτικά όργανα με κυριότερο την καρδιά. Λιγότερο επικίνδυνο κρίνεται το ρεύμα, που περνάει από το ένα πόδι στο άλλο. Υψηλότερα ρεύματα φυσικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πόδι σε πόδι ώστε να παραχθεί το ίδιο ρεύμα στην περιοχή της καρδιάς σε σχέση με ρεύματα από χέρι σε πόδι. Η αναλογία αυτή μπορεί να φτάσει και το 25:1 [51]

Σύμφωνα με την παραπάνω διαπίστωση, τιμές αντίστασης μεγαλύτερες των  $1000\Omega$  μπορούν να επιτραπούν για διαδρόμους από το ένα πόδι στο άλλο. Εντούτις κρίνεται αναγκαίο να ληφθούν υπόψη και οι παρακάτω παράγοντες:

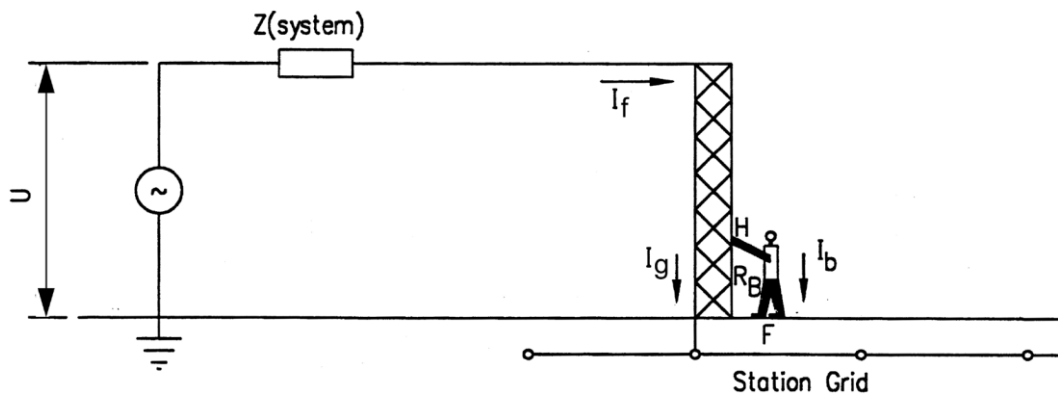
1. Μία τάση μεταξύ των δύο ποδιών, επίπονη αλλά σίγουρα όχι θανατηφόρα, μπορεί να καταλήξει σε πτώση, που θα οδηγήσει σε υψηλότερη ροή ρεύματος μέσω του στήθους. Ο βαθμός αυτής της επικινδυνότητας μπορεί να εξαρτάται και από την πιθανότητα μίας διαδοχικής ηλεκτροπληξίας και από τη διάρκεια του σφάλματος.
2. Ένας άνθρωπος μπορεί να εργάζεται ή ξεκουράζεται μπρούμυτα όταν παρουσιαστεί το σφάλμα.

Οι κίνδυνοι από την επαφή ενός ποδιού με το άλλο φαίνεται να είναι λιγότεροι από τον άλλο τύπο. Ωστόσο κανένας κίνδυνος δεν πρέπει να αγνοείται [52],[53], διότι και στην πρώτη περίπτωση έχουν συμβεί θάνατοι.



## Ισοδύναμο Κυκλώματα Ατυχημάτων

Κάνοντας χρήση της τιμής του ανεκτού από το σώμα ρεύματος και τις κατάλληλες κυκλωματικές σταθερές μπορεί να καθορισθεί η αντεκτή τιμή τάσης ανάμεσα στα δύο σημεία επαφής.



**Σχήμα 3.10:** Έκθεση σε Τάση Επαφής [24]

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ατυχήματος.

Όπου:

- $U$ :** Ενεργή τάση του κυκλώματος ατυχήματος (βηματική τάση ή τάση επαφής) σε  $V$
- $I_f$ :** Συνολικό ρεύμα σφάλματος σε  $A$
- $I_g$ :** Ρεύμα που ρέει στο πλέγμα σε  $A$
- $I_b$ :** Ρεύμα που ρέει από το σώμα σε  $A$
- $R_B$ :** Αντίσταση του σώματος σε  $A$
- $F, H$ :** Σημεία επαφής με το σώμα

Για τον ορισμό της συνολικής ανεκτής ενεργού τάσης του συστήματος ατυχήματος (τάση επαφής ή βηματική τάση) χρησιμοποιείται το ανεκτό ρεύμα σώματος,  $I_B$ . Η συνολική ανεκτή ενεργός τάση του κυκλώματος του ατυχήματος θα προκαλέσει στο σώμα ένα ρεύμα  $I_b$  που είναι ίσο με το ανεκτό ρεύμα  $I_B$ .

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 3.10) απεικονίζεται το ρεύμα σφάλματος  $I_f$  να αποφορτίζεται στο έδαφος από το σύστημα γείωσης του υποσταθμού και ένας άνθρωπος να αγγίζει μία γειωμένη μεταλλική δομή στο  $H$ .

- Ο κόμβος  $F$  είναι μία μικρή περιοχή στην επιφάνεια της γης, που είναι σε επαφή με τα δύο πόδια του ανθρώπου.

- Ο κόμβος  $H$  είναι ένα σημείο του συστήματος στο ίδιο δυναμικό με το δίκτυο μέσα στο οποίο ρέει το ρεύμα σφάλματος.

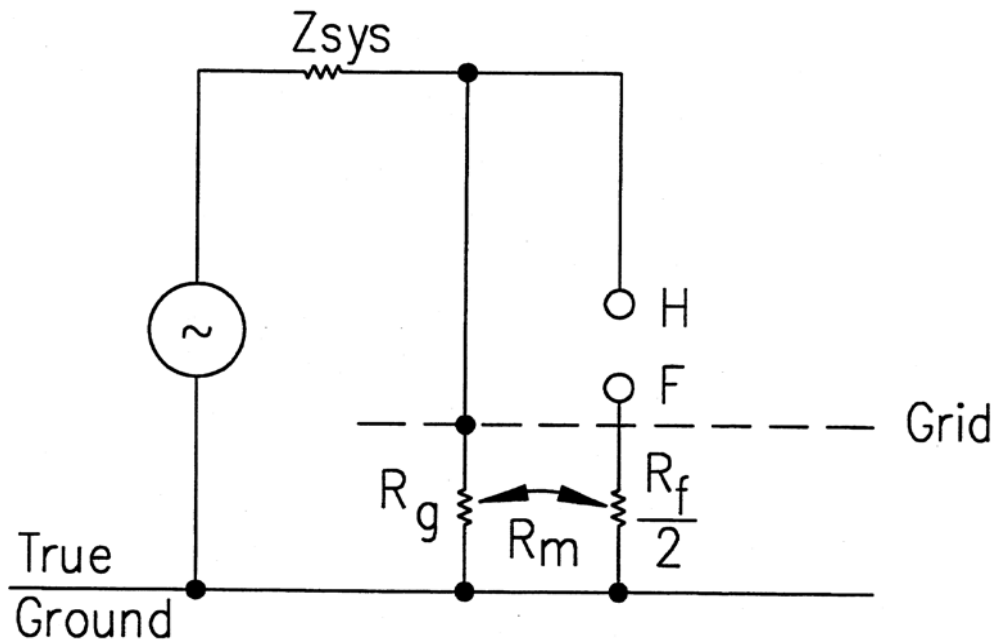
Το ρεύμα  $I_b$  ρέει από τον  $H$  μέσω του σώματος στο έδαφος στο  $F$ . Το θεώρημα *Thevenin* επιτρέπει την αντιπροσώπευση των δύο κόμβων  $H$  και  $F$  του δικτύου του σχήματος 3.11 από το κύκλωμα του σχήματος 3.12 [54],[55].

Όταν ο άνθρωπος δεν είναι παρών αναπτύσσεται μία τάση μεταξύ των κόμβων  $F$  και  $H$ , τάση *Thevenin*. Όπως φαίνεται από τα σημεία  $F$  και  $H$  με πηγές τάσης του συστήματος, που βραχυκυκλώνεται, η σύνθετη αντίσταση  $Z_{th}$  είναι η αντίδραση του συστήματος. Το ρεύμα  $I_b$  ρέει διαμέσου του σώματος ενός ανθρώπου που έρχεται σε επαφή με τα  $F$  και  $H$  και δίνεται από τη σχέση:

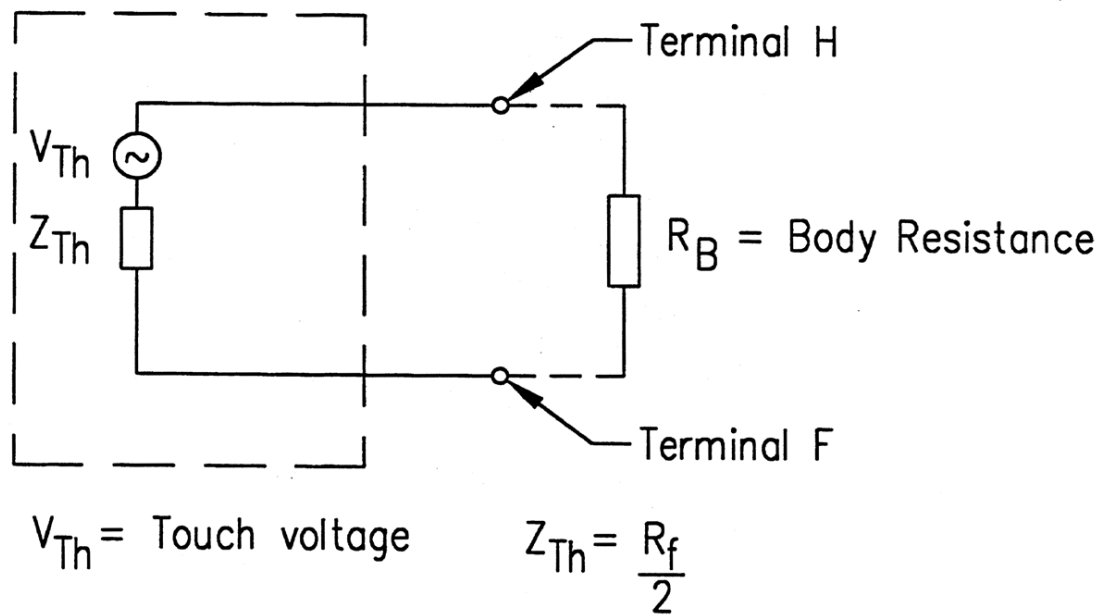
$$I_b = \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_B} \quad (3.12)$$

Όπου

$V_{th}$ :	Τάση Thevenin
$Z_{th}$ :	Σύνθετη Αντίσταση Thevenin
$R_B$ :	Αντίσταση του ανθρώπινου σώματος



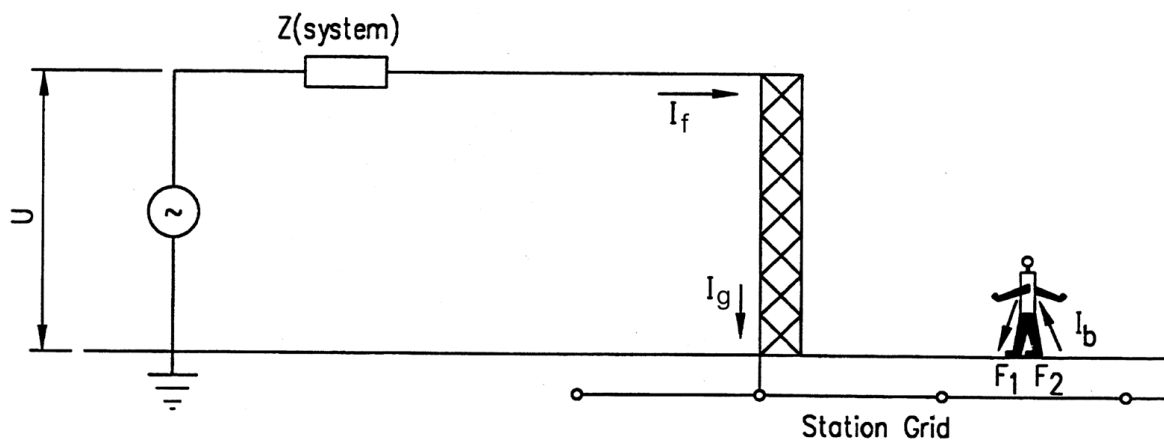
**Σχήμα 3.11:** Αντιστάσεις στο Κύκλωμα Τάσης Επαφής [24]



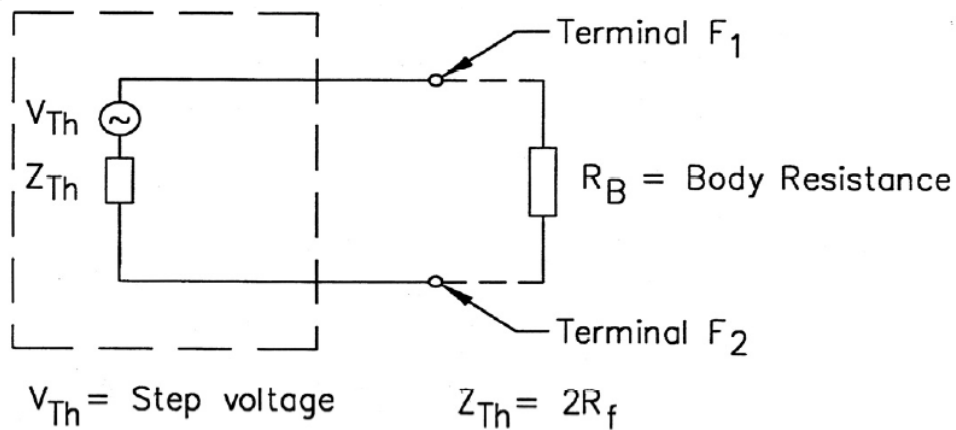
**Σχήμα 3.12:** Κύκλωμα Τάσης Επαφής [24]

Στο συνολικό κύκλωμα *Thevenin* ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης, οι επιδράσεις της  $Z_{sys}$ , της αντίστασης του δικτύου και της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ του δικτύου και των ποδιών του ανθρώπου μπορούν να αγνοηθούν. Άρα, η ισοδύναμη αντίσταση των ποδιών του ανθρώπου αντιπροσωπεύει την  $Z_{th}$ .

Παρακάτω (Σχήμα 3.13), απεικονίζεται το ρεύμα σφάλματος  $I_f$  να αποφορτίζεται στο έδαφος διαμέσου του συστήματος γείωσης του υποσταθμού. Το ρεύμα  $I_b$  ρέει από το ένα πόδι  $F_1$  στο άλλο πόδι  $F_2$ . Οι κόμβοι  $F_1$  και  $F_2$  είναι περιοχές στην επιφάνεια της γης, που είναι σε επαφή με τα δύο πόδια αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε, η τάση *Thevenin*  $V_{th}$  είναι η τάση μεταξύ των κόμβων  $F_1$  και  $F_2$  όταν ο άνθρωπος δεν είναι παρών. Η σύνθετη αντίσταση *Thevenin*  $Z_{th}$  είναι η αντίσταση του συστήματος, όπως φαίνεται από τους κόμβους  $F_1$  και  $F_2$ , με βραχυκυκλωμένες τις πηγές τάσης του συστήματος. Το ρεύμα  $I_b$ , που ρέει μέσω του σώματος του ανθρώπου, δίνεται από την προηγούμενη εξίσωση.



**Σχήμα 3.13:** Έκθεση σε Βηματική Τάση [24]



**Σχήμα 3.14:** Κύκλωμα Βηματικής Τάσης [24]

Η ισοδύναμη αντίσταση *Thevenin*  $Z_{th}$  υπολογίζεται με πολλούς τρόπους [54],[55],[56],[57].

Για το κύκλωμα της τάσης επαφής έχουμε:

$$Z_{th} = \frac{R_f}{2} \quad (3.13)$$

Για το κύκλωμα της βηματικής τάσης έχουμε:

$$Z_{th} = 2R_f \quad (3.14)$$

Όπου

$Z_{th}$  : Τάση Thevenin

$R_{th}$  : Αντίσταση γης του ενός ποδιού (αγνοώντας την παρουσία του συστήματος γείωσης του υποσταθμού)

Για τη βελτίωση της κυκλωματικής ανάλυσης, το ανθρώπινο πόδι συνήθως αντιπροσωπεύεται από ένα μεταλλικό δίσκο, ενώ η αντίσταση επαφής των ποδιών ή/και καλτσών αγνοείται.

Η αντίσταση γη (σε  $\Omega$ ) ενός μεταλλικού δίσκου ακτίνας  $b$  ( $m$ ) στην επιφάνεια ομογενούς εδάφους με ειδική αντίσταση  $\rho$  ( $\Omega m$ ) είναι [57]:

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (3.15)$$

Συνήθως το πόδι λαμβάνεται ως ένα κυκλικό πιάτο ακτίνας  $0,08m$  και απεικονίζεται ως μεταλλικός δίσκος. Έπειτα από μαθηματικές προσεγγίσεις, οι εξισώσεις για τη σύνθετη αντίσταση *Thevenin*  $Z_{th}$  μπορούν να ληφθούν σε αριθμητική μορφή και να εκφραστούν ως συνάρτηση της ειδικής αντίστασης  $\rho$ :

Για το κύκλωμα τάσης επαφής έχουμε:

$$\mathbf{Z_{th} = 1,5\rho} \quad (3.16)$$

Για το κύκλωμα βηματικής τάσης έχουμε:

$$\mathbf{Z_{th} = 6,0\rho} \quad (3.17)$$

Η επιτρεπόμενη συνολική ισοδύναμη τάση (δηλαδή η ανεκτή βηματική τάση και τάση επαφής) προκύπτει:

$$\mathbf{E_{επαφής} = I_B(R_B + 1,5\rho)} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{E_{βηματική} = I_B(R_B + 6,0\rho)} \quad (3.18)$$



# Κεφάλαιο 4

## Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης

### 4.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης είναι καίριας σημασίας. Με ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα γείωσης αποφεύγεται η καταστροφή εξοπλισμού σε περίπτωση ηλεκτρικού σφάλματος και ιδίως η ηλεκτροπληξία ανθρώπων ή ζώων. Το σφάλμα αυτό μπορεί να προέλθει είτε από ένα κεραυνικό πλήγμα στην εγκατάσταση είτε από ελαττωματικό ηλεκτρικό εξοπλισμό. Στον παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι γενικές αρχές για τη σχεδίαση των συστημάτων γείωσης, τα πλέγματα γείωσης, καθώς και η επικινδυνότητα των κεραυνών και αντικεραυνική προστασία.

### 4.2 Βασικές Παράμετροι στο Σχεδιασμό Συστημάτων Γείωσης

Τα συστήματα γείωσης σχεδιάζονται και εγκαθίστανται με στόχο τον περιορισμό των κλίσεων δυναμικού γης σε επίπεδα ρεύματος και τάσης, τέτοια ώστε, υπό συνθήκες σφάλματος, να μην κινδυνεύουν οι ζωές ανθρώπων ή ζώων και να μην καταστρέφεται ο εξοπλισμός. Παράλληλα θα πρέπει να είναι δυνατό να συνεχίζεται η παροχή υπηρεσίας. Καθίσταται έτσι σαφές, ότι ο σχεδιασμός και η μελέτη ενός συστήματος γείωσης λαμβάνει σοβαρά υπόψη τα ασφαλή όρια για την τάση επαφής και τη βηματική τάση με βάση το συνολικό χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος και την τιμή του ρεύματος σφάλματος. Επi το πλείστον το σχήμα του πλέγματος γείωσης, που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα γείωσης, δίνεται από το συνδυασμό οριζόντιων αγωγών με κατακόρυφες ράβδους, που ξεκινούν από το πλέγμα και επεκτείνονται προς μεγαλύτερο βάθος στη γη. Κάποιοι από τους λόγους, για τους οποίους γίνεται χρήση κατακόρυφων ράβδων σε συνδυασμό με οριζόντιους αγωγούς, αναφέρονται παρακάτω:

1. Ένα ηλεκτρόδιο στους υποσταθμούς είναι από μόνο του ανεπαρκές για να παρέχει ένα ασφαλές σύστημα γείωσης. Εντούτοις, όταν κάποια ηλεκτρόδια, όπως οι ράβδοι γείωσης, συνδεθούν μεταξύ τους και με όλους τους ουδέτερους και τα μεταλλικά πλαίσια του εξοπλισμού και τις κατασκευές που πρέπει να γειωθούν, το αποτέλεσμα είναι μία διάταξη πλέγματος από ηλεκτρόδια γείωσης, ανεξάρτητα από τον αρχικό σκοπό. Αν το έδαφος, που τοποθετείται το πλέγμα, έχει επιπλέον και χαμηλή ειδική αντίσταση, τότε το δίκτυο αυτό μπορεί να αποτελέσει άριστο σύστημα γείωσης.

2. Αν η διάχυση του ρεύματος στη γη είναι υψηλή, τότε θα πρέπει να εγκατασταθεί πλέγμα με αντίσταση τόσο χαμηλή, ώστε το *GPR* να μην προκαλέσει επικίνδυνες για τον άνθρωπο μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια της γης. Ένα σύστημα, που συνδυάζει ένα οριζόντιο πλέγμα και έναν αριθμό κατακόρυφων ράβδων έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:
- Αν το οριζόντιο πλέγμα είναι σε μικρό βάθος (συνήθως 0.3 ως 0.5m) τότε κρίνεται αποτελεσματικό στον περιορισμό των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής στην επιφάνεια της γης. Ωστόσο, μακρείς κατακόρυφοι ράβδοι σταθεροποιούν την απόδοση αυτού του συστήματος. Η σταθερότητα σε αρκετές εγκαταστάσεις είναι σημαντική, διότι η ειδική αντίσταση των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία ή βροχή), ενώ η ειδική αντίσταση των κατώτερων στρωμάτων του εδάφους παραμένει σχετικά σταθερή.
  - Οι ράβδοι, που διαπερνούν το έδαφος χαμηλής ειδικής αντίστασης, είναι πολύ πιο αποδοτικοί στη διάχυση του ρεύματος σφάλματος στην περίπτωση διστρωματικού ή πολυστρωματικού εδάφους, του οποίου το ανώτερο στρώμα έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από τα κατώτερα στρώματα.
  - Αν οι ράβδοι εγκατασταθούν κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος, σε έδαφος με ομοιόμορφη ειδική αντίσταση, όσο αυξάνεται το βάθος, τότε θα παρατηρηθεί σημαντική μείωση στις απότομες κλίσεις του δυναμικού επιφανείας στην περιφέρεια του πλέγματος.

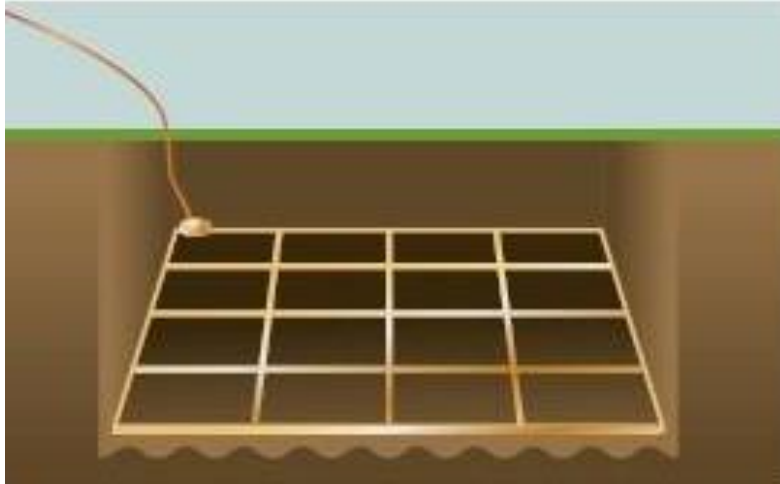
## 4.3 Πλέγματα Γείωσης

Η κατασκευή πλέγματος γείωσης για έναν υποσταθμό ή μία εγκατάσταση έχει στόχο την ασφαλή γείωση τους. Η γείωση είναι αναγκαίο να παρέχει το μέσο μεταφοράς ηλεκτρικών ρευμάτων στη γη υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες σφάλματος, χωρίς να επηρεάζεται η συνέχεια της παροχής και χωρίς να παραβιάζεται κανένα από τα όρια λειτουργίας.

Επιπλέον πρέπει να εξασφαλίζεται ότι ένας άνθρωπος, που βρίσκεται κοντά στις γειωμένες εγκαταστάσεις δεν εκθέτει τη ζωή του σε κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Ταυτόχρονα, στη μελέτη της γείωσης δεν θα πρέπει να παραλείπεται η αλληλεπίδραση του συστήματος γείωσης προς σχεδιασμό και της τυχαίας γείωσης, που πρόσκαιρα εγκαθίσταται όταν ένας άνθρωπος εκτίθεται σε ένα δυναμικό κλίσης στο εσωτερικής μίας γειωμένης εγκατάστασης. Μια χαμηλή αντίσταση του υποσταθμού ως προς γη δεν προσφέρει την απαραίτητη ασφάλεια.

Δεν υφίσταται μία απλή σχέση μεταξύ της αντίστασης του συστήματος γείωσης και του μέγιστου ρεύματος, στο οποίο μπορεί ένας άνθρωπος να εκτεθεί. Συνεπώς, ένας υποσταθμός με σχετικά χαμηλή αντίσταση μπορεί να γίνει επικίνδυνος, ενώ άλλος υποσταθμός με υψηλή αντίσταση να είναι περισσότερο ασφαλής ή να καταστεί ασφαλής έπειτα από προσεκτικό σχεδιασμό.





**Σχήμα 4.1:** Πλέγμα Γείωσης

Για όσο διαρκεί ένα σφάλμα προς γη, η ροή του ρεύματος προς γη θα παράγει κλίσεις δυναμικού μέσα στον υποσταθμό και κοντά σε αυτόν. Οι τιμές της τάσης επαφής, της βηματικής τάσης και του μεταφερόμενου δυναμικού καθορίζουν την ασφάλεια του προσωπικού. Παράλληλα, η γείωση μίας εγκατάστασης θα πρέπει να προστατεύει την ίδια την εγκατάσταση από καταπόνηση και καταστροφή των συσκευών, που περιλαμβάνει. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να υπάρξει έλεγχος της ανύψωσης δυναμικού γης, ώστε να μη καταστραφούν οι μονώσεις της εγκατάστασης. Θα πρέπει, ωστόσο, το σύστημα γείωσης να είναι τέτοιο, ώστε να ρέει αρκετό ρεύμα σφάλματος για να λειτουργήσουν οι συσκευές ασφάλειας της εγκατάστασης και να απομονωθεί το σφάλμα. Για να επιτραπεί το ρεύμα να ρέει προς γη, θα πρέπει το σύστημα γείωσης να περιλαμβάνει ηλεκτρόδια γείωσης, καθώς και ένα δίκτυο αγωγών για να επιτρέπει το ρεύμα σφάλματος να διαμοιράζεται, να ρέει δηλαδή μέσα σε ολόκληρο το πλέγμα γείωσης.

Πιο συγκεκριμένα στα αιολικά πάρκα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντικεραυνική προστασία στο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης. Ο κίνδυνος από κεραυνό για μία τοποθεσία είναι μία συνάρτηση της τοπογραφίας, του ύψους της κατασκευής και της πιθανότητας εκδήλωσης κεραυνού στην ευρύτερη περιοχή. Συνυπολογίζοντας το ύψος της Α/Γ και το γεγονός ότι τα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε κορυφές δίχως βλάστηση, είναι καίριας σημασίας η ανάγκη αντικεραυνικής προστασίας σε συνδυασμό με το σύστημα γείωσης ενός αιολικού πάρκου.

## 4.4 Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης με Πλέγμα

Ο ορθός σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης με πλέγμα αρχίζει συνήθως με τη μελέτη και επιθεώρηση της εγκατάστασης του υποσταθμού, όπου διακρίνονται οι βασικές δομές και ο κύριος εξοπλισμός.

Για την ανάλυση ενός τυπικού πλέγματος γείωσης λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

1. Η περίμετρος θα πρέπει να περιβάλλεται από ένα συνεχή αγωγίμο βρόχο. Έτσι αποφεύγεται η υψηλή συγκέντρωση ρεύματος και συνεπώς η δημιουργία υψηλών κλίσεων δυναμικού στην περιοχή του πλέγματος και στις άκρες των αγωγών που εξέχουν. Όσο αυξάνεται η περίμετρος της περιοχής, που περιβάλλει το πλέγμα, τόσο μειώνεται η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος.
2. Οι αγωγοί μέσα στο βράχο τοποθετούνται συνήθως παράλληλα, όπου αυτό κρίνεται δυνατό, κατά μήκος των δομών ή του εξοπλισμού προς γείωση ώστε να εξασφαλίζεται το μικρό μήκος των συνδέσεων με τη γείωση.
3. Γυμνοί αγωγοί χαλκού θαμμένοι σε βάθος 0,3 έως 0,5m και σε απόσταση 3 έως 7m μεταξύ τους μπορεί να περιλαμβάνονται σε ένα τυπικό ορθογωνικό πλέγμα γείωσης υποσταθμού. Οι αγωγοί αυτοί θα πρέπει να είναι καλά συνδεδεμένοι στις συνδέσεις των αγωγών. Οι ράβδοι μπορεί να είναι είτε στα σημεία σύνδεσης των αγωγών είτε στις ακμές του πλέγματος κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος. Ράβδοι μπορούν επιπλέον να εγκατασταθούν στον κύριο εξοπλισμό του υποσταθμού, ιδίως κοντά σε αλεξικέραυνα. Σε εδάφη υψηλής ειδικής αντίστασης και πολυστρωματικά εδάφη μπορούν να τοποθετηθούν είτε μακρύτεροι ράβδοι είτε ράβδοι σε περισσότερα σημεία σύνδεσης.
4. Το συγκεκριμένο πλέγμα γείωσης επεκτείνεται σε όλη την περιοχή του υποσταθμού και πολλές φορές πέρα από τη γραμμή του φράκτη. Αγωγοί μεγαλύτερης διατομής ή πολλαπλοί αγωγοί καθόδου χρησιμοποιούνται, όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση ρεύματος. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι η σύνδεση ουδέτερου προς γη, η σύνδεση γεννητριών, καθώς και η συστοιχία μετασχηματιστών ή πυκνωτών.
5. Το ορθογωνικό πλέγμα παρουσιάζει λόγο διαστάσεων, που κυμαίνεται από 1:1 έως 1:3, εκτός εάν από την ανάλυση προκύψουν διαφορετικές τιμές. Η πυκνότητα του πλέγματος έχει μικρή σχετικά επίδραση στη μείωση της αντίστασης πλέγματος. Ο έλεγχος των δυναμικών επιφανείας αποτελεί κυρίαρχο ρόλο των κάθετων και οριζόντιων αγωγών. Ταυτόχρονα, εξασφαλίζονται πολλαπλές διαδρομές για το ρεύμα σφάλματος που θα διαχέεται στο πλέγμα και έτσι ελαχιστοποιείται η πτώση τάσης μέσα στο ίδιο το πλέγμα.

## 4.5 Σύνδεση Πλεγμάτων Γείωσης

Κατάλληλοι αγωγοί μηχανικής αντοχής και μέγιστης αμπεροχωρητικότητας θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μεταξύ:

- Όλων των ηλεκτροδίων γείωσης, όπως πηγάρια γείωσης, ράβδοι και όπου αυτό εφαρμόζεται νερό, μέταλλο, σωλήνες αερίου κ.τ.λ.
- Όλων των υπέργειων αγωγίμων μεταλλικών τμημάτων, που μπορούν να ενεργοποιηθούν σε περίπτωση ατυχήματος. Τέτοια τμήματα μπορεί να είναι πλαίσια μηχανών, μεταλλικές κατασκευές, μεταλλικά στέγαστρα κ.τ.λ. Επιπλέον, τα αγωγίμα μεταλλικά τμήματα (που μπορεί να είναι σε διαφορετικό δυναμικό σε σχέση με άλλα μεταλλικά τμήματα, που έχουν ενεργοποιηθεί) πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους συνήθως μέσω του πλέγματος γείωσης.

- Όλων των πηγών ρεύματος σφάλματος, όπως μετασχηματιστές, αλεξικέραυνα, πυκνωτές ζεύξης ή συστοιχίες πυκνωτών και όπου κρίνεται απαραίτητο, μεταξύ των ουδετέρων των μηχανών και των κυκλωμάτων ισχύος και φωτισμού.

Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για τις συνδέσεις αυτές είναι καλώδια ή ταινίες χαλκού.

## 4.6 Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης σε Δύσκολες Συνθήκες

Στην περιοχή του υποσταθμού ή σε περιοχές, όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι πολύ υψηλή, η διαθέσιμη περιοχή για το πλέγμα γείωσης είναι αρκετά περιορισμένη. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η κατασκευή συστήματος γείωσης με χαμηλή αντίσταση, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Στην περίπτωση αυτή, καθίσταται δύσκολος ο έλεγχος των δυναμικών επιφανείας.

Κάποιες από τις πιθανές λύσεις που εφαρμόζονται είναι οι ακόλουθες:

- Χρήση ράβδων σε μεγάλο βάθος και άνοιγμα πηγαδιών γείωσης.
- Σύνδεση σε απομακρυσμένο πλέγμα και γειτονικά συστήματα γείωσης. Ένα συνδυασμένο σύστημα που χρησιμοποιεί τις ξεχωριστές εγκαταστάσεις σε υπόγειες κατασκευές, κτίρια κ.τ.λ. Η χρήση απομακρυσμένων ηλεκτροδίων γείωσης προϋποθέτει προσεκτική μελέτη των περιοχών με αλεξικέραυνα, των μεταφερόμενων δυναμικών και άλλων κρίσιμων σημείων. Μεταξύ των τοπικών και των απομακρυσμένων εγκαταστάσεων γείωσης μπορεί να αναπτυχθεί σημαντική πτώση τάσης και ιδίως για κρουστικές τάσεις υψηλής συχνότητας (κεραυνός).
- Κάποια πρόσθετα βελτιωτικά εδάφους, σε συνδυασμό με το πλέγμα και τις κατακόρυφες ράβδους.
- Χρήση στρωμάτων από αγωγούς. Με στόχο την εξισορρόπηση των κλίσεων δυναμικού κοντά στην επιφάνεια προτείνεται ο συνδυασμός προσθήκης υλικού επιφανείας και η κατασκευή στρώματος από σύρματα σε συνδυασμό πάντα με το πλέγμα γείωσης.
- Χρήση άλλων διαθέσιμων μέσων με στόχο την ελάττωση της συνολικής αντίστασης των συστημάτων γείωσης, όπως η σύνδεση στατικών αγωγών και ουδετέρων στη γείωση. Στην περιοχή του υποσταθμού συνηθίζεται η χρήση μεταλλικών αντικειμένων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εφεδρικά ηλεκτρόδια γείωσης ή ως σύνδεσμοι με άλλα συστήματα γείωσης.
- Η τοποθέτηση υλικού χαμηλής ειδικής αντίστασης αρκετά μεγάλου όγκου σε κοντινή απόσταση, όπου αυτό είναι δυνατό, ώστε το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί ως επιπλέον πλέγμα. Το δορυφορικό αυτό πλέγμα, όταν συνδέεται επαρκώς με το κύριο πλέγμα, θα ελαττώσει τη συνολική αντίσταση και αντίστοιχα και το GPR του πλέγματος γείωσης. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι είτε λάσπη είτε ακόμη και μέρος μίας μεγάλης κατασκευής, όπως ποσότητα τσιμέντου, που ανήκει σε υδροηλεκτρικό φράγμα.

## 4.7 Επικινδυνότητα Κεραυνών & Αντικεραυνική Προστασία

Η πιθανότητα να χτυπηθεί μία δομή (π.χ. Α/Γ) από έναν κεραυνό είναι συνάρτηση του ύψους της συγκεκριμένης δομής, της τοπογραφίας και της κεραυνικής δραστηριότητας της περιοχής.

Τα κεραυνικά πλήγματα μπορούν να προκαλέσουν ένα από τα ακόλουθα ή και συνδυασμό τους:

- Τραυματισμό ή ακόμα και θάνατο ανθρώπινης ζωής
- Βλάβη του εξοπλισμού
- Διακοπή λειτουργίας του εξοπλισμού
- Βλάβη σε κτιριακές μονάδες ή κατασκευές
- Φθορά ή απώλεια αποθηκευμένων δεδομένων

Τα αντικεραυνικά συστήματα σχεδιάζονται με στόχο την ελαχιστοποίηση των προαναφερθέντων επιπτώσεων. Φυσικά δεν είναι εγγυημένη η πλήρης προστασία, ωστόσο αν δοθεί η απαραίτητη προσοχή στα συστήματα γείωσης, στις συσκευές ασφάλειας και στο σχεδιασμό ολόκληρου του αιολικού πάρκου μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι παραπάνω κίνδυνοι.

Όταν ένας πύργος χτυπηθεί από έναν κεραυνό, το κεραυνικό ρεύμα ρέει από τον πύργο προς το έδαφος, προκαλώντας έτσι τοπικά ανύψωση του δυναμικού της γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση του δυναμικού γης στον αστέρα του μετασχηματιστή της Α/Γ. Τα καλώδια ισχύος, που συνδέουν τη γεννήτρια, μεταφέρουν αυτή την τάση στα ελίγματα της γεννήτριας. Υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ του περιβλήματος της γεννήτριας και των τυλιγμάτων της εξαιτίας της πτώσης τάσης κατά μήκος του πύργου της Α/Γ.

Όταν το κεραυνικό πλήγμα περάσει προς τη γη μέσω της γείωσης θα προκαλέσει κατάρρευση του εδάφους γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης. Αν μέσα στην περιοχή κατάρρευσης υπάρχει μία θαμμένη κατασκευή, τότε θα προκληθεί ζημιά στο μεταλλικό μέρος ή στο περίβλημα της κατασκευής και είναι πιθανή η πρόκληση πυρκαγιάς.

Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να εξασφαλίζει την ασφαλή αγωγή του κεραυνικού ρεύματος από το σημείο που χτυπά ο κεραυνός προς τη γη. Ταυτόχρονα θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τις επαγόμενες τάσεις και τις κλίσεις δυναμικού μέσα στην κατασκευή και να αποφορτίζει το κεραυνικό ρεύμα προς γείωση χωρίς την παραγωγή επικίνδυνων κλίσεων δυναμικού στην επιφάνεια της γης. Στόχος της αντικεραυνικής προστασίας σε ένα αιολικό πάρκο είναι να εκτρέψει προς αυτήν μία εκφόρτιση κεραυνού, η οποία ειδάλλως θα χτυπούσε ένα τρωτό σημείο του αιολικού πάρκου.

Το φάσμα του κεραυνικού ρεύματος περιέχει συνιστώσες υψηλής συχνότητας με τιμές που κυμαίνονται από τα 10kHz έως το 1MHz. Οι συνιστώσες αυτές αντιδρούν με την επαγωγική αντίδραση του συστήματος γείωσης. Η αντίδραση αυτή μπορεί να αυξήσει τη συνολική επαγωγική αντίδραση της γείωσης σε τιμή αρκετά υψηλότερη από την τιμή της αντίδρασης στα 50Hz.

Η επαγωγή των οριζοντίων ηλεκτροδίων γείωσης, που συνδέουν κάθε Α/Γ του πάρκου είναι μεγαλύτερη κατά τα πρώτα  $\mu\text{s}$  της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος. Αυτό έχει ως συνέπεια οι μεταφερόμενες υπερτάσεις προς τις γειτονικές Α/Γ να μειώνονται. Στην Α/Γ, που χτυπά ο κεραυνός, η ανύψωση του δυναμικού είναι τοπική. Καθίσταται έτσι επιθυμητή η σύνδεση κάθε Α/Γ με τη γειτονική της.

Επειδή οι κεραυνοί παράγονται από διαφορετικά σύννεφα κάθε φορά, ο κάθε κεραυνός είναι διαφορετικός. Η κατανομή της πιθανότητας για κάθε ηλεκτρική παράμετρο χρησιμοποιείται για την περιγραφή ενός κεραυνικού πλήγματος σε μία δεδομένη δομή και τον υπολογισμό του ποσοστού των κεραυνικών πληγμάτων των οποίων η ένταση ξεπερνά μία συγκεκριμένη τιμή σε *Amperes*.

Η πλειοψηφία των κεραυνών ανά τον κόσμο είναι αρνητικά κρουστικά ρεύματα μικρής έντασης και η εκφόρτιση γίνεται από το σύννεφο προς τη γη. Λιγότερα συχνοί είναι οι κεραυνοί που προκύπτουν από το θετικό τμήμα του σύννεφου. Ωστόσο, ανεξάρτητα από την πολικότητα, η ροή του ρεύματος είναι μονοδρομική, έχει χρόνο ανύψωσης μερικά  $\mu\text{s}$  και χρόνο ουράς κάποια δεκάδες  $\mu\text{s}$ .



# Κεφάλαιο 5

## Συστήματα Γείωσης Ανεμογεννητριών

### 5.1 Εισαγωγή

Στόχος των συστημάτων γείωσης σε ένα αιολικό πάρκο είναι η προστασία τόσο του ανθρώπινου δυναμικού όσο και του εξοπλισμού σε περίπτωση πιθανού σφάλματος [58]. Ωστόσο, η κατασκευή αντίστασης γείωσης με επαρκείς προδιαγραφές και τιμή μικρότερη των 10Ω καθίσταται δύσκολη εξαιτίας της υψηλής ειδικής αντίστασης του εδάφους και άλλων παραγόντων. Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι πρέπει να γίνει σωστός σχεδιασμός και κατασκευή των συστημάτων γείωσης, ώστε το αιολικό πάρκο να λειτουργεί με ασφάλεια καθόλη τη διάρκεια ζωής του.

Ένα από τα πρώτα βήματα στον ορθό σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης μίας Α/Γ είναι ο καθορισμός κατάλληλου προτύπου, σύμφωνα με το οποίο θα σχεδιασθεί το σύστημα γείωσης. Κατόπιν, θα πρέπει να γίνουν γνωστά τα απαραίτητα στοιχεία για την προσομοίωση. Τέτοια στοιχεία είναι η μορφολογία και ο τύπος εδάφους (μονοστρωματικό, διστρωματικό κ.τ.λ.), το τυπικό βάρος του ανθρώπου, η συχνότητα λειτουργίας, καθώς επίσης και το κόστος προϋπολογισμού για τη σχεδίαση και την κατασκευή του συστήματος γείωσης. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να προσδιοριστεί η διαστασιολόγηση των αγωγών και το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αν αυτό δεν επιτευχθεί, θα πρέπει να παρασχεθούν στοιχεία για τον υπολογισμό τους. Τέλος, θα πρέπει οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις να παραμείνουν εντός των επιτρεπτών ορίων και να γίνουν οι σωστές προβλέψεις για τον περιορισμό της αντίστασης γείωσης.

Στο πρότυπο *IEEE Std. 80-2013* [24] αναφέρονται οι μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους και της αντίστασης γείωσης των Α/Γ. Παράλληλα, περιγράφεται η μεθοδολογία για το σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης, καθώς και οι τρόποι υπολογισμού των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων.

Στο πρότυπο *IEC 61400-24* [59] γίνεται λόγος για την αντικεραυνική προστασία των ανεμογεννητριών.

Η ασφάλεια και η αξιοπιστία των συστημάτων γείωσης και οι τρόποι αντιμετώπισης πιθανών προβλημάτων έχουν προταθεί σε αρκετές μελέτες [60-63]. Είναι απαραίτητο οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις να είναι εντός ορίων, ώστε να μπορεί ένα σύστημα γείωσης να χαρακτηριστεί ασφαλές και να εγγυάται την προστασία του εξοπλισμού.

Στο σχεδιασμό συστημάτων γείωσης ενός αιολικού πάρκου υπάρχουν διάφορες ιδιαιτερότητες και για αυτό απαιτείται προσεκτική μελέτη [64-74]. Το ιδιαίτερα υψηλό αιολικό δυναμικό στις κορυφογραμμές της Ελλάδας καθιστά ελκυστική την εγκατάσταση Α/Γ σε αυτές τις περιοχές. Ωστόσο, αυτά τα εδάφη παρουσιάζουν υψηλή ειδική αντίσταση. Αν δεν προσδιορισθεί η βέλτιστη διάταξη είναι πιθανό να αυξηθεί η αντίσταση γείωσης και οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις, που αναπτύσσονται, να περάσουν τα επιτρεπτά όρια. Για αυτό θα πρέπει να εξετασθούν σοβαρά πολυάριθμες διατάξεις συστημάτων γείωσης. [64-70]. Η μείωση της τιμής αντίστασης γείωσης έχει μελετηθεί λεπτομερώς και έχουν προταθεί αρκετές εναλλακτικές για το σκοπό αυτό, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως. Αρκετές μελέτες [64-70] ασχολούνται με το σχεδιασμό ενός αξιόπιστου και ασφαλούς συστήματος γείωσης. Στις μελέτες αυτές, μεταξύ άλλων, προτείνεται και η σύνδεση των επιμέρους συστημάτων γείωσης των Α/Γ σε ένα ενιαίο σχηματισμό συστήματος γείωσης για όλο το αιολικό πάρκο. Ταυτόχρονα, υπάρχουν και άλλες μελέτες [72-75], που κάνουν λόγο για τα μεταβατικά φαινόμενα των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων των Α/Γ κατά τη διάρκεια κεραυνοπληξιών.

## 5.2 Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης Αιολικού Πάρκου

Τα αιολικά πάρκα, όπως προαναφέρθηκε, συνηθίζεται να τοποθετούνται σε ορεινές περιοχές με βραχώδες έδαφος και υψηλή ειδική αντίσταση. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα γείωσης που θα προκύψει, μπορεί να μην ικανοποιεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές ασφάλειας και αξιοπιστίας [76],[77]. Καθίσταται, λοιπόν, σαφές ότι ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης ενός αιολικού πάρκου προϋποθέτει ιδιαίτερη προσοχή και ορθή μελέτη. Ωστόσο, ο σχεδιασμός τους στην Ελλάδα μπορεί να θεωρηθεί ως μία τυποποιημένη διαδικασία, που αποτελείται από τα ακόλουθα 17 βήματα:

1. Προσδιορισμός της μέγιστης τιμής ρεύματος σφάλματος του αιολικού πάρκου.
2. Επιλογή των πιθανών θέσεων εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και των κέντρων ελέγχου.
3. Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη μέθοδο *Werner* για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας ή κέντρου ελέγχου.
4. Εντοπισμός άλλων υποψήφιων θέσεων στο αιολικό πάρκο που θα μπορούσαν να μειώσουν την αντίσταση γείωσης (χώμα, πηγάδια, κ.τ.λ.).
5. Εκτίμηση του μοντέλου εδάφους, σύμφωνα με μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους.
6. Σχεδίαση τυπικού πλέγματος γείωσης για κάθε υποσταθμό ή ανεμογεννήτρια.
7. Υπολογισμός της τιμής της αντίστασης γείωσης σε κάθε σύστημα γείωσης.
8. Υπολογισμός του εγχεόμενου ρεύματος σφάλματος για κάθε σύστημα γείωσης.
9. Υπολογισμός της μέγιστης επιτρεπτής ασφαλούς τάσης επαφής και της μέγιστης επιτρεπτής ασφαλούς βηματικής τάσης για κάθε σύστημα γείωσης.
10. Υπολογισμός της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης για κάθε σημείο στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το πλέγμα γείωσης.



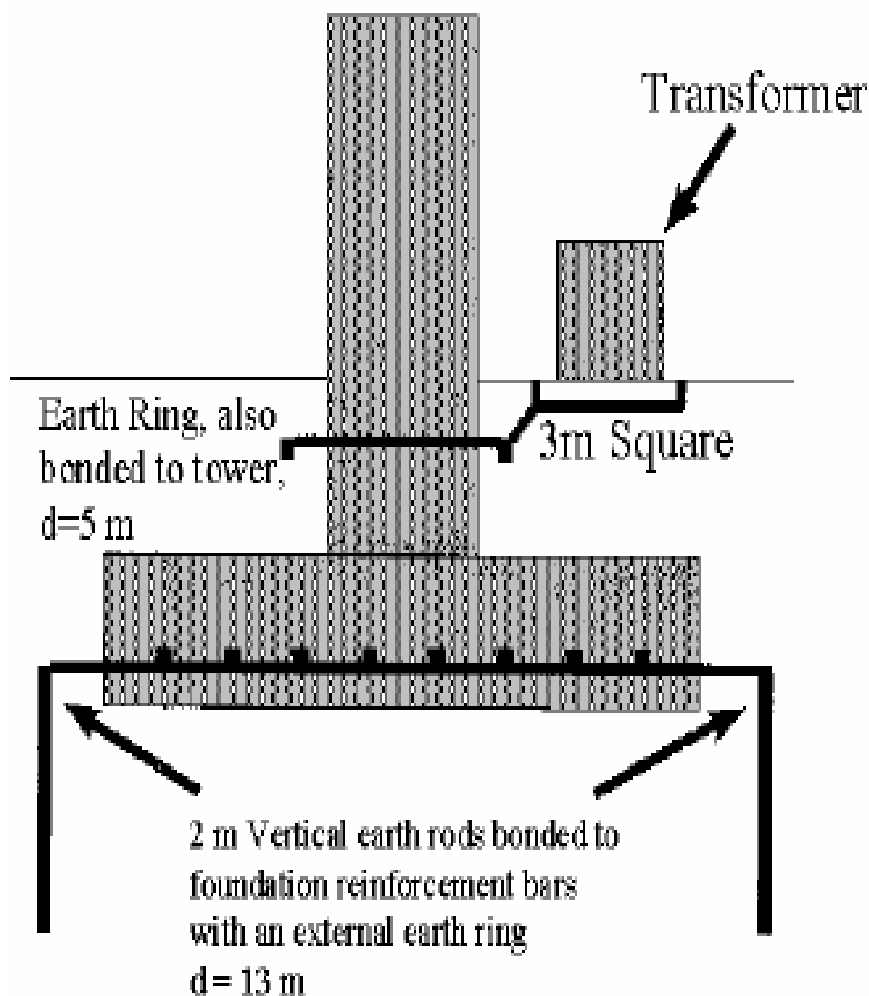
11. Έλεγχος των τιμών των παραπάνω μεγεθών. Θα ήταν επιθυμητό, η συνολική αντίσταση γείωσης του αιολικού πάρκου να είναι μικρότερη από  $1\Omega$ , η αντίσταση γείωσης για κάθε ανεμογεννήτρια να είναι μικρότερη από  $10\Omega$  και οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις να μην υπερβαίνουν τα ασφαλή όρια, όπως αυτά ορίζονται στο πρότυπο *IEEE Std. 80-2013* [24].
12. Αν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του βήματος 11, τότε ο σχεδιασμός έχει ολοκληρωθεί και μπορεί να ακολουθήσει το βήμα 15, ειδάλλως το επόμενο βήμα είναι το 13.
13. Βελτίωση του συστήματος γείωσης με ποικίλους τρόπους:
  - Αύξηση της επιφάνειας του συστήματος γείωσης
  - Πύκνωση του πλέγματος γείωσης
  - Προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων
  - Προσθήκη χώματος με χαμηλή ειδική αντίσταση ή βελτιωτικών εδάφους
  - Διασύνδεση του συστήματος γείωσης με άλλο σύστημα γείωσης
  - Αλλαγή σε αυστηρότερο κριτήριο όσον αφορά το χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Τα όρια ασφαλείας για την τάση επαφής και τη βηματική τάση θα έχουν υψηλότερες τιμές αν εξασφαλιστεί από τα μέσα προστασίας ότι ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρότερος.
  - Χρήση κατάλληλου υλικού επιφανείας (συνήθως χαλίκι) στην επιφάνεια εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης αν αυτό φέρει αλλαγή στα όρια ασφαλείας.
14. Επανάληψη της άνωθι διαδικασίας από το βήμα 4.
15. Κατασκευή του συστήματος γείωσης.
16. Μέτρηση της αντίστασης γείωσης.
17. Πραγματοποίηση πιθανών επιπλέον βελτιώσεων, όπου χρειάζεται και είναι τεχνικά αναγκαίο [58].

Εμπόδιο στη βελτίωση του συστήματος γείωσης αποτελεί το γεγονός, ότι η βάση της Α/Γ είναι δεδομένη και συνεπώς δεδομένο είναι και το θεμελιακό σύστημα γείωσης. Είναι δυνατό, ωστόσο, να τροποποιηθεί και να επεκταθεί το περιμετρικό σύστημα γείωσης. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της έκτασης του συστήματος γείωσης, γεγονός που οδηγεί σε περιορισμό της αντίστασης γείωσης.

Ο τρόπος με τον οποίο δύναται να περιορισθεί η τιμή της αντίστασης γείωσης βρίσκεται με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Η εκμετάλευση των υφιστάμενων χωματοργικών εργασιών στην «πλατεία» της Α/Γ αποτελεί έναν κατάλληλο τρόπο. Είναι πιθανό να σχηματίζεται βρόχος στο περιμετρικό σύστημα γείωσης, αλλά μπορεί και να μην σχηματίζεται. Η τιμή της αντίστασης γείωσης στη μόνιμη κατάσταση προσδιορίζεται από το συνολικό εμβαδό του συστήματος γείωσης και η δομή του εδάφους. Η ύπαρξη βρόχου περιορίζει τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε υψηλότερες τιμές της μεταβατικής αντίστασης.

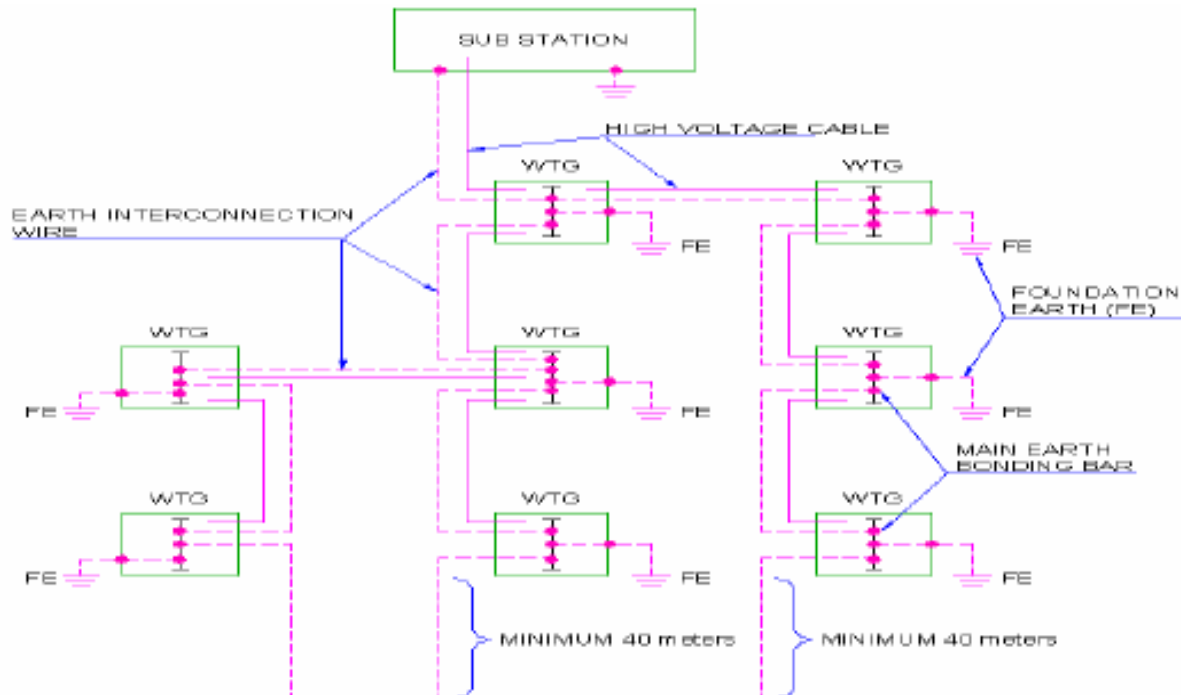
## 5.3 Κατασκευή Συστημάτων Γείωσης Ανεμογεννήτριας

Γύρω από τη θεμελίωση του πυλώνα μίας Α/Γ τοποθετείται και συγκολλείται ένα δακτυλοειδές ηλεκτρόδιο γείωσης, που αποτελεί και το σύστημα γείωσης της Α/Γ. Η θεμελίωση ενισχύεται με ράβδους ενίσχυσης, που ενώνονται απευθείας ή διαμέσου του πυλώνα με τον εσωτερικό δακτύλιο και λειτουργούν ως ηλεκτρόδιο γείωσης. Αυτό συμβαίνει, διότι η ειδική αντίσταση σκυροδέματος είναι προσεγγιστικά ίση με αυτή του εδάφους, που το περιβάλλει [78]. Εντούτοις, ορισμένες φορές αμελούνται οι ράβδοι ενίσχυσης οπότε παίρνονται πιο συντηρητικές τιμές για τις τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις, που αναπτύσσονται. Παράλληλα, μπορούν να τοποθετηθούν ράβδοι είτε οριζόντιας είτε εγκάρσιας κατεύθυνσης για τη μείωση της τιμής της αντίστασης γείωσης, συμπληρωματικά με το δακτυλίδι, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.1). Τα διεθνή πρότυπα [59],[79] αναφέρουν ότι μία τιμή γείωσης με τιμή μικρότερη ή ίση των  $10\Omega$  μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή τόσο για την αντικεραυνική προστασία όσο και για την προστασία από τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις.



Σχήμα 5.1: Διάταξη Συστήματος Γείωσης μίας Ανεμογεννήτριας [58]

Ακολουθώς, τα συστήματα γείωσης των μεμονωμένων Α/Γ μπορούν να συνδεθούν διαμέσου της μεταλλικής θωράκισης του κεντρικού καλωδίου ΜΤ προς σχηματισμό μίας ενιαίας γείωσης για όλο το αιολικό πάρκο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα περιορισμού της συνολικής αντίστασης γείωσης του αιολικού πάρκου σε τιμές του 1-2Ω. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων γίνεται σε περιοχές με υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης εδάφους. Συνεπώς καθίσταται απαραίτητη και η επιπρόσθετη διασύνδεση των ανεξάρτητων συστημάτων γείωσης κάθε Α/Γ με ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο.



**Σχήμα 5.2:** Διασύνδεση Μεμονομένων Συστημάτων Γείωσης κάθε Α/Γ προς Σχηματισμό του Ενιαίου Συστήματος Γείωσης του Αιολικού Πάρκου [80]

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρξει η δυνατότητα ανεξαρτητοποίησης κάθε συστήματος γείωσης έτσι ώστε να μπορεί να μετρηθεί η αντίσταση του, όταν κατασκευάζεται το σύστημα. Για αυτό το λόγο, κατά το στάδιο της κατασκευής, τα επιμέρους ανεξάρτητα συστήματα γείωσης των Α/Γ χωρίζονται με φρεάτια ανάμεσα τους. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εγγυημένη η ακρίβεια των μετρήσεων και ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα για ενίσχυση του συστήματος γείωσης, αν χρειαστεί [58].

## 5.4 Διαφοροποιήσεις των Συστημάτων Γείωσης των Ανεμογεννητριών

Για κάθε Α/Γ υπάρχουν διαφορετικά συστήματα γείωσης και έπειτα τα μεμονωμένα αυτά συστήματα γείωσης διασυνδέονται μεταξύ τους με ένα χάλκινο αγωγό.

Ο αγωγός αυτός είναι θαμμένος απευθείας στο έδαφος. Στη έρευνα, που ακολουθεί, εξετάζονται τέσσερις διαφορετικοί τύποι συστημάτων γείωσης.

## Γείωση Ανεμογεννήτριας Α

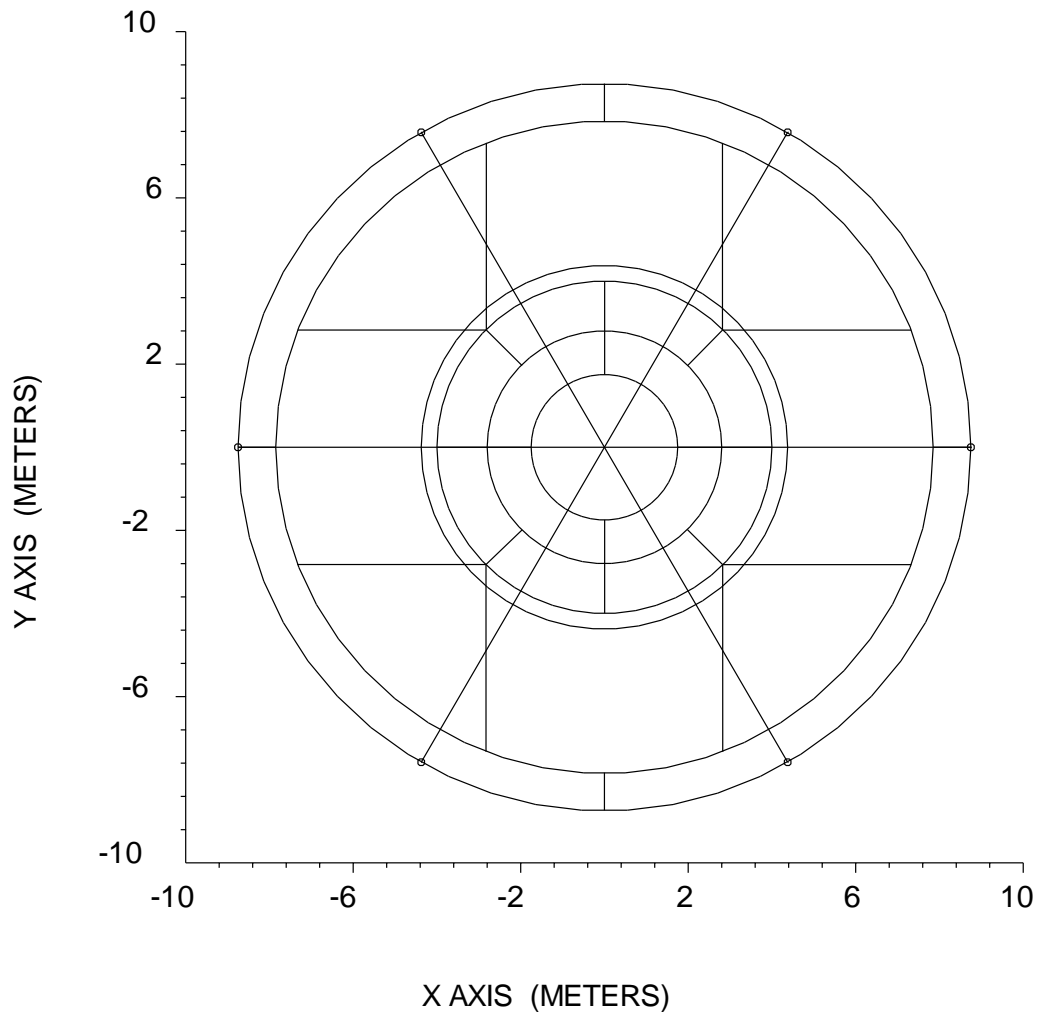
Το σύστημα γείωσης Α/Γ Α αποτελείται από τα εξής:

- Εξωτερική γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία  $30mm \times 3.5mm$  ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος  $2.4m$  και διάμετρο  $15.7m$ .
- Μεσαία γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία  $30mm \times 3.5mm$  ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος  $2.4m$  και διάμετρο  $8m$ .
- Μεσαία γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία  $30mm \times 3.5mm$  ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος  $0.8m$  και διάμετρο  $8m$ .
- Εσωτερική γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία  $30mm \times 3.5mm$  ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε βάθος  $0.8m$  και διάμετρο  $3.5m$ .
- Τέσσερις γαλβανισμένες ατσάλινες ταινίες  $30mm \times 3.5mm$  ενσωματωμένες μέσα στο σκυρόδεμα για να ενώνουν την εσωτερική ταινία με τη μεσαία ταινία διαμέτρου  $8m$ .
- Οκτώ γαλβανισμένες ατσάλινες ταινίες  $30mm \times 3.5mm$  ενσωματωμένες μέσα στο σκυρόδεμα για να ενώνουν την εξωτερική ταινία με τη μεσαία ταινία διαμέτρου  $8m$ , τοποθετημένη στο σκυρόδεμα σε βάθος  $2.4m$ .

Το περιμετρικό διάγραμμα γείωσης αποτελείται από:

- Εξωτερική επικασσιτερωμένη εν θερμώ χάλκινη ταινία  $25mm \times 4mm$ , τοποθετημένη σε βάθος  $2.6m$  και διάμετρο  $\Phi = 17.5m$
- Εσωτερική επικασσιτερωμένη εν θερμώ χάλκινη ταινία  $25mm \times 4mm$ , τοποθετημένη σε βάθος  $2.6m$  και διαμέτρου  $\Phi = 8.75m$
- Έξι ακτινικές επικασσιτερωμένες εν θερμώ χάλκινες ταινίες  $25mm \times 4mm$ , που ενώνουν την εσωτερική και την εξωτερική ταινία.
- Έξι κάθετες ατσάλινες ράβδοι γείωσης με  $250\mu m$  επικάλυψη χαλκού, διάμετρο  $\Phi 17$  και μήκος  $3m$ , τοποθετημένες στις άκρες των έξι ακτινικών ταινιών.
- Τέσσερις επικασσιτερωμένες εν θερμώ χάλκινες ταινίες  $25mm \times 4mm$ , που ενώνουν την εξωτερική ταινία του συστήματος γείωσης της περιμέτρου με την εξωτερική ταινία του πλέγματος θεμελιακής γείωσης με αλουμινοθερμική συγκόλληση.

Η κάτοψη της γείωσης Α/Γ Α απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.3):



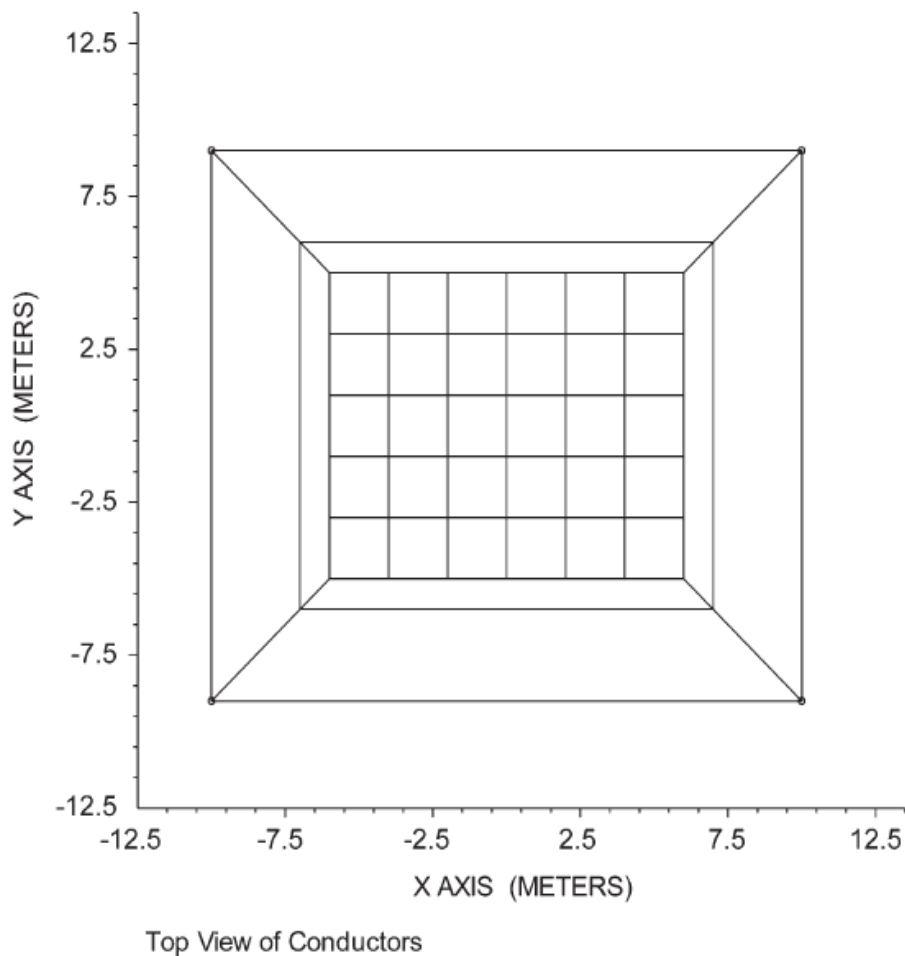
Top View of Conductors

**Σχήμα 5.3:** Κάτοψη Γείωσης Α/Γ Α [33]

Η συνολική επιφάνεια του δικτύου των αγωγών για κάθε ανεμογεννήτρια είναι  $240.5m^2$  και το συνολικό μήκος  $314.7m$ .

Το σύστημα γείωσης του υποσταθμού ελέγχου απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.4) και αποτελείται από τα εξής:

- Θεμελιακό δίκτυο γείωσης  $10m \times 12m$  με πλέγμα περίπου  $2m \times 2m$  από γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία  $30mm \times 3.5mm$ , που είναι ενσωματωμένη στο σκυρόδεμα σε βάθος  $0.7m$ .
- Ενδιάμεση επικασιτερωμένη εν θερμώ χάλκινη ταινία  $25mm \times 4mm$  που είναι ενσωματωμένη στο έδαφος έξω από το σκυρόδεμα. Το ηλεκτρόδιο γείωσης είναι τοποθετημένο σε βάθος  $0.7m$  και  $1m$  από τη θεμελίωση του υποσταθμού ελέγχου.



**Σχήμα 5.4:** Σύστημα Γείωσης Υποσταθμού Ελέγχου [81]

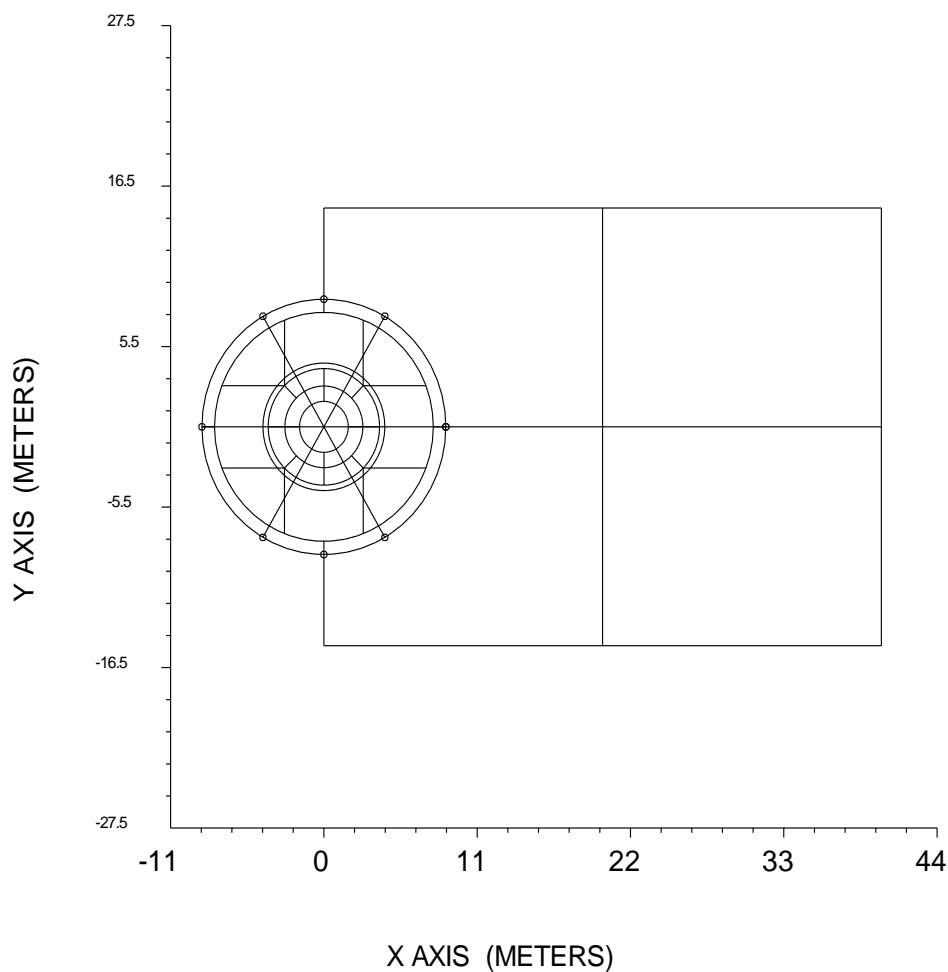
- Εξωτερική επικασσιτερωμένη εν θερμώ χάλκινη ταινία  $25mm \times 4mm$  ενσωματωμένη στο έδαφος έξω από το σκυρόδεμα. Το ηλεκτρόδιο γείωσης είναι τοποθετημένο σε βάθος  $0.7m$  και  $4m$  από τη θεμελίωση του υποσταθμού ελέγχου.
- Επικασσιτερωμένες εν θερμώ χάλκινες ταινίες  $25mm \times 4mm$ , που είναι ενσωματωμένες στο έδαφος σε ένα βάθος  $0.7m$  και ενώνουν το σύστημα γείωσης της περιμέτρου με το θεμελιακό δίκτυο γείωσης με αλουμινοθερμική συγκόλληση.
- Τέσσερις κάθετες ατσάλινες ράβδοι γείωσης με  $250\mu m$  επικάλυψη χαλκού, διάμετρο  $\Phi 17$  και μήκος  $3m$  τοποθετημένες στις άκρες της εξωτερικής ταινίας.

Η συνολική επιφάνεια του δικτύου των αγωγών του υποσταθμού ελέγχου είναι  $360m^2$  και το συνολικό μήκος  $304.6m$ .

## Γείωση Ανεμογεννήτριας Β

Το σύστημα γείωσης A/Γ Β απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.5). Είναι βασισμένο στη γείωση A/Γ Α με τη διαφορά ότι είναι ενισχυμένο με την προσθήκη ενός τετραγωνικού συστήματος γείωσης  $40m \times 30m$  στο σύστημα γείωσης της περιμέτρου, που είναι τοποθετημένο σε βάθος  $0.6m$ . Αυτό αποτελείται από μία επικασιτερωμένη εν θερμώ χάλκινη ταινία  $25mm \times 4mm$ .

Η συνολική επιφάνεια του δικτύου των αγωγών κάθε A/Γ είναι  $1320.3m^2$  και το συνολικό μήκος είναι  $504.4m$ .



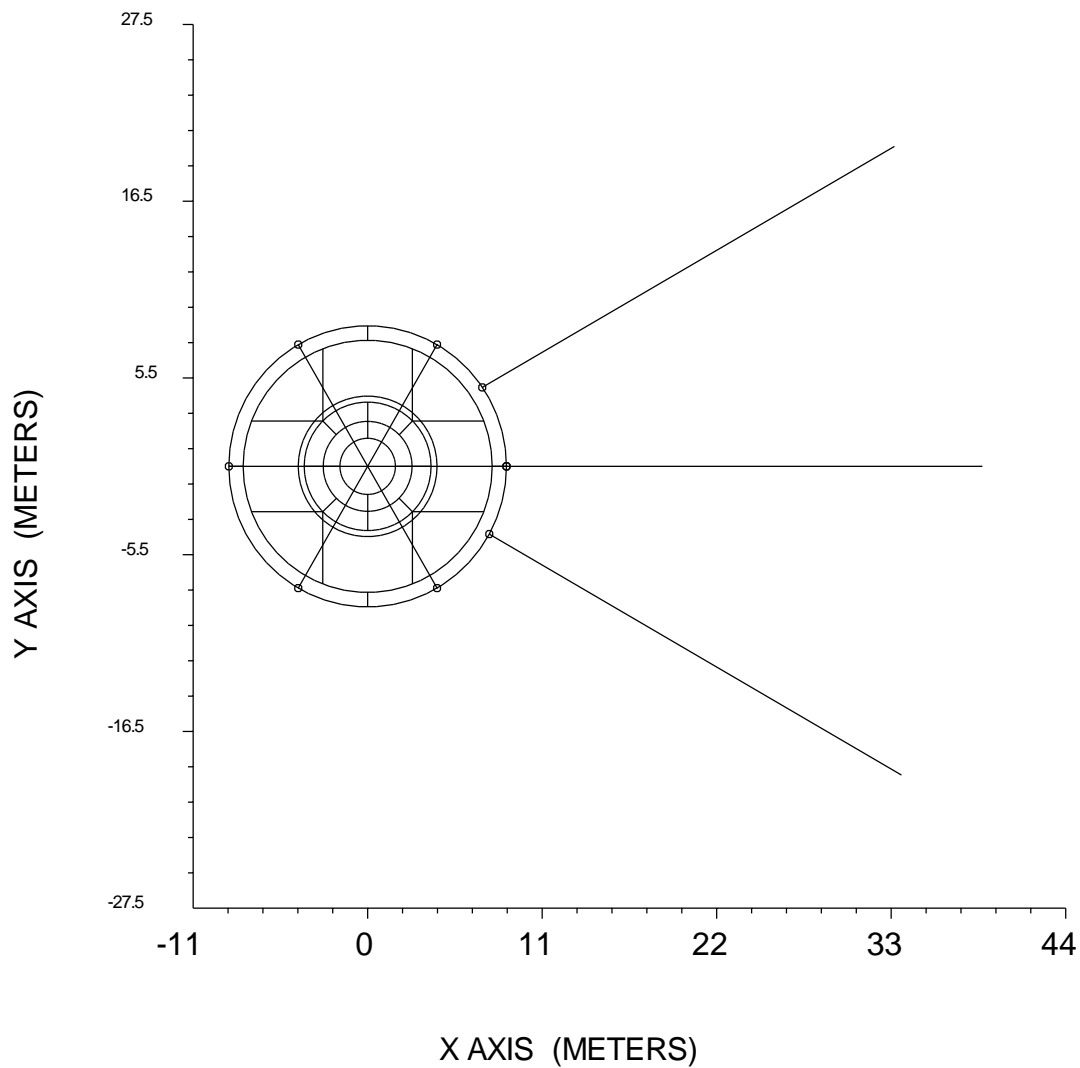
Top View of Conductors

**Σχήμα 5.5:** Κάτοψη Γείωσης A/Γ Β [33]

## Γείωση Ανεμογεννήτριας Γ

Το σύστημα γείωσης A/Γ Γ είναι ενισχυμένο με την προσθήκη ακτινικών αγωγών στο σύστημα γείωσης της περιμέτρου, που είναι τοποθετημένες σε βάθος  $0.6m$ . Οι ακτινικοί αγωγοί είναι χάλκινες ταινίες  $25mm \times 4mm$  σε μήκος  $30m$ .

Η συνολική επιφάνεια του δικτύου των αγωγών κάθε ανεμογεννήτριας είναι  $946.1m^2$  και το συνολικό μήκος είναι  $410.7m$ .



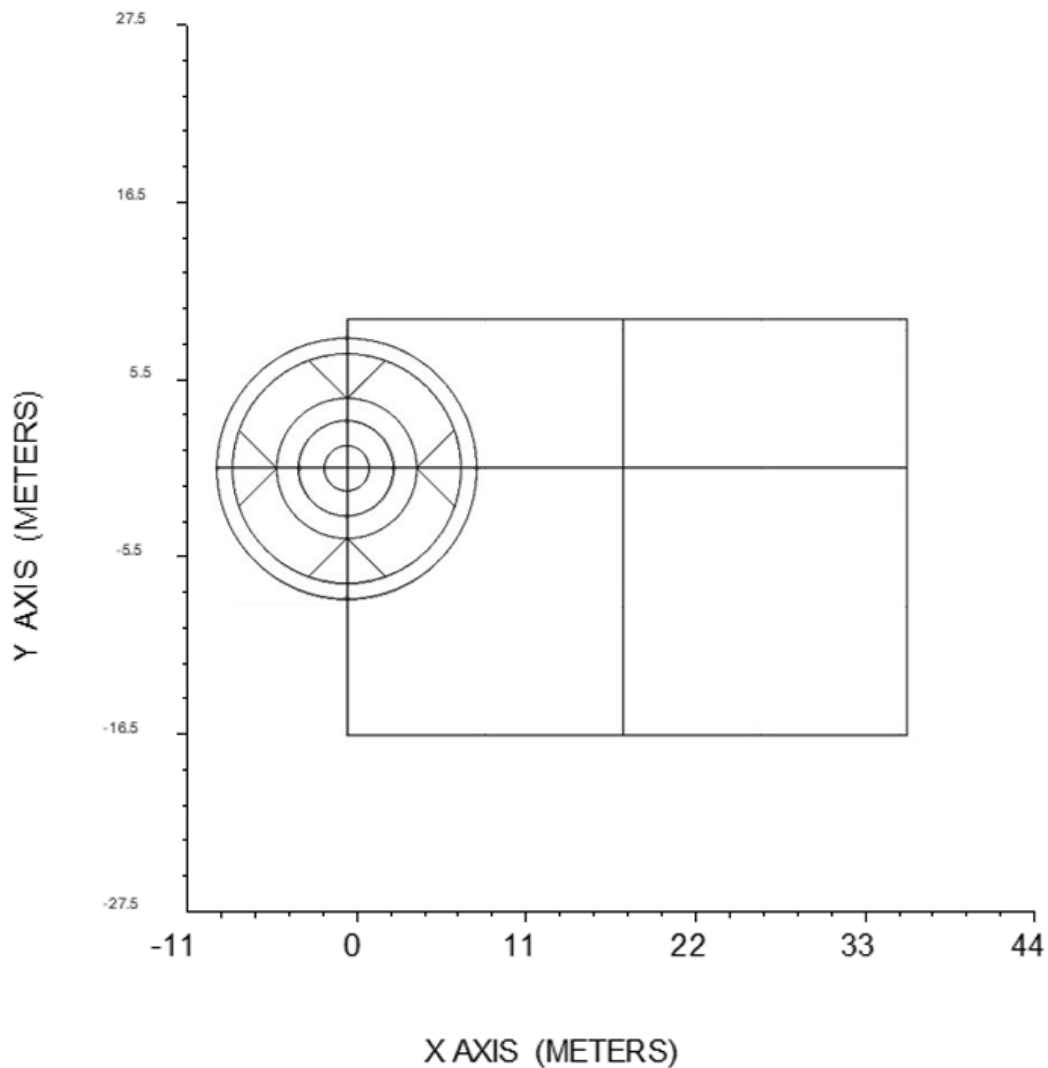
Top View of Conductors

**Σχήμα 5.6:** Κάτοψη Γείωσης A/Γ Γ [33]



## Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ

Το σύστημα γείωσης A/Γ Δ, κάτοψη του οποίου απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.7), θα χρησιμοποιηθεί για τις προσομοιώσεις, που θα γίνουν, στα δύο τελευταία μαθηματικά μοντέλα. Αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της έρευνάς μας, μιας και διαφοροποιείται σε σχέση με τα δύο πρώτα μαθηματικά μοντέλα, που θα ακολουθήσουν, και αφορούν τις γειώσεις A, B και Γ. Στο συγκεκριμένο τύπο γείωσης, θα εισάγουμε αρχικά τις παραμέτρους του εμβαδού και του μήκους κύριου ηλεκτροδίου. Ακολούθως, θα διαχωρίσουμε το εμβαδό και το μήκος σε εμβαδά και μήκη πρώτου και δεύτερου στρώματος εδάφους, όπως θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια.



Top View of Conductors

**Σχήμα 5.7:** Κάτοψη Γείωσης A/Γ Δ

## 5.5 Συχνότητα Κεραυνικού Πλήγματος Ανεμογεννητριών

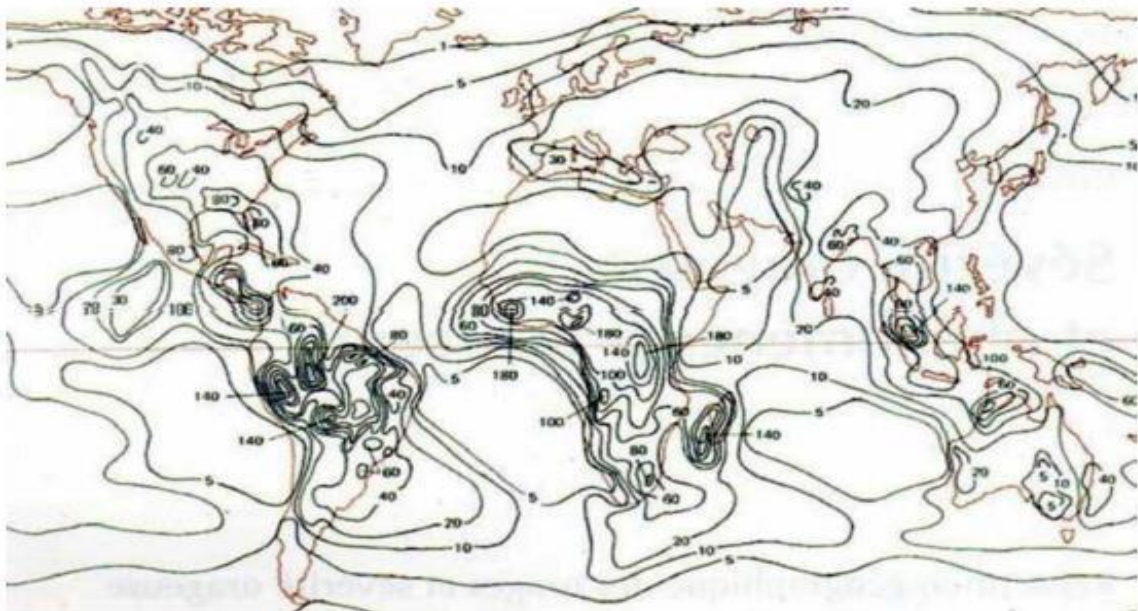
Σε ένα αιολικό πάρκο, το πιθανότερο σημείο κεραυνικού πλήγματος είναι ο πύργος της Α/Γ εξαιτίας του μεγάλου του ύψους. Στο πρότυπο *IEC 61400-24* [59] περιγράφεται η αξιολόγηση κινδύνου από κεραυνικά πλήγματα σε ένα αιολικό πάρκο.

Με στόχο να γίνει μία εκτίμηση του ολικού αριθμού κεραυνών, που δέχεται μία Α/Γ σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

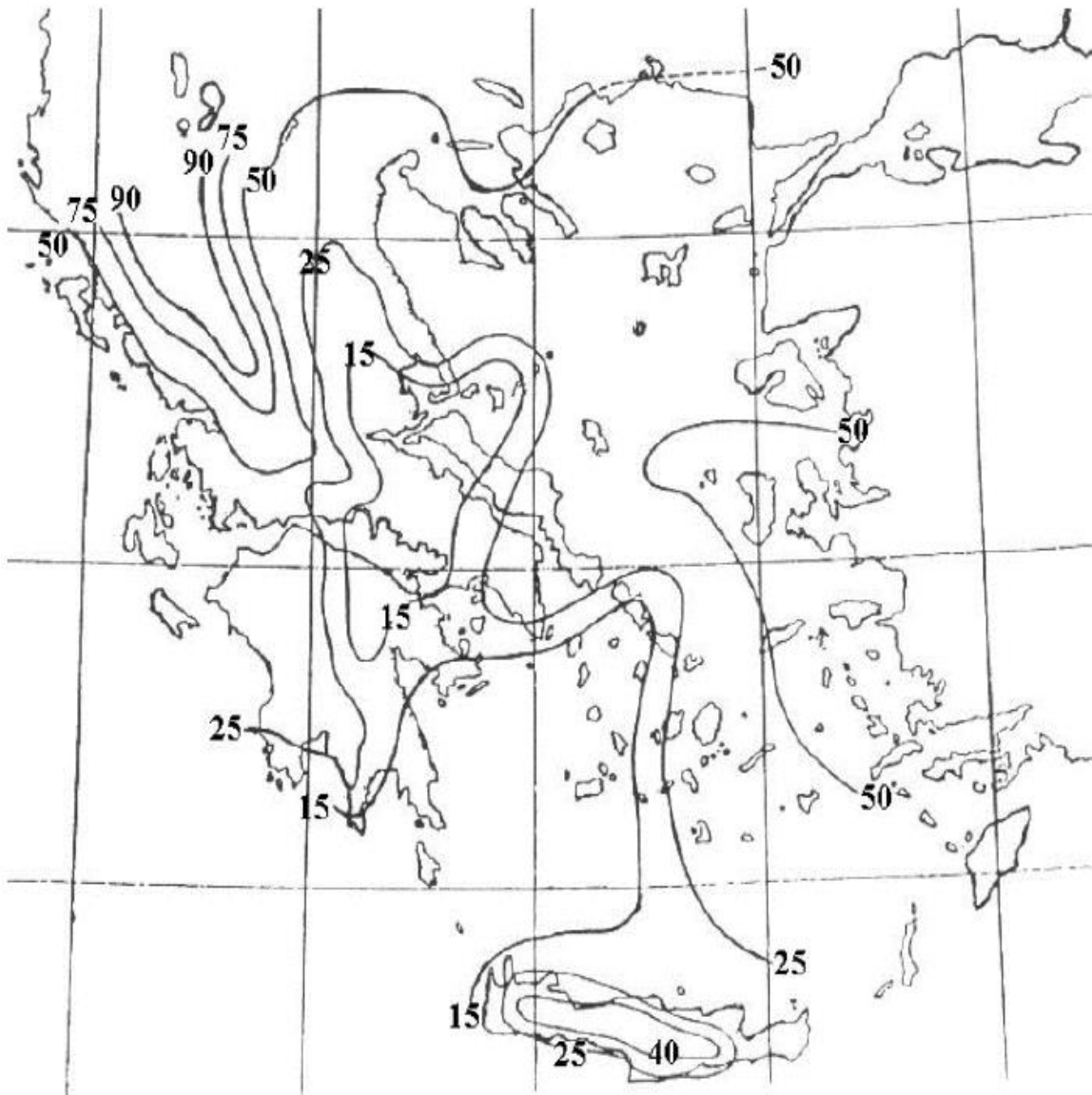
$$N_D = N_g \times A_c \times C_d \quad (5.1)$$

Όπου

- $N_D$  : Μέση Ετήσια Συχνότητα Άμεσων Κεραυνών στην Κατασκευή
- $N_g$  : Μέση Πυκνότητα Κεραυνών στο Έδαφος σε καταιγίδες/ $km^2$  ανά έτος, που προκύπτει από τον Ισοκεραυνικό Χάρτη μίας Περιοχής
- $A_c$  : Ισοδύναμη Περιοχή Συλλογής Κατασκευής σε  $km^2$
- $C_d$  : Περιβαλλοντικός Συντελεστής που εξαρτάται από τη Θέση Κατασκευής



Σχήμα 5.8 : Παγκόσμιος Χάρτης Ισοκεραυνικών Καμπυλών



**Σχήμα 5.9:** Χάρτης Ισοκεραυνικών Καμπυλών της Ελλάδας

Στην άνωθι εξίσωση έγινε προσθήκη νέων παραμέτρων με στόχο ο αριθμός των κεραυνικών πληγμάτων κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου να μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψε η ακόλουθη βελτιωμένη εξίσωση:

$$N_D = N_{sg} \times N_g \times A_c \times (C_{dc} \times C_{wl} \times C_{hasl}) \quad (5.2)$$

Όπου

$N_D$  : Μέση Ετήσια Συχνότητα Άμεσων Κεραυνών στην Κατασκευή

$N_{sg}$ :	Αριθμός Τερματισμού Κεραυνικών Πληγμάτων (Πιθανότητα να έχει μία Εκκένωση περισσότερα από ένα Σημεία Τερματισμού)
$N_g$ :	Μέση Πυκνότητα Κεραυνών στο Έδαφος σε καταιγίδες/ $km^2$ ανά έτος, που προκύπτει από τον Ισοκεραυνικό Χάρτη μίας Περιοχής
$A_c$ :	Ισοδύναμη Περιοχή Συλλογής Κατασκευής σε $km^2$
$C_{dc}$ :	Περιβαλλοντικός Παράγοντας, που αναφέρεται στην Πολυπλοκότητα Εδάφους
$C_{wl}$ :	Περιβαλλοντικός Παράγοντας, που αναφέρεται στους Κεραυνούς Χειμερινής Περιόδου
$C_{hasl}$ :	Περιβαλλοντικός Παράγοντας, που αναφέρεται στο Ύψος από την Επιφάνεια της Θάλασσας

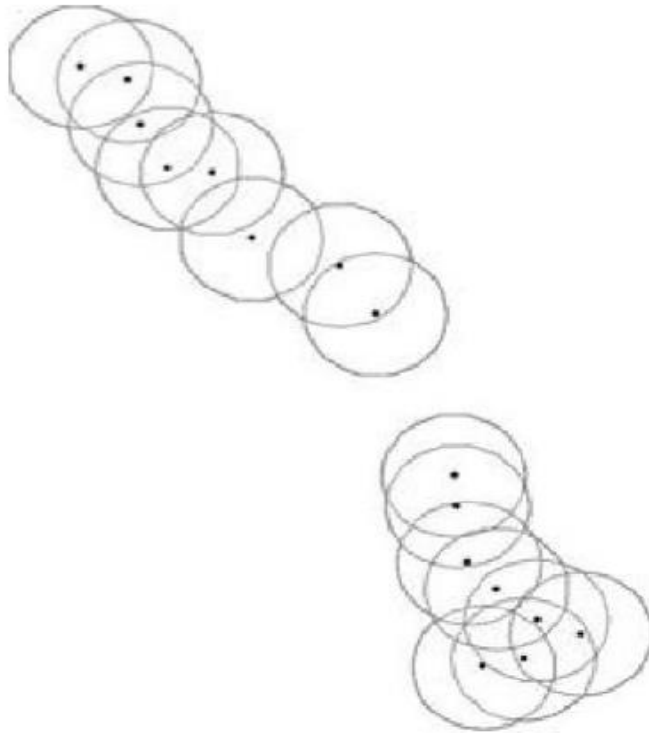
Η μέση πυκνότητα κεραυνών στο έδαφος,  $N_g$ , εξαρτάται από δύο παράγοντες:

1. Αποτελεσματικότητα αντίχτυσης κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος.
2. Μέγεθος πλέγματος, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας. Έχει διαπιστωθεί ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλέγματος τόσο αυξάνεται και η εκατοστιαία μεταβολή της πυκνότητας αστραπής. Πιο αναλυτικά, για ένα πλέγμα αναφοράς  $5km \times 5km$ , η μέση εκατοστιαία μεταβολή είναι 10%, 23% και 30% καθώς το μέγεθος πλέγματος αυξήθηκε στα  $10km \times 10km$ ,  $20km \times 20km$ ,  $30km \times 30km$  αντίστοιχα. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι οποιαδήποτε μεθοδολογία πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη διακύμανση των διαφορετικών πλέγματος.

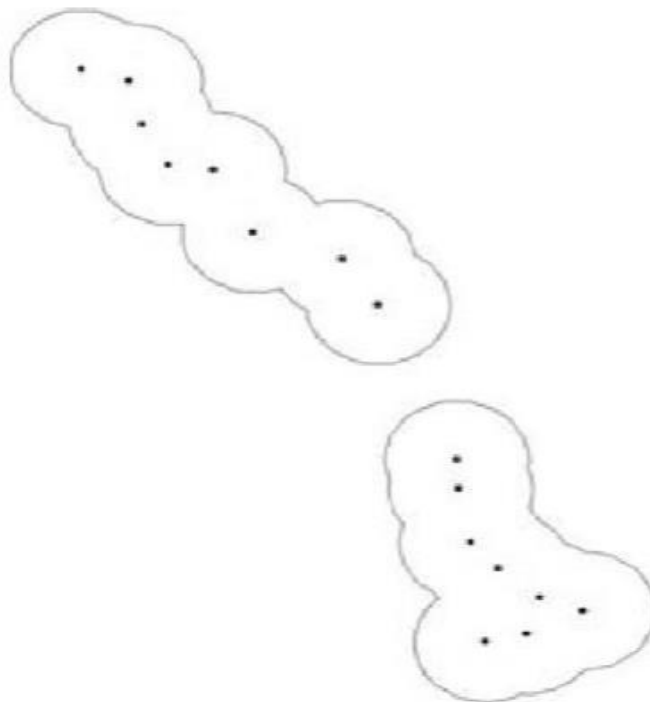
Το πρότυπο IEC 61400-24 [59] ορίζει την ισοδύναμη περιοχή συλλογής,  $A_c$ , ως μία περιφέρεια με ακτίνα τριπλάσια από το μέγεθος της Α/Γ. Όσον αφορά μία Α/Γ, η περιοχή συλλογής ορίζεται ως ένας κύκλος με περιφέρεια τρεις φορές το ύψος της. Εντούτοις, σε αιολικά πάρκα, που αποτελούνται από πολλαπλές Α/Γ, αλληλοεπικαλύπτονται η μία με την άλλη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το πρότυπο [59] περιγράφει ότι η περιοχή συλλογής πρέπει να προκύπτει από τις συνολικές διασταυρώσεις με την αναλογία ύψους ακτίνας να είναι 1:3, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.10).

Τα καιρικά φαινόμενα και οι περιβαλλοντικές συνθήκες εμφανίζουν ιδιαίτερη ποικιλία, συνεπώς και δυσκολίες όσον αφορά την κατανόηση ή την εκτίμηση τους. Για αυτό το λόγο και με στόχο να διευκολυνθεί η μελέτη και ο προσδιορισμός του, ο περιβαλλοντικός παράγοντας χωρίζεται σε τρεις υποπαράγοντες.

Οι μαύρες τελείες αντιστοιχούν σε Α/Γ.



**Σχήμα 5.10:** Περιοχή Συλλογής Αιολικού Πάρκου συνυπολογίζοντας την αλληλεπικάλυψη.



**Σχήμα 5.11:** Περιοχή Συλλογής Αιολικού Πάρκου μη συνυπολογίζοντας την Αλληλεπικάλυψη.

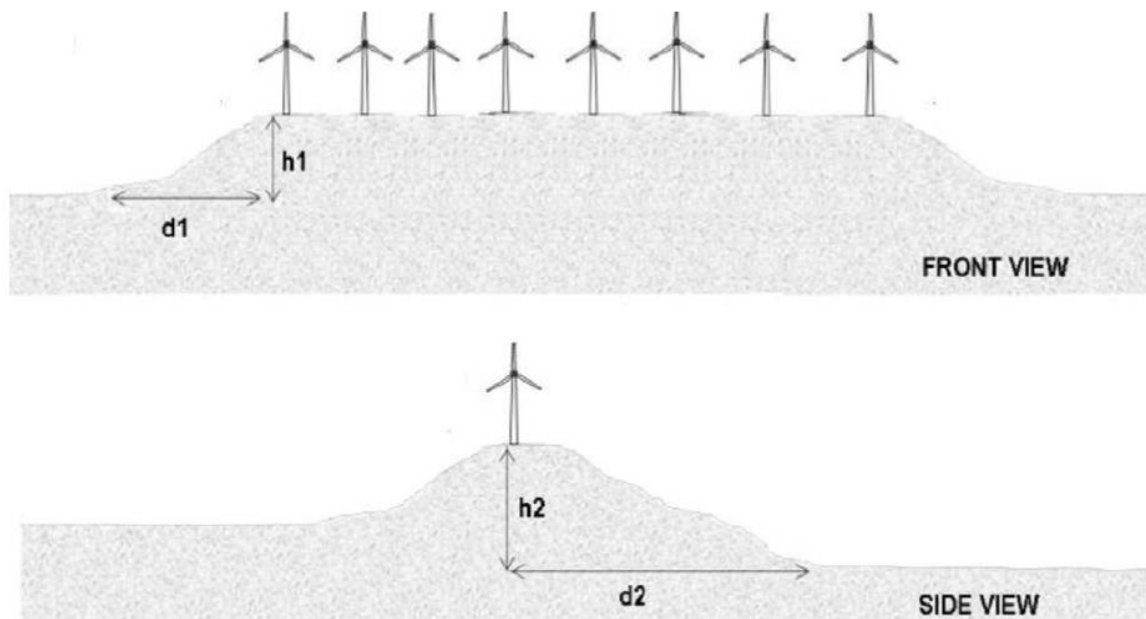
Ο περιβαλλοντικός παράγοντας:

$C_{dc}$  : αναφέρεται στην πολυπλοκότητα εδάφους και αφορά το σχήμα και το ύψος της θέσης, όπου ανεγέρθηκε το αιολικό πάρκο. Ο βαθμός πολυπλοκότητας του βουνού πρέπει να ποσοτικοποιηθεί, μιας και το σχήμα του βουνού επηρεάζει σημαντικά τη διαμόρφωση των τοπικών ηλεκτρικών πεδίων. Για την ποσοτικοποίησή του υπολογίζεται η κλίση του εδάφους και χρησιμοποιούνται βιβλιογραφικές τιμές. Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.11) απεικονίζεται ένα αιολικό πάρκο, που αποτελείται από 8 ανεμογεννήτριες και όπως φαίνεται οι διαφορετικές οπτικές γωνίες, που μπορεί κάποιος να το παρατηρήσει, μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικές κλίσεις εδάφους  $h_1/d_1$  και  $h_2/d_2$ .

$C_{wl}$  : αναφέρεται στους κεραυνούς χειμερινής περιόδου και ενδεχομένως να έχει αντίκτυπο στο τελικό κεραυνικό πλήγμα, που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία του αιολικού πάρκου.

$C_{hasl}$  : αναφέρεται στο ύψος εδάφους από την επιφάνεια της θάλασσας και επηρεάζει την τοπική δραστηριότητα του ανέμου σε ένα αιολικό πάρκο.

Καθίσταται έτσι σαφές ότι δεν υπάρχει ιδανική τοποθεσία για μία αιολική εγκατάσταση, αφού ποικίλοι παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά τόσο την τελική απόδοση όσο και την αύξηση του κινδύνου.



**Σχήμα 5.12:** Πολυπλοκότητα Εδάφους από Διαφορετικές Οπτικές Γωνίες για το Ίδιο Αιολικό Πάρκο

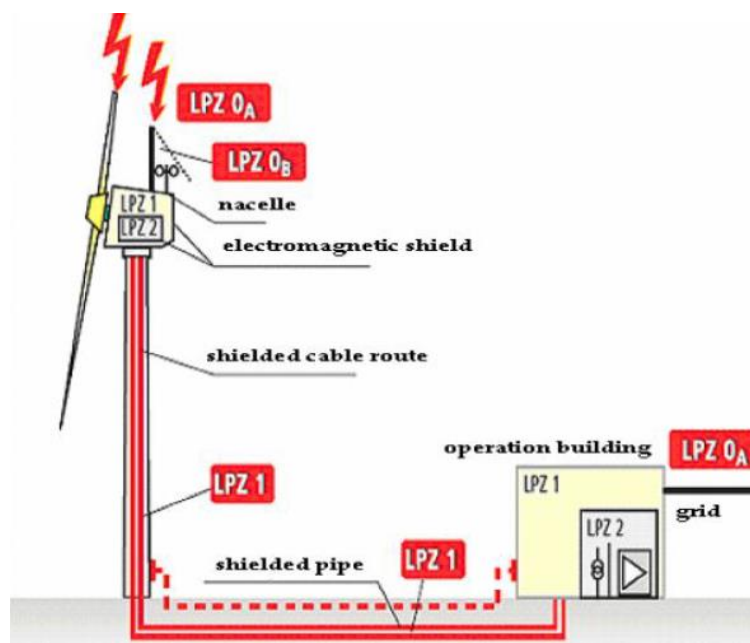
## 5.6 Αντικεραυνική Προστασία Ανεμογεννητριών

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1412, ένα Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) για την ελληνική επικράτεια αποτελείται από:

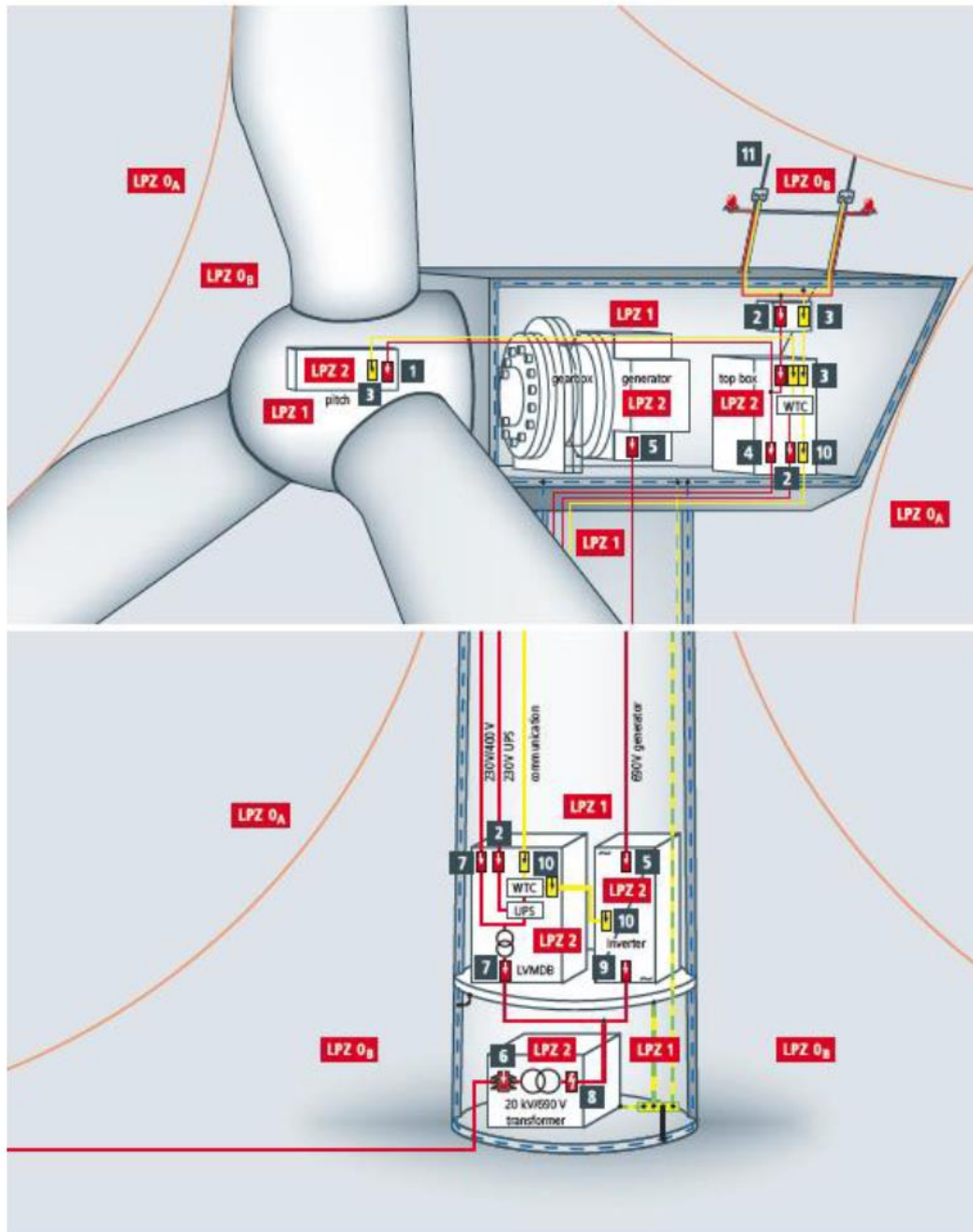
- Το εσωτερικό ΣΑΠ, που αποτελείται από το ισοδύναμο δυναμικό και την προστασία υπέρτασης, που σχετίζονται ιδίως με τα μέτρα προστασίας των ηλεκτρονικών και των συστημάτων ελέγχου της ανεμογεννήτριας.
- Το εξωτερικό ΣΑΠ, που αποτελείται από το σύστημα γείωσης, το συλλεκτήριο σύστημα και τους αγωγούς καθόδου.

Εντούτοις, πριν την εφαρμογή των παραπάνω, χρήσιμο είναι να σχεδιαστούν οι ζώνες αντικεραυνικής προστασίας των Α/Γ. Οι ζώνες αυτές απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.12) και είναι επί το πλείστον τρεις:

1. Η πρώτη ζώνη προστασίας (LPZ 0) αναφέρεται στην προστασία από το κεραυνικό πλήγμα στο ανεμόπτερο και τα πτερύγια.
2. Η δεύτερη ζώνη προστασίας (LPZ 1) αναφέρεται στο εσωτερικό τμήμα του ανεμοστροβίλου.
3. Η τρίτη ζώνη προστασίας (LPZ 2) αναφέρεται στην προστασία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού με χρήση ηλεκτρονικής ασπίδας [59]



Σχήμα 5.13: Ζώνες Αντικεραυνικής Προστασίας στο Εξωτερικό της Α/Γ [82]



**Σχήμα 5.14:** Ζώνες Αντικεραυνικής Προστασίας στο Εσωτερικό της Α/Γ [83]

Ο ορισμός των ζωνών αντικεραυνικής προστασίας γίνεται σε συνάρτηση του μεγέθους του κεραυνικού πλήγματος, της αρχιτεκτονικής της κατασκευής του ανεμοστροβίλου, καθώς επίσης και του αν είναι πιθανή μία άμεση πτώση κεραυνού. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5.1) αναφέρεται ο τρόπος καθορισμού των ζωνών:

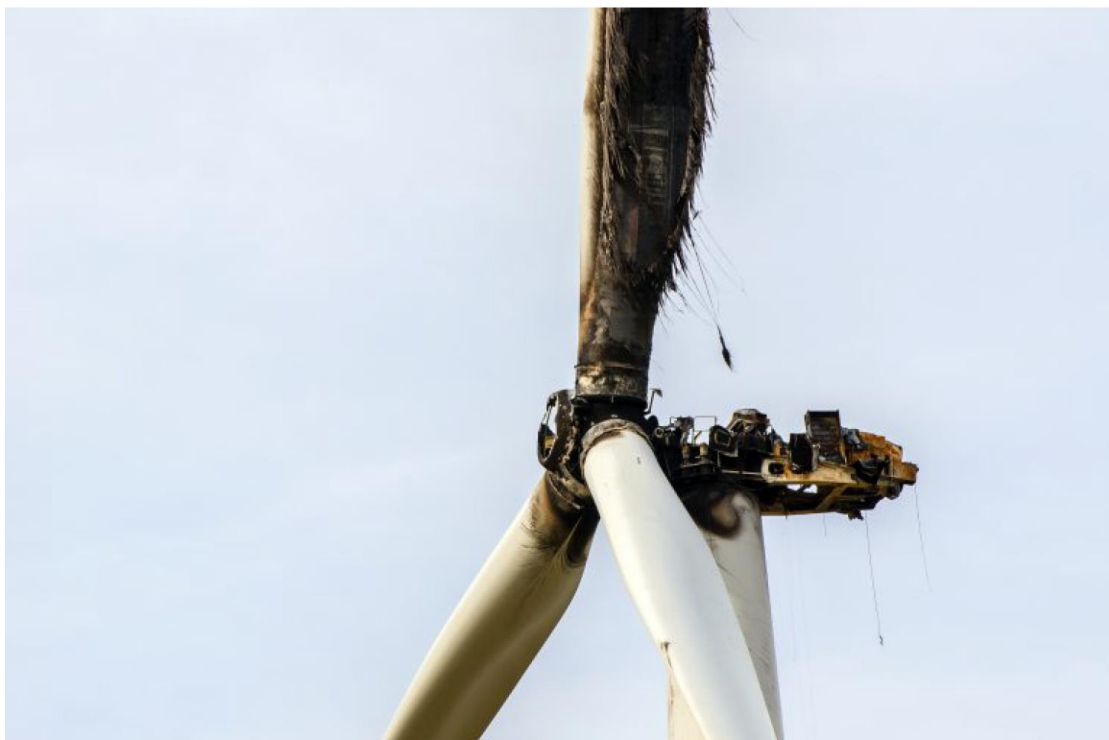


<b>Ζώνη Προστασίας</b>	<b>Τρόπος Καθορισμού</b>
<i>LPZ 0<sub>A</sub></i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Πλήρες ρεύμα κεραυνού</li> <li>○ Ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο</li> <li>○ Στοιχεία εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα</li> </ul>
<i>LPZ 0<sub>B</sub></i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Πλήρες ρεύμα κεραυνού</li> <li>○ Ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο</li> <li>○ Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα</li> </ul>
<i>LPZ 1</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Μειωμένο ρεύμα κεραυνού</li> <li>○ Εξασθενημένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο</li> <li>○ Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα</li> </ul>
<i>LPZ 2</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Περαιτέρω μείωση ρεύματος κεραυνού</li> <li>○ Εξασθένηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου</li> <li>○ Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα</li> </ul>

**Πίνακας 5.1 :** Προσδιορισμός Ζωνών Προστασίας



**Σχήμα 5.15:** Κεραυνικό Πλήγμα σε Ανεμογεννήτρια [84]



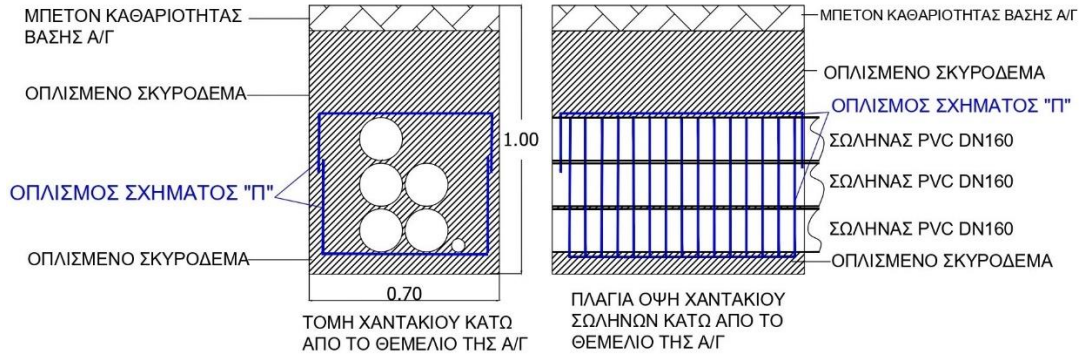
**Σχήμα 5.16:** Καταστροφή Πτερυγίων Ανεμογεννήτριας από Κεραυνικό Πλήγμα [84]



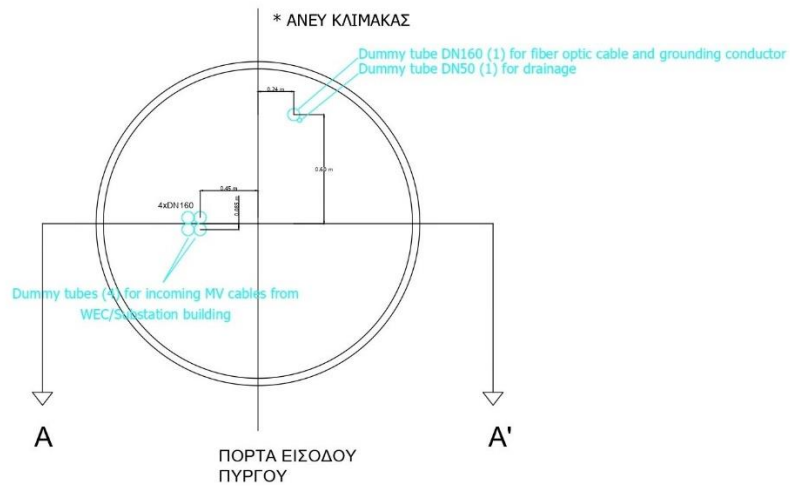
**Σχήμα 5.17:** Διάλυση των Πτερυγίων Ανεμογεννήτριας [84]

# 5.7 Απεικόνιση Συστημάτων Γείωσης Ανεμογεννητριών

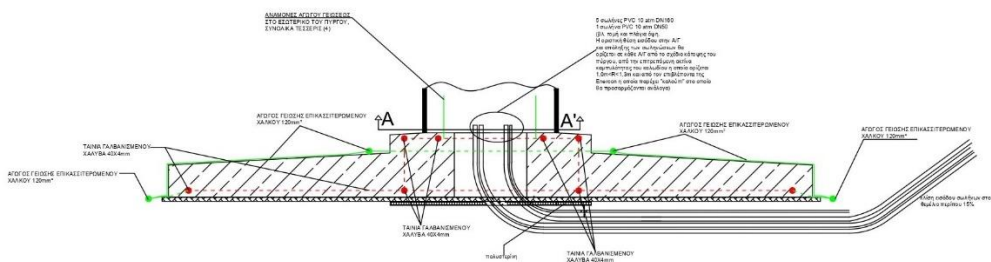
## ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΟ ΘΕΜΕΛΙΟ ΤΗΣ Α/Γ



## ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ



## ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΟΜΗ ΘΕΜΕΛΙΟΥ



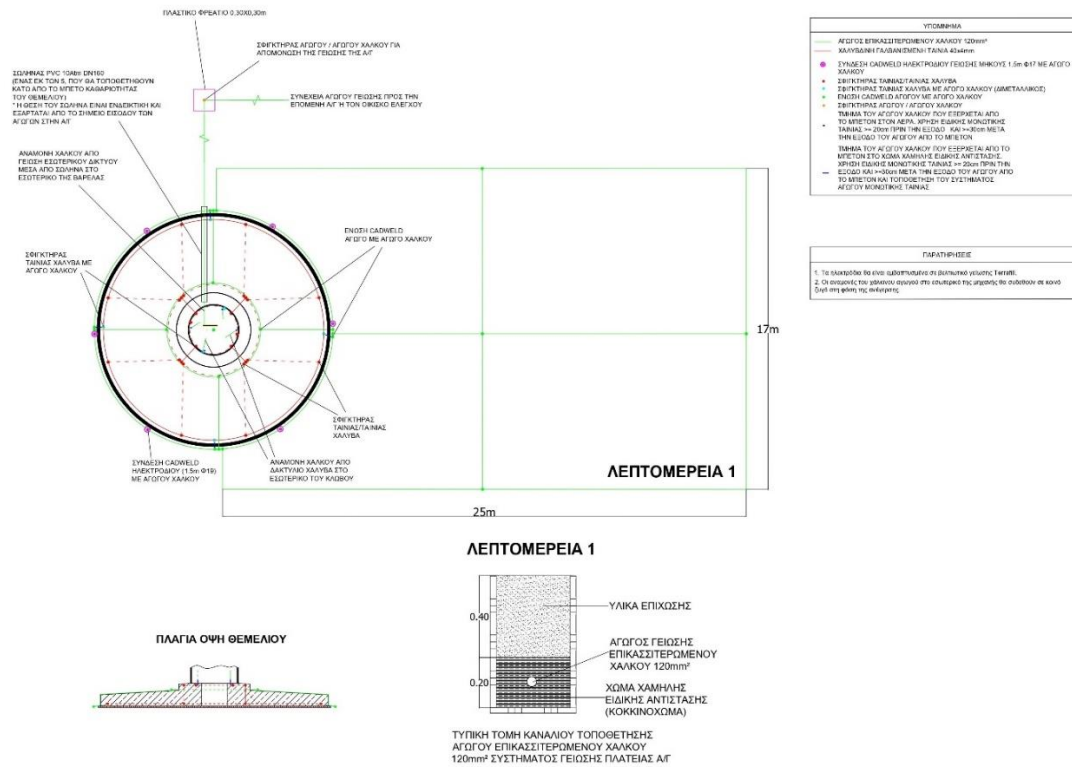
**Σχήμα 5.18:** Τυπικό Σύστημα Γείωσης Α/Γ – Σωληνώσεις Καλωδίων Α/Γ



**Σχήμα 5.19:** Σωληνώσεις Καλωδίων Α/Γ από Επιτόπια Επίσκεψη σε υπό Κατασκευή Αιολικό Πάρκο



**Σχήμα 5.20:** Εγκιβωτισμός Σωληνώσεων Καλωδίων



**Σχήμα 5.21:** Θεμελίωση Α/Γ με Πλέγμα & Σχέδιο Γείωσης Περιμετρικά και Άνω του Θεμελίου



**Σχήμα 5.22:** Εσκαφή Τάφρου Πλέγματος Γείωσης Περιμετρικά της Θεμελίωσης



**Σχήμα 5.23:** Συγκόληση Γείωσης Άνω του Θεμελίου με Περιμετρική Γείωση Πλέγματος



**Σχήμα 5.24:** Γείωση Άνω του Θεμελίου με Εμπλουτισμό Φυτικού Χώματος για την Προστασία της



# Κεφάλαιο 6

## Μη Γραμμική Πολλαπλή Παλινδρόμηση

### 6.1 Εισαγωγή

Η μη γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση αποτελεί μία στατιστική διαδικασία με στόχο την εκτίμηση σχέσης μεταξύ μεταβλητών. Αποτελείται από ποικίλες τεχνικές για την ανάλυση και μοντελοποίηση πολλών μεταβλητών, αναδεικνύοντάς την κατάλληλη για την εύρεση μίας σχέσης, που συνδέει μία εξαρτημένη με μία ή παραπάνω ανεξάρτητες μεταβλητές. Αποτελεί μία μαθηματική διεργασία, που βοηθά στην αντίληψη της διαδικασίας, με την οποία η τυπική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής μεταβάλλεται, όταν αλλάζει μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές, ενώ οι υπόλοιπες μένουν σταθερές. Η εύρεση μίας συνάρτησης των ανεξαρτήτων μεταβλητών αποτελεί και τον τελικό στόχο, διαδικασία, η οποία ονομάζεται συνάρτηση παλινδρόμησης. Στην ανάλυση παλινδρόμησης ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει επιπλέον ο χαρακτηρισμός της εξαρτημένης μεταβλητής γύρω από τη συνάρτηση παλινδρόμησης, που μπορεί να περιγραφεί από μία κατανομή πιθανότητας [85].

Η ανάλυση παλινδρόμησης συναντιέται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις προβλέψεων, όπου συχνά η χρήση της επικαλύπτεται με τον τομέα της Μηχανικής Μάθησης (*Machine Learning*), καθώς και σε περιπτώσεις, που αναζητούνται σχέσεις εξάρτησης για να γίνουν κατανοητοί οι μέθοδοι με τις οποίες οι ανεξάρτητες μεταβλητές συνδέονται με την εξαρτημένη μεταβλητή. Κάποιες φορές, η ανάλυση παλινδρόμησης ενδέχεται να υπονοήσει σχέση αίτιου-αιτιατού μεταξύ των εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών. Ωστόσο, αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε λάνθασμένα συμπεράσματα, μιας και η συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών δεν συνεπάγεται απαραίτητα, ότι η μία καταλήγει στην άλλη [85].

Ποικίλες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την ανάλυση παλινδρόμησης, με τη γραμμική παλινδρόμηση και την κοινή μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων να είναι οι επικρατέστερες. Και οι δύο μέθοδοι είναι παραμετρικές, με αποτέλεσμα η συνάρτηση παλινδρόμησης να ορίζεται, χρησιμοποιώντας ένα πεπερασμένο σύνολο άγνωστων παραμέτρων, εκτίμηση των οποίων γίνεται με βάση τα δεδομένα. Σε τεχνικές, που επιτρέπουν στη συνάρτηση παλινδρόμησης να βρίσκεται σε ένα καθορισμένο σύνολο συναρτήσεων με ενδεχομένως μη πεπερασμένη διάσταση, αναφέρεται η μη παραμετρική ανάλυση παλινδρόμησης [85]. Στην πράξη, η απόδοση των μεθόδων ανάλυσης παλινδρόμησης εξαρτάται από τη διαδικασία συλλογής των μετρήσεων ή δεδομένων και από το πως σχετίζεται με την παλινδρομική διαδικασία, που χρησιμοποιείται.

Η ανάλυση παλινδρόμησης εξαρτάται αρκετές φορές, ως ένα βαθμό τουλάχιστον από παραδοχές αναφορικά με τη διεργασία, αφού η πραγματική μορφή της διεργασίας, που παράγει συνήθως τα δεδομένα δεν είναι γνωστή. Βέβαια, οι υποθέσεις αυτές κρίνονται βάσιμες αν είναι διαθέσιμος ένας ικανοποιητικός όγκος δεδομένων. Ακόμα και όταν οι παραδοχές μερικώς παραβιάζονται, τα παλινδρομικά μοντέλα προβλέψεων είναι επί το πλείστον χρήσιμα, αν και ενδέχεται να μην λειτουργούν με βέλτιστο τρόπο. Ωστόσο, σε διάφορες εφαρμογές, οι παλινδρομικές μέθοδοι ενδέχεται να οδηγήσουν σε παραπλανητικά αποτελέσματα, ιδίως με μικρές επιδράσεις αιτιότητας, που βασίζονται στις μετρήσεις [85].

## 6.2 Μη Γραμμικά Μοντέλα

Τα γραμμικά μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης παρουσιάζουν την ακόλουθη μορφή:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \dots + \beta_{p-1} Z_{p-1} + \varepsilon \quad (6.1)$$

Όπου

**Zi :** Αναπαράσταση Οποιαδήποτε Συναρτήσεων Βασικών Προβλεπουσών Μεταβλητών Xi

**Xi :** Βασικές Προβλέπουσες Μεταβλητές

Παρά το γεγονός ότι η εξίσωση (6.1) έχει τη δυνατότητα να αναπαραστήσει ένα μεγάλο εύρος σχέσεων, υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις, στις οποίες ένα μοντέλο αυτής της μορφής δεν είναι κατάλληλο. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται, όταν υπάρχουν βέβαιες πληροφορίες για τη μορφή της σχέσης, που συνδέει την εξαρτημένη μεταβλητή με τις ανεξάρτητες. Τέτοιες πληροφορίες ενδέχεται να είναι η αντιπροσώπευση του μοντέλου ή η άμεση γνώση της μορφής του φυσικού μοντέλου από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, που πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο. Οι πληροφορίες συχνά οδηγούν σε διαφορετικά εναλλακτικά μοντέλα (σε αυτήν την περίπτωση ενδιαφέρουν επί το πλείστον οι μέθοδοι διάκρισης μεταξύ τους). Όταν οδηγούμαστε σε χρήση μοντέλου, που έχει μη γραμμική μορφή, προτιμούμε τις περισσότερες φορές να προσαρμόσουμε ένα τέτοιο μοντέλο, αν αυτό είναι εφικτό, αντί να οδηγηθούμε στην προσαρμογή ενός εναλλακτικού, λιγότερο ρεαλιστικού, γραμμικού μοντέλου.

Μη γραμμικό θα καλείται κάθε μοντέλο, που δεν έχει τη μορφή της εξίσωσης (6.1). Θα είναι δηλαδή μη γραμμικό προς τις παραμέτρους. Δύο τέτοια παραδείγματα είναι τα ακόλουθα:

$$Y = e^{\theta_1 + \theta_2 t + \varepsilon} \quad (6.2)$$

$$Y = \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_2} [e^{-\theta_2 t} - e^{-\theta_1 t}] + \varepsilon \quad (6.3)$$

Οι παράμετροι, που θα εκτιμηθούν στα παραδείγματα αυτά, συμβολίζονται με  $\theta$ , ενώ οι προβλέπουσες (ανεξάρτητες) μεταβλητές συμβολίζονται με  $t$ . Το  $\varepsilon$  συμβολίζει το τυχαίο σφάλμα με:  $E(\varepsilon) = 0$ ,  $V(\varepsilon) = \sigma^2$ .

Εφικτό είναι, επίσης, να γράψουμε τα μοντέλα αυτά χωρίς το  $\varepsilon$  και να αντικαταστήσουμε το  $Y$  με το  $\eta$ . Τότε τα μοντέλα θα έδειχναν, ότι οι πραγματικές τιμές της απόκρισης ( $\eta$ ), εξαρτώνται από το  $t$ .

Τα μοντέλα (6.2) και (6.3) χαρακτηρίζονται μη γραμμικά υπό την έννοια, ότι περιλαμβάνουν τα  $\theta_1$  και  $\theta_2$  με μη γραμμικό τρόπο, αλλά είναι διαφορετικά μεταξύ τους ως προς το χαρακτήρα. Λογαριθμίζοντας με βάση τον αριθμό *Euler*, η εξίσωση (6.2) μπορεί να μετασχηματιστεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\ln Y = \theta_1 + \theta_2 t + \varepsilon \quad (6.4)$$

Η μορφή (6.4) είναι γραμμική ως προς τις παραμέτρους. Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι το μοντέλο που δίνεται στην εξίσωση (6.2) είναι εγγενώς γραμμικό, μιας και μπορεί να μετασχηματισθεί σε γραμμική μορφή. Ωστόσο, η εξίσωση (6.3) είναι αδύνατο να μετατραπεί σε μορφή, που είναι γραμμική στις παραμέτρους. Ένα τέτοιο μοντέλο καλείται εγγενώς μη γραμμικό. Παρά το γεγονός, ότι ένα μοντέλο αυτής της μορφής μπορεί να είναι εύκολο να μετασχηματισθεί, ώστε να μπορεί να γίνει ευκολότερα η προσαρμογή, θα παραμείνει ένα μη γραμμικό μοντέλο οποιονδήποτε μετασχηματισμό και αν εφαρμόσουμε. Από εδώ και πέρα όλα τα μοντέλα θα θεωρούνται εγγενώς μη γραμμικά [86].

## 6.3 Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων για Μη Γραμμικά Μοντέλα

Η ενότητα αυτή ασχολείται με τη μη γραμμική εκτίμηση. Η μη γραμμική εκτίμηση είναι η προσαρμογή μη γραμμικών μοντέλων στα δεδομένα από μετρήσεις, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στις περιπτώσεις αυτές, οι κανονικές εξισώσεις είναι μη γραμμικές και έτσι παρουσιάζουν δυσκολία στην επίλυσή τους. Πραγματοποιείται επί το πλείστον ευθεία ελαχιστοποίηση της συνάρτησης του αθροίσματος των τετραγώνων. Αυτό συνήθως απαιτεί τη χρήση κατάλληλων λογισμικών και απαιτητικούς επαναληπτικούς υπολογισμούς.

Έστω ένα μη γραμμικό μοντέλο της ακόλουθης μορφής:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) + \varepsilon \quad (6.5)$$

Όπου

$\xi_k$ :	Προβλέπουσες (Ανεξάρτητες) Μεταβλητές
$\theta_k$ :	Παράμετροι
$u_k$	Παρατηρήσεις

Αν γράψουμε

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

μπορούμε να πούμε τότε:

$$Y = f(\xi, \theta) + \varepsilon \quad (6.6)$$

ή

$$E(Y) = f(\xi, \theta) \quad (6.6)$$

αν υποθέσουμε ότι  $E(\varepsilon) = 0$

Παράλληλα, θα υποθέσουμε ότι τα σφάλματα είναι ασυσχέτιστα, ότι  $V(\varepsilon) = \sigma^2$ , και τις περισσότερες φορές, ότι  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ , ώστε τα σφάλματα να είναι ανεξάρτητα.

Όταν υπάρχουν  $n$  μετρήσεις της μορφής:

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

για  $u = 1, 2, \dots, n$  έχουμε τη δυνατότητα να γράψουμε το μοντέλο στη μορφή:

$$Y_u = f(\xi_{1u}, \xi_{2u}, \dots, \xi_{ku}; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) + \varepsilon_u \quad (6.7)$$

όπου  $\varepsilon_u$  είναι το  $u$ -οστό σφάλμα. Μπορεί να συντομευθεί ακολούθως ως:

$$Y_u = f(\xi_u, \theta) + \varepsilon_u \quad (6.8)$$

όπου  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)'$ .

Η παραδοχή της ανεξαρτησίας και της κανονικότητας των σφαλμάτων θα μπορούσε να γραφεί ως  $\varepsilon \sim N(0, I\sigma^2)$ , όπου  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)'$  και  $\theta$  είναι ένα διάνυσμα από μηδενικά και  $I$  είναι ο μοναδιαίος πίνακας, με κατάλληλες διαστάσεις.

Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων για μη γραμμικό μοντέλο ορίζεται ακολούθως:

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^n \{Y_u - f(\xi_u, \theta)\}^2 \quad (6.9)$$

Το άθροισμα των τετραγώνων είναι μόνο συνάρτηση του  $\theta$ , αφού τα  $Y_u$  και  $\xi_u$  είναι συγκεκριμένες μετρήσεις. Η τιμή του  $\theta$  για την οποία ελαχιστοποιείται η  $S(\theta)$ , η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων του  $\theta$  δηλαδή, θα συμβολίζεται με  $\hat{\theta}$ .

Ενδέχεται να αποδειχθεί ότι αν  $\varepsilon \sim N(0, I\sigma^2)$ , τότε η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων του  $\theta$  είναι επίσης και η εκτιμήτρια μέγιστης πιθανοφάνειας του  $\theta$ .

Για να βρεθεί η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων  $\hat{\theta}$  πρέπει να διαφορίσουμε την (6.9) ως προς  $\theta$  και οι κανονικές εξισώσεις θα έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\sum_{i=1}^n \{Y_u - f(\xi_u, \hat{\theta})\} \left[ \frac{\partial f(\xi_u, \theta)}{\partial \theta_i} \right]_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \quad (6.10)$$

για  $i = 1, 2, \dots, p$ . Η ποσότητα που συμβολίζεται με τις αγκύλες είναι η παράγωγος του  $f(\xi_u, \theta)$  ως προς  $\theta_i$  με όλα τα  $\theta$  να αντικαθίστανται από τα αντίστοιχα  $\hat{\theta}$ . Αν η συνάρτηση  $f(\xi_u, \theta)$  ήταν γραμμική, η ποσότητα αυτή θα ήταν συνάρτηση μόνο του  $\xi_u$  και δεν θα περιείχε καθόλου ποσότητες  $\hat{\theta}$ . Για παράδειγμα αν

$$f(\xi_u, \theta) = \theta_1 \xi_{1u} + \dots + \theta_p \xi_{pu}$$

τότε  $\frac{\partial f}{\partial \theta_i} = \xi_u$ , για  $i = 1, 2, \dots, p$ , που είναι ανεξάρτητο από το  $\theta$ . Τότε οι κανονικές εξισώσεις έχουν τη μορφή γραμμικών εξισώσεων ως προς  $\theta_1, \dots, \theta_p$ . Όταν το μοντέλο είναι, όμως, μη γραμμικό ως προς τα  $\theta$ , θα συμβαίνει το ίδιο και με τις κανονικές εξισώσεις.

Καθίστα, λοιπόν, σαφές ότι ακόμα και η εκτίμηση μίας παραμέτρου, ακόμα και σε ένα σχετικά απλό μη γραμμικό μονοπαραμετρικό μοντέλο, δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση. Αν μάλιστα το μοντέλο γίνει περισσότερο πολύπλοκο και υπεισέρχονται περισσότερες παράμετροι, τότε η επίλυση των κανονικών εξισώσεων ενδέχεται να γίνει πάρα πολύ δύσκολη και θα πρέπει να εξετασθούν επαναληπτικές μέθοδοι σε όλες τις περιπτώσεις. Ακόμα χειρότερα, υπάρχει το ενδεχόμενο να υπάρχουν ποικίλες λύσεις, που αντιστοιχούν σε πολλές στατικές τιμές της συνάρτησης  $S(\hat{\theta})$ . Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά σε τεχνικές για την εκτίμηση των παραμέτρων σε μη γραμμικά συστήματα [86].

## 6.4 Εκτίμηση Παραμέτρων Μη Γραμμικού Συστήματος

Είναι πρακτικό σε κάποια μη γραμμικά συστήματα να γραφτούν οι κανονικές εξισώσεις (6.10) και να αναπτυχθεί μία επαναληπτική τεχνική για την επίλυσή τους. Η μορφή των εξισώσεων και η επαναληπτική τεχνική, που θα χρησιμοποιηθεί, θα κρίνουν το αν θα δουλέψει ικανοποιητικά η τεχνική αυτή. Πέρα από αυτή την προσέγγιση υπάρχουν και άλλες μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται διαδεδομένα, προκειμένου να εκτιμηθούν οι παράμετροι με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στη μελέτη θα ασχοληθούμε με τη μέθοδο γραμμικοποίησης, τη μέθοδο πιο ταχείας καθόδου και τη μέθοδο του συμβιβασμού του *Marquardt* [86].

### 6.4.1 Μέθοδος Γραμμικοποίησης

Η πρώτη μέθοδος, με την οποία θα ασχοληθούμε στη μελέτη μας, είναι αυτή της γραμμικοποίησης. Πρόκειται για μία τεχνική με σειρές Taylor, που χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων σε διαδοχικά στάδια. Ας υποθέσουμε, ότι το μοντέλο έχει τη μορφή της εξίσωσης (6.8). Αν  $\theta_{1o}, \theta_{2o}, \dots, \theta_{po}$  είναι οι αρχικές τιμές για τις παραμέτρους  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ , τότε οι πρώτες εκτιμήσεις ενδέχεται να είναι έξυπνες «μαντεψιές» ή πρώιμες εκτιμήσεις, οι οποίες βασίζονται σε όποια πληροφορία είναι διαθέσιμη. Οι αρχικές αυτές τιμές, κατά πάσα πιθανότητα, θα βελτιωθούν μετά από διαδοχικές επαναλήψεις, περιγραφή των οποίων θα γίνει παρακάτω.

Αν εκτελέσουμε το ανάπτυγμα Taylor της  $f(\xi_u, \theta)$  γύρω από το σημείο  $\theta_o$  με  $\theta_o = (\theta_{1o}, \theta_{2o}, \dots, \theta_{po})'$  και σταματήσουμε το ανάπτυγμα στις πρώτες παραγώγους, μπορούμε τότε προσεγγιστικά να πούμε, ότι όταν το  $\theta$  είναι κοντά με το  $\theta_o$  θα ισχύει:

$$f(\xi_u, \theta) = f(\xi_u, \theta_o) + \sum_{i=1}^p \left[ \frac{\partial f(\xi_u, \theta)}{\partial \theta_i} \right]_{\theta=\theta_o} (\theta_i - \theta_{io}) \quad (6.11)$$

Αν τώρα θέσουμε:

$$f_u^0 = f(\xi_u, \theta_o)$$

$$\beta_i^0 = \theta_i - \theta_{io} \quad (6.12)$$

$$Z_{iu}^0 = \left[ \frac{\partial f(\xi_u, \theta)}{\partial \theta_i} \right]_{\theta=\theta_o}$$

Τότε η εξίσωση (3.8) παίρνει προσεγγιστικά τη μορφή:

$$Y_u - f_u^0 = \sum_{i=1}^p \beta_i^0 Z_{iu}^0 + \varepsilon_u \quad (6.13)$$

Αυτή η μορφή έχει τη γραμμική μορφή της εξίσωσης (6.1) για την τάξη της προσέγγισης, που έχει επιλεχθεί. Τώρα, εφαρμόζοντας τη θεωρία των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων, μπορούμε να εκτιμήσουμε τις παραμέτρους  $\beta_i^0, i = 1, \dots, p$ . Αν γράψουμε:

$$\mathbf{Z}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11}^o & \mathbf{Z}_{21}^o & \cdots & \mathbf{Z}_{p1}^o \\ \mathbf{Z}_{12}^o & \mathbf{Z}_{22}^o & \cdots & \mathbf{Z}_{p2}^o \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{1u}^o & \mathbf{Z}_{2u}^o & \cdots & \mathbf{Z}_{pu}^o \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{1n}^o & \mathbf{Z}_{2n}^o & \cdots & \mathbf{Z}_{pn}^o \end{bmatrix} = \{\mathbf{Z}_{iu}^o\}, n \times p \quad (6.14)$$

$$\mathbf{b}_o = \begin{bmatrix} b_1^o \\ b_2^o \\ \vdots \\ b_p^o \end{bmatrix} \quad \& \quad \mathbf{y}_o = \begin{bmatrix} Y_1 - f_1^o \\ Y_2 - f_2^o \\ \vdots \\ Y_n - f_n^o \end{bmatrix} = \mathbf{Y} - \mathbf{f}^o \quad (6.15)$$

Τότε η εκτιμήτρια του  $\beta_o = (\beta_1^o, \beta_2^o, \dots, \beta_p^o)'$  δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{b}_o = (\mathbf{Z}_o' \mathbf{Z}_o)^{-1} \mathbf{Z}_o' (\mathbf{Y} - \mathbf{f}^o) \quad (6.16)$$

Συνεπώς το διάνυσμα  $\mathbf{b}_o$  θα ελαχιστοποιήσει το άθροισμα των τετραγώνων:

$$SS(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^n \left\{ Y_u - f(\xi_u, \boldsymbol{\theta}_o) - \sum_{i=1}^p \beta_i^o \mathbf{Z}_{iu}^o \right\}^2 \quad (6.17)$$

Κατά αντιστοιχεία με τα  $\beta_i^o$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ , όπου  $\beta_i^o = \theta_i - \theta_{i_0}$ . Αν γράψουμε  $b_{i_0} = \theta_{i_1} - \theta_{i_0}$  τότε τα  $\theta_{i_1}$  με  $i = 1, \dots, p$  μπορούν να θεωρηθούν ως οι αναθεωρημένες εκτιμήτριες του  $\theta$ .

Χρήσιμο είναι σε αυτό το σημείο να τονισθεί η διαφορά ανάμεσα στο άθροισμα των τετραγώνων  $S(\boldsymbol{\theta})$  της εξίσωσης (6.9), όπου χρησιμοποιείται το κατάλληλο μη γραμμικό μοντέλο και στο άθροισμα των τετραγώνων  $SS(\boldsymbol{\theta})$  της (6.17), όπου χρησιμοποιείται η προσεγγιστική γραμμική έκφραση του μοντέλου.

Επιτρέπεται τώρα να τοποθετήσουμε τις τιμές  $\theta_{i_1}$ , τις βελτιωμένες εκτιμήτριες, στους ίδιους ρόλους, που έπαιζαν προηγουμένως οι τιμές  $\theta_{i_0}$ , και να ακολουθήσουμε την ίδια πάλι διαδικασία, που περιγράφεται στις εξισώσεις (6.11) έως (6.17), κάνοντας όμως αντικατάσταση όλων τους μηδενικούς δείκτες με άσσους. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ένα άλλο σύνολο αναθεωρημένων εκτιμητριών  $\theta_{i_2}$  κ.ο.κ. Επεκτείνοντας τον προηγούμενο συμβολισμό με εμφανή τρόπο, γράφουμε σε διανυσματική μορφή:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_{j+1} &= \boldsymbol{\theta}_j + \mathbf{b}_j \\ \boldsymbol{\theta}_{j+1} &= \boldsymbol{\theta}_j + (\mathbf{Z}_j' \mathbf{Z}_j)^{-1} \mathbf{Z}_j' (\mathbf{Y} - \mathbf{f}^j) \end{aligned} \quad (6.18)$$

Όπου

$$Z_j = \{Z_{iu}^j\}$$

$$f^j = (f_1^j, f_2^j, \dots, f_n^j)'$$

$$\theta^j = (\theta_1^j, \theta_2^j, \dots, \theta_n^j)'$$

Η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται έως ότου η ακολουθία να συγκλίνει, δηλαδή μέχρι  $j$ ,  $(j+1)$  επαναλήψεις τέτοιες ώστε:

$$|\{\theta_{i(j+1)} - \theta_{ij}\}/\theta_{ij}| < \delta, i = 1, 2, \dots, p$$

Όπου  $\delta$  μία προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού π.χ. 0,000001. Η επαναληπτική διαδικασία,  $S(\theta_j)$  μπορεί να εκτιμηθεί στο σημείο αυτό ως προς το αν επιτεύχθηκε μείωση στην τιμή της.

## Μειονεκτήματα Γραμμικοποίησης σε Κάποια Προβλήματα

1. Ενδέχεται να συγκλίνει πολύ αργά. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να χρειασθεί ένας πολύ υψηλός αριθμός επαναλήψεων, μολονότι το άθροισμα των τετραγώνων  $S(\theta_j)$  μειώνεται όσο το  $j$  αυξάνεται.
2. Ενδέχεται να ταλαντώνεται ευρέως, αλλάζοντας συνεχώς κατευθύνσεις, και πιθανώς να αυξάνει ή να μειώνει το άθροισμα των τετραγώνων διαδοχικά. Ωστόσο, ενδέχεται τελικώς το άθροισμα να σταθεροποιηθεί.
3. Ενδέχεται να μην συγκλίνει καθόλου, ακόμα και να αποκλίνει, συνεπώς το άθροισμα των τετραγώνων να αυξάνει σε κάθε επανάληψη δίχως φραγμό [86].

### 6.4.2 Μέθοδος πιο Ταχείας Καθόδου

Μία άλλη μέθοδος είναι η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου, η οποία επικεντρώνεται στη συνάρτηση αθροίσματος των τετραγώνων  $S(\theta)$ , όπως ορίζεται από την εξίσωση (6.9) και στη χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας για την εύρεση του ελαχίστου της. Η κυρίαρχη ιδέα είναι η μετακίνηση από ένα αρχικό σημείο  $\theta_0$ , κατά μήκος του διανύσματος με στοιχεία

$$-\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta_1}, -\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta_2}, \dots, -\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta_p}$$

του οποίου οι τιμές μεταβάλλονται συνεχώς, για όσο ακολουθείται το μονοπάτι. Ένας πρακτικός τρόπος να επιτευχθεί αυτό, χωρίς την εκτίμηση παραγώγων συναρτήσεων, είναι να εκτιμήσουμε την κλίση του διανύσματος σε καθορισμένα σημεία της επιφάνειας  $S(\theta)$ , τροποποιώντας επίπεδες προσεγγιστικές συναρτήσεις. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ερευνητικές εργασίες για την εύρεση στατικών τιμών στις επιφάνειες απόκρισης.



Η διαδικασία έχει ως ακολούθως. Αρχίζοντας από μία συγκεκριμένη περιοχή του  $\theta$ -χώρου, πραγματοποιούνται διάφορα τρεξίματα επιλέγοντας, για παράδειγμα,  $n$  συνδυασμούς επιπέδων των  $\theta_1, \dots, \theta_p$  και εκτιμώντας το  $S(\theta)$  σε αυτούς τους συνδυασμούς των επιπέδων. Συχνά τα τρεξίματα επιλέγονται σε ένα μοτίβο σχεδιασμού δύο επιπέδων. Κάνοντας χρήση των εκτιμώμενων τιμών  $S(\theta)$  ως μετρήσεις μίας εξαρτημένης μεταβλητής και το συνδυασμό των  $\theta_1, \dots, \theta_p$  ως τις μετρήσεις των αντίστοιχων μεταβλητών πρόβλεψης, τροποποιούμε το μοντέλο μέσω συνήθων ελαχίστων τετραγώνων:

$$\text{Παρατηρούμενη } S(\theta) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i(\theta_i - \bar{\theta}_i)/s_i + \varepsilon$$

Όπου

$\bar{\theta}_i$  : Μέσο των Επιπέδων  $\theta_{iu}$ ,  $u = 1, \dots, n$  των  $\theta_i$ , που χρησιμοποιήθηκαν στα Τρεξίματα

$s_i$  : Παράγοντας Διαβάθμισης που επιλέχθηκε ώστε  $\sum_{u=1}^n (\theta_{iu} - \bar{\theta}_i)^2 / s_i^2 = \text{σταθερό}$

Αυτό δείχνει, ότι πιστεύουμε, πως η πραγματική επιφάνεια, που ορίζεται από το  $S(\theta)$  ενδέχεται να προσεγγιστεί από ένα επίπεδο στην περιοχή του  $\theta$ -χώρου, στο οποίο έγιναν τα τρεξίματα. Οι εκτιμώμενοι συντελεστές  $b_1, \dots, b_p$  δείχνουν την κατεύθυνση της πιο απότομης ανόδου οπότε οι αντίστοιχες αρνητικές, δηλαδή,  $-b_1, \dots, -b_p$  δείχνουν την κατεύθυνση της πιο απότομης καθόδου. Αυτό υπονοεί ότι όσο η γραμμική προσέγγιση είναι ρεαλιστική, η μέγιστη κάθοδος της  $S(\theta)$  βρίσκεται, όσο κινούμαστε κατά μήκος της γραμμής, η οποία περιλαμβάνει σημεία τέτοια ώστε  $(\theta_i - \bar{\theta}_i)/s_i \propto -b_i$ . Αν ο συντελεστής της αναλογίας συμβολισθεί με  $\lambda > 0$ , τότε το μονοπάτι της πιο απότομης καθόδου περιέχει σημεία  $(\theta_1, \dots, \theta_p)$  τέτοια ώστε:

$$\frac{\theta_i - \bar{\theta}_i}{s_i} = -\lambda b_i$$

ή

$$\theta_i = \bar{\theta}_i - \lambda b_i s_i$$

Προσδίδοντας στο  $\lambda$  επιλεγμένες τιμές ενδέχεται να ακολουθήσει το μονοπάτι της πιο ταχείας καθόδου. Γίνεται επιλογή ενός αριθμού από τις τιμές του  $\lambda$  και το μονοπάτι ακολουθείται όσο το  $S(\theta)$  μειώνεται. Όταν αυτό δεν συμβαίνει, καταστρώνεται ένα άλλο πειραματικό σχήμα και η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου να συγκλίνει στην τιμή  $\hat{\theta}$ , που ελαχιστοποιεί το  $S(\theta)$ .

Αν και η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου μπορεί θεωρητικά να συγκλίνει, αυτό γίνεται πολύ αργά. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου είναι, πως δεν είναι αναλλοίωτη ως προς την κλίμακα. Η υποδεικνυόμενη κατεύθυνση της κίνησης μεταβάλλεται, εάν αλλάξουν οι κλίμακες  $s_i$  με την εξαίρεση όλες να αλλάζουν με τον ίδιο παράγοντα. Συνολικά, η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου προτιμάται λιγότερο από την τεχνική της γραμμικοποίησης, αλλά δουλεύει σε ικανοποιητικό βαθμό για πολλά μη γραμμικά προβλήματα.

Η μέθοδος αυτή δουλεύει καλά αν η τρέχουσα θέση στον  $\theta$ -χώρο είναι μακριά από το επιθυμητό  $\hat{\theta}$ , το οποίο εμφανίζεται ιδίως στις αρχικές επαναλήψεις. Όσο προσεγγίζεται το  $\hat{\theta}$  τόσο η συμπεριφορά *ζικ-ζακ* της μεθόδου είναι αρκετά πιθανή, έχοντας ως αποτέλεσμα οι μέθοδοι γραμμικοποίησης να δουλεύουν καλύτερα [86].

### 6.4.3 Μέθοδος Συμβιβασμού του *Marquardt*

Η μέθοδος συμβιβασμού του *Marquardt* εκφράζει ένα συμβιβασμό μεταξύ της γραμμικοποίησης και της πιο απότομης καθόδου και συνδυάζει τα καλά χαρακτηριστικά και των δύο μεθόδων, αποφεύγοντας κατά κύριο λόγο τα μειονεκτήματά τους. Η μέθοδος του *Marquardt* είναι καλή υπό την έννοια, ότι συγκλίνει σχεδόν πάντα και δεν καθυστερεί όσο πλησιάζει προς το σημείο  $\hat{\theta}$ , όπως η μέθοδος της πιο απότομης καθόδου.

Έστω ένα συγκεκριμένο σημείο του  $\theta$ -χώρου. Αν η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου εφαρμοσθεί, ένα συγκεκριμένο διάνυσμα κατεύθυνσης,  $\delta_g$  (όπου το  $g$  συμβολίζει την κλίση  $\sim$  *gradient*), αποκτάται για κάθε κίνηση μακριά από το αρχικό σημείο. Εξαιτίας της απόσβεσης στην περιφέρεια της  $S(\theta)$ , αυτό μπορεί να είναι η βέλτιστη τοπική κατεύθυνση στην οποία πρέπει να μετακινηθούμε για να αποκτήσουμε μικρότερες τιμές του  $S(\theta)$ , αλλά μπορεί να μην είναι η βέλτιστη γενική κατεύθυνση. Ωστόσο, η βέλτιστη κατεύθυνση θα πρέπει να είναι εντός  $90^\circ$  του  $\delta_g$ , αλλιώς το  $S(\theta)$  θα αυξάνεται τοπικά. Η μέθοδος της γραμμικοποίησης οδηγεί σε ένα άλλο διάνυσμα διόρθωσης  $\delta$ , που δίνεται από μία εξίσωση σαν την (6.16). Ο *Marquardt* ανακάλυψε, ότι για έναν αριθμό πρακτικών προβλημάτων, που μελέτησε, ότι η γωνία, έστω  $\varphi$ , μεταξύ του  $\delta_g$  και του  $\delta$  έπεσε στο εύρος  $80^\circ < \varphi < 90^\circ$ . Πιο συγκεκριμένα, οι δύο κατευθύνσεις ήταν σχεδόν στις σωστές γωνίες. Ο αλγόριθμος του *Marquardt* δίνει μία μέθοδο για την παρεμβολή μεταξύ των διανυσμάτων  $\delta_g$  και  $\delta$ , καθώς και για την απόκτηση κατάλληλου μεγέθους του βήματος [86].

### 6.4.4 Άλλες Μέθοδοι

Το κυρίαρχο πρόβλημα, που αντιμετωπίζει η προσαρμογή των παραμέτρων ενός μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα, είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων  $S(\theta)$ . Με άλλα λόγια, πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, που στόχο έχει την εύρεση ελαχίστου μίας συνάρτησης. Συνεπώς για την επίλυση του προβλήματος αυτού μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλοι οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση των προβλημάτων αυτού του τύπου. Ένας τέτοιος αλγόριθμος, τον οποίο μάλιστα χρησιμοποιεί και το λογισμικό *matlab*, είναι ο αλγόριθμος εμπιστοσύνης της περιοχής (*Trust Region Algorithm*).

## 6.5 Διαστήματα Εμπιστοσύνης

Ένας τρόπος για να εξαχθεί η μη γραμμικότητα του μελετούμενου μοντέλου είναι μετά την εκτίμηση του  $\theta$  εκτιμώντας την ελλειψοειδή περιοχή εμπιστοσύνης, που εξάγεται από την υπόθεση, ότι η γραμμικοποιημένη μορφή του μοντέλου είναι έγκυρη γύρω από το  $\hat{\theta}$ .

$$\begin{aligned} & (\theta - \hat{\theta})' \hat{Z}' Z \\ (\theta - \hat{\theta}) & \leq ps^2 F(p, n - p, 1 - \alpha) \end{aligned}$$

όπου το  $\hat{Z}$  αντιπροσωπεύει έναν πίνακα της μορφής της εξίσωσης (6.14), αλλά με το  $\hat{\theta}$  να έχει αντικατασταθεί στα στοιχεία από το  $\theta_0$  παντού, και όπου

$$s^2 = S(\hat{\theta}) / (n - p)$$

Όταν η διαφορά μεταξύ διαδοχικών τιμών  $\theta_{j+1}$  και  $\theta_j$  είναι αρκετά μικρή ώστε να τερματιστεί η επαναληπτική διαδικασία με  $\theta_{j+1} = \hat{\theta}$ , τότε στην εξίσωση (6.9), η  $S(\hat{\theta})$  είναι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης  $S(\theta)$  με βάση την εισαχθείσα ακρίβεια της συνθήκης τερματισμού. Είναι κάτι, που μπορούμε να δούμε από την εξίσωση (6.17) με  $\hat{\theta}$ ,  $\beta_i^{j+1}$  και  $Z_{iu}^{j+1}$  να αντικαθιστούν τα  $\theta_0$ ,  $\beta_i^0$  και  $Z_{iu}^0$  αντίστοιχα και ενθυμούμενοι ότι για την τάξη της ακρίβειας που επιθυμούμε στη συνθήκη τερματισμού  $b_{j+1} = 0$ . Όταν το μοντέλο είναι μη γραμμικό, το παραπάνω ελλειψοειδές δεν θα είναι ένα πραγματικό διάστημα εμπιστοσύνης. Έχουμε όμως τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τα σημεία τερματισμού στους κύριους άξονες του ελλειψοειδούς με κανονική αναγωγή. Οι πραγματικές τιμές της  $S(\theta)$  ενδέχεται να εκτιμηθούν σε αυτά τα σημεία και να συγκριθούν μεταξύ τους. Όλες αυτές οι τιμές θα είναι όμοιες υπό τη γραμμική θεώρηση.

Ένα ακριβές διάστημα εμπιστοσύνης ορίζεται για  $S(\theta) = \text{σταθερό}$ , αλλά αφού δεν γνωρίζουμε τις ακριβείς ιδιότητες της κατανομής στη γενική μη γραμμική μορφή, δεν μπορούμε να εξάγουμε ένα ακριβές επίπεδο πιθανότητας. Θα μπορούσαμε, ωστόσο, να επιλέξουμε για παράδειγμα ένα διάστημα τέτοιο ώστε:

$$S(\theta) = S(\hat{\theta}) \left\{ 1 + \frac{p}{n - p} F(p, n - p, 1 - \alpha) \right\}$$

αν το μοντέλο είναι γραμμικό, να παράγει ένα ακριβώς ελλειψοειδές με όριο  $100(1-\alpha)\%$ , το οποίο το ονομάζουμε ως ένα προσεγγιστικό διάστημα εμπιστοσύνης  $100(1-\alpha)\%$  στη μη γραμμική περίπτωση. Σε αυτή την περίπτωση, σημειώνεται ότι το διάστημα αυτό θα είναι ένα σωστό διάστημα εμπιστοσύνης και όχι ελλειπτικό γενικά και μόνο το επίπεδο πιθανότητας θα είναι προσεγγιστικό [86].

## 6.6 Σημαντικότητα Αρχικών Τιμών & Αρχικές Τιμές $\theta_0$

Όπως ήδη γνωρίζουμε και έχει προαναφερθεί, όλες οι επαναληπτικές διαδικασίες χρειάζονται αρχικές τιμές  $\theta_{10}, \theta_{20}, \dots, \theta_{p0}$  των παραμέτρων  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ . Κυρίαρχος στόχος είναι οι αρχικές τιμές να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστες γίνεται, έτσι ώστε να επιτρέψουν στην επαναληπτική διεργασία να συγκλίνει σε μία λύση γρηγορότερα. Παράλληλα αν υπάρχουν αρκετά τοπικά ελάχιστα, οι κακές αρχικές τιμές ενδέχεται να οδηγήσουν στη σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο, γεγονός μη επιθυμητό.

Το μη επιθυμητό αυτό σημείο ενδέχεται να έχει τιμές παραμέτρων, που είναι αδύνατες από τη φύση της διαδικασίας ή που δεν περιγράφουν το ολικό ελάχιστο της  $S(\theta)$ . Για την ορθή επιλογή αρχικών τιμών χρήσιμη είναι μία πρώιμη εκτίμηση της  $S(\theta)$  σε μία πληθώρα σημείων του παραμετρικού χώρου.

Δεν υπάρχει βήμα προς βήμα διαδικασία, που να ισχύει για κάθε μη γραμμικό πρόβλημα, προκειμένου να γίνουν αρχικές εκτιμήσεις για τις παραμέτρους. Κάποιες μέθοδοι, που μπορούν να φανούν χρήσιμες, αναφέρονται ακολούθως:

1. Αν υπάρχουν  $p$  παράμετροι, αντικαθιστούμε για  $p$  σύνολα παρατηρήσεων  $(Y_u, \xi_u)$  στο μοντέλο αγνοώντας το σφάλμα. Λύνουμε τις  $p$  εξισώσεις, που προκύπτουν για τις παραμέτρους αν είναι εφικτό. Συνήθως τα καλύτερα είναι τα ευρέως διασκορπισμένα  $\xi_u$ .
2. Καθώς τα  $\xi_i$  πλησιάζουν το μηδέν ή το άπειρο, θεωρούμε τη συμπεριφορά της συνάρτησης απόκρισης και τα αντικαθιστούμε στις παρατηρήσεις, οι οποίες είναι πιο κοντά στις συνθήκες αυτές στο πλαίσιο του προβλήματος, που πρέπει να επιλύσουμε. Τότε, αν είναι εφικτό, λύνουμε τις εξισώσεις, που προκύπτουν. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη μέθοδο 1.
3. Γίνεται έλεγχος της μορφής του μοντέλου για να δούμε αν το μοντέλο μπορεί να μετασχηματισθεί καταλλήλως σε κάποιο άλλο στο οποίο είναι ευκολότερο να βρεθούν οι κατάλληλες αρχικές τιμές.
4. Αν όλα τα παραπάνω αποτύχουν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της γραφικής απεικόνισης των δεδομένων προκειμένου να υπολογίσουμε σωστά τις αρχικές τιμές [86].

## 6.7 Ανθεκτική Παλινδρόμηση

Κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιώντας  $n$  παρατηρήσεις για ένα  $p$  παραμετρικό μοντέλο, παίρνουμε κάποιες ιδανικές παραδοχές για το διάνυσμα των σφαλμάτων, ότι ακολουθεί δηλαδή την κατανομή  $N(0, I\sigma^2)$ . Υπάρχουν πρακτικά αποκλίσεις από αυτές τις παραδοχές. Αν οι αποκλίσεις είναι σημαντικές, ελπίζουμε να τις εντοπίσουμε στη συμπεριφορά των υπολοίπων, ώστε να τροποποιηθούν καταλλήλως τα μοντέλα.

Για παράδειγμα, ενδέχεται να τροποποιήσουμε μία ή περισσότερες από τις προβλέπουσες μεταβλητές (ανεξάρτητες μεταβλητές) ή τη μεταβλητή απόκρισης (εξαρτημένη μεταβλητή) ή απλώς να τροποποιήσουμε το μοντέλο, προσθέτοντας όρους μεγαλύτερης τάξης. Οι αποκλίσεις, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, δεν είναι τόσο σημαντικές ώστε να δικαιολογηθούν διορθωτικές κινήσεις [86].

Αν η μελέτη μας καταλήξει στο συμπέρασμα, ότι τα σφάλματα ακολουθούν μη κανονική κατανομή, θα πρέπει να σκεφτούμε την εφαρμογή μίας ανθεκτικής μεθόδου παλινδρόμησης. Ειδικά σε περιπτώσεις, όπου η κατανομή των σφαλμάτων είναι πιο οπισθοβαρής από την κανονική, έχει δηλαδή μεγαλύτερη πιθανότητα στις ουρές από ότι η κανονική, είναι πιο πιθανό να παράγουν μεγαλύτερα σφάλματα. Μία ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων σταθμίζει κάθε παρατήρηση ισότιμα για την εκτίμηση των παραμέτρων. Οι ανθεκτικές μέθοδοι επιτρέπουν την ανισοβαρή στάθμιση των παραμέτρων.

Ουσιαστικά, οι παρατηρήσεις, που παράγουν μεγάλα υπόλοιπα, είναι συνήθως υποσταθμισμένες σε μία ανθεκτική μέθοδο εκτίμησης. Υπάρχει διαθέσιμη μία πληθώρα από μεθόδους, με τις ανθεκτικές μεθόδους παλινδρόμησης να απαιτούν πολύ περισσότερο υπολογιστικό χρόνο από τα ελάχιστα τετράγωνα και να απαιτείται να γίνουν κάποιες υποθέσεις σχετικά με τη διαδικασία υπο-στάθμισης. Τέτοιου είδους μετρήσεις μπορεί να είναι [86]:

- Η παλινδρόμηση ελαχίστων απόλυτων αποκλίσεων
- M-εκτιμητές (εκτιμητές A/Γ μέγιστης πιθανοφάνειας)
- Παλινδρόμηση ελαχίστου μέσου των τετραγώνων
- Ανθεκτική παλινδρόμηση με βαθμονομημένα υπόλοιπα
- Άλλες μέθοδοι

## 6.8 Καταλληλότητα Προσαρμογής

Αφού γίνει η προσαρμογή των δεδομένων σε ένα ή περισσότερα μοντέλα, θα πρέπει να εκτιμηθεί η ποιότητα της προσαρμογής. Αρχικά θα πρέπει να εξετασθεί η οπτική αξιολόγηση της προσαρμογής στην καμπύλη/επιφάνεια. Μία «καλή προσαρμογή» ενδέχεται να είναι ένα μοντέλο:

- Από το οποίο τα δεδομένα θα μπορούσαν λογικά να έχουν προκύψει με βάση τις υποθέσεις της προσαρμογής των ελαχίστων τετραγώνων.
- Στο οποίο οι συντελεστές του μοντέλου μπορούν να εκτιμηθούν με μικρή αβεβαιότητα.
- Το οποίο εξηγεί τη μεταβλητότητα των δεδομένων και μπορεί να προβλέπει με μεγάλη βεβαιότητα νέες παρατηρήσεις.

Μία εφαρμογή θα μπορούσε να απαιτεί περαιτέρω χαρακτηριστικά ώστε να χαρακτηριστεί μία προσαρμογή ως «καλή», όπως για παράδειγμα ένα απλό μοντέλο, που μπορεί να εξηγηθεί εύκολα.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ποιότητας της προσαρμογής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε γραφικές και σε αριθμητικές. Η γραφική απεικόνιση των υπολοίπων και των ορίων της πρόβλεψης είναι γραφικές μέθοδοι, που βοηθούν την οπτική ερμηνεία. Ο υπολογισμός των στατιστικών της ποιότητας της προσαρμογής και των διαστημάτων εμπιστοσύνης των συντελεστών αποτελούν αριθμητικές μεθόδους, που βοηθούν τη στατιστική επεξήγηση.

Σε γενικά πλαίσια, οι γραφικές μέθοδοι είναι πιο επικερδείς από τις αριθμητικές, διότι επιτρέπουν στον χρήστη να δει ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων με μία ματιά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο χρήστης να μπορεί εύκολα να οπτικοποιήσει ένα μεγάλο εύρος σχέσεων μεταξύ του μοντέλου και των δεδομένων. Τις περισσότερες φορές, οι αριθμητικές μέθοδοι επικεντρώνονται σε ένα λιγότερο ευρύ φάσμα σε μία συγκεκριμένη όψη των δεδομένων και προσπαθούν να συμπιέσουν αυτή την πληροφορία ώστε να παρουσιασθεί ένας μεμονωμένος αριθμός. Πρακτικά, ανάλογα με τα δεδομένα και τις απαιτήσεις της μελέτης, ενδέχεται να χρειασθούν και οι δύο μέθοδοι, ώστε να εκτιμηθεί η ποιότητα προσαρμογής.

Σημαντικό είναι να σημειωθεί, ότι υπάρχει πιθανότητα καμία από τις προσαρμογές να μην θεωρηθεί κατάλληλη για τα δεδομένα με βάση αυτές τις μεθόδους. Έτσι, θα πρέπει να αλλαχθεί το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης. Ωστόσο, αν ο στόχος είναι η εξαγωγή συντελεστών, που έχουν φυσική σημασία, αλλά το μοντέλο δεν αντικατοπτρίζει τη φυσική των δεδομένων, οι συντελεστές που προκύπτουν είναι άχρηστοι. Στην περίπτωση αυτή, η κατανόηση του πως πάρθηκαν οι μετρήσεις και τι αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα είναι το ίδιο σημαντικό με την αξιολόγηση της ποιότητας της προσαρμογής [87]. Στην ανάλυση της παρούσας εργασίας θα γίνει αναφορά σε τέσσερις στατιστικές μεθόδους για την αξιολόγηση της προσαρμογής:

- Άθροισμα των τετραγώνων λόγω του σφάλματος (*SSE-Sum of Squares due to Error*)
- $R^2$
- Προσαρμοζόμενο  $R^2$  (*Adjusted R-Square*)
- Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (*RMSE-Root Mean Square Error*)

## Άθροισμα των Τετραγώνων λόγω του Σφάλματος

Με το στατιστικό αυτό εργαλείο υπολογίζεται η συνολική απόκλιση των τιμών της απόκρισης της προσαρμογής αναφορικά με τις μετρήσεις. Ονομάζεται και αθροισμένο τετράγωνο των υπολοίπων και πολλές φορές συμβολίζεται ως *SSE*:

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

Αν η τιμή του *SSE* τείνει στο 0, δείχνει ότι το μοντέλο έχει μικρότερο στοιχείο τυχαίου σφάλματος και ότι η προσαρμογή θα είναι περισσότερο χρήσιμη για προβλέψεις [87].

## $R^2$

Με το στατιστικό αυτό εργαλείο μετράται πόσο επιτυχημένη είναι η προσαρμογή στην επεξήγηση διακύμανσης των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, το  $R^2$  είναι το τετράγωνο των συσχετίσεων μεταξύ των μετρήσεων και των τιμών, που προβλέπει η προσαρμογή. Ονομάζεται και τετράγωνο των συντελεστών πολλαπλών συσχετίσεων.

Ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των τετραγώνων της παλινδρόμησης  $SSR$  και του συνολικού αθροίσματος των τετραγώνων  $SST$ :

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

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

όπου  $SST = SSR + SSE$

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

Το  $R^2$  ενδέχεται να πάρει κάθε τιμή από 0 έως και 1. Μία τιμή κοντά στο 1 σημαίνει ότι μία μεγαλύτερη αναλογία διακύμανσης λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο. Για παράδειγμα, μία τιμή  $R^2 = 0,8234$  σημαίνει, ότι η προσαρμογή εξηγεί το 82,34% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων γύρω από τη μέση τιμή. Αν ο αριθμός των συντελεστών προς προσαρμογή στο μοντέλο  $R^2$  αυξηθεί, ενδέχεται να αυξηθεί χωρίς η προσαρμογή να βελτιωθεί πρακτικά. Για αποφυγή μίας τέτοιας κατάστασης, ορθό κρίνεται να γίνει χρήση βαθμών ελευθερίας του προσαρμοσμένου  $R^2$ , που περιγράφεται παρακάτω [87].

## Προσαρμοσμένο $R^2$

Με το στατιστικό αυτό εργαλείο χρησιμοποιείται το  $R^2$ , που αναφέρθηκε παραπάνω, και το προσαρμόζει βασιζόμενο στους βαθμούς ελευθερίας των υπολοίπων. Οι υπολοίπομενοι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται ως ο αριθμός των τιμών απόκρισης  $n$  μείον τον αριθμό των συντελεστών προς προσαρμογή  $m$ , που εκτιμάται από τις τιμές απόκρισης.

$$v = n - m$$

όπου το  $v$  απεικονίζει τον αριθμό των ανεξάρτητων κομματιών πληροφορίας, που περιέχει  $n$  σημεία δεδομένων, που απαιτούνται για τον υπολογισμό του αθροίσματος των τετραγώνων. Σημαντικό είναι να σημειωθεί, ότι οι αν παράμετροι είναι φραγμένοι και ένας ή περισσότερους εκτιμητές είναι στα όριά τους, τότε αυτοί οι εκτιμητές κρίνονται σταθεροί. Ο βαθμός ελευθερίας αυξάνεται από τον αριθμό τέτοιων παραμέτρων.

Τις περισσότερες φορές, το προσαρμοσμένο  $R^2$  είναι ο καλύτερος δείκτης της ποιότητας προσαρμογής, όταν γίνεται σύγκριση δύο μοντέλων, που είναι φωλιασμένα. Αυτό σημαίνει ότι το καθένα προσθέτει επιπλέον συντελεστές σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο.

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

Το προσαρμοσμένο  $R^2$  ενδέχεται να λάβει τιμές, μικρότερες του 1. Μία τιμή κοντά στο 1 δείχνει καλύτερη προσαρμογή [87].

## Ρίζα του Μέσου Τετραγώνου του Σφάλματος

Με το στατιστικό αυτό εργαλείο γίνεται μία εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της τυχαίας συνιστώσας των δεδομένων και ορίζεται ως εξής:

$$RMSE = s = \sqrt{MSE}$$

όπου το  $MSE$  είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

$$MSE = \frac{SSE}{v}$$

Όπως και στο SSE έτσι και στο MSE μία τιμή κοντά στο 0 δείχνει ότι η προσαρμογή είναι πιο χρήσιμη για προβλέψεις [87].

## 6.9 Προσαρμογή Γραμμικής Μεταβολής στη Μελέτη μας

### 6.9.1 Μαθηματική Έκφραση Γειώσεων Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ

Οι βασικοί τύποι, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη μας δίνονται από τις ακόλουθες δύο σχέσεις:

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left[ a + b \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{c \cdot h^{d+e}} \right] \quad (6.19)$$

$$R(\rho_1, \rho_2, h) = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left[ a + b \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{c \cdot h^{d+e}} + 0.1 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{q \cdot h^{d+m}} \right] \quad (6.20)$$



Όπου

<b>R :</b>	Αντίσταση Γείωσης
<b><math>\rho_1, \rho_2 :</math></b>	Ειδικές Αντιστάσεις Πρώτου & Δεύτερου Στρώματος του Διστρωματικού Εδάφους
<b>h :</b>	Βάθος Πρώτου Στρώματος
<b>a,b,c,d,e,q,m,n :</b>	Σταθερές

Στο εξής θα θεωρούμε τη σχέση (6.19) ως «**Απλό Εκθετικό Μοντέλο**» και τη σχέση (6.20) ως «**Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών**».

Ένας πιο απλοποιημένος τύπος για την παραπάνω σχέση (6.19) είναι ο εξής:

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

Όπου  $K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$  και έτσι η παραπάνω σχέση γράφεται:

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

Τότε για το βασικό τύπο:

$$S(a, b, c, d, e) = \sum_{i=1}^n (\widehat{RR}_i - RR(K, h))^2$$

όπου  $\widehat{RR}_i$  οι μετρήσεις. Τα κανονικά σφάλματα αλληλοαναιρούνται. Για αυτό παίρνω τετράγωνα (απόλυτες τιμές). Στόχος μου να ελαχιστοποιήσω το  $S$ , συνεπώς παίρνω τις ακόλουθες μερικές παραγώγους

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2 \cdot (\widehat{RR}_i - RR) \cdot (-1) = 0 \quad (\text{A})$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^n (-2) \cdot (\widehat{RR}_i - RR) \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e} = 0 \quad (\text{B})$$

$$\frac{\partial S}{\partial c} = \sum_{i=1}^n (-2) \cdot (\widehat{RR}_i - RR) \cdot b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e} \cdot h^d \cdot \ln(K + 1) = 0 \quad (\text{C})$$

$$\frac{\partial S}{\partial d} = \sum_{i=1}^n (-2) \cdot (\widehat{RR}_i - RR) \cdot b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e} \cdot \ln(K + 1) \cdot (c \cdot h^d \cdot \ln h) = 0 \quad (\text{D})$$

$$\frac{\partial S}{\partial e} = \sum_{i=1}^n (-2) \cdot (\widehat{RR}i - RR) \cdot b \cdot (K + 1)^{c \cdot h^d + e} \cdot \ln(K + 1) = 0 \quad (E)$$

Όσον αφορά τη σχέση (6.19) αντικαθιστούμε

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

και η σχέση γίνεται:

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

Το παραπάνω σύστημα δεν μπορεί να λυθεί αναλυτικά. Για αυτό το λόγο θα λυθεί αριθμητικά με χρήση του λογισμικού *matlab*, όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 8.

## 6.9.2 Μαθηματική Έκφραση Γείωσης Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους

$$R(\rho_1, \rho_2, l, h, E) = a \left[ \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{m-1} \cdot \left[ \frac{1}{E} \right]^{n-1} \quad (6.21)$$

Όπου

<b>R :</b>	Αντίσταση Γείωσης
<b><math>\rho_1, \rho_2</math> :</b>	Ειδικές Αντιστάσεις Πρώτου & Δεύτερου Στρώματος του Διστρωματικού Εδάφους
<b>h :</b>	Βάθος Πρώτου Στρώματος
<b>E :</b>	Εμβαδό Γείωσης
<b>a, m, n :</b>	Σταθερές

Στο εξής θα θεωρούμε τη σχέση (6.21) ως «**Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους**». Συνεπώς, και επειδή η εντολή *cftool* του λογισμικού *matlab* δέχεται έως και 3 μεταβλητές, οι τελικοί τύποι θα είναι:

$$RR = R \cdot K1 \cdot K2$$

$$K1 = \frac{\rho1 \cdot \rho2}{\rho1 + \frac{\rho2}{h}}$$

$$K2 = \frac{1}{E}$$

### 6.9.3 Μαθηματική Έκφραση Γείωσης Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων

$$R(\rho_1, \rho_2, l_1, l_2, h, E_1, E_2) = \left(\frac{h}{\rho_1}\right)^a \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l_1 \cdot l_2}{b \frac{\rho_1 \cdot l_1}{E_1} + c \frac{\rho_2 \cdot l_2}{E_2}} \quad (6.22)$$

$$\rightarrow R = \left(\frac{h}{\rho_1}\right)^a \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l_1 \cdot l_2}{b E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1 + c E_1 \cdot \rho_2 \cdot l_2} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{R}{E_1 \cdot E_2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l_1 \cdot l_2} = \left(\frac{h}{\rho_1}\right)^a \frac{1}{b E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1 + c E_1 \cdot \rho_2 \cdot l_2} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{R}{E_1 \cdot E_2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l_1 \cdot l_2} = \left(\frac{h}{\rho_1}\right)^a \frac{1}{E_1 \cdot \rho_2 \cdot l_2 * \left(b \frac{E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1}{E_1 \cdot \rho_2 \cdot l_2} + c\right)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{R}{E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1} = \left(\frac{h}{\rho_1}\right)^a \frac{1}{b \frac{E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1}{E_1 \cdot \rho_2 \cdot l_2} + c}$$

Όπου

- R :** Αντίσταση Γείωσης
- $\rho_1, \rho_2$  :** Ειδικές Αντιστάσεις Πρώτου & Δεύτερου Στρώματος του Διστρωματικού Εδάφους
- h :** Βάθος Πρώτου Στρώματος
- E1, E2 :** Εμβαδά Γείωσης
- l1, l2 :** Συνολικό Θαμμένο Μήκος Κύριου Ηλεκτροδίου Πρώτου & Δεύτερου Στρώματος
- a, b, c :** Σταθερές

Στο εξής θα θεωρούμε τη σχέση (6.22) ως «**Μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων**». Συνεπώς, και επειδή η εντολή *cftool* του λογισμικού *matlab* δέχεται έως και 3 μεταβλητές, οι τελικοί τύποι θα είναι:

$$RR = \frac{R}{E2 \cdot \rho1 \cdot l1}$$

$$K1 = \frac{h}{\rho1}$$

$$K2 = \frac{E2 \cdot \rho1 \cdot l1}{E1 \cdot \rho2 \cdot l2}$$

# Κεφάλαιο 7

## Προσωμοιώσεις με το Λογισμικό *CDEGS*

### 7.1 Εισαγωγή

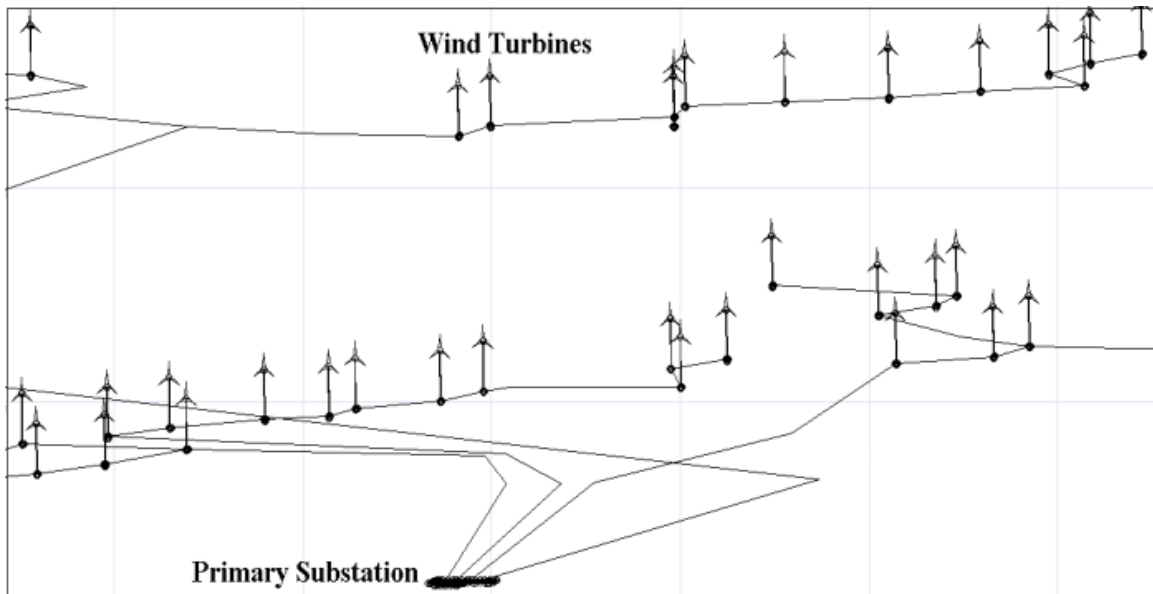
Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 5, στη μελέτη μας θα ασχοληθούμε με τέσσερις τύπους γείωσης Α/Γ. Για κάθε τύπο θα χρειαστεί να βρούμε την αντίσταση γείωσης. Για αυτό το λόγο, θα χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό *CDEGS* (*Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis*). Ακολουθώντας, θα περιγραφούν συνοπτικά οι δυνατότητες του λογισμικού, καθώς και οι τομείς, που χρησιμοποιείται.

Το λογισμικό *CDEGS* αποτελεί ένα ισχυρό σύνολο ενσωματωμένων εργαλείων λογισμικού για μηχανικούς, που είναι προγραμματισμένο για ακριβή ανάλυση ποικίλων προβλημάτων. Τέτοια προβλήματα ενδέχεται να αφορούν γειώσεις, ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, όπως μελέτες μετριάσμου *AC/DC* παρεμβολών, και διάφορες πτυχές της ανάλυσης των καθοδικών προστασιών σε διεθνή κλίμακα, αρχίζοντας κυριολεκτικά από το μηδέν. Πρόκειται για ένα λογισμικό, που μπορεί να υπολογίσει ρεύματα αγωγών και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, που παράγονται από αυθαίρετο δίκτυο από φορτισμένους αγωγούς σε κάθε σημείο άνω ή κάτω από το έδαφος για κανονικές συνθήκες, συνθήκες κεραυνοπληξίας, συνθήκες σφάλματος, καθώς και μεταβατικές συνθήκες.

Παράλληλα, το *CDEGS* και τα υποπακέτα του έχουν τη δυνατότητα να επιλύσουν προβλήματα κλιμακούμενης πολυπλοκότητας από τη σχεδίαση απλών συστημάτων γείωσης μέχρι τη συμπεριφορά πολύπλοκων δικτύων, τα οποία βρίσκονται τόσο άνω όσο και κάτω από το έδαφος και που πλήττονται από κεραυνικά ή άλλα μεταβατικά φαινόμενα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα, που εμφανίζει το λογισμικό, είναι η δυνατότητα που έχει να εισάγει γραφικά από το *AutoCAD*, καθώς και από άλλα λογισμικά, κάνοντας ιδιαίτερα εύκολη την εισαγωγή δεδομένων. Ταυτόχρονα, οι γραφικές απεικονίσεις και η ευέλικτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των αποτελεσμάτων και στην απομόνωση ενδιαφερόντων συμπερασμάτων. Περιεκτικά, οι δυνατότητες του *CDEGS* περιγράφονται ως εξής [88] :

- Ανάλυση της αντίστασης του εδάφους και ερμηνεία της δομής εδάφους
- Ανάλυση γειώσεων· αυθαίρετες δομές εδάφους· κάθε συχνότητα και μεταβατικό φαινόμενο

- Σταθερές γραμμών για υπέργειους και υπόγειους αγωγούς ή πολύπλοκες διατάξεις καλωδίων μέσα σε σωλήνες
- Ανάλυση καθοδικής προστασίας ή πολύπλοκων υπόγειων δικτύων
- Επαγωγικές ή χωρητικές παρεμβολές σε κοινούς διαδρόμους
- Ανάλυση συχνότητας και ανάλυση στο πεδίο του χρόνου ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, που παράγονται από αυθαίρετα φορτισμένα δίκτυα αγωγών (υποσταθμοί, γραμμές μεταφοράς και διανομής, βιομηχανικά εργοστάσια κ.τ.λ.)



**Σχήμα 7.1:** Στιγμιότυπο Οθόνης Μελέτης Αιολικού Πάρκου στο Λογισμικό *CDEGS* [89]

Το πλήρες πακέτο του λογισμικού *CDEGS* περιλαμβάνει τους εξής επιλύτες:

- *RESAP*: Ανάλυση της ειδικής αντίστασης του εδάφους
- *MALT*: Γειώσεις χαμηλής συχνότητας
- *MALZ*: Γείωση στον πεδίο της συχνότητας
- *TRALIN*: Παράμετροι γραμμών και καλωδίων και ανάλυση επαγωγικότητας
- *SPLITS*: Αναλυτική κατανομή του ρεύματος σάλματος
- *HIFREQ*: Ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων
- *FFTSES*: Αυτόματη ανάλυση ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT)
- *FCDIST*: Απλοποιημένη ανάλυση της κατανομής του ρεύματος σφάλματος

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, θα ασχοληθούμε με τον επιλυτή *MALZ* για τις γειώσεις Α/Γ Α,Β και Γ, ενώ για τη γείωση Α/Γ Δ με τον επιλυτή *MALT*, περιγραφή των οποίων γίνεται παρακάτω.

## 7.2 Επιλύτης *MALZ* [90]

Ο επιλυτής *MALZ* αναλύει την απόδοση στο πεδίο της συχνότητας των υπόγειων δικτύων αγωγών και υπολογίζει τις εξής ποσότητες [90]:

- Δυναμικό γης και αγωγού
- Κατανομή του διαμήκους ρεύματος διαφυγής στους αγωγούς
- Πυκνότητα ρεύματος
- Ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος ή στην επιφάνεια της γης
- Μαγνητικά πεδία στον αέρα

Το ισχυρό αυτό πακέτο γείωσης αποτελεί το ιδανικό εργαλείο σε μονωμένους αγωγούς ή στην περίπτωση όπου οι μεταλλικοί αγωγοί δεν μπορούν πλέον να προσεγγισθούν ως ισοδυναμικές επιφάνειες [90]. Η ανάπτυξη του *MALZ* έγινε ειδικά για την επίλυση προβλημάτων, που περιλαμβάνουν ένα δίκτυο αγωγών, που φορτίζονται με υψηλές συχνότητες ή για αγωγούς στους οποίους οι διαμήκεις επαγωγές είναι σημαντικές [90].

- Οι αγωγοί ενδέχεται να είναι συμπαγείς ή κοίλοι, μονωμένοι ή γυμνοί, και μπορούν να είναι τοποθετημένοι αυθαίρετα σε εδάφη με οριζόντια, κάθετα, σφαιρικά ή κυλινδρικά στρώματα ή σε στρώματα με πεπερασμένους όγκους διαφορετικών αντιστάσεων.
- Κάθε σύστημα αγωγών ενδέχεται να φορτίζεται σε διαφορετικές τοποθεσίες από ρεύματα μιγαδικής τιμής. Κάθε πηγή ρεύματος μπορεί να εγγχεί ένα ρεύμα, το οποίο διαφέρει από τις υπόλοιπες πηγές τόσο σε μέτρο όσο και σε γωνία.
- Ο χρήστης ενδέχεται επιπλέον να προσδιορίσει το δυναμικό επιλεγμένων αγωγών, καθώς και το επαγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ή άλλη μορφή διαμήκους πηγής τάσης σε οποιοδήποτε αριθμό αγωγών. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον, όταν μελετάται η συμπεριφορά μίας δομής με μακριά γείωση, όπως ένας σωλήνας, ο οποίος είναι παράλληλος με μία γραμμή ισχύος.
- Ο επιλυτής *MALZ* διαχωρίζει αυτόματα τους αγωγούς σε κατηγορίες και κατά συνέπεια προσδιορίζεται ποιοι αγωγοί αποτελούν διακριτά συστήματα.

### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Ο επιλυτής *MALZ* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επακριβή ολοκλήρωση πολλών τύπων εργασιών ενός μηχανικού όπως:

- Ανάλυση μεγάλων δικτύων γείωσης σε εδάφη με μικρή ειδική αντίσταση.
- Ανάλυση μεγάλων *HVDC* ηλεκτροδίων για τα οποία η πτώση τάσης κατά μήκος των αγωγών γείωσης είναι σημαντική.
- Απόκριση των δικτύων γείωσης, τα οποία υπόκεινται σε ρεύματα υψηλής συχνότητας (αρμονικές τρίτης, πέμπτης και υψηλότερης τάξης).
- Έρευνες αναφορικά με την παρουσία σωληνώσεων (μονωμένων ή μη) ή άλλων παρόμοιων μεταλλικών διαδρόμων (φράκτες κ.τ.λ.). Ο *MALZ* μπορεί, επίσης, να αναλύσει τις επιδράσεις των ηλεκτροδίων επιστροφής (δίκτυα γείωσης όπου τα ρεύματα γης επιστρέφουν στο σύστημα ως πηγές).
- Προσδιορισμός των ηλεκτρικών πεδίων και της πυκνότητας ρεύματος σε καθορισμένα σημεία παρατήρησης στο έδαφος ή στην επιφάνεια της γης.
- Προσδιορισμός των μαγνητικών πεδίων από θαμμένους αγωγούς που φέρουν ρεύμα (μονωμένους ή μη). Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογισθεί σε κάθε σημείο πάνω από την επιφάνεια της γης.
- Εκτίμηση της απόδοσης των σχημάτων καθοδικής προστασίας και των συστημάτων γείωσης που είναι ευαίσθητα στη διάβρωση.
- Απόκριση των συστημάτων γείωσης σε μεταβατικά ρεύματα όπως κεραυνοπληξίες.

## 7.3 Προσομοίωση με το λογισμικό *CDEGS*

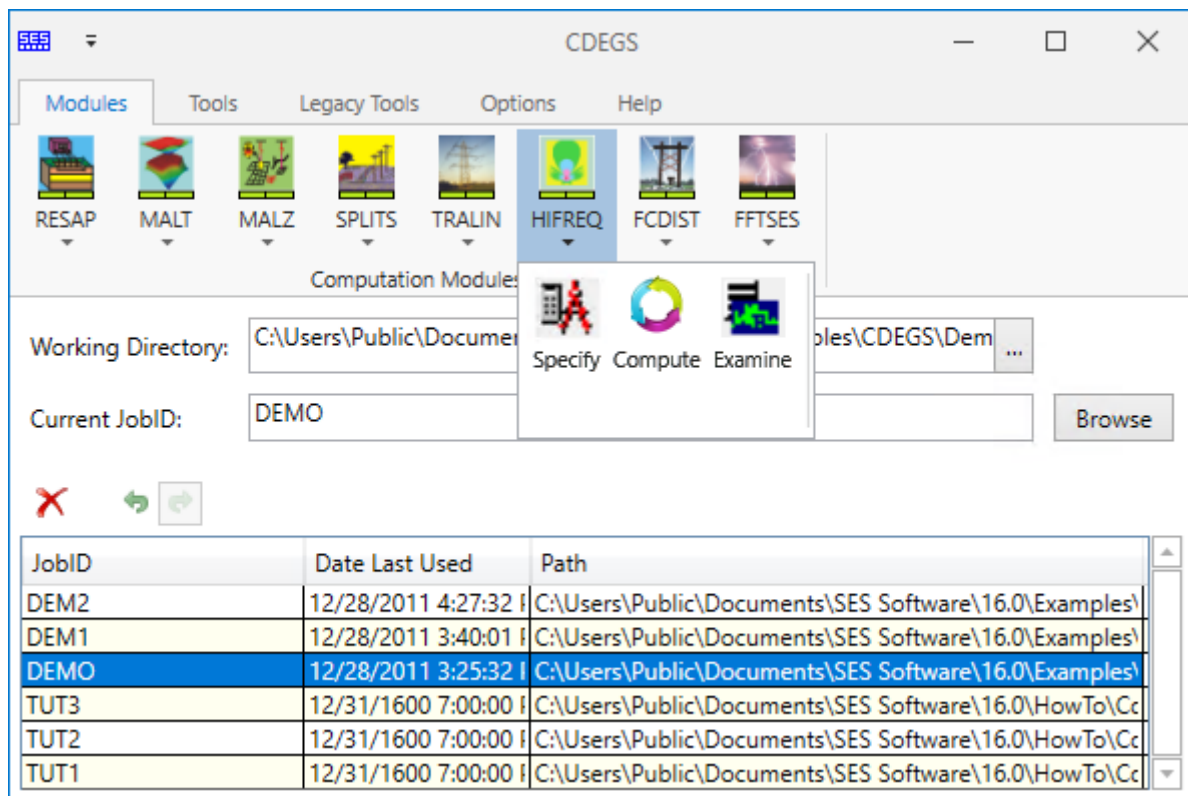
Όπως προαναφέρθηκε και στην ενότητα 7.1, στα πλαίσια της διπλωματικής θα ασχοληθούμε μόνο με τον επιλύτη *MALZ*, περιγραφή του οποίου έγινε στην ενότητα 7.2. Το περιβάλλον εργασίας διακρίνεται σε τρεις βασικές ενότητες:

1. Εισαγωγή δεδομένων
2. Διαδικασία προσομοίωσης/επίλυσης
3. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση ακολουθεί κάποια συγκεκριμένα βήματα. Πρωτίστως, στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων επιλέγουμε το *Toolbox* και έπειτα τον επιλύτη, που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε (εδώ *MALZ*). Κατόπιν εισάγουμε τα δεδομένα, όπως περιγράφεται ακολούθως. Στη συνέχεια εκτελούμε την προσομοίωση. Τελικά, στο παράθυρο της εξαγωγής των αποτελεσμάτων επιλέγουμε *Toolbox* και έπειτα τον επιλύτη, που χρησιμοποιήσαμε.

Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού *CDEGS* απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:





Σχήμα 7.2: Περιβάλλον Εργασίας Λογισμικού *CDEGS* [88]

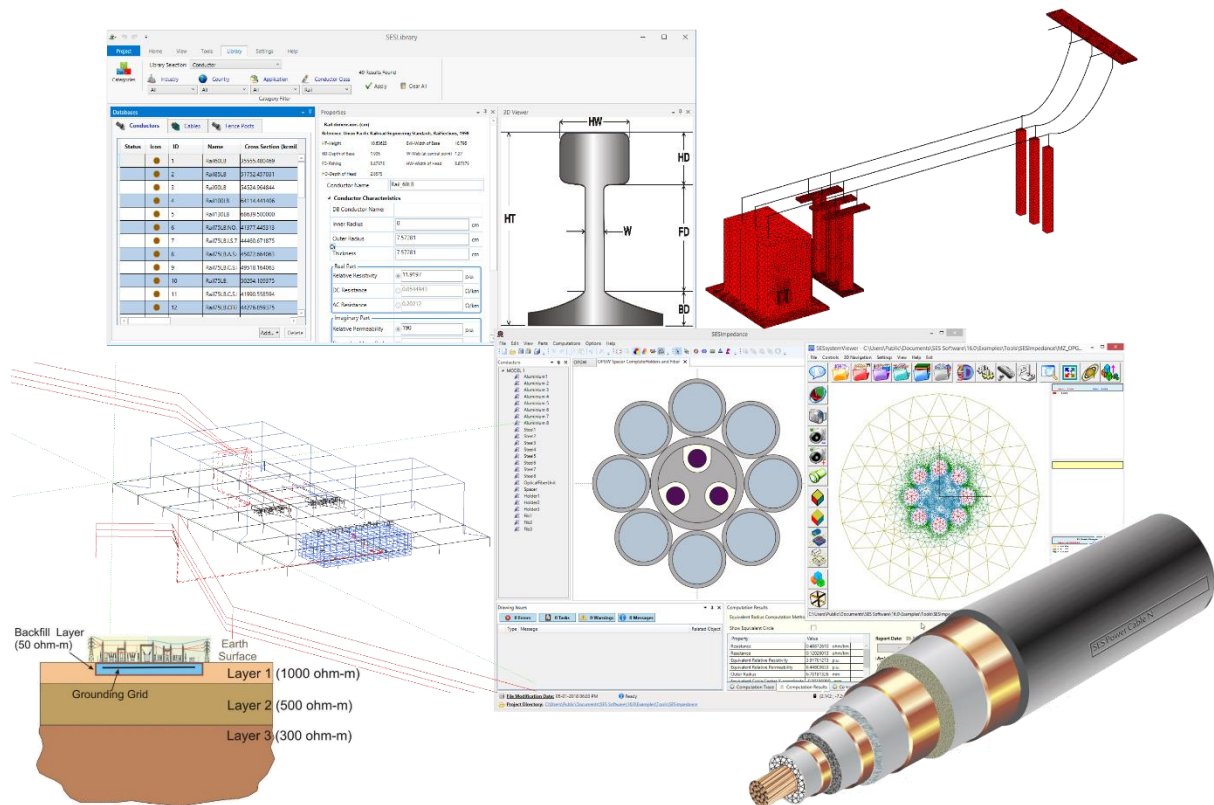
### 7.3.1 Εισαγωγή Δεδομένων στο Λογισμικό *CDEGS*

Είναι σημαντικό, για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων, να εισαχθούν τα πραγματικά δεδομένα για τη γείωση και το έδαφος. Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 7.3) απεικονίζονται διάφορες δυνατότες του λογισμικού *CDEGS* [88]. Παράλληλα, θα πρέπει να εισαχθούν οι ειδικές αντιστάσεις των δύο στρωμάτων του διστρωματικού εδάφους, καθώς και το βάθος του πρώτου στρώματος.

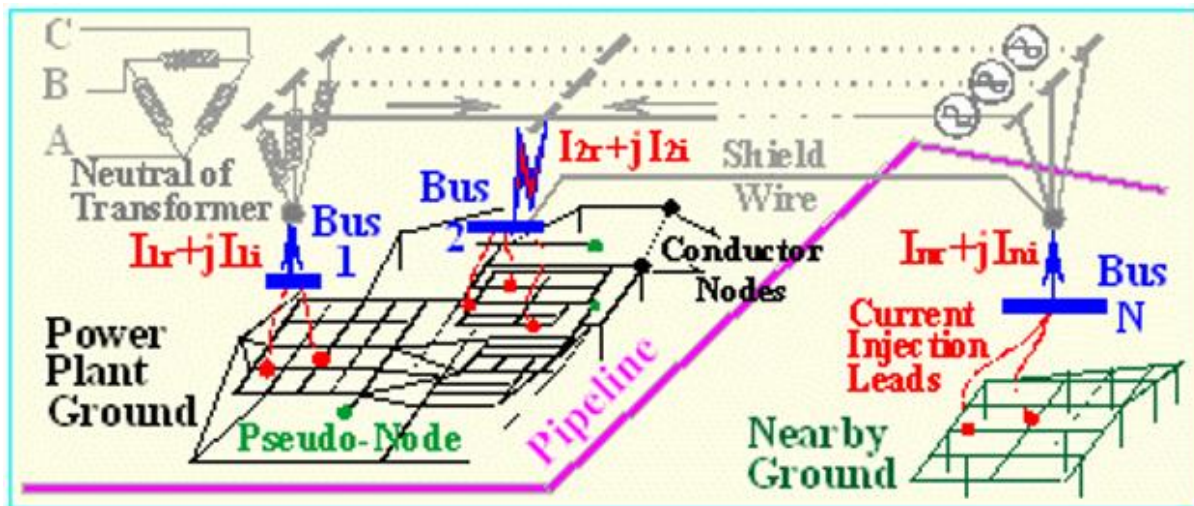
### 7.3.2 Πραγματοποίηση Προσομοίωσης & Εξαγωγή Αποτελεσμάτων

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης παρατηρούμε το μεσαίο παράθυρο. Στο σημείο αυτό επιλέγουμε τον αντίστοιχο επιλύτη, για τον οποίο έχουμε εισάγει δεδομένα στο προηγούμενο στάδιο και με τον τρόπο αυτό αρχίζει η επίλυση.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων επιλέγουμε αρχικά, στο δεξί παράθυρο, την εντολή *Toolbox* και κατόπιν τον επιλύτη, που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο στάδιο (εδώ *MALZ*). Στο σημείο αυτό μας εμφανίζεται ένα *Report* με διάφορα αποτελέσματα, που προέκυψαν στην προσομοίωση. Αυτό, που μας ενδιαφέρει, είναι η αντίσταση του συστήματος γείωσης.



Σχήμα 7.3: Λογισμικό CDEGS [88]



Σχήμα 7.4: Επιλύτης MALZ Λογισμικού CDEGS [90]

## 7.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με Επιλύτη *MALZ*

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 5, στη μελέτη μας θα ασχοληθούμε με τέσσερις τύπους γείωσης Α/Γ. Για κάθε τύπο, το έδαφος, στο οποίο θα γίνει η μελέτη θεωρείται διστρωματικό.

Έτσι προκύπτουν οι ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  του πρώτου και του δεύτερου στρώματος αντίστοιχα καθώς και το βάθος του πρώτου στρώματος  $h$ , που θα πάρουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\rho_1 = 100, 500, 1000, 5000, 10000$$

$$\rho_2 = 100, 500, 1000, 5000, 10000$$

$$h = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5$$

Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι για κάθε τύπο γείωσης θα πραγματοποιηθούν  $5 \cdot 5 \cdot 9 = 225$  προσομοιώσεις, μιας και τα παραπάνω μεγέθη θα συνδυασθούν με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.

### Αποτελέσματα Γείωσης Ανεμογεννήτριας Α

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι εδαφών, που εξετάζουμε. Τα αποτελέσματα από τις 225 προσομοιώσεις, που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων των δύο στρωμάτων και του βάθους του πρώτου στρώματος για τη γείωση Α/Γ Α, απεικονίζονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1

Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος $\rho_1$	Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος $\rho_2$	Βάθος Πρώτου Στρώματος $h$	Αντίσταση Γείωσης $R$
100	100	0.5	2.38
100	100	1	2.38
100	100	1.5	2.38
100	100	2	2.38
100	100	2.5	2.38
100	100	3	2.38
100	100	3.5	2.38
100	100	4	2.38
100	100	5	2.38
500	100	0.5	2.43

500	100	1	2.49
500	100	1.5	2.56
500	100	2	2.64
500	100	2.5	2.86
500	100	3	3.70
500	100	3.5	4.07
500	100	4	4.44
500	100	5	5.38
1000	100	0.5	2.43
1000	100	1	2.50
1000	100	1.5	2.58
1000	100	2	2.68
1000	100	2.5	2.97
1000	100	3	4.48
1000	100	3.5	5.10
1000	100	4	5.78
1000	100	5	7.86
5000	100	0.5	2.43
5000	100	1	2.52
5000	100	1.5	2.60
5000	100	2	2.72
5000	100	2.5	3.06
5000	100	3	6.29
5000	100	3.5	7.34
5000	100	4	8.80
5000	100	5	15.62
10000	100	0.5	2.43
10000	100	1	2.52
10000	100	1.5	2.61
10000	100	2	2.72
10000	100	2.5	3.08
10000	100	3	6.77
10000	100	3.5	7.92
10000	100	4	9.57
10000	100	5	18.32
100	500	0.5	10.85
100	500	1	10.00
100	500	1.5	9.29
100	500	2	8.58
100	500	2.5	7.40

100	500	3	6.57
100	500	3.5	6.16
100	500	4	5.83
100	500	5	5.31
500	500	0.5	11.88
500	500	1	11.88
500	500	1.5	11.88
500	500	2	11.88
500	500	2.5	11.88
500	500	3	11.89
500	500	3.5	11.88
500	500	4	11.88
500	500	5	11.88
1000	500	0.5	12.02
1000	500	1	12.20
1000	500	1.5	12.40
1000	500	2	12.63
1000	500	2.5	13.19
1000	500	3	14.42
1000	500	3.5	14.99
1000	500	4	15.51
1000	500	5	16.59
5000	500	0.5	12.16
5000	500	1	12.52
5000	500	1.5	12.91
5000	500	2	13.41
5000	500	2.5	14.83
5000	500	3	22.41
5000	500	3.5	25.51
5000	500	4	28.91
5000	500	5	39.30
10000	500	0.5	12.15
10000	500	1	12.56
10000	500	1.5	12.98
10000	500	2	13.51
10000	500	2.5	15.12
10000	500	3	26.64
10000	500	3.5	30.92
10000	500	4	36.09
10000	500	5	55.85

100	1000	0.5	19.88
100	1000	1	17.06
100	1000	1.5	15.10
100	1000	2	13.44
100	1000	2.5	10.72
100	1000	3	9.26
100	1000	3.5	8.54
100	1000	4	7.96
100	1000	5	7.06
500	1000	0.5	23.08
500	1000	1	22.54
500	1000	1.5	22.00
500	1000	2	21.41
500	1000	2.5	20.27
500	1000	3	19.05
500	1000	3.5	18.45
500	1000	4	17.94
500	1000	5	17.08
1000	1000	0.5	23.77
1000	1000	1	23.77
1000	1000	1.5	23.77
1000	1000	2	23.77
1000	1000	2.5	23.77
1000	1000	3	23.78
1000	1000	3.5	23.77
1000	1000	4	23.76
1000	1000	5	23.76
5000	1000	0.5	24.32
5000	1000	1	24.90
5000	1000	1.5	25.57
5000	1000	2	26.41
5000	1000	2.5	28.65
5000	1000	3	37.04
5000	1000	3.5	40.71
5000	1000	4	44.44
5000	1000	5	53.77
10000	1000	0.5	24.31
10000	1000	1	25.03
10000	1000	1.5	25.82
10000	1000	2	26.81

10000	1000	2.5	29.65
10000	1000	3	44.83
10000	1000	3.5	51.03
10000	1000	4	57.83
10000	1000	5	78.60
100	5000	0.5	69.35
100	5000	1	43.50
100	5000	1.5	34.18
100	5000	2	28.09
100	5000	2.5	19.86
100	5000	3	16.71
100	5000	3.5	15.01
100	5000	4	13.68
100	5000	5	11.70
500	5000	0.5	99.40
500	5000	1	85.29
500	5000	1.5	75.50
500	5000	2	67.20
500	5000	2.5	53.58
500	5000	3	46.33
500	5000	3.5	42.72
500	5000	4	39.81
500	5000	5	35.32
1000	5000	0.5	108.53
1000	5000	1	100.03
1000	5000	1.5	92.89
1000	5000	2	85.82
1000	5000	2.5	73.96
1000	5000	3	65.67
1000	5000	3.5	61.64
1000	5000	4	58.33
1000	5000	5	53.06
5000	5000	0.5	118.83
5000	5000	1	118.83
5000	5000	1.5	118.83
5000	5000	2	118.83
5000	5000	2.5	118.84
5000	5000	3	118.88
5000	5000	3.5	118.84
5000	5000	4	118.81

5000	5000	5	118.79
10000	5000	0.5	120.17
10000	5000	1	121.99
10000	5000	1.5	123.96
10000	5000	2	126.32
10000	5000	2.5	131.94
10000	5000	3	144.23
10000	5000	3.5	149.87
10000	5000	4	155.13
10000	5000	5	165.92
100	10000	0.5	113.95
100	10000	1	56.69
100	10000	1.5	42.87
100	10000	2	34.53
100	10000	2.5	24.08
100	10000	3	20.21
100	10000	3.5	18.02
100	10000	4	16.32
100	10000	5	13.82
500	10000	0.5	174.49
500	10000	1	135.21
500	10000	1.5	113.44
500	10000	2	97.15
500	10000	2.5	72.26
500	10000	3	61.52
500	10000	3.5	55.97
500	10000	4	51.58
500	10000	5	44.93
1000	10000	0.5	198.80
1000	10000	1	170.58
1000	10000	1.5	151.00
1000	10000	2	134.41
1000	10000	2.5	107.17
1000	10000	3	92.65
1000	10000	3.5	85.43
1000	10000	4	79.63
1000	10000	5	70.65
5000	10000	0.5	230.84
5000	10000	1	225.42
5000	10000	1.5	220.01



5000	10000	2	214.14
5000	10000	2.5	202.73
5000	10000	3	190.48
5000	10000	3.5	184.53
5000	10000	4	179.44
5000	10000	5	170.82
10000	10000	0.5	237.66
10000	10000	1	237.67
10000	10000	1.5	237.67
10000	10000	2	237.67
10000	10000	2.5	237.69
10000	10000	3	237.75
10000	10000	3.5	237.68
10000	10000	4	237.62
10000	10000	5	237.59

## Αποτελέσματα Γείωσης Ανεμογεννήτριας Β

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι εδαφών, που εξετάζουμε. Τα αποτελέσματα από τις 225 προσομοιώσεις, που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων των δύο στρωμάτων και του βάθους του πρώτου στρώματος για τη γείωση Α/Γ Α, απεικονίζονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2

Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος $\rho_1$	Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος $\rho_2$	Βάθος Πρώτου Στρώματος $h$	Αντίσταση Γείωσης $R$
100	100	0.5	1.32
100	100	1	1.32
100	100	1.5	1.32
100	100	2	1.32
100	100	2.5	1.32
100	100	3	1.32
100	100	3.5	1.32
100	100	4	1.32
100	100	5	1.32
500	100	0.5	1.37

500	100	1	1.80
500	100	1.5	1.88
500	100	2	1.95
500	100	2.5	2.08
500	100	3	2.41
500	100	3.5	2.56
500	100	4	2.70
500	100	5	3.02
1000	100	0.5	1.38
1000	100	1	2.03
1000	100	1.5	2.13
1000	100	2	2.23
1000	100	2.5	2.42
1000	100	3	3.21
1000	100	3.5	3.54
1000	100	4	3.86
1000	100	5	4.67
5000	100	0.5	1.39
5000	100	1	2.38
5000	100	1.5	2.48
5000	100	2	2.59
5000	100	2.5	2.91
5000	100	3	5.53
5000	100	3.5	6.41
5000	100	4	7.49
5000	100	5	11.79
10000	100	0.5	1.38
10000	100	1	2.44
10000	100	1.5	2.54
10000	100	2	2.66
10000	100	2.5	3.00
10000	100	3	6.29
10000	100	3.5	7.37
10000	100	4	8.77
10000	100	5	15.33
100	500	0.5	5.90
100	500	1	4.84
100	500	1.5	4.52
100	500	2	4.27
100	500	2.5	4.03

100	500	3	3.82
100	500	3.5	3.66
100	500	4	3.52
100	500	5	3.30
500	500	0.5	6.58
500	500	1	6.58
500	500	1.5	6.58
500	500	2	6.58
500	500	2.5	6.58
500	500	3	6.58
500	500	3.5	6.58
500	500	4	6.58
500	500	5	6.58
1000	500	0.5	6.72
1000	500	1	7.52
1000	500	1.5	7.70
1000	500	2	7.85
1000	500	2.5	8.06
1000	500	3	8.34
1000	500	3.5	8.58
1000	500	4	8.75
1000	500	5	9.08
5000	500	0.5	6.89
5000	500	1	10.16
5000	500	1.5	10.66
5000	500	2	11.13
5000	500	2.5	12.09
5000	500	3	16.07
5000	500	3.5	17.68
5000	500	4	19.29
5000	500	5	23.36
10000	500	0.5	6.95
10000	500	1	11.10
10000	500	1.5	11.63
10000	500	2	12.16
10000	500	2.5	13.45
10000	500	3	21.05
10000	500	3.5	23.84
10000	500	4	26.86
10000	500	5	36.15

100	1000	0.5	10.85
100	1000	1	8.14
100	1000	1.5	7.33
100	1000	2	6.71
100	1000	2.5	6.17
100	1000	3	5.74
100	1000	3.5	5.42
100	1000	4	5.15
100	1000	5	4.70
500	1000	0.5	12.64
500	1000	1	11.58
500	1000	1.5	11.27
500	1000	2	11.02
500	1000	2.5	10.75
500	1000	3	10.49
500	1000	3.5	10.30
500	1000	4	10.13
500	1000	5	9.83
1000	1000	0.5	13.17
1000	1000	1	13.17
1000	1000	1.5	13.17
1000	1000	2	13.17
1000	1000	2.5	13.17
1000	1000	3	13.17
1000	1000	3.5	13.17
1000	1000	4	13.17
1000	1000	5	13.16
5000	1000	0.5	13.75
5000	1000	1	18.02
5000	1000	1.5	18.85
5000	1000	2	19.55
5000	1000	2.5	20.76
5000	1000	3	24.06
5000	1000	3.5	25.60
5000	1000	4	27.05
5000	1000	5	30.21
10000	1000	0.5	13.77
10000	1000	1	20.31
10000	1000	1.5	21.33
10000	1000	2	22.26

10000	1000	2.5	24.19
10000	1000	3	32.13
10000	1000	3.5	35.36
10000	1000	4	38.57
10000	1000	5	46.73
100	5000	0.5	38.90
100	5000	1	22.03
100	5000	1.5	18.04
100	5000	2	15.48
100	5000	2.5	13.50
100	5000	3	12.10
100	5000	3.5	11.05
100	5000	4	10.18
100	5000	5	8.88
500	5000	0.5	54.25
500	5000	1	40.71
500	5000	1.5	36.65
500	5000	2	33.55
500	5000	2.5	30.84
500	5000	3	28.72
500	5000	3.5	27.11
500	5000	4	25.74
500	5000	5	23.50
1000	5000	0.5	58.99
1000	5000	1	48.38
1000	5000	1.5	45.18
1000	5000	2	42.70
1000	5000	2.5	40.28
1000	5000	3	38.23
1000	5000	3.5	36.57
1000	5000	4	35.24
1000	5000	5	33.00
5000	5000	0.5	65.83
5000	5000	1	65.84
5000	5000	1.5	65.83
5000	5000	2	65.83
5000	5000	2.5	65.84
5000	5000	3	65.83
5000	5000	3.5	65.85
5000	5000	4	65.84

5000	5000	5	65.82
10000	5000	0.5	67.23
10000	5000	1	75.19
10000	5000	1.5	77.04
10000	5000	2	78.54
10000	5000	2.5	80.59
10000	5000	3	83.38
10000	5000	3.5	85.80
10000	5000	4	87.51
10000	5000	5	90.83
100	10000	0.5	63.05
100	10000	1	30.47
100	10000	1.5	24.11
100	10000	2	20.23
100	10000	2.5	17.37
100	10000	3	15.37
100	10000	3.5	13.89
100	10000	4	12.70
100	10000	5	10.92
500	10000	0.5	96.60
500	10000	1	65.03
500	10000	1.5	56.23
500	10000	2	50.11
500	10000	2.5	44.84
500	10000	3	41.00
500	10000	3.5	38.10
500	10000	4	35.69
500	10000	5	31.89
1000	10000	0.5	108.49
1000	10000	1	81.41
1000	10000	1.5	73.29
1000	10000	2	67.10
1000	10000	2.5	61.69
1000	10000	3	57.45
1000	10000	3.5	54.22
1000	10000	4	51.48
1000	10000	5	47.01
5000	10000	0.5	126.39
5000	10000	1	115.77
5000	10000	1.5	112.66

5000	10000	2	110.18
5000	10000	2.5	107.53
5000	10000	3	104.88
5000	10000	3.5	103.00
5000	10000	4	101.29
5000	10000	5	98.27
10000	10000	0.5	131.66
10000	10000	1	131.67
10000	10000	1.5	131.66
10000	10000	2	131.66
10000	10000	2.5	131.67
10000	10000	3	131.66
10000	10000	3.5	131.69
10000	10000	4	131.67
10000	10000	5	131.63

### Αποτελέσματα Γείωσης Ανεμογεννήτριας Γ

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι εδαφών, που εξετάζουμε. Τα αποτελέσματα από τις 225 προσομοιώσεις, που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων των δύο στρωμάτων και του βάθους του πρώτου στρώματος για τη γείωση Α/Γ Α, απεικονίζονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3

Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος $\rho_1$	Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος $\rho_2$	Βάθος Πρώτου Στρώματος $h$	Αντίσταση Γείωσης $R$
100	100	0.5	1.61
100	100	1	1.61
100	100	1.5	1.61
100	100	2	1.61
100	100	2.5	1.61
100	100	3	1.61
100	100	3.5	1.61
100	100	4	1.61
100	100	5	1.61
500	100	0.5	1.68

500	100	1	2.08
500	100	1.5	2.16
500	100	2	2.24
500	100	2.5	2.39
500	100	3	2.88
500	100	3.5	3.09
500	100	4	3.30
500	100	5	3.78
1000	100	0.5	1.68
1000	100	1	2.25
1000	100	1.5	2.34
1000	100	2	2.43
1000	100	2.5	2.66
1000	100	3	3.77
1000	100	3.5	4.14
1000	100	4	4.58
1000	100	5	5.78
5000	100	0.5	1.70
5000	100	1	2.45
5000	100	1.5	2.54
5000	100	2	2.66
5000	100	2.5	2.99
5000	100	3	5.88
5000	100	3.5	6.81
5000	100	4	8.05
5000	100	5	13.38
10000	100	0.5	1.69
10000	100	1	2.48
10000	100	1.5	2.57
10000	100	2	2.69
10000	100	2.5	3.04
10000	100	3	6.52
10000	100	3.5	7.59
10000	100	4	9.11
10000	100	5	16.65
100	500	0.5	7.16
100	500	1	5.76
100	500	1.5	5.36
100	500	2	5.05
100	500	2.5	4.70



100	500	3	4.39
100	500	3.5	4.21
100	500	4	4.04
100	500	5	3.77
500	500	0.5	8.03
500	500	1	8.03
500	500	1.5	8.03
500	500	2	8.03
500	500	2.5	8.03
500	500	3	8.03
500	500	3.5	8.03
500	500	4	8.03
500	500	5	8.03
1000	500	0.5	8.20
1000	500	1	9.06
1000	500	1.5	9.27
1000	500	2	9.44
1000	500	2.5	9.74
1000	500	3	10.27
1000	500	3.5	10.54
1000	500	4	10.80
1000	500	5	11.29
5000	500	0.5	8.40
5000	500	1	11.24
5000	500	1.5	11.70
5000	500	2	12.17
5000	500	2.5	13.32
5000	500	3	18.61
5000	500	3.5	20.70
5000	500	4	22.90
5000	500	5	28.89
10000	500	0.5	8.47
10000	500	1	11.81
10000	500	1.5	12.29
10000	500	2	12.82
10000	500	2.5	14.25
10000	500	3	23.47
10000	500	3.5	26.76
10000	500	4	30.59
10000	500	5	43.41

100	1000	0.5	13.13
100	1000	1	9.52
100	1000	1.5	8.52
100	1000	2	7.77
100	1000	2.5	7.01
100	1000	3	6.45
100	1000	3.5	6.07
100	1000	4	5.75
100	1000	5	5.24
500	1000	0.5	15.40
500	1000	1	14.05
500	1000	1.5	13.66
500	1000	2	13.34
500	1000	2.5	12.95
500	1000	3	12.54
500	1000	3.5	12.28
500	1000	4	12.06
500	1000	5	11.66
1000	1000	0.5	16.06
1000	1000	1	16.06
1000	1000	1.5	16.05
1000	1000	2	16.05
1000	1000	2.5	16.06
1000	1000	3	16.06
1000	1000	3.5	16.05
1000	1000	4	16.05
1000	1000	5	16.05
5000	1000	0.5	16.76
5000	1000	1	20.83
5000	1000	1.5	21.62
5000	1000	2	22.38
5000	1000	2.5	23.94
5000	1000	3	28.80
5000	1000	3.5	30.94
5000	1000	4	33.04
5000	1000	5	37.82
10000	1000	0.5	16.80
10000	1000	1	22.48
10000	1000	1.5	23.39
10000	1000	2	24.35

10000	1000	2.5	26.65
10000	1000	3	37.73
10000	1000	3.5	41.39
10000	1000	4	45.80
10000	1000	5	57.78
100	5000	0.5	46.91
100	5000	1	24.65
100	5000	1.5	20.05
100	5000	2	17.15
100	5000	2.5	14.61
100	5000	3	12.99
100	5000	3.5	11.85
100	5000	4	10.91
100	5000	5	9.51
500	5000	0.5	65.65
500	5000	1	47.62
500	5000	1.5	42.62
500	5000	2	38.85
500	5000	2.5	35.03
500	5000	3	32.26
500	5000	3.5	30.36
500	5000	4	28.77
500	5000	5	26.19
1000	5000	0.5	71.62
1000	5000	1	57.64
1000	5000	1.5	53.60
1000	5000	2	50.48
1000	5000	2.5	46.96
1000	5000	3	43.94
1000	5000	3.5	42.06
1000	5000	4	40.43
1000	5000	5	37.72
5000	5000	0.5	80.27
5000	5000	1	80.28
5000	5000	1.5	80.26
5000	5000	2	80.26
5000	5000	2.5	80.27
5000	5000	3	80.27
5000	5000	3.5	80.26
5000	5000	4	80.26

5000	5000	5	80.25
10000	5000	0.5	82.01
10000	5000	1	90.64
10000	5000	1.5	92.66
10000	5000	2	94.45
10000	5000	2.5	97.38
10000	5000	3	102.71
10000	5000	3.5	105.44
10000	5000	4	107.97
10000	5000	5	112.94
100	10000	0.5	76.70
100	10000	1	33.56
100	10000	1.5	26.37
100	10000	2	22.04
100	10000	2.5	18.53
100	10000	3	16.30
100	10000	3.5	14.71
100	10000	4	13.45
100	10000	5	11.56
500	10000	0.5	116.55
500	10000	1	74.68
500	10000	1.5	64.13
500	10000	2	56.72
500	10000	2.5	49.74
500	10000	3	45.04
500	10000	3.5	41.77
500	10000	4	39.06
500	10000	5	34.82
1000	10000	0.5	131.31
1000	10000	1	95.25
1000	10000	1.5	85.25
1000	10000	2	77.70
1000	10000	2.5	70.06
1000	10000	3	64.52
1000	10000	3.5	60.73
1000	10000	4	57.53
1000	10000	5	52.39
5000	10000	0.5	154.00
5000	10000	1	140.52
5000	10000	1.5	136.59

5000	10000	2	133.42
5000	10000	2.5	129.49
5000	10000	3	125.40
5000	10000	3.5	122.85
5000	10000	4	120.58
5000	10000	5	116.62
10000	10000	0.5	160.55
10000	10000	1	160.58
10000	10000	1.5	160.53
10000	10000	2	160.54
10000	10000	2.5	160.56
10000	10000	3	160.55
10000	10000	3.5	160.54
10000	10000	4	160.53
10000	10000	5	160.52

## 7.5 Επιλύτης *MALT*<sup>[91]</sup>

Ο επιλύτης *MALT* είναι ιδανικός για την ανάλυση συστημάτων γείωσης μικρής ηλεκτρικής ισχύος. Εφαρμόζεται σε συστήματα χαμηλής συχνότητας.

Μπορεί, παράλληλα, να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση δυναμικού και ρεύματος σε κοντινές δομές με θαμμένες μεταλικές κατασκευές.

Ο *MALT* προϋποθέτει, ότι οι αγωγοί και οι μεταλλικές πλάκες, που αποτελούν μέρος του ίδιου ηλεκτροδίου (όπως το κύριο σύστημα γείωσης), έχουν το ίδιο δυναμικό και λαμβάνουν επαγωγικά αποτελέσματα ή πιθανές πτώσεις τάσης.

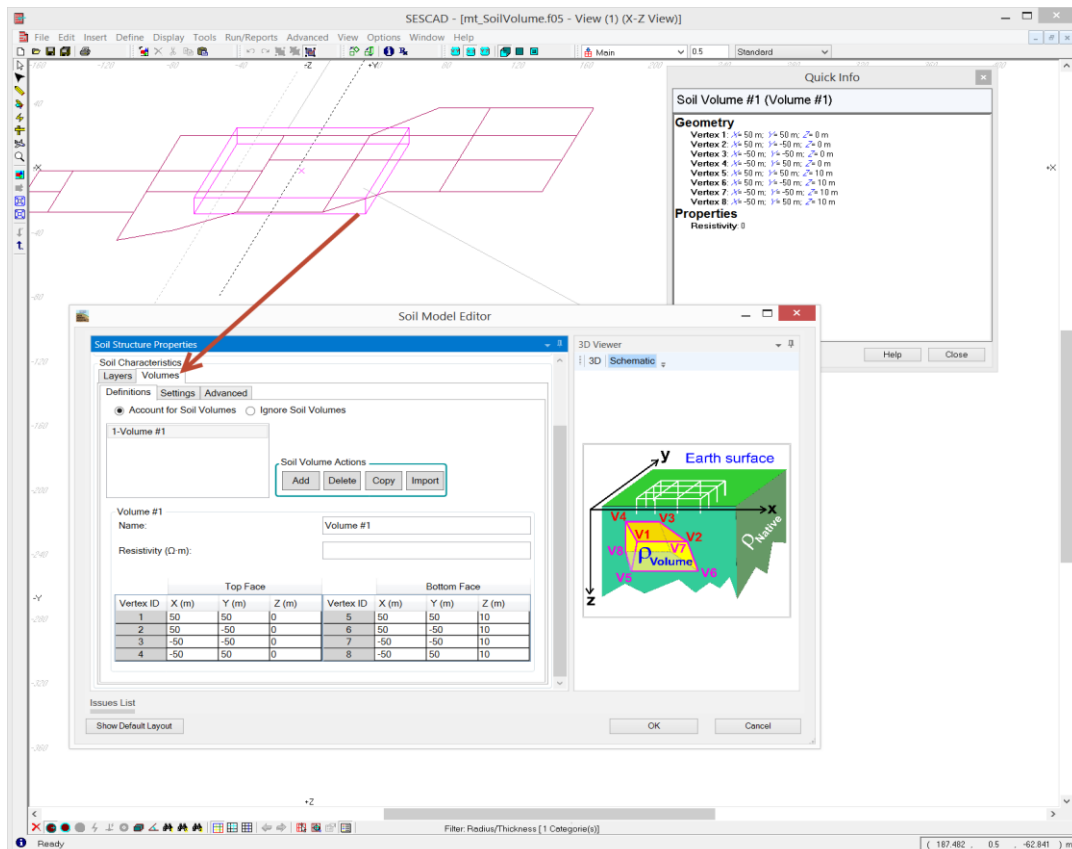
### Κυρίαρχα χαρακτηριστικά Επιλύτη *MALT*

- Διαθεσιμότητα πολλαπλών μοντέλων εδάφους με ένα, δύο ή περισσότερα στρώματα (οριζόντια ή κατακόρυφα), καθώς και δομές εδάφους με πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως σφαιρικά εδάφη, κυλινδρικά εδάφη, κεκλιμένα εδάφη και εδάφη με πεπερασμένους όγκους διαφόρων ειδικών αντιστάσεων (Σχήμα 7.8).
- Δυνατότητα καθορισμού του αριθμού ηλεκτροδίων.
- Ξεχωριστή φόρτιση ηλεκτροδίων ανάλογα με το επιθυμητό δυναμικό ή ρεύμα.
- Με τη χρήση της μεθόδου *fall-of-potential* δίνεται η δυνατότητα μέτρησης της αντίστασης εδάφους σε ανομοιόμορφο έδαφος.

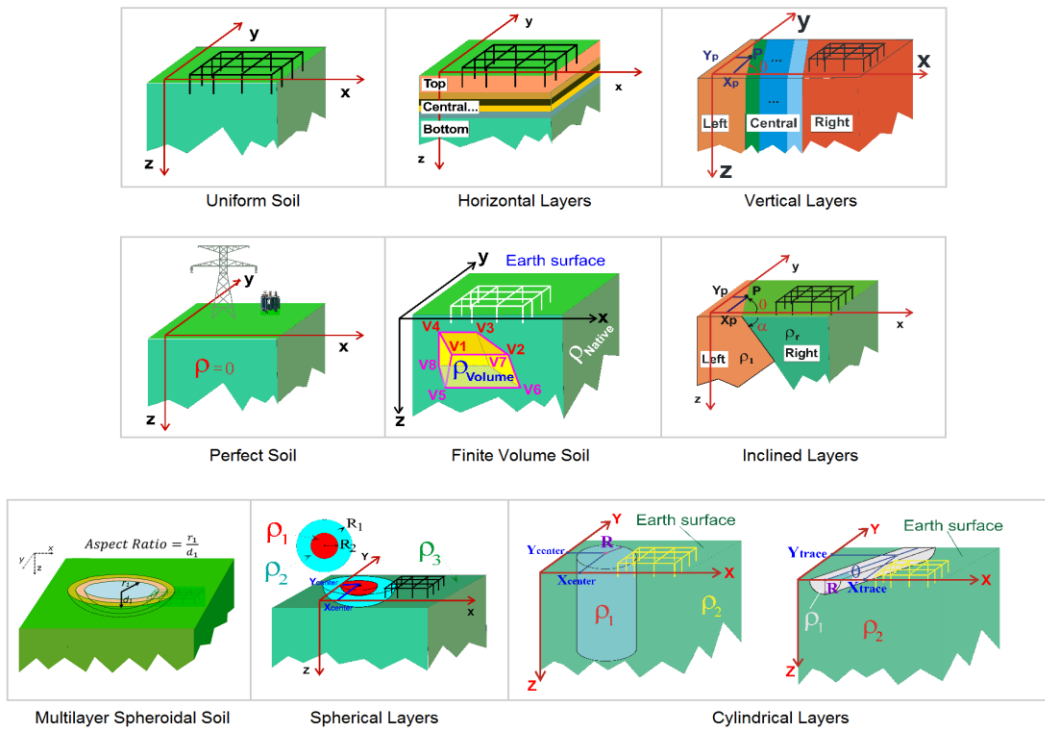
- Διεξαγωγή ηλεκτροστατικής μελέτης, που περιλαμβάνει μεταλλικούς αγωγούς ή πλάκες πάνω από ένα τέλειο επίπεδο γείωσης, προαιρετικά υπό την παρουσία εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.

## Τεχνικά χαρακτηριστικά Επιλύτη *MALT*

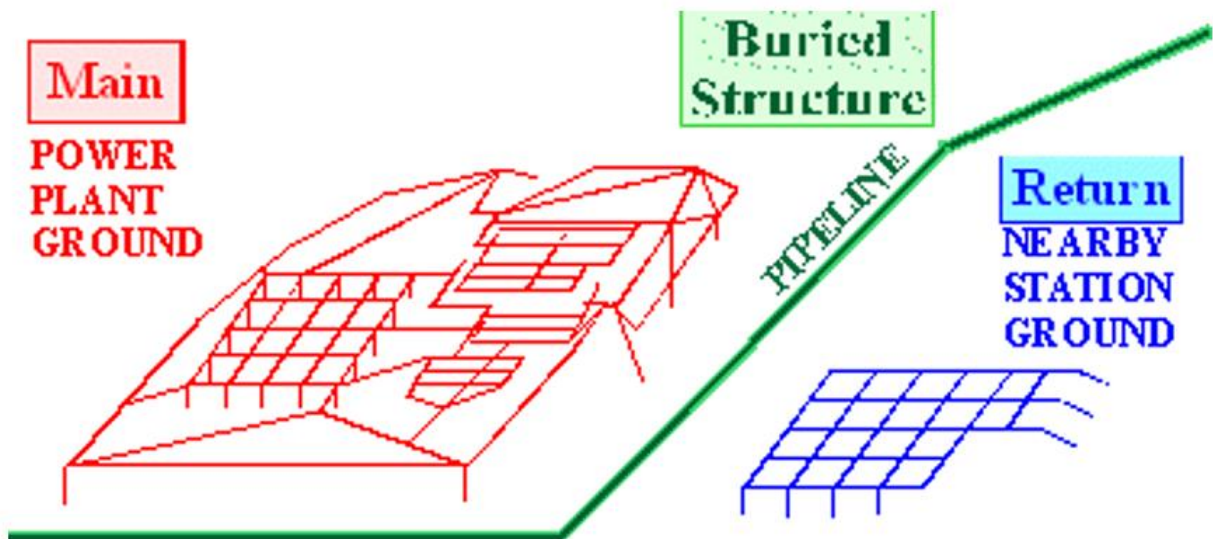
- Τα συστήματα μοντελοποιούνται ως ένα δίκτυο κυλινδρικών αγωγών χωρίς απώλειες και μεταλλικών πλακών ελεύθερης κατεύθυνσης.
- Οριζόντια εδάφη, κατακόρυφα εδάφη και σφαιρικά εδάφη μπορούν να έχουν διαφορετικά στρώματα. Ταυτόχρονα κεκλιμένα στρώματα και κυλινδρικά στρώματα με οποιαδήποτε τιμή αντίστασης μπορούν να ενσωματωθούν στο φυσικό έδαφος.
- Υπολογισμός της αύξησης δυναμικού γείωσης κάθε ανεξάρτητου συστήματος γείωσης του ρεύματος διαρροής γείωσης σε κάθε τμήμα του αγωγού, καθώς και του δυναμικού ηλεκτρικού πεδίου και της πυκνότητας ρεύματος σε συγκεκριμένο σημείο στο έδαφος ή στην επιφάνεια της γης.
- Τα συστήματα γείωσης ενδέχεται να είναι οποιαδήποτε μεταλλική δομή. Κάθε δομή μπορεί να φορτισθεί ή όχι και να παρουσιάσει πιθανές αυξήσεις δυναμικού που διαφέρουν μεταξύ τους.



Σχήμα 7.5: Περιβάλλον Εργασίας Επιλύτη *MALT* [91]



**Σχήμα 7.6:** Παραδείγματα Εδαφών με Πολλαπλά Στρώματα και Πολύπλοκες Γεωμετρίες [91]



**Σχήμα 7.7:** Μοντελοποίηση Μεταλλικών Δομών [91]

## 7.6 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με Επιλύτη *MALT*

Όπως είδαμε, στη μελέτη μας θα ασχοληθούμε με τέσσερις τύπους γείωσης Α/Γ. Για κάθε τύπο, το έδαφος, στο οποίο θα γίνει η μελέτη θεωρείται διστρωματικό. Έτσι, προκύπτουν οι ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  του πρώτου και του δεύτερου στρώματος αντίστοιχα, καθώς και το βάθος του πρώτου στρώματος  $h$ , που εδώ όμως θα πάρουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\rho_1 = 100, 500, 1000, 5000, 10000$$

$$\rho_2 = 100, 500, 1000, 5000, 10000$$

$$h = 1, 2, 3, 4, 5$$

Η διαφορά με τους τρεις προηγούμενους τύπους γείωσης Α/Γ είναι, ότι τώρα χρησιμοποιήσαμε ένα μοντέλο γείωσης, στο οποίο πήραμε μετρήσεις για διαφορετικές τιμές του εμβαδού του (συγκεκριμένα 15 μετρήσεις διαφορετικών εμβαδών). Παράλληλα, υπολογίστηκαν οι τιμές του συνολικού θαμμένου μήκους του κύριου ηλεκτροδίου, που όπως θα δούμε από τις ακόλουθες μετρήσεις επηρεάζεται από το εμβαδόν και φυσικά η τιμή της αντίστασης γείωσης, που διαφέρει ανάλογα με τις τιμές ειδικής αντίστασης στρωμάτων, το βάθος του πρώτου στρώματος και φυσικά το εμβαδόν της γείωσης.

Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι για κάθε εμβαδό της γείωσης Α/Γ  $\Delta$  θα πραγματοποιηθούν  $5 \cdot 5 \cdot 5 = 125$  προσομοιώσεις, μιας και τα παραπάνω μεγέθη θα συνδυασθούν με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Ωστόσο, μιας και οι μετρήσεις έγιναν για 15 διαφορετικά εμβαδά της ίδιας γείωσης, οι συνολικές προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκαν είναι  $125 \cdot 15 = 1125$ .

### Αποτελέσματα Γείωσης Ανεμογεννήτριας $\Delta$

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι εδαφών, που εξετάζουμε. Τα αποτελέσματα από τις 1125 προσομοιώσεις, που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων των δύο στρωμάτων του βάθους του πρώτου στρώματος, και τα διαφορετικά εμβαδά για τη γείωση Α/Γ  $\Delta$  απεικονίζονται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4

Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος $\rho_1$	Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος $\rho_2$	Βάθος Πρώτου Στρώματος $h$	Εμβαδό Γείωσης $E$	Συνολικό Μήκος Ηλεκτροδίου Γείωσης $l$	Αντίσταση Γείωσης $R$
100	100	1	1339	504.29	1.2807
100	100	2	1339	504.29	1.2807
100	100	3	1339	504.29	1.2807
100	100	4	1339	504.29	1.2806



100	100	5	1339	504.29	1.2807
500	100	1	1339	504.29	1.7252
500	100	2	1339	504.29	1.8746
500	100	3	1339	504.29	2.3819
500	100	4	1339	504.29	2.7402
500	100	5	1339	504.29	3.0274
1000	100	1	1339	504.29	1.9406
1000	100	2	1339	504.29	2.1287
1000	100	3	1339	504.29	3.3646
1000	100	4	1339	504.29	4.2692
1000	100	5	1339	504.29	5.0194
5000	100	1	1339	504.29	2.2753
5000	100	2	1339	504.29	2.4779
5000	100	3	1339	504.29	7.9696
5000	100	4	1339	504.29	13.633
5000	100	5	1339	504.29	20.709
10000	100	1	1339	504.29	2.3387
10000	100	2	1339	504.29	2.5383
10000	100	3	1339	504.29	10.65
10000	100	4	1339	504.29	21.254
10000	100	5	1339	504.29	40.276
100	500	1	1339	504.29	4.7585
100	500	2	1339	504.29	4.1991
100	500	3	1339	504.29	3.7595
100	500	4	1339	504.29	3.4615
100	500	5	1339	504.29	3.2417
500	500	1	1339	504.29	6.4036
500	500	2	1339	504.29	6.4037
500	500	3	1339	504.29	6.4035
500	500	4	1339	504.29	6.4032
500	500	5	1339	504.29	6.4036
1000	500	1	1339	504.29	7.2572
1000	500	2	1339	504.29	7.5871
1000	500	3	1339	504.29	8.1409
1000	500	4	1339	504.29	8.5306
1000	500	5	1339	504.29	8.8456
5000	500	1	1339	504.29	9.7028
5000	500	2	1339	504.29	10.644
5000	500	3	1339	504.29	16.823
5000	500	4	1339	504.29	21.346
5000	500	5	1339	504.29	25.097
10000	500	1	1339	504.29	10.604
10000	500	2	1339	504.29	11.617
10000	500	3	1339	504.29	24.602
10000	500	4	1339	504.29	35.094
10000	500	5	1339	504.29	44.782

100	1000	1	1339	504.29	8.0175
100	1000	2	1339	504.29	6.6108
100	1000	3	1339	504.29	5.6668
100	1000	4	1339	504.29	5.0736
100	1000	5	1339	504.29	4.6338
500	1000	1	1339	504.29	11.332
500	1000	2	1339	504.29	10.782
500	1000	3	1339	504.29	10.253
500	1000	4	1339	504.29	9.8895
500	1000	5	1339	504.29	9.5984
1000	1000	1	1339	504.29	12.807
1000	1000	2	1339	504.29	12.807
1000	1000	3	1339	504.29	12.807
1000	1000	4	1339	504.29	12.806
1000	1000	5	1339	504.29	12.807
5000	1000	1	1339	504.29	17.252
5000	1000	2	1339	504.29	18.746
5000	1000	3	1339	504.29	23.819
5000	1000	4	1339	504.29	27.402
5000	1000	5	1339	504.29	30.274
10000	1000	1	1339	504.29	19.406
10000	1000	2	1339	504.29	21.287
10000	1000	3	1339	504.29	33.646
10000	1000	4	1339	504.29	42.692
10000	1000	5	1339	504.29	50.194
100	100	1	1354	505.79	1.2746
100	100	2	1354	505.79	1.2746
100	100	3	1354	505.79	1.2746
100	100	4	1354	505.79	1.2746
100	100	5	1354	505.79	1.2746
500	100	1	1354	505.79	1.7196
500	100	2	1354	505.79	1.8689
500	100	3	1354	505.79	2.3727
500	100	4	1354	505.79	2.7283
500	100	5	1354	505.79	3.0132
1000	100	1	1354	505.79	1.9361
1000	100	2	1354	505.79	2.1243
1000	100	3	1354	505.79	3.3535
1000	100	4	1354	505.79	4.2518
1000	100	5	1354	505.79	4.9961
5000	100	1	1354	505.79	2.2738
5000	100	2	1354	505.79	2.4765
5000	100	3	1354	505.79	7.9543
5000	100	4	1354	505.79	13.592
5000	100	5	1354	505.79	20.615
10000	100	1	1354	505.79	2.3378

10000	100	2	1354	505.79	2.5375
10000	100	3	1354	505.79	10.636
10000	100	4	1354	505.79	21.201
10000	100	5	1354	505.79	40.094
100	500	1	1354	505.79	4.7352
100	500	2	1354	505.79	4.1794
100	500	3	1354	505.79	3.7433
100	500	4	1354	505.79	3.4471
100	500	5	1354	505.79	3.2288
500	500	1	1354	505.79	6.3732
500	500	2	1354	505.79	6.3732
500	500	3	1354	505.79	6.373
500	500	4	1354	505.79	6.3728
500	500	5	1354	505.79	6.3732
1000	500	1	1354	505.79	7.226
1000	500	2	1354	505.79	7.5548
1000	500	3	1354	505.79	8.1042
1000	500	4	1354	505.79	8.4908
1000	500	5	1354	505.79	8.8031
5000	500	1	1354	505.79	9.6804
5000	500	2	1354	505.79	10.621
5000	500	3	1354	505.79	16.767
5000	500	4	1354	505.79	21.259
5000	500	5	1354	505.79	24.98
10000	500	1	1354	505.79	10.589
10000	500	2	1354	505.79	11.602
10000	500	3	1354	505.79	24.535
10000	500	4	1354	505.79	34.963
10000	500	5	1354	505.79	44.577
100	1000	1	1354	505.79	7.9807
100	1000	2	1354	505.79	6.5829
100	1000	3	1354	505.79	5.6444
100	1000	4	1354	505.79	5.0552
100	1000	5	1354	505.79	4.6177
500	1000	1	1354	505.79	11.276
500	1000	2	1354	505.79	10.729
500	1000	3	1354	505.79	10.204
500	1000	4	1354	505.79	9.8437
500	1000	5	1354	505.79	9.5548
1000	1000	1	1354	505.79	12.746
1000	1000	2	1354	505.79	12.746
1000	1000	3	1354	505.79	12.746
1000	1000	4	1354	505.79	12.746
1000	1000	5	1354	505.79	12.746
5000	1000	1	1354	505.79	17.196
5000	1000	2	1354	505.79	18.689

5000	1000	3	1354	505.79	23.727
5000	1000	4	1354	505.79	27.283
5000	1000	5	1354	505.79	30.132
10000	1000	1	1354	505.79	19.361
10000	1000	2	1354	505.79	21.243
10000	1000	3	1354	505.79	33.535
10000	1000	4	1354	505.79	42.518
10000	1000	5	1354	505.79	49.961
100	100	1	1369	507.29	1.2686
100	100	2	1369	507.29	1.2686
100	100	3	1369	507.29	1.2686
100	100	4	1369	507.29	1.2685
100	100	5	1369	507.29	1.2686
500	100	1	1369	507.29	1.741
500	100	2	1369	507.29	1.8632
500	100	3	1369	507.29	2.3636
500	100	4	1369	507.29	2.7164
500	100	5	1369	507.29	2.999
1000	100	1	1369	507.29	1.9316
1000	100	2	1369	507.29	2.1199
1000	100	3	1369	507.29	3.3425
1000	100	4	1369	507.29	4.2346
1000	100	5	1369	507.29	4.9731
5000	100	1	1369	507.29	2.2722
5000	100	2	1369	507.29	2.4751
5000	100	3	1369	507.29	7.9391
5000	100	4	1369	507.29	13.549
5000	100	5	1369	507.29	20.522
10000	100	1	1369	507.29	2.337
10000	100	2	1369	507.29	2.5368
10000	100	3	1369	507.29	10.622
10000	100	4	1369	507.29	21.15
10000	100	5	1369	507.29	39.914
100	500	1	1369	507.29	4.7123
100	500	2	1369	507.29	4.1602
100	500	3	1369	507.29	3.7272
100	500	4	1369	507.29	3.4329
100	500	5	1369	507.29	3.216
500	500	1	1369	507.29	6.343
500	500	2	1369	507.29	6.343
500	500	3	1369	507.29	6.3428
500	500	4	1369	507.29	6.3426
500	500	5	1369	507.29	6.343
1000	500	1	1369	507.29	7.1951
1000	500	2	1369	507.29	7.5229
1000	500	3	1369	507.29	8.0677

1000	500	4	1369	507.29	8.4512
1000	500	5	1369	507.29	8.761
5000	500	1	1369	507.29	9.6581
5000	500	2	1369	507.29	10.6
5000	500	3	1369	507.29	16.712
5000	500	4	1369	507.29	21.173
5000	500	5	1369	507.29	24.865
10000	500	1	1369	507.29	10.573
10000	500	2	1369	507.29	11.588
10000	500	3	1369	507.29	24.469
10000	500	4	1369	507.29	34.837
10000	500	5	1369	507.29	44.375
100	1000	1	1369	507.29	7.9442
100	1000	2	1369	507.29	6.5553
100	1000	3	1369	507.29	5.623
100	1000	4	1369	507.29	5.0371
100	1000	5	1369	507.29	4.6018
500	1000	1	1369	507.29	11.221
500	1000	2	1369	507.29	10.677
500	1000	3	1369	507.29	10.156
500	1000	4	1369	507.29	9.7985
500	1000	5	1369	507.29	9.5118
1000	1000	1	1369	507.29	12.686
1000	1000	2	1369	507.29	12.686
1000	1000	3	1369	507.29	12.686
1000	1000	4	1369	507.29	12.685
1000	1000	5	1369	507.29	12.686
5000	1000	1	1369	507.29	17.14
5000	1000	2	1369	507.29	18.632
5000	1000	3	1369	507.29	23.636
5000	1000	4	1369	507.29	27.164
5000	1000	5	1369	507.29	29.99
10000	1000	1	1369	507.29	19.316
10000	1000	2	1369	507.29	21.199
10000	1000	3	1369	507.29	33.425
10000	1000	4	1369	507.29	42.346
10000	1000	5	1369	507.29	49.731
100	100	1	1384	508.79	1.2626
100	100	2	1384	508.79	1.2626
100	100	3	1384	508.79	1.2626
100	100	4	1384	508.79	1.2625
100	100	5	1384	508.79	1.2626
500	100	1	1384	508.79	1.7084
500	100	2	1384	508.79	1.8575
500	100	3	1384	508.79	2.3545
500	100	4	1384	508.79	2.7048

500	100	5	1384	508.79	2.9851
1000	100	1	1384	508.79	1.9272
1000	100	2	1384	508.79	2.1155
1000	100	3	1384	508.79	3.3315
1000	100	4	1384	508.79	4.2179
1000	100	5	1384	508.79	4.9504
5000	100	1	1384	508.79	2.2707
5000	100	2	1384	508.79	2.4737
5000	100	3	1384	508.79	7.9239
5000	100	4	1384	508.79	13.507
5000	100	5	1384	508.79	20.43
10000	100	1	1384	508.79	2.3361
10000	100	2	1384	508.79	2.536
10000	100	3	1384	508.79	10.608
10000	100	4	1384	508.79	21.097
10000	100	5	1384	508.79	39.737
100	500	1	1384	508.79	4.6896
100	500	2	1384	508.79	4.1411
100	500	3	1384	508.79	3.7113
100	500	4	1384	508.79	3.4189
100	500	5	1384	508.79	3.2033
500	500	1	1384	508.79	6.3132
500	500	2	1384	508.79	6.3132
500	500	3	1384	508.79	6.313
500	500	4	1384	508.79	6.3127
500	500	5	1384	508.79	6.3132
1000	500	1	1384	508.79	7.1646
1000	500	2	1384	508.79	7.4914
1000	500	3	1384	508.79	8.0322
1000	500	4	1384	508.79	8.4122
1000	500	5	1384	508.79	8.7196
5000	500	1	1384	508.79	9.6359
5000	500	2	1384	508.79	10.578
5000	500	3	1384	508.79	16.659
5000	500	4	1384	508.79	21.09
5000	500	5	1384	508.79	24.752
10000	500	1	1384	508.79	10.558
10000	500	2	1384	508.79	11.573
10000	500	3	1384	508.79	24.402
10000	500	4	1384	508.79	34.708
10000	500	5	1384	508.79	44.175
100	1000	1	1384	508.79	7.9083
100	1000	2	1384	508.79	6.5281
100	1000	3	1384	508.79	5.6019
100	1000	4	1384	508.79	5.0191
100	1000	5	1384	508.79	4.586

500	1000	1	1384	508.79	11.166
500	1000	2	1384	508.79	10.625
500	1000	3	1384	508.79	10.109
500	1000	4	1384	508.79	9.7537
500	1000	5	1384	508.79	9.4691
1000	1000	1	1384	508.79	12.626
1000	1000	2	1384	508.79	12.626
1000	1000	3	1384	508.79	12.626
1000	1000	4	1384	508.79	12.625
1000	1000	5	1384	508.79	12.626
5000	1000	1	1384	508.79	17.084
5000	1000	2	1384	508.79	18.575
5000	1000	3	1384	508.79	23.545
5000	1000	4	1384	508.79	27.048
5000	1000	5	1384	508.79	29.851
10000	1000	1	1384	508.79	19.272
10000	1000	2	1384	508.79	21.155
10000	1000	3	1384	508.79	33.315
10000	1000	4	1384	508.79	42.179
10000	1000	5	1384	508.79	49.504
100	100	1	1399	510.29	1.2567
100	100	2	1399	510.29	1.2567
100	100	3	1399	510.29	1.2567
100	100	4	1399	510.29	1.2566
100	100	5	1399	510.29	1.2567
500	100	1	1399	510.29	1.7029
500	100	2	1399	510.29	1.8518
500	100	3	1399	510.29	2.3455
500	100	4	1399	510.29	2.6932
500	100	5	1399	510.29	2.9713
1000	100	1	1399	510.29	1.9228
1000	100	2	1399	510.29	2.1112
1000	100	3	1399	510.29	3.3207
1000	100	4	1399	510.29	4.201
1000	100	5	1399	510.29	4.9279
5000	100	1	1399	510.29	2.2691
5000	100	2	1399	510.29	2.4723
5000	100	3	1399	510.29	7.9088
5000	100	4	1399	510.29	13.466
5000	100	5	1399	510.29	20.339
10000	100	1	1399	510.29	2.3353
10000	100	2	1399	510.29	2.5353
10000	100	3	1399	510.29	10.594
10000	100	4	1399	510.29	21.045
10000	100	5	1399	510.29	39.56
100	500	1	1399	510.29	4.6672

100	500	2	1399	510.29	4.1223
100	500	3	1399	510.29	3.6956
100	500	4	1399	510.29	3.405
100	500	5	1399	510.29	3.1908
500	500	1	1399	510.29	6.2837
500	500	2	1399	510.29	6.2837
500	500	3	1399	510.29	6.2835
500	500	4	1399	510.29	6.2832
500	500	5	1399	510.29	6.2837
1000	500	1	1399	510.29	7.1343
1000	500	2	1399	510.29	7.4601
1000	500	3	1399	510.29	7.9967
1000	500	4	1399	510.29	8.3736
1000	500	5	1399	510.29	8.6785
5000	500	1	1399	510.29	9.6139
5000	500	2	1399	510.29	10.556
5000	500	3	1399	510.29	16.603
5000	500	4	1399	510.29	21.005
5000	500	5	1399	510.29	24.64
10000	500	1	1399	510.29	10.543
10000	500	2	1399	510.29	11.559
10000	500	3	1399	510.29	24.337
10000	500	4	1399	510.29	34.581
10000	500	5	1399	510.29	43.977
100	1000	1	1399	510.29	7.8728
100	1000	2	1399	510.29	6.5011
100	1000	3	1399	510.29	5.5808
100	1000	4	1399	510.29	5.0013
100	1000	5	1399	510.29	4.5698
500	1000	1	1399	510.29	11.111
500	1000	2	1399	510.29	10.574
500	1000	3	1399	510.29	10.062
500	1000	4	1399	510.29	9.7094
500	1000	5	1399	510.29	9.4269
1000	1000	1	1399	510.29	12.567
1000	1000	2	1399	510.29	12.567
1000	1000	3	1399	510.29	12.567
1000	1000	4	1399	510.29	12.566
1000	1000	5	1399	510.29	12.567
5000	1000	1	1399	510.29	17.029
5000	1000	2	1399	510.29	18.518
5000	1000	3	1399	510.29	23.455
5000	1000	4	1399	510.29	26.932
5000	1000	5	1399	510.29	29.714
10000	1000	1	1399	510.29	19.228
10000	1000	2	1399	510.29	21.112



10000	1000	3	1399	510.29	33.207
10000	1000	4	1399	510.29	42.01
10000	1000	5	1399	510.29	49.279
100	100	1	1414	511.79	1.2509
100	100	2	1414	511.79	1.2509
100	100	3	1414	511.79	1.2509
100	100	4	1414	511.79	1.2508
100	100	5	1414	511.79	1.2509
500	100	1	1414	511.79	1.6974
500	100	2	1414	511.79	1.8462
500	100	3	1414	511.79	2.3365
500	100	4	1414	511.79	2.6816
500	100	5	1414	511.79	2.9576
1000	100	1	1414	511.79	1.9184
1000	100	2	1414	511.79	2.1068
1000	100	3	1414	511.79	3.3098
1000	100	4	1414	511.79	4.1842
1000	100	5	1414	511.79	4.9055
5000	100	1	1414	511.79	2.2676
5000	100	2	1414	511.79	2.4709
5000	100	3	1414	511.79	7.8937
5000	100	4	1414	511.79	13.424
5000	100	5	1414	511.79	20.249
10000	100	1	1414	511.79	2.3344
10000	100	2	1414	511.79	2.5345
10000	100	3	1414	511.79	10.58
10000	100	4	1414	511.79	20.993
10000	100	5	1414	511.79	39.985
100	500	1	1414	511.79	4.6449
100	500	2	1414	511.79	4.1036
100	500	3	1414	511.79	3.6801
100	500	4	1414	511.79	3.3912
100	500	5	1414	511.79	3.1784
500	500	1	1414	511.79	6.2545
500	500	2	1414	511.79	6.2544
500	500	3	1414	511.79	6.2543
500	500	4	1414	511.79	6.254
500	500	5	1414	511.79	6.2545
1000	500	1	1414	511.79	7.1041
1000	500	2	1414	511.79	7.429
1000	500	3	1414	511.79	7.9613
1000	500	4	1414	511.79	8.3352
1000	500	5	1414	511.79	8.6377
5000	500	1	1414	511.79	9.5918
5000	500	2	1414	511.79	10.534
5000	500	3	1414	511.79	16.549

5000	500	4	1414	511.79	20.921
5000	500	5	1414	511.79	24.528
10000	500	1	1414	511.79	10.528
10000	500	2	1414	511.79	11.544
10000	500	3	1414	511.79	24.271
10000	500	4	1414	511.79	34.454
10000	500	5	1414	511.79	43.78
100	1000	1	1414	511.79	7.8376
100	1000	2	1414	511.79	6.4742
100	1000	3	1414	511.79	5.5599
100	1000	4	1414	511.79	4.9836
100	1000	5	1414	511.79	4.5543
500	1000	1	1414	511.79	11.057
500	1000	2	1414	511.79	10.523
500	1000	3	1414	511.79	10.016
500	1000	4	1414	511.79	9.6655
500	1000	5	1414	511.79	9.3851
1000	1000	1	1414	511.79	12.509
1000	1000	2	1414	511.79	12.509
1000	1000	3	1414	511.79	12.509
1000	1000	4	1414	511.79	12.508
1000	1000	5	1414	511.79	12.509
5000	1000	1	1414	511.79	16.974
5000	1000	2	1414	511.79	18.462
5000	1000	3	1414	511.79	23.365
5000	1000	4	1414	511.79	26.816
5000	1000	5	1414	511.79	29.576
10000	1000	1	1414	511.79	19.184
10000	1000	2	1414	511.79	21.068
10000	1000	3	1414	511.79	33.098
10000	1000	4	1414	511.79	41.842
10000	1000	5	1414	511.79	49.055
100	100	1	1429	513.29	1.2451
100	100	2	1429	513.29	1.2451
100	100	3	1429	513.29	1.2451
100	100	4	1429	513.29	1.245
100	100	5	1429	513.29	1.2451
500	100	1	1429	513.29	1.692
500	100	2	1429	513.29	1.0506
500	100	3	1429	513.29	1.1971
500	100	4	1429	513.29	1.2941
500	100	5	1429	513.29	1.3689
1000	100	1	1429	513.29	1.9139
1000	100	2	1429	513.29	2.1025
1000	100	3	1429	513.29	3.2992
1000	100	4	1429	513.29	4.1677

1000	100	5	1429	513.29	4.8833
5000	100	1	1429	513.29	2.266
5000	100	2	1429	513.29	2.4695
5000	100	3	1429	513.29	7.8789
5000	100	4	1429	513.29	13.383
5000	100	5	1429	513.29	20.159
10000	100	1	1429	513.29	2.3336
10000	100	2	1429	513.29	2.5338
10000	100	3	1429	513.29	10.566
10000	100	4	1429	513.29	20.941
10000	100	5	1429	513.29	39.211
100	500	1	1429	513.29	4.6229
100	500	2	1429	513.29	4.0852
100	500	3	1429	513.29	3.6648
100	500	4	1429	513.29	3.3774
100	500	5	1429	513.29	3.166
500	500	1	1429	513.29	6.2256
500	500	2	1429	513.29	6.2256
500	500	3	1429	513.29	6.2254
500	500	4	1429	513.29	6.2252
500	500	5	1429	513.29	6.2256
1000	500	1	1429	513.29	7.0743
1000	500	2	1429	513.29	7.3982
1000	500	3	1429	513.29	7.9263
1000	500	4	1429	513.29	8.2973
1000	500	5	1429	513.29	8.597
5000	500	1	1429	513.29	9.5697
5000	500	2	1429	513.29	10.513
5000	500	3	1429	513.29	16.496
5000	500	4	1429	513.29	20.838
5000	500	5	1429	513.29	24.416
10000	500	1	1429	513.29	10.512
10000	500	2	1429	513.29	11.53
10000	500	3	1429	513.29	24.207
10000	500	4	1429	513.29	34.329
10000	500	5	1429	513.29	43.584
100	1000	1	1429	513.29	7.8029
100	1000	2	1429	513.29	6.4476
100	1000	3	1429	513.29	5.5393
100	1000	4	1429	513.29	4.9658
100	1000	5	1429	513.29	4.5395
500	1000	1	1429	513.29	11.004
500	1000	2	1429	513.29	10.473
500	1000	3	1429	513.29	9.9696
500	1000	4	1429	513.29	9.6223
500	1000	5	1429	513.29	9.3438

1000	1000	1	1429	513.29	12.451
1000	1000	2	1429	513.29	12.451
1000	1000	3	1429	513.29	12.451
1000	1000	4	1429	513.29	12.45
1000	1000	5	1429	513.29	12.451
5000	1000	1	1429	513.29	16.92
5000	1000	2	1429	513.29	18.406
5000	1000	3	1429	513.29	23.277
5000	1000	4	1429	513.29	26.704
5000	1000	5	1429	513.29	29.44
10000	1000	1	1429	513.29	19.139
10000	1000	2	1429	513.29	21.025
10000	1000	3	1429	513.29	32.992
10000	1000	4	1429	513.29	41.677
10000	1000	5	1429	513.29	48.833
100	100	1	1444	514.79	1.2394
100	100	2	1444	514.79	1.2394
100	100	3	1444	514.79	1.2394
100	100	4	1444	514.79	1.2393
100	100	5	1444	514.79	1.2394
500	100	1	1444	514.79	1.6865
500	100	2	1444	514.79	1.8351
500	100	3	1444	514.79	2.3189
500	100	4	1444	514.79	2.6591
500	100	5	1444	514.79	2.9306
1000	100	1	1444	514.79	1.9095
1000	100	2	1444	514.79	2.0982
1000	100	3	1444	514.79	3.2885
1000	100	4	1444	514.79	4.1512
1000	100	5	1444	514.79	4.8614
5000	100	1	1444	514.79	2.2644
5000	100	2	1444	514.79	2.4681
5000	100	3	1444	514.79	7.864
5000	100	4	1444	514.79	13.342
5000	100	5	1444	514.79	20.071
10000	100	1	1444	514.79	2.3327
10000	100	2	1444	514.79	2.533
10000	100	3	1444	514.79	10.552
10000	100	4	1444	514.79	20.89
10000	100	5	1444	514.79	39.039
100	500	1	1444	514.79	4.6013
100	500	2	1444	514.79	4.067
100	500	3	1444	514.79	3.6495
100	500	4	1444	514.79	3.364
100	500	5	1444	514.79	3.1538
500	500	1	1444	514.79	6.1969

500	500	2	1444	514.79	6.1969
500	500	3	1444	514.79	6.1968
500	500	4	1444	514.79	6.1965
500	500	5	1444	514.79	6.1969
1000	500	1	1444	514.79	7.0448
1000	500	2	1444	514.79	7.3677
1000	500	3	1444	514.79	7.892
1000	500	4	1444	514.79	8.2598
1000	500	5	1444	514.79	8.5571
5000	500	1	1444	514.79	9.5477
5000	500	2	1444	514.79	10.491
5000	500	3	1444	514.79	16.443
5000	500	4	1444	514.79	20.756
5000	500	5	1444	514.79	24.307
10000	500	1	1444	514.79	10.497
10000	500	2	1444	514.79	11.516
10000	500	3	1444	514.79	24.142
10000	500	4	1444	514.79	34.204
10000	500	5	1444	514.79	43.391
100	1000	1	1444	514.79	7.7685
100	1000	2	1444	514.79	6.4215
100	1000	3	1444	514.79	5.5188
100	1000	4	1444	514.79	4.9485
100	1000	5	1444	514.79	4.5243
500	1000	1	1444	514.79	10.952
500	1000	2	1444	514.79	10.424
500	1000	3	1444	514.79	9.9242
500	1000	4	1444	514.79	9.5794
500	1000	5	1444	514.79	9.3026
1000	1000	1	1444	514.79	12.394
1000	1000	2	1444	514.79	12.394
1000	1000	3	1444	514.79	12.394
1000	1000	4	1444	514.79	12.393
1000	1000	5	1444	514.79	12.394
5000	1000	1	1444	514.79	16.865
5000	1000	2	1444	514.79	18.351
5000	1000	3	1444	514.79	23.189
5000	1000	4	1444	514.79	26.591
5000	1000	5	1444	514.79	29.306
10000	1000	1	1444	514.79	19.095
10000	1000	2	1444	514.79	20.982
10000	1000	3	1444	514.79	32.885
10000	1000	4	1444	514.79	41.512
10000	1000	5	1444	514.79	48.614
100	100	1	1459	516.29	1.2337
100	100	2	1459	516.29	1.2337

100	100	3	1459	516.29	1.2337
100	100	4	1459	516.29	1.2336
100	100	5	1459	516.29	1.2337
500	100	1	1459	516.29	1.6811
500	100	2	1459	516.29	1.8295
500	100	3	1459	516.29	2.3102
500	100	4	1459	516.29	2.6479
500	100	5	1459	516.29	2.9173
1000	100	1	1459	516.29	1.9052
1000	100	2	1459	516.29	2.0939
1000	100	3	1459	516.29	3.2779
1000	100	4	1459	516.29	4.1348
1000	100	5	1459	516.29	4.8397
5000	100	1	1459	516.29	2.2629
5000	100	2	1459	516.29	2.4667
5000	100	3	1459	516.29	7.8491
5000	100	4	1459	516.29	13.3
5000	100	5	1459	516.29	19.983
10000	100	1	1459	516.29	2.3319
10000	100	2	1459	516.29	2.5322
10000	100	3	1459	516.29	10.538
10000	100	4	1459	516.29	20.836
10000	100	5	1459	516.29	38.869
100	500	1	1459	516.29	4.5799
100	500	2	1459	516.29	4.0489
100	500	3	1459	516.29	3.6345
100	500	4	1459	516.29	3.3506
100	500	5	1459	516.29	3.1417
500	500	1	1459	516.29	6.1686
500	500	2	1459	516.29	6.1685
500	500	3	1459	516.29	6.1684
500	500	4	1459	516.29	6.1681
500	500	5	1459	516.29	6.1686
1000	500	1	1459	516.29	7.0155
1000	500	2	1459	516.29	7.3373
1000	500	3	1459	516.29	7.8576
1000	500	4	1459	516.29	8.2225
1000	500	5	1459	516.29	8.5176
5000	500	1	1459	516.29	9.5259
5000	500	2	1459	516.29	10.469
5000	500	3	1459	516.29	16.389
5000	500	4	1459	516.29	20.674
5000	500	5	1459	516.29	24.199
10000	500	1	1459	516.29	10.482
10000	500	2	1459	516.29	11.501
10000	500	3	1459	516.29	24.078

10000	500	4	1459	516.29	34.08
10000	500	5	1459	516.29	43.199
100	1000	1	1459	516.29	7.7345
100	1000	2	1459	516.29	6.3961
100	1000	3	1459	516.29	5.4985
100	1000	4	1459	516.29	4.9313
100	1000	5	1459	516.29	4.5092
500	1000	1	1459	516.29	10.9
500	1000	2	1459	516.29	10.375
500	1000	3	1459	516.29	9.8792
500	1000	4	1459	516.29	9.5367
500	1000	5	1459	516.29	9.2621
1000	1000	1	1459	516.29	12.337
1000	1000	2	1459	516.29	12.337
1000	1000	3	1459	516.29	12.337
1000	1000	4	1459	516.29	12.336
1000	1000	5	1459	516.29	12.337
5000	1000	1	1459	516.29	16.811
5000	1000	2	1459	516.29	18.295
5000	1000	3	1459	516.29	23.102
5000	1000	4	1459	516.29	26.479
5000	1000	5	1459	516.29	29.173
10000	1000	1	1459	516.29	19.052
10000	1000	2	1459	516.29	20.939
10000	1000	3	1459	516.29	32.779
10000	1000	4	1459	516.29	41.348
10000	1000	5	1459	516.29	48.397
100	100	1	1489	519.29	1.2226
100	100	2	1489	519.29	1.2226
100	100	3	1489	519.29	1.2225
100	100	4	1489	519.29	1.2225
100	100	5	1489	519.29	1.2226
500	100	1	1489	519.29	1.6704
500	100	2	1489	519.29	1.8186
500	100	3	1489	519.29	2.2929
500	100	4	1489	519.29	2.6258
500	100	5	1489	519.29	2.8911
1000	100	1	1489	519.29	1.8965
1000	100	2	1489	519.29	2.0853
1000	100	3	1489	519.29	3.2569
1000	100	4	1489	519.29	4.1025
1000	100	5	1489	519.29	4.7969
5000	100	1	1489	519.29	2.2598
5000	100	2	1489	519.29	2.4639
5000	100	3	1489	519.29	7.8196
5000	100	4	1489	519.29	13.219

5000	100	5	1489	519.29	19.812
10000	100	1	1489	519.29	2.3302
10000	100	2	1489	519.29	2.5308
10000	100	3	1489	519.29	10.51
10000	100	4	1489	519.29	20.735
10000	100	5	1489	519.29	38.538
100	500	1	1489	519.29	4.5376
100	500	2	1489	519.29	4.0135
100	500	3	1489	519.29	3.6047
100	500	4	1489	519.29	3.3244
100	500	5	1489	519.29	3.1178
500	500	1	1489	519.29	6.1129
500	500	2	1489	519.29	6.1129
500	500	3	1489	519.29	6.1127
500	500	4	1489	519.29	6.1125
500	500	5	1489	519.29	6.1129
1000	500	1	1489	519.29	6.9577
1000	500	2	1489	519.29	7.2776
1000	500	3	1489	519.29	7.7898
1000	500	4	1489	519.29	8.1492
1000	500	5	1489	519.29	8.4399
5000	500	1	1489	519.29	9.4826
5000	500	2	1489	519.29	10.427
5000	500	3	1489	519.29	16.285
5000	500	4	1489	519.29	20.513
5000	500	5	1489	519.29	23.985
10000	500	1	1489	519.29	10.452
10000	500	2	1489	519.29	11.473
10000	500	3	1489	519.29	23.951
10000	500	4	1489	519.29	33.832
10000	500	5	1489	519.29	42.828
100	1000	1	1489	519.29	7.6675
100	1000	2	1489	519.29	6.3452
100	1000	3	1489	519.29	5.4583
100	1000	4	1489	519.29	4.8971
100	1000	5	1489	519.29	4.4795
500	1000	1	1489	519.29	10.798
500	1000	2	1489	519.29	10.279
500	1000	3	1489	519.29	9.7906
500	1000	4	1489	519.29	9.4531
500	1000	5	1489	519.29	9.1823
1000	1000	1	1489	519.29	12.226
1000	1000	2	1489	519.29	12.226
1000	1000	3	1489	519.29	12.226
1000	1000	4	1489	519.29	12.225
1000	1000	5	1489	519.29	12.226



5000	1000	1	1489	519.29	16.704
5000	1000	2	1489	519.29	18.186
5000	1000	3	1489	519.29	22.929
5000	1000	4	1489	519.29	26.258
5000	1000	5	1489	519.29	28.911
10000	1000	1	1489	519.29	18.965
10000	1000	2	1489	519.29	20.853
10000	1000	3	1489	519.29	32.569
10000	1000	4	1489	519.29	41.025
10000	1000	5	1489	519.29	47.969
100	100	1	1534	522.29	1.2111
100	100	2	1534	522.29	1.2111
100	100	3	1534	522.29	1.211
100	100	4	1534	522.29	1.211
100	100	5	1534	522.29	1.2111
500	100	1	1534	522.29	1.66
500	100	2	1534	522.29	1.8079
500	100	3	1534	522.29	2.2758
500	100	4	1534	522.29	2.6035
500	100	5	1534	522.29	2.8643
1000	100	1	1534	522.29	1.8882
1000	100	2	1534	522.29	2.0772
1000	100	3	1534	522.29	3.2361
1000	100	4	1534	522.29	4.0701
1000	100	5	1534	522.29	4.7538
5000	100	1	1534	522.29	2.2568
5000	100	2	1534	522.29	2.4612
5000	100	3	1534	522.29	7.7902
5000	100	4	1534	522.29	13.139
5000	100	5	1534	522.29	19.636
10000	100	1	1534	522.29	2.3285
10000	100	2	1534	522.29	2.5293
10000	100	3	1534	522.29	10.483
10000	100	4	1534	522.29	20.633
10000	100	5	1534	522.29	38.197
100	500	1	1534	522.29	4.4924
100	500	2	1534	522.29	3.9753
100	500	3	1534	522.29	3.5737
100	500	4	1534	522.29	3.2973
100	500	5	1534	522.29	3.0937
500	500	1	1534	522.29	6.0554
500	500	2	1534	522.29	6.0554
500	500	3	1534	522.29	6.0552
500	500	4	1534	522.29	6.055
500	500	5	1534	522.29	6.0554
1000	500	1	1534	522.29	6.8998

1000	500	2	1534	522.29	7.2177
1000	500	3	1534	522.29	7.7213
1000	500	4	1534	522.29	8.0748
1000	500	5	1534	522.29	8.3597
5000	500	1	1534	522.29	9.4409
5000	500	2	1534	522.29	10.386
5000	500	3	1534	522.29	16.181
5000	500	4	1534	522.29	20.35
5000	500	5	1534	522.29	23.769
10000	500	1	1534	522.29	10.423
10000	500	2	1534	522.29	11.446
10000	500	3	1534	522.29	23.824
10000	500	4	1534	522.29	33.586
10000	500	5	1534	522.29	42.444
100	1000	1	1534	522.29	7.5949
100	1000	2	1534	522.29	6.2898
100	1000	3	1534	522.29	5.417
100	1000	4	1534	522.29	4.8623
100	1000	5	1534	522.29	4.4502
500	1000	1	1534	522.29	10.691
500	1000	2	1534	522.29	10.178
500	1000	3	1534	522.29	9.6983
500	1000	4	1534	522.29	9.3667
500	1000	5	1534	522.29	9.1002
1000	1000	1	1534	522.29	12.111
1000	1000	2	1534	522.29	12.111
1000	1000	3	1534	522.29	12.11
1000	1000	4	1534	522.29	12.11
1000	1000	5	1534	522.29	12.111
5000	1000	1	1534	522.29	16.6
5000	1000	2	1534	522.29	18.079
5000	1000	3	1534	522.29	22.758
5000	1000	4	1534	522.29	26.035
5000	1000	5	1534	522.29	28.643
10000	1000	1	1534	522.29	18.882
10000	1000	2	1534	522.29	20.772
10000	1000	3	1534	522.29	32.361
10000	1000	4	1534	522.29	40.701
10000	1000	5	1534	522.29	47.538
100	100	1	1556.5	523.79	1.2054
100	100	2	1556.5	523.79	1.2054
100	100	3	1556.5	523.79	1.2054
100	100	4	1556.5	523.79	1.2053
100	100	5	1556.5	523.79	1.2054
500	100	1	1556.5	523.79	1.6548
500	100	2	1556.5	523.79	1.8027

500	100	3	1556.5	523.79	2.2673
500	100	4	1556.5	523.79	2.5925
500	100	5	1556.5	523.79	2.8514
1000	100	1	1556.5	523.79	1.884
1000	100	2	1556.5	523.79	2.0731
1000	100	3	1556.5	523.79	3.2258
1000	100	4	1556.5	523.79	4.0537
1000	100	5	1556.5	523.79	4.7324
5000	100	1	1556.5	523.79	2.2553
5000	100	2	1556.5	523.79	2.4599
5000	100	3	1556.5	523.79	7.7755
5000	100	4	1556.5	523.79	13.099
5000	100	5	1556.5	523.79	19.55
10000	100	1	1556.5	523.79	2.3277
10000	100	2	1556.5	523.79	2.5286
10000	100	3	1556.5	523.79	10.469
10000	100	4	1556.5	523.79	20.582
10000	100	5	1556.5	523.79	38.029
100	500	1	1556.5	523.79	4.4701
100	500	2	1556.5	523.79	3.9566
100	500	3	1556.5	523.79	3.5584
100	500	4	1556.5	523.79	3.2839
100	500	5	1556.5	523.79	3.0817
500	500	1	1556.5	523.79	6.0271
500	500	2	1556.5	523.79	6.0271
500	500	3	1556.5	523.79	6.0269
500	500	4	1556.5	523.79	6.0267
500	500	5	1556.5	523.79	6.0271
1000	500	1	1556.5	523.79	6.8712
1000	500	2	1556.5	523.79	7.1881
1000	500	3	1556.5	523.79	7.6875
1000	500	4	1556.5	523.79	8.0381
1000	500	5	1556.5	523.79	8.3205
5000	500	1	1556.5	523.79	9.4201
5000	500	2	1556.5	523.79	10.365
5000	500	3	1556.5	523.79	16.129
5000	500	4	1556.5	523.79	20.269
5000	500	5	1556.5	523.79	23.662
10000	500	1	1556.5	523.79	10.408
10000	500	2	1556.5	523.79	11.432
10000	500	3	1556.5	523.79	23.761
10000	500	4	1556.5	523.79	33.465
10000	500	5	1556.5	523.79	42.255
100	1000	1	1556.5	523.79	7.5592
100	1000	2	1556.5	523.79	6.2628
100	1000	3	1556.5	523.79	5.3966

100	1000	4	1556.5	523.79	4.8453
100	1000	5	1556.5	523.79	4.4355
500	1000	1	1556.5	523.79	10.638
500	1000	2	1556.5	523.79	10.128
500	1000	3	1556.5	523.79	9.6527
500	1000	4	1556.5	523.79	9.324
500	1000	5	1556.5	523.79	9.0598
1000	1000	1	1556.5	523.79	12.054
1000	1000	2	1556.5	523.79	12.054
1000	1000	3	1556.5	523.79	12.054
1000	1000	4	1556.5	523.79	12.053
1000	1000	5	1556.5	523.79	12.054
5000	1000	1	1556.5	523.79	16.548
5000	1000	2	1556.5	523.79	18.027
5000	1000	3	1556.5	523.79	22.673
5000	1000	4	1556.5	523.79	25.925
5000	1000	5	1556.5	523.79	28.514
10000	1000	1	1556.5	523.79	18.84
10000	1000	2	1556.5	523.79	20.731
10000	1000	3	1556.5	523.79	32.258
10000	1000	4	1556.5	523.79	40.537
10000	1000	5	1556.5	523.79	47.324
100	100	1	1601.5	526.79	1.1947
100	100	2	1601.5	526.79	1.1947
100	100	3	1601.5	526.79	1.1947
100	100	4	1601.5	526.79	1.1946
100	100	5	1601.5	526.79	1.1947
500	100	1	1601.5	526.79	1.645
500	100	2	1601.5	526.79	1.7926
500	100	3	1601.5	526.79	2.2506
500	100	4	1601.5	526.79	2.5704
500	100	5	1601.5	526.79	2.8247
1000	100	1	1601.5	526.79	1.8762
1000	100	2	1601.5	526.79	2.0653
1000	100	3	1601.5	526.79	3.2053
1000	100	4	1601.5	526.79	4.0208
1000	100	5	1601.5	526.79	4.6878
5000	100	1	1601.5	526.79	2.2525
5000	100	2	1601.5	526.79	2.4574
5000	100	3	1601.5	526.79	7.7457
5000	100	4	1601.5	526.79	13.013
5000	100	5	1601.5	526.79	19.365
10000	100	1	1601.5	526.79	2.3262
10000	100	2	1601.5	526.79	2.5273
10000	100	3	1601.5	526.79	10.441
10000	100	4	1601.5	526.79	20.473

10000	100	5	1601.5	526.79	37.669
100	500	1	1601.5	526.79	4.4278
100	500	2	1601.5	526.79	3.9211
100	500	3	1601.5	526.79	3.5302
100	500	4	1601.5	526.79	3.2595
100	500	5	1601.5	526.79	3.0599
500	500	1	1601.5	526.79	5.9735
500	500	2	1601.5	526.79	5.9735
500	500	3	1601.5	526.79	5.9733
500	500	4	1601.5	526.79	5.9731
500	500	5	1601.5	526.79	5.9735
1000	500	1	1601.5	526.79	6.8169
1000	500	2	1601.5	526.79	7.132
1000	500	3	1601.5	526.79	7.6224
1000	500	4	1601.5	526.79	7.9665
1000	500	5	1601.5	526.79	8.2437
5000	500	1	1601.5	526.79	9.3809
5000	500	2	1601.5	526.79	10.326
5000	500	3	1601.5	526.79	16.026
5000	500	4	1601.5	526.79	20.104
5000	500	5	1601.5	526.79	23.439
10000	500	1	1601.5	526.79	10.381
10000	500	2	1601.5	526.79	11.406
10000	500	3	1601.5	526.79	23.634
10000	500	4	1601.5	526.79	33.211
10000	500	5	1601.5	526.79	41.856
100	1000	1	1601.5	526.79	7.4908
100	1000	2	1601.5	526.79	6.2307
100	1000	3	1601.5	526.79	5.3592
100	1000	4	1601.5	526.79	4.8144
100	1000	5	1601.5	526.79	4.4089
500	1000	1	1601.5	526.79	10.537
500	1000	2	1601.5	526.79	10.033
500	1000	3	1601.5	526.79	9.5674
500	1000	4	1601.5	526.79	9.2443
500	1000	5	1601.5	526.79	8.9846
1000	1000	1	1601.5	526.79	11.947
1000	1000	2	1601.5	526.79	11.947
1000	1000	3	1601.5	526.79	11.947
1000	1000	4	1601.5	526.79	11.946
1000	1000	5	1601.5	526.79	11.947
5000	1000	1	1601.5	526.79	16.45
5000	1000	2	1601.5	526.79	17.926
5000	1000	3	1601.5	526.79	22.506
5000	1000	4	1601.5	526.79	25.704
5000	1000	5	1601.5	526.79	28.247

10000	1000	1	526	526.79	18.762
10000	1000	2	1601.5	526.79	20.653
10000	1000	3	1601.5	526.79	32.053
10000	1000	4	1601.5	526.79	40.208
10000	1000	5	1601.5	526.79	46.878
100	100	1	1624	528.29	1.1896
100	100	2	1624	528.29	1.1895
100	100	3	1624	528.29	1.1895
100	100	4	1624	528.29	1.1895
100	100	5	1624	528.29	1.1896
500	100	1	1624	528.29	1.6404
500	100	2	1624	528.29	1.7878
500	100	3	1624	528.29	2.2424
500	100	4	1624	528.29	2.5592
500	100	5	1624	528.29	2.8111
1000	100	1	1624	528.29	1.8725
1000	100	2	1624	528.29	2.0615
1000	100	3	1624	528.29	3.195
1000	100	4	1624	528.29	4.0039
1000	100	5	1624	528.29	4.6647
5000	100	1	1624	528.29	2.2512
5000	100	2	1624	528.29	2.4561
5000	100	3	1624	528.29	7.7306
5000	100	4	1624	528.29	12.969
5000	100	5	1624	528.29	19.267
10000	100	1	1624	528.29	2.3255
10000	100	2	1624	528.29	2.5266
10000	100	3	1624	528.29	10.427
10000	100	4	1624	528.29	20.416
10000	100	5	1624	528.29	37.478
100	500	1	1624	528.29	4.4075
100	500	2	1624	528.29	3.9041
100	500	3	1624	528.29	3.5169
100	500	4	1624	528.29	3.2482
100	500	5	1624	528.29	3.0499
500	500	1	1624	528.29	5.9478
500	500	2	1624	528.29	5.9477
500	500	3	1624	528.29	5.9477
500	500	4	1624	528.29	5.9474
500	500	5	1624	528.29	5.9478
1000	500	1	1624	528.29	6.7909
1000	500	2	1624	528.29	7.105
1000	500	3	1624	528.29	7.5907
1000	500	4	1624	528.29	7.9315
1000	500	5	1624	528.29	8.206
5000	500	1	1624	528.29	9.3623

5000	500	2	1624	528.29	10.308
5000	500	3	1624	528.29	15.975
5000	500	4	1624	528.29	20.019
5000	500	5	1624	528.29	23.324
10000	500	1	1624	528.29	10.368
10000	500	2	1624	528.29	11.394
10000	500	3	1624	528.29	23.571
10000	500	4	1624	528.29	33.079
10000	500	5	1624	528.29	41.647
100	1000	1	1624	528.29	7.4584
100	1000	2	1624	528.29	6.2062
100	1000	3	1624	528.29	5.3418
100	1000	4	1624	528.29	4.8006
100	1000	5	1624	528.29	4.3967
500	1000	1	1624	528.29	10.488
500	1000	2	1624	528.29	9.9881
500	1000	3	1624	528.29	9.5269
500	1000	4	1624	528.29	9.2068
500	1000	5	1624	528.29	8.9493
1000	1000	1	1624	528.29	11.896
1000	1000	2	1624	528.29	11.896
1000	1000	3	1624	528.29	11.895
1000	1000	4	1624	528.29	11.895
1000	1000	5	1624	528.29	11.896
5000	1000	1	1624	528.29	16.404
5000	1000	2	1624	528.29	17.878
5000	1000	3	1624	528.29	22.424
5000	1000	4	1624	528.29	25.592
5000	1000	5	1624	528.29	28.111
10000	1000	1	1624	528.29	18.725
10000	1000	2	1624	528.29	20.615
10000	1000	3	1624	528.29	31.95
10000	1000	4	1624	528.29	40.039
10000	1000	5	1624	528.29	46.647
100	100	1	1657	531.29	1.179
100	100	2	1657	531.29	1.179
100	100	3	1657	531.29	1.179
100	100	4	1657	531.29	1.179
100	100	5	1657	531.29	1.179
500	100	1	1657	531.29	1.6299
500	100	2	1657	531.29	1.7771
500	100	3	1657	531.29	2.2258
500	100	4	1657	531.29	2.5382
500	100	5	1657	531.29	2.7864
1000	100	1	1657	531.29	1.8638
1000	100	2	1657	531.29	2.053

1000	100	3	1657	531.29	3.1747
1000	100	4	1657	531.29	3.973
1000	100	5	1657	531.29	4.6243
5000	100	1	1657	531.29	2.248
5000	100	2	1657	531.29	2.4533
5000	100	3	1657	531.29	7.6997
5000	100	4	1657	531.29	12.891
5000	100	5	1657	531.29	19.103
10000	100	1	1657	531.29	2.3237
10000	100	2	1657	531.29	2.525
10000	100	3	1657	531.29	10.399
10000	100	4	1657	531.29	20.317
10000	100	5	1657	531.29	37.16
100	500	1	1657	531.29	4.3682
100	500	2	1657	531.29	3.871
100	500	3	1657	531.29	3.4889
100	500	4	1657	531.29	3.2233
100	500	5	1657	531.29	3.0273
500	500	1	1657	531.29	5.8952
500	500	2	1657	531.29	5.8952
500	500	3	1657	531.29	5.8951
500	500	4	1657	531.29	5.8948
500	500	5	1657	531.29	5.8952
1000	500	1	1657	531.29	6.7359
1000	500	2	1657	531.29	7.0484
1000	500	3	1657	531.29	7.5266
1000	500	4	1657	531.29	7.8624
1000	500	5	1657	531.29	8.1328
5000	500	1	1657	531.29	9.3189
5000	500	2	1657	531.29	10.265
5000	500	3	1657	531.29	15.874
5000	500	4	1657	531.29	19.865
5000	500	5	1657	531.29	23.121
10000	500	1	1657	531.29	10.337
10000	500	2	1657	531.29	11.365
10000	500	3	1657	531.29	23.446
10000	500	4	1657	531.29	32.845
10000	500	5	1657	531.29	41.29
100	1000	1	1657	531.29	7.3957
100	1000	2	1657	531.29	6.1582
100	1000	3	1657	531.29	5.3044
100	1000	4	1657	531.29	4.7683
100	1000	5	1657	531.29	4.3686
500	1000	1	1657	531.29	10.393
500	1000	2	1657	531.29	9.8978
500	1000	3	1657	531.29	9.4437



500	1000	4	1657	531.29	9.1281
500	1000	5	1657	531.29	8.8739
1000	1000	1	1657	531.29	11.79
1000	1000	2	1657	531.29	11.79
1000	1000	3	1657	531.29	11.79
1000	1000	4	1657	531.29	11.79
1000	1000	5	1657	531.29	11.79
5000	1000	1	1657	531.29	16.299
5000	1000	2	1657	531.29	17.771
5000	1000	3	1657	531.29	22.258
5000	1000	4	1657	531.29	25.382
5000	1000	5	1657	531.29	27.864
10000	1000	1	1657	531.29	18.638
10000	1000	2	1657	531.29	20.53
10000	1000	3	1657	531.29	31.747
10000	1000	4	1657	531.29	39.73
10000	1000	5	1657	531.29	46.243

Πέρα από τις παραπάνω μετρήσεις για το διστρωματικό μοντέλο της γείωσης A/Γ Δ, έγιναν και άλλες 168 μετρήσεις με διαφορετικές τιμές ειδικών αντιστάσεων  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  και διαφορετικού βάθους πρώτου στρώματος  $h$  με στόχο την ακρίβεια της μαθηματικής σχέσης, που βρήκαμε για τη γείωση τύπου Δ. Οι ακόλουθες μετρήσεις είναι:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= 250, 750 \\ \rho_2 &= 1200, 2400, 4800, 7200 \\ h &= 1.5, 2.5, 3.5\end{aligned}$$

Η κυρίαρχη διαφορά με τον παραπάνω πίνακα είναι, ότι πέρα από τις διαφορετικές τιμές, έγιναν μετρήσεις για 7 εμβαδά και όχι 15. Πιο συγκεκριμένα, τα έγιναν μετρήσεις για το 1°, 3°, 5°, 8°, 10°, 13° και 15° εμβαδό. Και σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκαν οι τιμές του συνολικού θαμμένου μήκους του κύριου ηλεκτροδίου, που όπως θα δούμε από τις ακόλουθες μετρήσεις επηρεάζεται από το εμβαδόν, και φυσικά η τιμή της αντίστασης γείωσης, που διαφέρει ανάλογα με τις τιμές ειδικής αντίστασης στρωμάτων, το βάθος του πρώτου στρώματος και φυσικά το εμβαδόν της γείωσης.

Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι τώρα για κάθε εμβαδό της γείωσης A/Γ Δ θα πραγματοποιηθούν  $2 \cdot 4 \cdot 3 = 24$  προσομοιώσεις, μιας και τα παραπάνω μεγέθη θα συνδυασθούν με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Ωστόσο, μιας και οι μετρήσεις έγιναν για 7 διαφορετικά εμβαδά της ίδιας γείωσης, οι συνολικές προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκαν είναι  $24 \cdot 7 = 168$ .

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι εδαφών, που εξετάζουμε. Τα αποτελέσματα από τις 168 προσομοιώσεις, που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων των δύο στρωμάτων, του βάθους του πρώτου στρώματος και τα διαφορετικά εμβαδά για τη γείωση A/Γ Δ, απεικονίζονται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5

Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος $\rho_1$	Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος $\rho_2$	Βάθος Πρώτου Στρώματος $h$	Εμβαδό Γείωσης $E$	Συνολικό Μήκος Ηλεκτροδίου Γείωσης $l$	Αντίσταση Γείωσης $R$
250	1200	1.5	1339	504.29	10.778
250	1200	2.5	1339	504.29	9.6744
250	1200	3.5	1339	504.29	8.7691
250	2400	1.5	1339	504.29	17.517
250	2400	2.5	1339	504.29	14.984
250	2400	3.5	1339	504.29	13.08
250	4800	1.5	1339	504.29	27.085
250	4800	2.5	1339	504.29	21.915
250	4800	3.5	1339	504.29	18.492
250	7200	1.5	1339	504.29	33.925
250	7200	2.5	1339	504.29	26.661
250	7200	3.5	1339	504.29	22.06
750	1200	1.5	1339	504.29	13.903
750	1200	2.5	1339	504.29	13.504
750	1200	3.5	1339	504.29	13.046
750	2400	1.5	1339	504.29	23.837
750	2400	2.5	1339	504.29	22.107
750	2400	3.5	1339	504.29	20.478
750	4800	1.5	1339	504.29	39.758
750	4800	2.5	1339	504.29	35.072
750	4800	3.5	1339	504.29	31.278
750	7200	1.5	1339	504.29	52.553
750	7200	2.5	1339	504.29	44.953
750	7200	3.5	1339	504.29	39.242
250	1200	1.5	1369	507.29	10.676
250	1200	2.5	1369	507.29	9.6222
250	1200	3.5	1369	507.29	8.6945
250	2400	1.5	1369	507.29	17.362
250	2400	2.5	1369	507.29	14.861
250	2400	3.5	1369	507.29	12.983
250	4800	1.5	1369	507.29	26.878
250	4800	2.5	1369	507.29	21.761
250	4800	3.5	1369	507.29	18.372
250	7200	1.5	1369	507.29	33.684
250	7200	2.5	1369	507.29	26.488
250	7200	3.5	1369	507.29	21.932
750	1200	1.5	1369	507.29	13.768
750	1200	2.5	1369	507.29	13.373

750	1200	3.5	1369	507.29	12.923
750	2400	1.5	1369	507.29	23.605
750	2400	2.5	1369	507.29	21.898
750	2400	3.5	1369	507.29	20.299
750	4800	1.5	1369	507.29	39.39
750	4800	2.5	1369	507.29	34.767
750	4800	3.5	1369	507.29	31.026
750	7200	1.5	1369	507.29	52.089
750	7200	2.5	1369	507.29	44.583
750	7200	3.5	1369	507.29	38.951
250	1200	1.5	1399	510.29	10.576
250	1200	2.5	1399	510.29	9.536
250	1200	3.5	1399	510.29	8.6219
250	2400	1.5	1399	510.29	17.212
250	2400	2.5	1399	510.29	14.741
250	2400	3.5	1399	510.29	12.888
250	4800	1.5	1399	510.29	26.672
250	4800	2.5	1399	510.29	21.605
250	4800	3.5	1399	510.29	18.256
250	7200	1.5	1399	510.29	33.443
250	7200	2.5	1399	510.29	26.321
250	7200	3.5	1399	510.29	21.806
750	1200	1.5	1399	510.29	13.635
750	1200	2.5	1399	510.29	13.245
750	1200	3.5	1399	510.29	12.803
750	2400	1.5	1399	510.29	23.377
750	2400	2.5	1399	510.29	21.694
750	2400	3.5	1399	510.29	20.12
750	4800	1.5	1399	510.29	39.029
750	4800	2.5	1399	510.29	34.466
750	4800	3.5	1399	510.29	30.779
750	7200	1.5	1399	510.29	51.637
750	7200	2.5	1399	510.29	44.225
750	7200	3.5	1399	510.29	38.664
250	1200	1.5	1444	514.79	10.43
250	1200	2.5	1444	514.79	9.4101
250	1200	3.5	1444	514.79	8.5157
250	2400	1.5	1444	514.79	16.992
250	2400	2.5	1444	514.79	14.567
250	2400	3.5	1444	514.79	12.747
250	4800	1.5	1444	514.79	26.369
250	4800	2.5	1444	514.79	21.389
250	4800	3.5	1444	514.79	18.086
250	7200	1.5	1444	514.79	33.094
250	7200	2.5	1444	514.79	26.075
250	7200	3.5	1444	514.79	21.621

750	1200	1.5	1444	514.79	13.441
750	1200	2.5	1444	514.79	13.059
750	1200	3.5	1444	514.79	12.627
750	2400	1.5	1444	514.79	23.046
750	2400	2.5	1444	514.79	21.396
750	2400	3.5	1444	514.79	19.859
750	4800	1.5	1444	514.79	38.503
750	4800	2.5	1444	514.79	34.03
750	4800	3.5	1444	514.79	30.417
750	7200	1.5	1444	514.79	50.976
750	7200	2.5	1444	514.79	43.701
750	7200	3.5	1444	514.79	38.242
250	1200	1.5	1489	519.29	10.29
250	1200	2.5	1489	519.29	9.2894
250	1200	3.5	1489	519.29	8.4125
250	2400	1.5	1489	519.29	16.779
250	2400	2.5	1489	519.29	14.398
250	2400	3.5	1489	519.29	12.611
250	4800	1.5	1489	519.29	26.074
250	4800	2.5	1489	519.29	21.169
250	4800	3.5	1489	519.29	17.925
250	7200	1.5	1489	519.29	32.755
250	7200	2.5	1489	519.29	25.837
250	7200	3.5	1489	519.29	21.484
750	1200	1.5	1489	519.29	13.253
750	1200	2.5	1489	519.29	12.879
750	1200	3.5	1489	519.29	12.458
750	2400	1.5	1489	519.29	22.727
750	2400	2.5	1489	519.29	21.109
750	2400	3.5	1489	519.29	12.611
750	4800	1.5	1489	519.29	37.996
750	4800	2.5	1489	519.29	33.609
750	4800	3.5	1489	519.29	30.066
750	7200	1.5	1489	519.29	50.338
750	7200	2.5	1489	519.29	43.194
750	7200	3.5	1489	519.29	37.834
250	1200	1.5	1601.5	526.79	10.046
250	1200	2.5	1601.5	526.79	9.0819
250	1200	3.5	1601.5	526.79	8.2425
250	2400	1.5	1601.5	526.79	16.409
250	2400	2.5	1601.5	526.79	14.108
250	2400	3.5	1601.5	526.79	12.389
250	4800	1.5	1601.5	526.79	25.568
250	4800	2.5	1601.5	526.79	20.804
250	4800	3.5	1601.5	526.79	17.639
250	7200	1.5	1601.5	526.79	32.175

250	7200	2.5	1601.5	526.79	25.432
250	7200	3.5	1601.5	526.79	21.199
750	1200	1.5	1601.5	526.79	12.937
750	1200	2.5	1601.5	526.79	12.575
750	1200	3.5	1601.5	526.79	12.175
750	2400	1.5	1601.5	526.79	22.178
750	2400	2.5	1601.5	526.79	20.619
750	2400	3.5	1601.5	526.79	19.186
750	4800	1.5	1601.5	526.79	37.115
750	4800	2.5	1601.5	526.79	32.884
750	4800	3.5	1601.5	526.79	29.491
750	7200	1.5	1601.5	526.79	49.229
750	7200	2.5	1601.5	526.79	42.326
750	7200	3.5	1601.5	526.79	37.169
250	1200	1.5	1657	531.29	9.9127
250	1200	2.5	1657	531.29	8.9685
250	1200	3.5	1657	531.29	8.1478
250	2400	1.5	1657	531.29	16.258
250	2400	2.5	1657	531.29	13.95
250	2400	3.5	1657	531.29	12.265
250	4800	1.5	1657	531.29	25.288
250	4800	2.5	1657	531.29	20.602
250	4800	3.5	1657	531.29	17.509
250	7200	1.5	1657	531.29	31.855
250	7200	2.5	1657	531.29	25.2
250	7200	3.5	1657	531.29	21.033
750	1200	1.5	1657	531.29	12.762
750	1200	2.5	1657	531.29	12.407
750	1200	3.5	1657	531.29	12.018
750	2400	1.5	1657	531.29	21.878
750	2400	2.5	1657	531.29	20.351
750	2400	3.5	1657	531.29	18.953
750	4800	1.5	1657	531.29	36.638
750	4800	2.5	1657	531.29	32.489
750	4800	3.5	1657	531.29	29.172
750	7200	1.5	1657	531.29	48.777
750	7200	2.5	1657	531.29	41.851
750	7200	3.5	1657	531.29	36.796

Στον πίνακα. που ακολουθεί. παρουσιάζονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι εδαφών, που εξετάζουμε για τις 1125 προσομοιώσεις, με τη διαφορά, ότι τώρα έχουμε αντικαταστήσει το συνολικό εμβαδό με το ισοδύναμο εμβαδό του πρώτου και δεύτερου στρώματος, καθώς και το συνολικό θαμμένο μήκος του κύριου καλωδίου με το μήκος αγωγών, που βρίσκεται στο πρώτο και το δεύτερο στρώμα.

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα και την εύρεση μίας νέας μαθηματικής σχέσης, στην οποία θα μπορούν να υπάρχουν όλα τα διαθέσιμα μεγέθη, όπως θα δούμε ακολούθως:

$$\rho_1 = 100, 500, 1000, 5000, 10000$$

$$\rho_2 = 100, 500, 1000, 5000, 10000$$

$$h = 1, 2, 3, 4, 5$$

**Πίνακας 7.6**

Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος $\rho_1$	Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος $\rho_2$	Βάθος Πρώτου Στρώματος $h$	Εμβαδό Γείωσης Πρώτου Στρώματος $E_1$	Εμβαδό Γείωσης Δεύτερου Στρώματος $E_2$	Συνολικό Μήκος Ηλεκτροδίου Γείωσης Πρώτου Στρώματος $l_1$	Συνολικό Μήκος Ηλεκτροδίου Γείωσης Δεύτερου Στρώματος $l_2$	Αντίσταση Γείωσης $R$
100	100	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	1.2807
100	100	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	1.2807
100	100	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	1.2807
100	100	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	1.2807
100	100	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	1.2806
100	100	5	1339	0.001	392.8151	0.001	1.2807
500	100	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	1.7252
500	100	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	1.8746
500	100	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	2.3819
500	100	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	2.7402
500	100	5	1339	0.001	392.8151	0.001	3.0274
1000	100	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	1.9406
1000	100	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	2.1287
1000	100	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	3.3646
1000	100	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	4.2692
1000	100	5	1339	0.001	392.8151	0.001	5.0194
5000	100	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	2.2753
5000	100	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	2.4779
5000	100	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	7.9696
5000	100	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	13.633
5000	100	5	1339	0.001	392.8151	0.001	20.709
10000	100	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	2.3387
10000	100	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	2.5383
10000	100	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	10.65
10000	100	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	21.254
10000	100	5	1339	0.001	392.8151	0.001	40.276
100	500	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	4.7585
100	500	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	4.1991
100	500	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	3.7595
100	500	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	3.4615
100	500	5	1339	0.001	392.8151	0.001	3.2417
500	500	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	6.4036

500	500	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	6.4037
500	500	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	6.4035
500	500	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	6.4032
500	500	5	1339	0.001	392.8151	0.001	6.4036
1000	500	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	7.2572
1000	500	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	7.5871
1000	500	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	8.1409
1000	500	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	8.5306
1000	500	5	1339	0.001	392.8151	0.001	8.8456
5000	500	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	9.7028
5000	500	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	10.644
5000	500	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	16.823
5000	500	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	21.346
5000	500	5	1339	0.001	392.8151	0.001	25.097
10000	500	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	10.604
10000	500	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	11.617
10000	500	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	24.602
10000	500	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	35.094
10000	500	5	1339	0.001	392.8151	0.001	44.782
100	1000	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	8.0175
100	1000	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	6.6108
100	1000	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	5.6668
100	1000	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	5.0736
100	1000	5	1339	0.001	392.8151	0.001	4.6338
500	1000	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	11.332
500	1000	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	10.782
500	1000	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	10.253
500	1000	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	9.8895
500	1000	5	1339	0.001	392.8151	0.001	9.5984
1000	1000	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	12.807
1000	1000	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	12.807
1000	1000	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	12.807
1000	1000	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	12.806
1000	1000	5	1339	0.001	392.8151	0.001	12.807
5000	1000	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	17.252
5000	1000	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	18.746
5000	1000	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	23.819
5000	1000	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	27.402
5000	1000	5	1339	0.001	392.8151	0.001	30.274
10000	1000	1	1218.566	277.9062	230.03	162.7851	19.406
10000	1000	2	1316.915	277.9062	235.556	157.2591	21.287
10000	1000	3	1339	277.9062	387.6151	5.2	33.646
10000	1000	4	1339	277.9062	391.6151	1.2	42.692
10000	1000	5	1339	0.001	392.8151	0.001	50.194
100	100	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	1.2746
100	100	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	1.2746

100	100	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	1.2746
100	100	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	1.2746
100	100	5	1354	0.001	394.3151	0.001	1.2746
500	100	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	1.7196
500	100	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	1.8689
500	100	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	2.3727
500	100	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	2.7283
500	100	5	1354	0.001	394.3151	0.001	3.0132
1000	100	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	1.9361
1000	100	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	2.1243
1000	100	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	3.3535
1000	100	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	4.2518
1000	100	5	1354	0.001	394.3151	0.001	4.9961
5000	100	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	2.2738
5000	100	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	2.4765
5000	100	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	7.9543
5000	100	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	13.592
5000	100	5	1354	0.001	394.3151	0.001	20.615
10000	100	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	2.3378
10000	100	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	2.5375
10000	100	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	10.636
10000	100	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	21.201
10000	100	5	1354	0.001	394.3151	0.001	40.094
100	500	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	4.7352
100	500	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	4.1794
100	500	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	3.7433
100	500	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	3.4471
100	500	5	1354	0.001	394.3151	0.001	3.2288
500	500	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	6.3732
500	500	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	6.3732
500	500	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	6.373
500	500	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	6.3728
500	500	5	1354	0.001	394.3151	0.001	6.3732
1000	500	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	7.226
1000	500	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	7.5548
1000	500	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	8.1042
1000	500	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	8.4908
1000	500	5	1354	0.001	394.3151	0.001	8.8031
5000	500	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	9.6804
5000	500	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	10.621
5000	500	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	16.767
5000	500	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	21.259
5000	500	5	1354	0.001	394.3151	0.001	24.98
10000	500	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	10.589
10000	500	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	11.602
10000	500	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	24.535



10000	500	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	34.963
10000	500	5	1354	0.001	394.3151	0.001	44.577
100	1000	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	7.9807
100	1000	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	6.5829
100	1000	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	5.6444
100	1000	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	5.0552
100	1000	5	1354	0.001	394.3151	0.001	4.6177
500	1000	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	11.276
500	1000	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	10.729
500	1000	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	10.204
500	1000	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	9.8437
500	1000	5	1354	0.001	394.3151	0.001	9.5548
1000	1000	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	12.746
1000	1000	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	12.746
1000	1000	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	12.746
1000	1000	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	12.746
1000	1000	5	1354	0.001	394.3151	0.001	12.746
5000	1000	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	17.196
5000	1000	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	18.689
5000	1000	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	23.727
5000	1000	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	27.283
5000	1000	5	1354	0.001	394.3151	0.001	30.132
10000	1000	1	1233.566	277.9062	231.53	162.7851	19.361
10000	1000	2	1331.915	277.9062	237.056	157.2591	21.243
10000	1000	3	1354	277.9062	389.1151	5.2	33.535
10000	1000	4	1354	277.9062	393.1151	1.2	42.518
10000	1000	5	1354	0.001	394.3151	0.001	49.961
100	100	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	1.2686
100	100	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	1.2686
100	100	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	1.2686
100	100	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	1.2685
100	100	5	1369	0.001	395.8151	0.001	1.2686
500	100	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	1.741
500	100	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	1.8632
500	100	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	2.3636
500	100	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	2.7164
500	100	5	1369	0.001	395.8151	0.001	2.999
1000	100	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	1.9316
1000	100	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	2.1199
1000	100	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	3.3425
1000	100	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	4.2346
1000	100	5	1369	0.001	395.8151	0.001	4.9731
5000	100	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	2.2722
5000	100	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	2.4751
5000	100	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	7.9391
5000	100	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	13.549

5000	100	5	1369	0.001	395.8151	0.001	20.522
10000	100	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	2.337
10000	100	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	2.5368
10000	100	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	10.622
10000	100	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	21.15
10000	100	5	1369	0.001	395.8151	0.001	39.914
100	500	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	4.7123
100	500	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	4.1602
100	500	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	3.7272
100	500	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	3.4329
100	500	5	1369	0.001	395.8151	0.001	3.216
500	500	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	6.343
500	500	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	6.343
500	500	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	6.3428
500	500	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	6.3426
500	500	5	1369	0.001	395.8151	0.001	6.343
1000	500	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	7.1951
1000	500	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	7.5229
1000	500	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	8.0677
1000	500	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	8.4512
1000	500	5	1369	0.001	395.8151	0.001	8.761
5000	500	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	9.6581
5000	500	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	10.6
5000	500	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	16.712
5000	500	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	21.173
5000	500	5	1369	0.001	395.8151	0.001	24.865
10000	500	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	10.573
10000	500	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	11.588
10000	500	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	24.469
10000	500	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	34.837
10000	500	5	1369	0.001	395.8151	0.001	44.375
100	1000	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	7.9442
100	1000	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	6.5553
100	1000	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	5.623
100	1000	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	5.0371
100	1000	5	1369	0.001	395.8151	0.001	4.6018
500	1000	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	11.221
500	1000	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	10.677
500	1000	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	10.156
500	1000	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	9.7985
500	1000	5	1369	0.001	395.8151	0.001	9.5118
1000	1000	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	12.686
1000	1000	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	12.686
1000	1000	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	12.686
1000	1000	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	12.685
1000	1000	5	1369	0.001	395.8151	0.001	12.686

5000	1000	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	17.14
5000	1000	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	18.632
5000	1000	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	23.636
5000	1000	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	27.164
5000	1000	5	1369	0.001	395.8151	0.001	29.99
10000	1000	1	1248.566	277.9062	233.03	162.7851	19.316
10000	1000	2	1346.915	277.9062	238.556	157.2591	21.199
10000	1000	3	1369	277.9062	390.6151	5.2	33.425
10000	1000	4	1369	277.9062	394.6151	1.2	42.346
10000	1000	5	1369	0.001	395.8151	0.001	49.731
100	100	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	1.2626
100	100	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	1.2626
100	100	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	1.2626
100	100	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	1.2625
100	100	5	1384	0.001	397.3151	0.001	1.2626
500	100	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	1.7084
500	100	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	1.8575
500	100	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	2.3545
500	100	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	2.7048
500	100	5	1384	0.001	397.3151	0.001	2.9851
1000	100	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	1.9272
1000	100	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	2.1155
1000	100	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	3.3315
1000	100	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	4.2179
1000	100	5	1384	0.001	397.3151	0.001	4.9504
5000	100	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	2.2707
5000	100	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	2.4737
5000	100	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	7.9239
5000	100	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	13.507
5000	100	5	1384	0.001	397.3151	0.001	20.43
10000	100	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	2.3361
10000	100	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	2.536
10000	100	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	10.608
10000	100	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	21.097
10000	100	5	1384	0.001	397.3151	0.001	39.737
100	500	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	4.6896
100	500	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	4.1411
100	500	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	3.7113
100	500	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	3.4189
100	500	5	1384	0.001	397.3151	0.001	3.2033
500	500	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	6.3132
500	500	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	6.3132
500	500	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	6.313
500	500	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	6.3127
500	500	5	1384	0.001	397.3151	0.001	6.3132
1000	500	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	7.1646

1000	500	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	7.4914
1000	500	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	8.0322
1000	500	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	8.4122
1000	500	5	1384	0.001	397.3151	0.001	8.7196
5000	500	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	9.6359
5000	500	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	10.578
5000	500	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	16.659
5000	500	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	21.09
5000	500	5	1384	0.001	397.3151	0.001	24.752
10000	500	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	10.558
10000	500	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	11.573
10000	500	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	24.402
10000	500	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	34.708
10000	500	5	1384	0.001	397.3151	0.001	44.175
100	1000	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	7.9083
100	1000	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	6.5281
100	1000	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	5.6019
100	1000	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	5.0191
100	1000	5	1384	0.001	397.3151	0.001	4.586
500	1000	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	11.166
500	1000	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	10.625
500	1000	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	10.109
500	1000	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	9.7537
500	1000	5	1384	0.001	397.3151	0.001	9.4691
1000	1000	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	12.626
1000	1000	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	12.626
1000	1000	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	12.626
1000	1000	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	12.625
1000	1000	5	1384	0.001	397.3151	0.001	12.626
5000	1000	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	17.084
5000	1000	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	18.575
5000	1000	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	23.545
5000	1000	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	27.048
5000	1000	5	1384	0.001	397.3151	0.001	29.851
10000	1000	1	1263.566	277.9062	234.53	162.7851	19.272
10000	1000	2	1361.915	277.9062	240.056	157.2591	21.155
10000	1000	3	1384	277.9062	392.1151	5.2	33.315
10000	1000	4	1384	277.9062	396.1151	1.2	42.179
10000	1000	5	1384	0.001	397.3151	0.001	49.504
100	100	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	1.2567
100	100	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	1.2567
100	100	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	1.2567
100	100	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	1.2566
100	100	5	1399	0.001	398.8151	0.001	1.2567
500	100	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	1.7029
500	100	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	1.8518

500	100	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	2.3455
500	100	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	2.6932
500	100	5	1399	0.001	398.8151	0.001	2.9713
1000	100	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	1.9228
1000	100	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	2.1112
1000	100	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	3.3207
1000	100	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	4.201
1000	100	5	1399	0.001	398.8151	0.001	4.9279
5000	100	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	2.2691
5000	100	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	2.4723
5000	100	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	7.9088
5000	100	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	13.466
5000	100	5	1399	0.001	398.8151	0.001	20.339
10000	100	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	2.3353
10000	100	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	2.5353
10000	100	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	10.594
10000	100	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	21.045
10000	100	5	1399	0.001	398.8151	0.001	39.56
100	500	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	4.6672
100	500	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	4.1223
100	500	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	3.6956
100	500	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	3.405
100	500	5	1399	0.001	398.8151	0.001	3.1908
500	500	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	6.2837
500	500	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	6.2837
500	500	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	6.2835
500	500	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	6.2832
500	500	5	1399	0.001	398.8151	0.001	6.2837
1000	500	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	7.1343
1000	500	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	7.4601
1000	500	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	7.9967
1000	500	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	8.3736
1000	500	5	1399	0.001	398.8151	0.001	8.6785
5000	500	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	9.6139
5000	500	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	10.556
5000	500	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	16.603
5000	500	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	21.005
5000	500	5	1399	0.001	398.8151	0.001	24.64
10000	500	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	10.543
10000	500	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	11.559
10000	500	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	24.337
10000	500	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	34.581
10000	500	5	1399	0.001	398.8151	0.001	43.977
100	1000	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	7.8728
100	1000	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	6.5011
100	1000	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	5.5808

100	1000	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	5.0013
100	1000	5	1399	0.001	398.8151	0.001	4.5698
500	1000	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	11.111
500	1000	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	10.574
500	1000	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	10.062
500	1000	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	9.7094
500	1000	5	1399	0.001	398.8151	0.001	9.4269
1000	1000	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	12.567
1000	1000	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	12.567
1000	1000	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	12.567
1000	1000	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	12.566
1000	1000	5	1399	0.001	398.8151	0.001	12.567
5000	1000	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	17.029
5000	1000	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	18.518
5000	1000	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	23.455
5000	1000	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	26.932
5000	1000	5	1399	0.001	398.8151	0.001	29.714
10000	1000	1	1278.566	277.9062	236.03	162.7851	19.228
10000	1000	2	1376.915	277.9062	241.556	157.2591	21.112
10000	1000	3	1399	277.9062	393.6151	5.2	33.207
10000	1000	4	1399	277.9062	397.6151	1.2	42.01
10000	1000	5	1399	0.001	398.8151	0.001	49.279
100	100	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	1.2509
100	100	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	1.2509
100	100	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	1.2509
100	100	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	1.2508
100	100	5	1414	0.001	400.3151	0.001	1.2509
500	100	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	1.6974
500	100	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	1.8462
500	100	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	2.3365
500	100	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	2.6816
500	100	5	1414	0.001	400.3151	0.001	2.9576
1000	100	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	1.9184
1000	100	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	2.1068
1000	100	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	3.3098
1000	100	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	4.1842
1000	100	5	1414	0.001	400.3151	0.001	4.9055
5000	100	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	2.2676
5000	100	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	2.4709
5000	100	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	7.8937
5000	100	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	13.424
5000	100	5	1414	0.001	400.3151	0.001	20.249
10000	100	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	2.3344
10000	100	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	2.5345
10000	100	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	10.58
10000	100	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	20.993

10000	100	5	1414	0.001	400.3151	0.001	39.985
100	500	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	4.6449
100	500	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	4.1036
100	500	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	3.6801
100	500	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	3.3912
100	500	5	1414	0.001	400.3151	0.001	3.1784
500	500	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	6.2545
500	500	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	6.2544
500	500	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	6.2543
500	500	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	6.254
500	500	5	1414	0.001	400.3151	0.001	6.2545
1000	500	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	7.1041
1000	500	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	7.429
1000	500	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	7.9613
1000	500	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	8.3352
1000	500	5	1414	0.001	400.3151	0.001	8.6377
5000	500	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	9.5918
5000	500	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	10.534
5000	500	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	16.549
5000	500	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	20.921
5000	500	5	1414	0.001	400.3151	0.001	24.528
10000	500	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	10.528
10000	500	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	11.544
10000	500	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	24.271
10000	500	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	34.454
10000	500	5	1414	0.001	400.3151	0.001	43.78
100	1000	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	7.8376
100	1000	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	6.4742
100	1000	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	5.5599
100	1000	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	4.9836
100	1000	5	1414	0.001	400.3151	0.001	4.5543
500	1000	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	11.057
500	1000	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	10.523
500	1000	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	10.016
500	1000	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	9.6655
500	1000	5	1414	0.001	400.3151	0.001	9.3851
1000	1000	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	12.509
1000	1000	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	12.509
1000	1000	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	12.509
1000	1000	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	12.508
1000	1000	5	1414	0.001	400.3151	0.001	12.509
5000	1000	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	16.974
5000	1000	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	18.462
5000	1000	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	23.365
5000	1000	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	26.816
5000	1000	5	1414	0.001	400.3151	0.001	29.576

10000	1000	1	1293.566	277.9062	237.53	162.7851	19.184
10000	1000	2	1391.915	277.9062	243.056	157.2591	21.068
10000	1000	3	1414	277.9062	395.1151	5.2	33.098
10000	1000	4	1414	277.9062	399.1151	1.2	41.842
10000	1000	5	1414	0.001	400.3151	0.001	49.055
100	100	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	1.2451
100	100	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	1.2451
100	100	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	1.2451
100	100	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	1.245
100	100	5	1429	0.001	401.8151	0.001	1.2451
500	100	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	1.692
500	100	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	1.0506
500	100	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	1.1971
500	100	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	1.2941
500	100	5	1429	0.001	401.8151	0.001	1.3689
1000	100	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	1.9139
1000	100	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	2.1025
1000	100	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	3.2992
1000	100	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	4.1677
1000	100	5	1429	0.001	401.8151	0.001	4.8833
5000	100	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	2.266
5000	100	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	2.4695
5000	100	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	7.8789
5000	100	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	13.383
5000	100	5	1429	0.001	401.8151	0.001	20.159
10000	100	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	2.3336
10000	100	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	2.5338
10000	100	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	10.566
10000	100	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	20.941
10000	100	5	1429	0.001	401.8151	0.001	39.211
100	500	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	4.6229
100	500	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	4.0852
100	500	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	3.6648
100	500	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	3.3774
100	500	5	1429	0.001	401.8151	0.001	3.166
500	500	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	6.2256
500	500	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	6.2256
500	500	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	6.2254
500	500	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	6.2252
500	500	5	1429	0.001	401.8151	0.001	6.2256
1000	500	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	7.0743
1000	500	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	7.3982
1000	500	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	7.9263
1000	500	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	8.2973
1000	500	5	1429	0.001	401.8151	0.001	8.597
5000	500	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	9.5697



5000	500	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	10.513
5000	500	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	16.496
5000	500	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	20.838
5000	500	5	1429	0.001	401.8151	0.001	24.416
10000	500	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	10.512
10000	500	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	11.53
10000	500	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	24.207
10000	500	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	34.329
10000	500	5	1429	0.001	401.8151	0.001	43.584
100	1000	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	7.8029
100	1000	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	6.4476
100	1000	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	5.5393
100	1000	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	4.9658
100	1000	5	1429	0.001	401.8151	0.001	4.5395
500	1000	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	11.004
500	1000	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	10.473
500	1000	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	9.9696
500	1000	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	9.6223
500	1000	5	1429	0.001	401.8151	0.001	9.3438
1000	1000	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	12.451
1000	1000	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	12.451
1000	1000	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	12.451
1000	1000	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	12.45
1000	1000	5	1429	0.001	401.8151	0.001	12.451
5000	1000	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	16.92
5000	1000	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	18.406
5000	1000	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	23.277
5000	1000	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	26.704
5000	1000	5	1429	0.001	401.8151	0.001	29.44
10000	1000	1	1308.566	277.9062	239.03	162.7851	19.139
10000	1000	2	1406.915	277.9062	244.556	157.2591	21.025
10000	1000	3	1429	277.9062	396.6151	5.2	32.992
10000	1000	4	1429	277.9062	400.6151	1.2	41.677
10000	1000	5	1429	0.001	401.8151	0.001	48.833
100	100	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	1.2394
100	100	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	1.2394
100	100	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	1.2394
100	100	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	1.2393
100	100	5	1444	0.001	403.3151	0.001	1.2394
500	100	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	1.6865
500	100	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	1.8351
500	100	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	2.3189
500	100	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	2.6591
500	100	5	1444	0.001	403.3151	0.001	2.9306
1000	100	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	1.9095
1000	100	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	2.0982

1000	100	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	3.2885
1000	100	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	4.1512
1000	100	5	1444	0.001	403.3151	0.001	4.8614
5000	100	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	2.2644
5000	100	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	2.4681
5000	100	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	7.864
5000	100	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	13.342
5000	100	5	1444	0.001	403.3151	0.001	20.071
10000	100	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	2.3327
10000	100	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	2.533
10000	100	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	10.552
10000	100	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	20.89
10000	100	5	1444	0.001	403.3151	0.001	39.039
100	500	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	4.6013
100	500	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	4.067
100	500	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	3.6495
100	500	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	3.364
100	500	5	1444	0.001	403.3151	0.001	3.1538
500	500	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	6.1969
500	500	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	6.1969
500	500	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	6.1968
500	500	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	6.1965
500	500	5	1444	0.001	403.3151	0.001	6.1969
1000	500	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	7.0448
1000	500	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	7.3677
1000	500	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	7.892
1000	500	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	8.2598
1000	500	5	1444	0.001	403.3151	0.001	8.5571
5000	500	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	9.5477
5000	500	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	10.491
5000	500	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	16.443
5000	500	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	20.756
5000	500	5	1444	0.001	403.3151	0.001	24.307
10000	500	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	10.497
10000	500	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	11.516
10000	500	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	24.142
10000	500	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	34.204
10000	500	5	1444	0.001	403.3151	0.001	43.391
100	1000	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	7.7685
100	1000	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	6.4215
100	1000	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	5.5188
100	1000	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	4.9485
100	1000	5	1444	0.001	403.3151	0.001	4.5243
500	1000	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	10.952
500	1000	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	10.424
500	1000	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	9.9242

500	1000	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	9.5794
500	1000	5	1444	0.001	403.3151	0.001	9.3026
1000	1000	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	12.394
1000	1000	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	12.394
1000	1000	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	12.394
1000	1000	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	12.393
1000	1000	5	1444	0.001	403.3151	0.001	12.394
5000	1000	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	16.865
5000	1000	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	18.351
5000	1000	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	23.189
5000	1000	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	26.591
5000	1000	5	1444	0.001	403.3151	0.001	29.306
10000	1000	1	1323.566	277.9062	240.53	162.7851	19.095
10000	1000	2	1421.915	277.9062	246.056	157.2591	20.982
10000	1000	3	1444	277.9062	398.1151	5.2	32.885
10000	1000	4	1444	277.9062	402.1151	1.2	41.512
10000	1000	5	1444	0.001	403.3151	0.001	48.614
100	100	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	1.2337
100	100	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	1.2337
100	100	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	1.2337
100	100	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	1.2336
100	100	5	1459	0.001	404.8151	0.001	1.2337
500	100	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	1.6811
500	100	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	1.8295
500	100	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	2.3102
500	100	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	2.6479
500	100	5	1459	0.001	404.8151	0.001	2.9173
1000	100	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	1.9052
1000	100	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	2.0939
1000	100	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	3.2779
1000	100	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	4.1348
1000	100	5	1459	0.001	404.8151	0.001	4.8397
5000	100	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	2.2629
5000	100	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	2.4667
5000	100	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	7.8491
5000	100	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	13.3
5000	100	5	1459	0.001	404.8151	0.001	19.983
10000	100	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	2.3319
10000	100	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	2.5322
10000	100	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	10.538
10000	100	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	20.836
10000	100	5	1459	0.001	404.8151	0.001	38.869
100	500	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	4.5799
100	500	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	4.0489
100	500	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	3.6345
100	500	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	3.3506

100	500	5	1459	0.001	404.8151	0.001	3.1417
500	500	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	6.1686
500	500	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	6.1685
500	500	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	6.1684
500	500	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	6.1681
500	500	5	1459	0.001	404.8151	0.001	6.1686
1000	500	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	7.0155
1000	500	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	7.3373
1000	500	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	7.8576
1000	500	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	8.2225
1000	500	5	1459	0.001	404.8151	0.001	8.5176
5000	500	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	9.5259
5000	500	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	10.469
5000	500	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	16.389
5000	500	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	20.674
5000	500	5	1459	0.001	404.8151	0.001	24.199
10000	500	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	10.482
10000	500	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	11.501
10000	500	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	24.078
10000	500	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	34.08
10000	500	5	1459	0.001	404.8151	0.001	43.199
100	1000	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	7.7345
100	1000	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	6.3961
100	1000	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	5.4985
100	1000	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	4.9313
100	1000	5	1459	0.001	404.8151	0.001	4.5092
500	1000	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	10.9
500	1000	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	10.375
500	1000	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	9.8792
500	1000	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	9.5367
500	1000	5	1459	0.001	404.8151	0.001	9.2621
1000	1000	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	12.337
1000	1000	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	12.337
1000	1000	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	12.337
1000	1000	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	12.336
1000	1000	5	1459	0.001	404.8151	0.001	12.337
5000	1000	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	16.811
5000	1000	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	18.295
5000	1000	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	23.102
5000	1000	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	26.479
5000	1000	5	1459	0.001	404.8151	0.001	29.173
10000	1000	1	1338.566	277.9062	242.03	162.7851	19.052
10000	1000	2	1436.915	277.9062	247.556	157.2591	20.939
10000	1000	3	1459	277.9062	399.6151	5.2	32.779
10000	1000	4	1459	277.9062	403.6151	1.2	41.348
10000	1000	5	1459	0.001	404.8151	0.001	48.397

100	100	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	1.2226
100	100	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	1.2226
100	100	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	1.2225
100	100	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	1.2225
100	100	5	1489	0.001	407.8151	0.001	1.2226
500	100	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	1.6704
500	100	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	1.8186
500	100	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	2.2929
500	100	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	2.6258
500	100	5	1489	0.001	407.8151	0.001	2.8911
1000	100	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	1.8965
1000	100	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	2.0853
1000	100	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	3.2569
1000	100	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	4.1025
1000	100	5	1489	0.001	407.8151	0.001	4.7969
5000	100	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	2.2598
5000	100	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	2.4639
5000	100	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	7.8196
5000	100	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	13.219
5000	100	5	1489	0.001	407.8151	0.001	19.812
10000	100	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	2.3302
10000	100	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	2.5308
10000	100	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	10.51
10000	100	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	20.735
10000	100	5	1489	0.001	407.8151	0.001	38.538
100	500	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	4.5376
100	500	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	4.0135
100	500	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	3.6047
100	500	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	3.3244
100	500	5	1489	0.001	407.8151	0.001	3.1178
500	500	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	6.1129
500	500	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	6.1129
500	500	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	6.1127
500	500	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	6.1125
500	500	5	1489	0.001	407.8151	0.001	6.1129
1000	500	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	6.9577
1000	500	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	7.2776
1000	500	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	7.7898
1000	500	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	8.1492
1000	500	5	1489	0.001	407.8151	0.001	8.4399
5000	500	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	9.4826
5000	500	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	10.427
5000	500	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	16.285
5000	500	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	20.513
5000	500	5	1489	0.001	407.8151	0.001	23.985
10000	500	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	10.452

10000	500	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	11.473
10000	500	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	23.951
10000	500	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	33.832
10000	500	5	1489	0.001	407.8151	0.001	42.828
100	1000	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	7.6675
100	1000	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	6.3452
100	1000	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	5.4583
100	1000	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	4.8971
100	1000	5	1489	0.001	407.8151	0.001	4.4795
500	1000	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	10.798
500	1000	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	10.279
500	1000	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	9.7906
500	1000	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	9.4531
500	1000	5	1489	0.001	407.8151	0.001	9.1823
1000	1000	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	12.226
1000	1000	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	12.226
1000	1000	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	12.226
1000	1000	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	12.225
1000	1000	5	1489	0.001	407.8151	0.001	12.226
5000	1000	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	16.704
5000	1000	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	18.186
5000	1000	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	22.929
5000	1000	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	26.258
5000	1000	5	1489	0.001	407.8151	0.001	28.911
10000	1000	1	1368.566	277.9062	245.03	162.7851	18.965
10000	1000	2	1466.915	277.9062	250.556	157.2591	20.853
10000	1000	3	1489	277.9062	402.6151	5.2	32.569
10000	1000	4	1489	277.9062	406.6151	1.2	41.025
10000	1000	5	1489	0.001	407.8151	0.001	47.969
100	100	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	1.2111
100	100	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	1.2111
100	100	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	1.211
100	100	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	1.211
100	100	5	1534	0.001	410.8151	0.001	1.2111
500	100	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	1.66
500	100	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	1.8079
500	100	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	2.2758
500	100	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	2.6035
500	100	5	1534	0.001	410.8151	0.001	2.8643
1000	100	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	1.8882
1000	100	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	2.0772
1000	100	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	3.2361
1000	100	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	4.0701
1000	100	5	1534	0.001	410.8151	0.001	4.7538
5000	100	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	2.2568
5000	100	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	2.4612

5000	100	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	7.7902
5000	100	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	13.139
5000	100	5	1534	0.001	410.8151	0.001	19.636
10000	100	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	2.3285
10000	100	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	2.5293
10000	100	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	10.483
10000	100	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	20.633
10000	100	5	1534	0.001	410.8151	0.001	38.197
100	500	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	4.4924
100	500	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	3.9753
100	500	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	3.5737
100	500	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	3.2973
100	500	5	1534	0.001	410.8151	0.001	3.0937
500	500	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	6.0554
500	500	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	6.0554
500	500	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	6.0552
500	500	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	6.055
500	500	5	1534	0.001	410.8151	0.001	6.0554
1000	500	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	6.8998
1000	500	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	7.2177
1000	500	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	7.7213
1000	500	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	8.0748
1000	500	5	1534	0.001	410.8151	0.001	8.3597
5000	500	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	9.4409
5000	500	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	10.386
5000	500	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	16.181
5000	500	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	20.35
5000	500	5	1534	0.001	410.8151	0.001	23.769
10000	500	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	10.423
10000	500	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	11.446
10000	500	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	23.824
10000	500	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	33.586
10000	500	5	1534	0.001	410.8151	0.001	42.444
100	1000	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	7.5949
100	1000	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	6.2898
100	1000	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	5.417
100	1000	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	4.8623
100	1000	5	1534	0.001	410.8151	0.001	4.4502
500	1000	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	10.691
500	1000	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	10.178
500	1000	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	9.6983
500	1000	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	9.3667
500	1000	5	1534	0.001	410.8151	0.001	9.1002
1000	1000	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	12.111
1000	1000	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	12.111
1000	1000	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	12.11

1000	1000	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	12.11
1000	1000	5	1534	0.001	410.8151	0.001	12.111
5000	1000	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	16.6
5000	1000	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	18.079
5000	1000	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	22.758
5000	1000	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	26.035
5000	1000	5	1534	0.001	410.8151	0.001	28.643
10000	1000	1	1413.566	277.9062	248.03	162.7851	18.882
10000	1000	2	1511.915	277.9062	253.556	157.2591	20.772
10000	1000	3	1534	277.9062	405.6151	5.2	32.361
10000	1000	4	1534	277.9062	409.6151	1.2	40.701
10000	1000	5	1534	0.001	410.8151	0.001	47.538
100	100	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	1.2054
100	100	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	1.2054
100	100	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	1.2054
100	100	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	1.2053
100	100	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	1.2054
500	100	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	1.6548
500	100	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	1.8027
500	100	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	2.2673
500	100	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	2.5925
500	100	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	2.8514
1000	100	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	1.884
1000	100	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	2.0731
1000	100	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	3.2258
1000	100	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	4.0537
1000	100	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	4.7324
5000	100	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	2.2553
5000	100	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	2.4599
5000	100	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	7.7755
5000	100	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	13.099
5000	100	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	19.55
10000	100	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	2.3277
10000	100	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	2.5286
10000	100	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	10.469
10000	100	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	20.582
10000	100	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	38.029
100	500	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	4.4701
100	500	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	3.9566
100	500	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	3.5584
100	500	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	3.2839
100	500	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	3.0817
500	500	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	6.0271
500	500	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	6.0271
500	500	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	6.0269
500	500	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	6.0267



500	500	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	6.0271
1000	500	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	6.8712
1000	500	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	7.1881
1000	500	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	7.6875
1000	500	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	8.0381
1000	500	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	8.3205
5000	500	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	9.4201
5000	500	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	10.365
5000	500	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	16.129
5000	500	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	20.269
5000	500	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	23.662
10000	500	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	10.408
10000	500	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	11.432
10000	500	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	23.761
10000	500	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	33.465
10000	500	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	42.255
100	1000	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	7.5592
100	1000	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	6.2628
100	1000	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	5.3966
100	1000	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	4.8453
100	1000	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	4.4355
500	1000	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	10.638
500	1000	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	10.128
500	1000	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	9.6527
500	1000	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	9.324
500	1000	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	9.0598
1000	1000	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	12.054
1000	1000	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	12.054
1000	1000	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	12.054
1000	1000	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	12.053
1000	1000	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	12.054
5000	1000	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	16.548
5000	1000	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	18.027
5000	1000	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	22.673
5000	1000	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	25.925
5000	1000	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	28.514
10000	1000	1	1436.066	277.9062	249.53	162.7851	18.84
10000	1000	2	1534.415	277.9062	255.056	157.2591	20.731
10000	1000	3	1556.5	277.9062	407.1151	5.2	32.258
10000	1000	4	1556.5	277.9062	411.1151	1.2	40.537
10000	1000	5	1556.5	0.001	412.3151	0.001	47.324
100	100	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	1.1947
100	100	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	1.1947
100	100	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	1.1947
100	100	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	1.1946
100	100	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	1.1947

500	100	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	1.645
500	100	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	1.7926
500	100	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	2.2506
500	100	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	2.5704
500	100	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	2.8247
1000	100	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	1.8762
1000	100	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	2.0653
1000	100	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	3.2053
1000	100	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	4.0208
1000	100	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	4.6878
5000	100	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	2.2525
5000	100	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	2.4574
5000	100	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	7.7457
5000	100	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	13.013
5000	100	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	19.365
10000	100	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	2.3262
10000	100	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	2.5273
10000	100	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	10.441
10000	100	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	20.473
10000	100	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	37.669
100	500	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	4.4278
100	500	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	3.9211
100	500	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	3.5302
100	500	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	3.2595
100	500	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	3.0599
500	500	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	5.9735
500	500	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	5.9735
500	500	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	5.9733
500	500	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	5.9731
500	500	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	5.9735
1000	500	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	6.8169
1000	500	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	7.132
1000	500	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	7.6224
1000	500	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	7.9665
1000	500	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	8.2437
5000	500	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	9.3809
5000	500	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	10.326
5000	500	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	16.026
5000	500	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	20.104
5000	500	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	23.439
10000	500	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	10.381
10000	500	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	11.406
10000	500	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	23.634
10000	500	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	33.211
10000	500	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	41.856
100	1000	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	7.4908

100	1000	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	6.2307
100	1000	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	5.3592
100	1000	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	4.8144
100	1000	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	4.4089
500	1000	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	10.537
500	1000	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	10.033
500	1000	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	9.5674
500	1000	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	9.2443
500	1000	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	8.9846
1000	1000	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	11.947
1000	1000	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	11.947
1000	1000	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	11.947
1000	1000	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	11.946
1000	1000	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	11.947
5000	1000	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	16.45
5000	1000	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	17.926
5000	1000	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	22.506
5000	1000	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	25.704
5000	1000	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	28.247
10000	1000	1	1481.066	277.9062	252.53	162.7851	18.762
10000	1000	2	1579.415	277.9062	258.056	157.2591	20.653
10000	1000	3	1601.5	277.9062	410.1151	5.2	32.053
10000	1000	4	1601.5	277.9062	414.1151	1.2	40.208
10000	1000	5	1601.5	0.001	415.3151	0.001	46.878
100	100	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	1.1896
100	100	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	1.1895
100	100	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	1.1895
100	100	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	1.1895
100	100	5	1624	0.001	416.8151	0.001	1.1896
500	100	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	1.6404
500	100	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	1.7878
500	100	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	2.2424
500	100	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	2.5592
500	100	5	1624	0.001	416.8151	0.001	2.8111
1000	100	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	1.8725
1000	100	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	2.0615
1000	100	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	3.195
1000	100	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	4.0039
1000	100	5	1624	0.001	416.8151	0.001	4.6647
5000	100	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	2.2512
5000	100	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	2.4561
5000	100	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	7.7306
5000	100	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	12.969
5000	100	5	1624	0.001	416.8151	0.001	19.267
10000	100	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	2.3255
10000	100	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	2.5266

10000	100	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	10.427
10000	100	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	20.416
10000	100	5	1624	0.001	416.8151	0.001	37.478
100	500	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	4.4075
100	500	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	3.9041
100	500	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	3.5169
100	500	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	3.2482
100	500	5	1624	0.001	416.8151	0.001	3.0499
500	500	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	5.9478
500	500	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	5.9477
500	500	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	5.9477
500	500	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	5.9474
500	500	5	1624	0.001	416.8151	0.001	5.9478
1000	500	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	6.7909
1000	500	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	7.105
1000	500	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	7.5907
1000	500	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	7.9315
1000	500	5	1624	0.001	416.8151	0.001	8.206
5000	500	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	9.3623
5000	500	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	10.308
5000	500	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	15.975
5000	500	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	20.019
5000	500	5	1624	0.001	416.8151	0.001	23.324
10000	500	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	10.368
10000	500	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	11.394
10000	500	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	23.571
10000	500	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	33.079
10000	500	5	1624	0.001	416.8151	0.001	41.647
100	1000	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	7.4584
100	1000	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	6.2062
100	1000	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	5.3418
100	1000	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	4.8006
100	1000	5	1624	0.001	416.8151	0.001	4.3967
500	1000	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	10.488
500	1000	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	9.9881
500	1000	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	9.5269
500	1000	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	9.2068
500	1000	5	1624	0.001	416.8151	0.001	8.9493
1000	1000	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	11.896
1000	1000	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	11.896
1000	1000	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	11.895
1000	1000	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	11.895
1000	1000	5	1624	0.001	416.8151	0.001	11.896
5000	1000	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	16.404
5000	1000	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	17.878
5000	1000	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	22.424

5000	1000	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	25.592
5000	1000	5	1624	0.001	416.8151	0.001	28.111
10000	1000	1	1503.566	277.9062	254.03	162.7851	18.725
10000	1000	2	1601.915	277.9062	259.556	157.2591	20.615
10000	1000	3	1624	277.9062	411.6151	5.2	31.95
10000	1000	4	1624	277.9062	415.6151	1.2	40.039
10000	1000	5	1624	0.001	416.8151	0.001	46.647
100	100	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	1.179
100	100	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	1.179
100	100	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	1.179
100	100	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	1.179
100	100	5	1657	0.001	419.8151	0.001	1.179
500	100	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	1.6299
500	100	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	1.7771
500	100	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	2.2258
500	100	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	2.5382
500	100	5	1657	0.001	419.8151	0.001	2.7864
1000	100	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	1.8638
1000	100	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	2.053
1000	100	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	3.1747
1000	100	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	3.973
1000	100	5	1657	0.001	419.8151	0.001	4.6243
5000	100	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	2.248
5000	100	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	2.4533
5000	100	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	7.6997
5000	100	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	12.891
5000	100	5	1657	0.001	419.8151	0.001	19.103
10000	100	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	2.3237
10000	100	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	2.525
10000	100	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	10.399
10000	100	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	20.317
10000	100	5	1657	0.001	419.8151	0.001	37.16
100	500	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	4.3682
100	500	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	3.871
100	500	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	3.4889
100	500	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	3.2233
100	500	5	1657	0.001	419.8151	0.001	3.0273
500	500	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	5.8952
500	500	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	5.8952
500	500	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	5.8951
500	500	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	5.8948
500	500	5	1657	0.001	419.8151	0.001	5.8952
1000	500	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	6.7359
1000	500	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	7.0484
1000	500	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	7.5266
1000	500	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	7.8624

1000	500	5	1657	0.001	419.8151	0.001	8.1328
5000	500	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	9.3189
5000	500	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	10.265
5000	500	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	15.874
5000	500	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	19.865
5000	500	5	1657	0.001	419.8151	0.001	23.121
10000	500	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	10.337
10000	500	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	11.365
10000	500	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	23.446
10000	500	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	32.845
10000	500	5	1657	0.001	419.8151	0.001	41.29
100	1000	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	7.3957
100	1000	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	6.1582
100	1000	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	5.3044
100	1000	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	4.7683
100	1000	5	1657	0.001	419.8151	0.001	4.3686
500	1000	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	10.393
500	1000	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	9.8978
500	1000	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	9.4437
500	1000	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	9.1281
500	1000	5	1657	0.001	419.8151	0.001	8.8739
1000	1000	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	11.79
1000	1000	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	11.79
1000	1000	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	11.79
1000	1000	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	11.79
1000	1000	5	1657	0.001	419.8151	0.001	11.79
5000	1000	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	16.299
5000	1000	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	17.771
5000	1000	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	22.258
5000	1000	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	25.382
5000	1000	5	1657	0.001	419.8151	0.001	27.864
10000	1000	1	1536.566	277.9062	257.03	162.7851	18.638
10000	1000	2	1634.915	277.9062	262.556	157.2591	20.53
10000	1000	3	1657	277.9062	414.6151	5.2	31.747
10000	1000	4	1657	277.9062	418.6151	1.2	39.73
10000	1000	5	1657	0.001	419.8151	0.001	46.243

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο επιλύτης *MALT*, που χρησιμοποιήθηκε για τις 1125 και τις 168 μετρήσεις, είναι ιδανικός για την ανάλυση συστημάτων γείωσης μικρής ηλεκτρικής ισχύος και εφαρμόζεται σε συστήματα χαμηλής συχνότητας. Φυσικά, το ίδιο αποτέλεσμα, θα παίρναμε, αν οι προσομοιώσεις γίνονταν και με τον επιλύτη *MALZ*.

# Κεφάλαιο 8

## Μέθοδοι Βελτιστοποίησης των Αποτελεσμάτων με Χρήση του Λογισμικού *MATLAB*

### 8.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η σύνδεση των δεδομένων της προσομοίωσης, ώστε να προκύψει λύση ως προς  $R_{\text{γείωσης}}$  (αντίσταση γείωσης). Το κυρίαρχο πλεονέκτημα της μελέτης αυτής αποτελεί η παραδοχή, ότι ο μελετητής της εγκατάστασης των Α/Γ θα μπορεί εύκολα και απλά να υπολογίζει την αντίσταση γείωσης της εγκατάστασης με βάση κάποιες υπάρχουσες τιμές. Πιο συγκεκριμένα:

1. Για τις **Γειώσεις Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ** θα μπορεί ο μελετητής να υπολογίζει την τιμή αντίστασης γείωσης για οποιαδήποτε τιμή της ειδικής αντίστασης των δύο στρωμάτων του διστρωματικού εδάφους ( $\rho_1, \rho_2$ ) και για οποιαδήποτε τιμή βάθους του πρώτου στρώματος ( $h$ ), έχοντας δηλαδή στη διάθεση του 3 μεταβλητές.

$$R_{\text{γείωσης}} = f(\rho_1, \rho_2, h)$$

2. Για τη **Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ** διακρίνονται δύο υποπεριπτώσεις:
  - Στην πρώτη περίπτωση ο μελετητής θα μπορεί γρήγορα να βρει την τιμή αντίστασης γείωσης, όπως και για τους παραπάνω τύπους γείωσης, με τη διαφορά, ότι αυτή τη φορά, πέρα από τα παραπάνω μεγέθη ( $\rho_1, \rho_2, h$ ), θα έχει στη διάθεσή του το εμβαδό γείωσης ( $E$ ), καθώς και το συνολικό θαμμένο μήκος του κύριου ηλεκτροδίου ( $l$ ), έχοντας δηλαδή στη διάθεση του 5 μεταβλητές.

$$R_{\text{γείωσης}} = f(\rho_1, \rho_2, h, E, l)$$

- Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση της γειώσης Α/Γ Δ οι μεταβλητές από 5 γίνονται τώρα 7. Πιο συγκεκριμένα το εμβαδό  $E$  και το μήκος  $l$  διακρίνονται τώρα σε  $E_1, E_2$  (εμβαδό 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στρώματος) και  $l_1, l_2$  (μήκος 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στρώματος) αντίστοιχα, διατηρώντας τα μεγέθη  $(\rho_1, \rho_2, h)$ .

$$R_{\text{γειώσης}} = f(\rho_1, \rho_2, h, E_1, E_2, l_1, l_2)$$

## 8.2 Μεθοδολογία για τις Γειώσεις Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ

Σύμφωνα με τα παραπάνω καθίσταται σαφές, ότι οι σχέσεις πολλών μεταβλητών καθιστούν δύσκολη την ύπαρξη γραφικής αναπαράστασης. Συνεπώς, η διαδικασία εύρεσης των παραπάνω σχέσεων καθίσταται ακόμα δυσκολότερη. Παράλληλα, στόχος της διπλωματικής ήταν να βρεθεί ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο να ισχύει για όλες τις περιπτώσεις γειώσεων, όσον αφορά τις γειώσεις Α, Β και Γ, καθώς και ένα νέο μοντέλο, που να ισχύει για τη γειώση Α/Γ Δ. Σε όλες τις περιπτώσεις, που μελετήσαμε, πρόεκυψαν μοντέλα, στα οποία θα αλλάζουν μόνο οι σταθεροί συντελεστές.

Αρχικά, για τις γειώσεις Α, Β και Γ θα πρέπει να μειωθούν οι μεταβλητές της σχέσης  $R_{\text{γειώσης}} = f(\rho_1, \rho_2, h)$  από 3 σε 2. Το πλεονέκτημα από την αλλαγή αυτή είναι προφανές, μιας και τώρα έχουμε τη δυνατότητα μιας γραφικής απεικόνισης των μετρήσεων, γεγονός που μας διευκολύνει στο να προβλέψουμε ποια μπορεί να είναι η συσχέτιση μεταξύ τους. Ένας από τους τρόπους για να συμβεί αυτό είναι να ορίσουμε κάποιο τυχαίο συντελεστή  $K$ , τέτοιου ώστε:

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

Ο συντελεστής  $K$  εξαρτάται από τα  $\rho_1$  και  $\rho_2$  και περιγράφει την εξάρτηση της αντίστασης γειώσης  $R_{\text{γειώσης}}$  από τις ειδικές αντιστάσεις. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας αυτόν τον συντελεστή βρίσκουμε μία σχέση της μορφής  $R_{\text{γειώσης}} = g(K, h)$ , γεγονός, που κάνει αυτόματα το έργο μας ευκολότερο, μιας και στις 2 ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούμε να έχουμε γραφική απεικόνιση.

Πέρα όμως από το εμπόδιο των 3 μεταβλητών, ένα άλλο δύσκολο εγχείρημα είναι ο υψηλός όγκος δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, οι 225 μετρήσεις καθιστούν δύσκολη την προσαρμογή, καθώς πρέπει να βρεθεί επιφάνεια, που θα τις ικανοποιεί όλες. Θα ήταν έτσι χρήσιμο, με τους μετασχηματισμούς που κάνουμε, να μπορέσουμε να «μειώσουμε» τεχνητά το πλήθος των μετρήσεων. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να παρατηρήσουμε προσεκτικά τις μετρήσεις.



Για παράδειγμα βλέπουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις αν  $\rho'_1 = 10 \cdot \rho_1$  και  $\rho'_2 = 10 \cdot \rho_2$  τότε θα είναι και  $R'_{\gammaείωσης} = 10 \cdot R_{\gammaείωσης}$ . Παράλληλα, εύκολα παρατηρούμε ότι ο συνδυασμός των τιμών  $\rho'_1, \rho'_2$  και ο συνδυασμών  $\rho_1$  και  $\rho_2$  έχουν ακριβώς τον ίδιο συντελεστή  $K$ , πράγμα που αποδεικνύει ότι μάλλον οδεύουμε προς τη σωστή κατεύθυνση.

Στο σημείο αυτό είναι ορθό να ειπωθεί για ακόμη μία φορά, ότι δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος αλγόριθμος για την αντιμετώπιση των μη γραμμικών. Η εύρεση της εξίσωσης βασίζεται στην παρατηρητικότητα, στην εμπειρία και τις γνώσεις των μελετητών.

Κάνοντας το μετασχηματισμό και απεικονίζοντας γραφικά τις μετρήσεις  $R_{\gammaείωσης} = g(K, h)$  παρατηρήσαμε ότι είναι «άναρχα» τοποθετημένες και δεν μπορεί να υπάρξει καμία μαθηματική σύνδεση μεταξύ τους. Έτσι το επόμενο βήμα είναι ο μετασχηματισμός του μεγέθους  $R_{\gammaείωσης}$ . Με άλλα λόγια δεν θα επιχειρούμε πλέον να βρούμε μία σχέση  $R_{\gammaείωσης} = g(K, h)$ , αλλά μία σχέση της μορφής  $RR = M(K, h)$ , όπου το μέγεθος  $RR$  θα πρέπει να έχει τη μορφή  $RR = h(R_{\gammaείωσης})$ . Κάνοντας δοκιμές πάνω σε αυτά παρατηρήσαμε το εξής:

Αν  $RR = \frac{R_{\gammaείωσης}}{\rho_1}$  τότε η σχέση  $RR = M(K, h)$  παίρνει τη μορφή μιας ομαλής επιφάνειας στο χώρο η οποία μπορεί να περιγραφεί σχετικά σωστά με ένα εκθετικό μοντέλο της μορφής:

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

όπου  $a, b, c, d, e$  σταθερές.

Χρήσιμο στο σημείο αυτό είναι να σημειωθεί ότι οι δοκιμές αυτές περιελάμβαναν και τη διεξαγωγή πολλαπλών αναλύσεων παλινδρόμησης σε μία μεταβλητή (δηλαδή για σταθερό  $h$ ) με σκοπό να δούμε πως μεταβάλλεται η εξίσωση προσαρμογής ανάλογα με τα διαφορετικά  $h$ , έχοντας ως απώτερο σκοπό να βρούμε πως το  $h$  μπορεί να «μπει» στη σχέση των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών.

Εντούτοις, όσο καλή και αν είναι η προσαρμογή, δεν μπορεί ποτέ να ικανοποιήσει πλήρως (100%) όλα τα σημεία. Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα έχει ως ακολούθως:

Αναζητούμε μία σχέση της μορφής  $R_{\gammaείωσης} = g(K, h)$ , όμως έχουμε βρει μία σχέση της μορφής

$$RR = M(K, h)$$

από την οποία μπορεί εύκολα να εξαχθεί ότι

$$R_{\gammaείωσης} = \rho_1 \cdot M(K, h)$$

Η συνάρτηση  $M(K, h)$  περιέχει το σφάλμα της προσαρμογής για κάθε σημείο της. Έτσι τώρα θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την  $M(K, h)$  με το  $\rho_1$  για να πάρουμε την τιμή της  $R_{\gammaείωσης}$ . Ωστόσο, μαζί με την τιμή πολλαπλασιάζεται και το σφάλμα. Συμπεραίνουμε έτσι, λοιπόν, ότι όσο ανεβαίνει η τιμή του  $\rho_1$ , τόσο «χειρότερη» γίνεται η πρόβλεψη της  $R_{\gammaείωσης}$  από την εξίσωση, με αποτέλεσμα η εξίσωση να αποτυγχάνει για μεγάλες τιμές του  $\rho_1$ .

Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι η δοκιμή  $RR = \frac{R_{\gammaείωσης}}{\rho_1}$  απέτυχε. Παρ' όλ' αυτά ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη, αφού για πρώτη φορά καταφέραμε να δημιουργήσουμε μία σχέση μεταξύ των δεδομένων. Παρατηρώντας τις μονάδες του κλάσματος  $\frac{R_{\gammaείωσης}}{\rho_1}$ , βλέπουμε ότι είναι  $m^{-1}$ .

Αυτό οδήγησε στην ιδέα μίας νέας δοκιμής άλλων σχημάτων με τις ίδιες μονάδες όπως  $\frac{R_{\gammaείωσης}}{\rho_2}$ ,  $\frac{R_{\gammaείωσης}}{\rho_1} + \frac{R_{\gammaείωσης}}{\rho_2}$  κ.τ.λ.

Είδαμε έτσι, λοιπόν, ότι όλα αυτά τα σχήματα με τις μονάδες αυτές μπορούσαν να προσαρμοσθούν στη μορφή

$$RR = M(K, h)$$

με άλλο σχήμα εξίσωσης κάθε φορά, φυσικά. Συνεπώς καταλήξαμε ότι το  $RR$  θα πρέπει να έχει σίγουρα μονάδες  $m^{-1}$ .

Ο επόμενος στόχος ήταν να βρεθεί ένα  $RR$  (το οποίο φυσικά να έχει μονάδες  $m^{-1}$ ), αλλά το οποίο να μην έχει τις αρνητικές πολλαπλασιαστικές ιδιότητες του  $\frac{R_{\gammaείωσης}}{\rho_1}$ . Ένα τέτοιο  $RR$  βρέθηκε και είναι το παρακάτω:

$$RR = 100 \cdot R_{\gammaείωσης} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)$$

Το κυρίαρχο πλεονέκτημα του συντελεστή αυτού είναι ότι η τιμή

$$\Sigma\Pi = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)}$$

με την οποία θα πολλαπλασιασθεί η  $M(K, h)$ , ώστε να δώσει την τιμή της  $R_{\gammaείωσης}$ , είναι πρακτικά η ίδια ανεξάρτητα από τα  $\rho_1, \rho_2$ .

Με τον τρόπο αυτό έχουμε πετύχει και το στόχο της μείωσης του πλήθους των δεδομένων. Έτσι το μόνο που απομένει τώρα είναι να βρεθεί ο τύπος της επιφάνειας που συνδέει τα μεγέθη.

Έτσι μέχρι στιγμής ψάχνουμε μία σχέση της μορφής:

$$RR = M(K, h) \quad (8.1)$$

όπου

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \quad (8.2)$$

Και

$$RR = 100 \cdot R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right) \quad (8.3)$$

Έπειτα από έρευνα διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν δύο γενικοί τύποι  $M(K, h)$ , που μπορούν να ικανοποιήσουν τα δεδομένα και για τις 3 περιπτώσεις γείωσης (Γείωση Α/Γ Α, Β & Γ) και είναι οι ακόλουθοι:

$$M(K, h) = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot K^c \cdot h^{d+e} \quad (8.4)$$

το οποίο και έχουμε ονομάσει «**Απλό Εκθετικό Μοντέλο**»

$$M(K, h) = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m} \quad (8.5)$$

το οποίο και έχουμε ονομάσει «**Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών**»

Όπου  $a, b, c, d, e, q, n, m$  σταθερές, που μεταβάλλονται με βάση τον τύπο της γείωσης.

Συνοπτικά και σύμφωνα με τα παραπάνω το απλό εκθετικό μοντέλο είναι απλούστερο στην εφαρμογή, αλλά έχει μικρότερη ακρίβεια σε αντίθεση με το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών, που έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και έτσι μεγαλύτερη δυσκολία στην προσαρμογή, έχοντας όμως μεγαλύτερη ακρίβεια.

Για την προσαρμογή των επιφανειών στα δεδομένα θα χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή *cfTool* του λογισμικού *matlab*.

Σημαντικό ρόλο στη μη γραμμική παλινδρομική ανάλυση (κεφάλαιο 6) παίζουν οι αρχικές τιμές, που βάζουμε στις σταθερές του μοντέλου, που θέλουμε να προσαρμόσουμε. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν υπάρχει κάποιος αλγοριθμικός τρόπος εύρεσης των αρχικών τιμών, συνεπώς τις τοποθετούμε με βάση την εμπειρία και προσωπικές παρατηρήσεις όσον αφορά τις μετρήσεις και δοκιμές, που έχουν γίνει.

## 8.3 Προσαρμογή στο Μοντέλο της Γείωσης Ανεμογεννήτριας Α

### Απλό Εκθετικό Μοντέλο

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

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

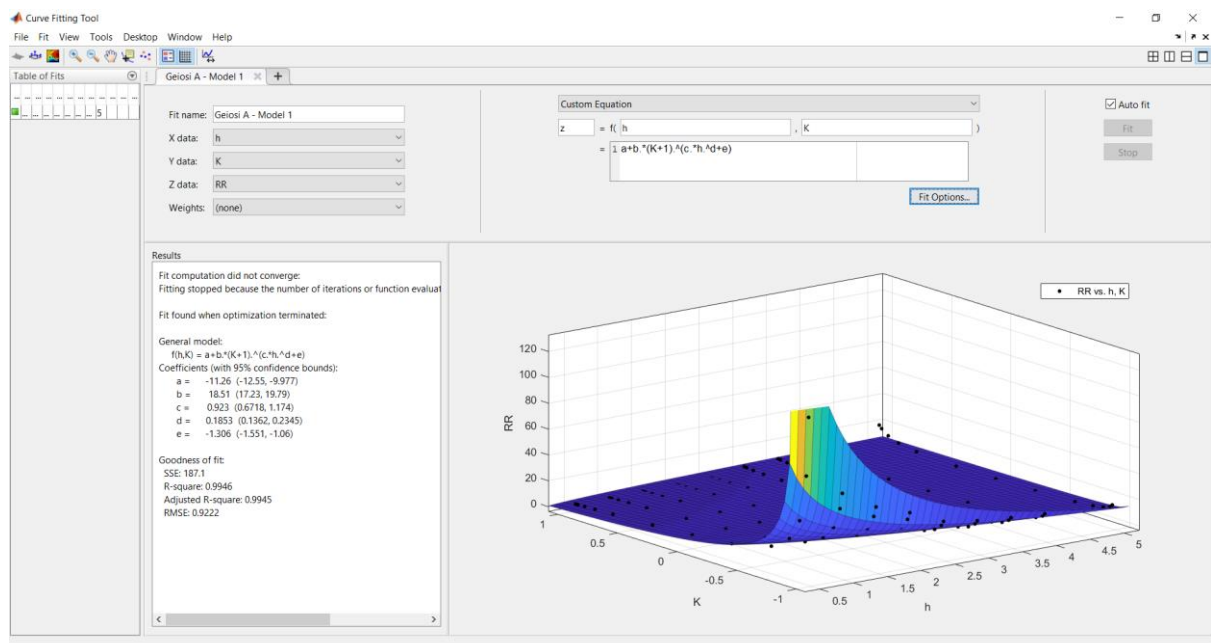
όπου

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

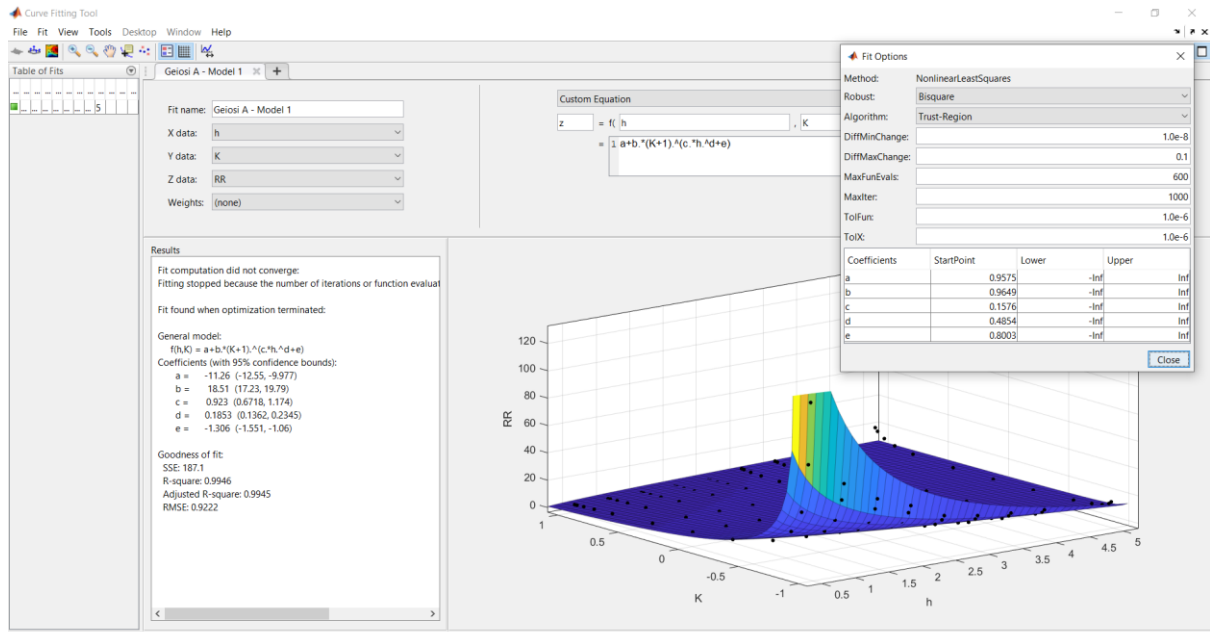
και

$$RR = 100 \cdot R_{\text{γείωσης}} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)$$

στις μετρήσεις για τη γείωση Α/Γ Α (Πίνακας 7.1) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:



**Σχήμα 8.1:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Α



**Σχήμα 8.2:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^d + e$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση A/Γ A ~ *Fit Options*

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω σχήματα, οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned}
 a &= -11.26 \\
 b &= 18.51 \\
 c &= 0.923 \\
 d &= 0.1853 \\
 e &= -1.306
 \end{aligned}$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned}
 SSE &= 187.1 \\
 R^2 &= 0.9946 \\
 Adjusted R^2 &= 0.9945 \\
 RMSE &= 0.9222
 \end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (*StartPoint*) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned}
 a &= 0.9575 \\
 b &= 0.9649 \\
 c &= 0.1576 \\
 d &= 0.4854 \\
 e &= 0.8003
 \end{aligned}$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\gamma\epsilon\acute{\iota}\omega\sigma\eta\varsigma} = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)} \cdot \left( -11.26 + 18.51 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{0,923 \cdot h^{0,1853} - 1,306} \right)$$

## Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

$$RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0.1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$$

όπου

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

$$RR = 100 \cdot R_{\gamma\epsilon\acute{\iota}\omega\sigma\eta\varsigma} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)$$

στις μετρήσεις για τη γείωση Α/Γ Α (Πίνακας 7.1) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις.

Όπως βλέπουμε από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.4), οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$a = -15.28$$

$$b = 22.28$$

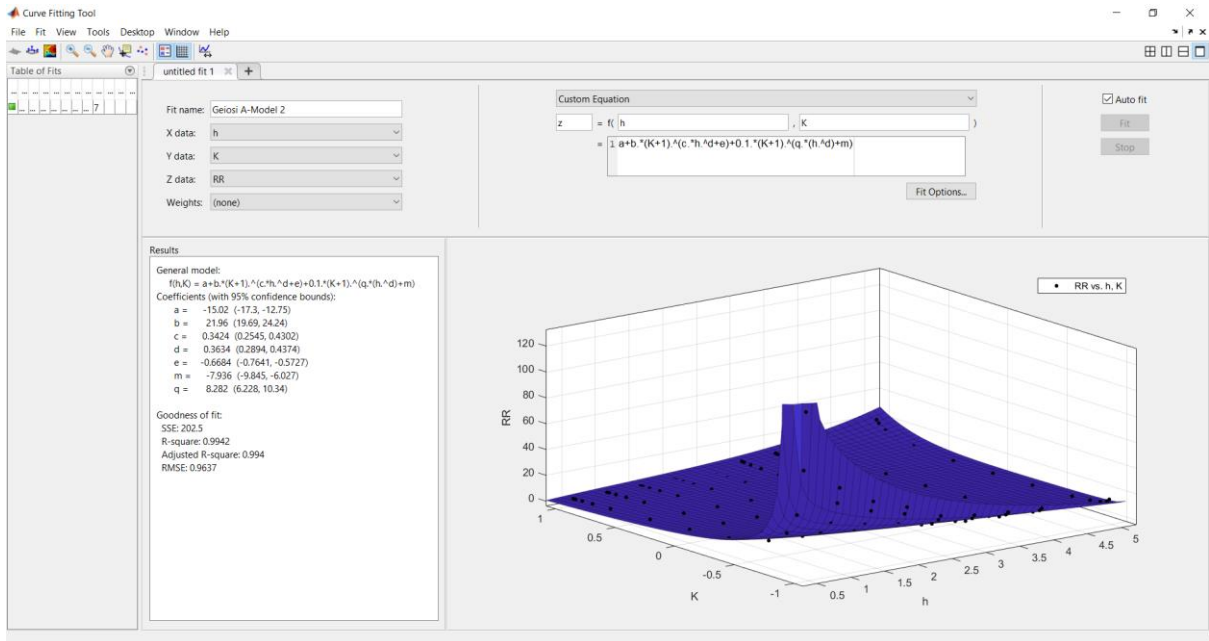
$$c = 0.3129$$

$$d = 0.3823$$

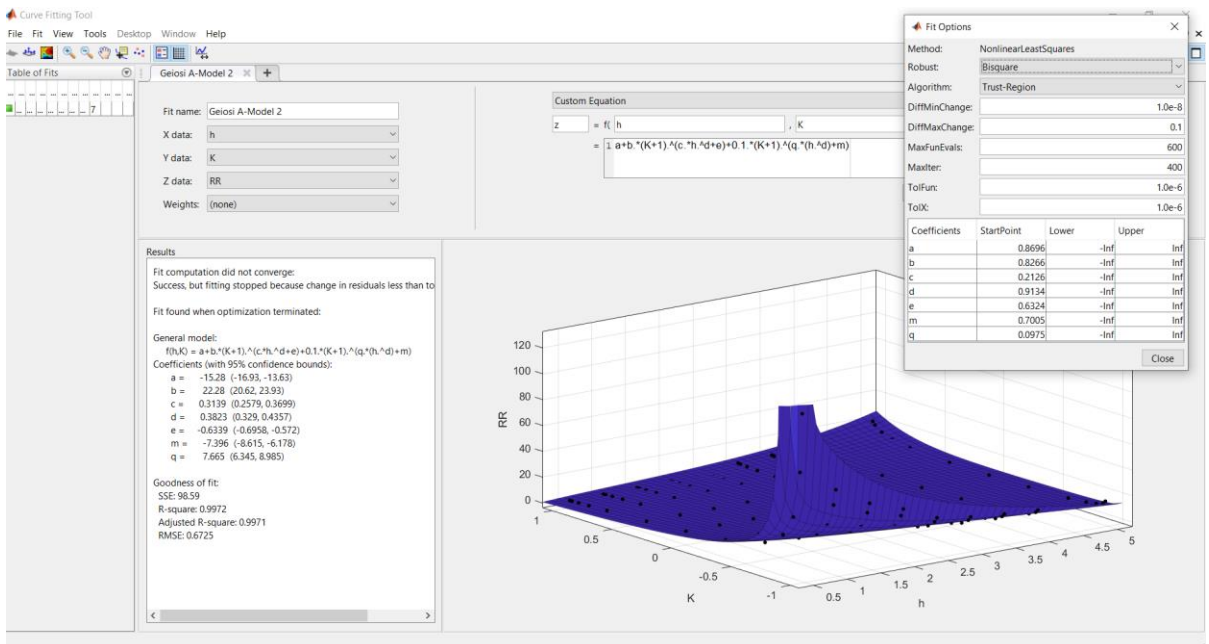
$$e = -0.6339$$

$$m = -7.396$$

$$q = 7.665$$



**Σχήμα 8.3:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Α



**Σχήμα 8.4:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Α ~ Fit Options

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned}
SSE &= 98.59 \\
R^2 &= 0.9972 \\
Adjusted R^2 &= 0.9971 \\
RMSE &= 0.6725
\end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (*StartPoint*) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned}
a &= 0.8696 \\
b &= 0.8266 \\
c &= 0.2126 \\
d &= 0.9134 \\
e &= 0.6324 \\
m &= 0.7005 \\
q &= 0.0975
\end{aligned}$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left( -15.28 + 22.28 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{0.3129 \cdot h^{0.3823} - 0.6339} + 0.1 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{7.665 \cdot h^{0.3823} - 7.396} \right)$$

## 8.4 Προσαρμογή στο Μοντέλο της Γείωσης Ανεμογεννήτριας Β

### Απλό Εκθετικό Μοντέλο

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

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

όπου

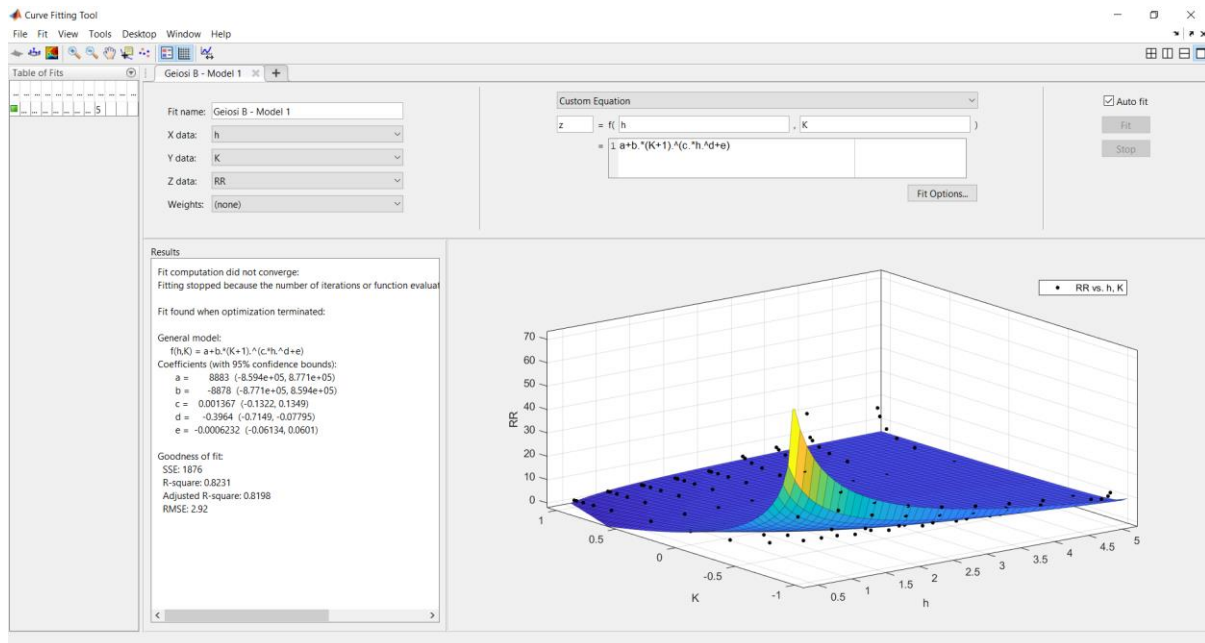


$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

$$RR = 100 \cdot R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)$$

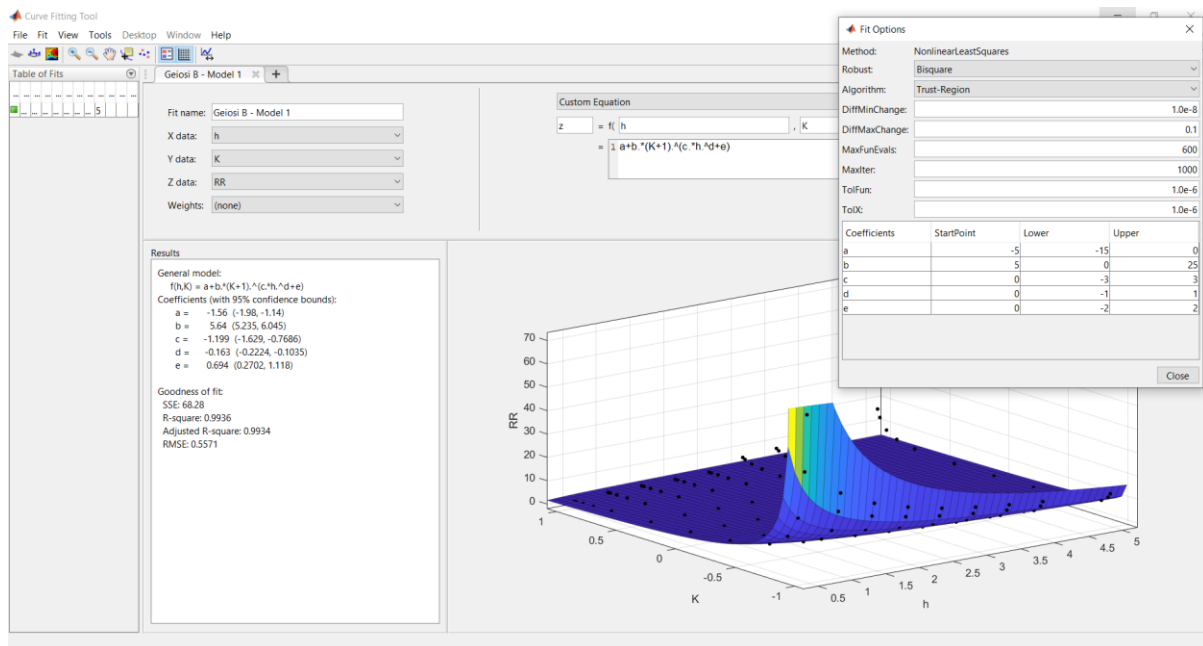
στις μετρήσεις για τη γείωση A/Γ Β (Πίνακας 7.2) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:



**Σχήμα 8.5:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση A/Γ Β

Όπως βλέπουμε από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.6), οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned} a &= -1.56 \\ b &= 5.64 \\ c &= -1.199 \\ d &= -0.163 \\ e &= 0.694 \end{aligned}$$



**Σχήμα 8.6:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^d + e$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση A/Γ B ~ *Fit Options*

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned}
 SSE &= 68.28 \\
 R^2 &= 0.9936 \\
 \text{Adjusted } R^2 &= 0.9934 \\
 RMSE &= 0.5571
 \end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (*StartPoint*) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned}
 a &= -5 \\
 b &= 5 \\
 c &= 0 \\
 d &= 0 \\
 e &= 0
 \end{aligned}$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma} = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)} \cdot \left( -1.56 + 5.64 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-1.199 \cdot h^{-0.163} + 0.694} \right)$$

## Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

$$RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0.1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$$

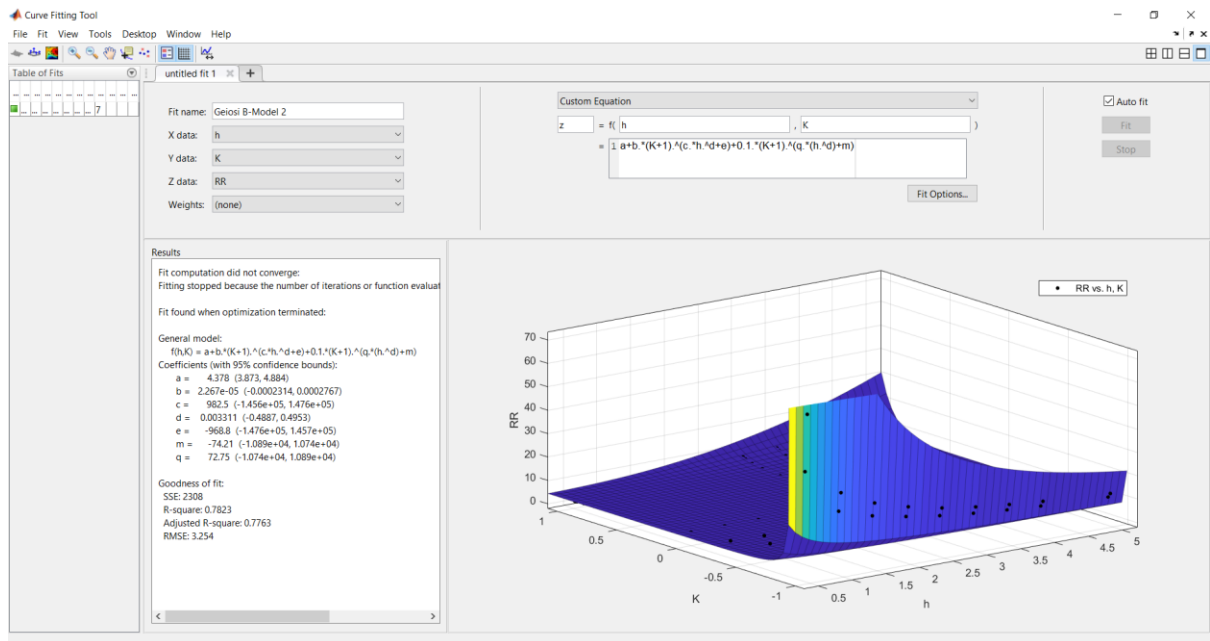
όπου

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

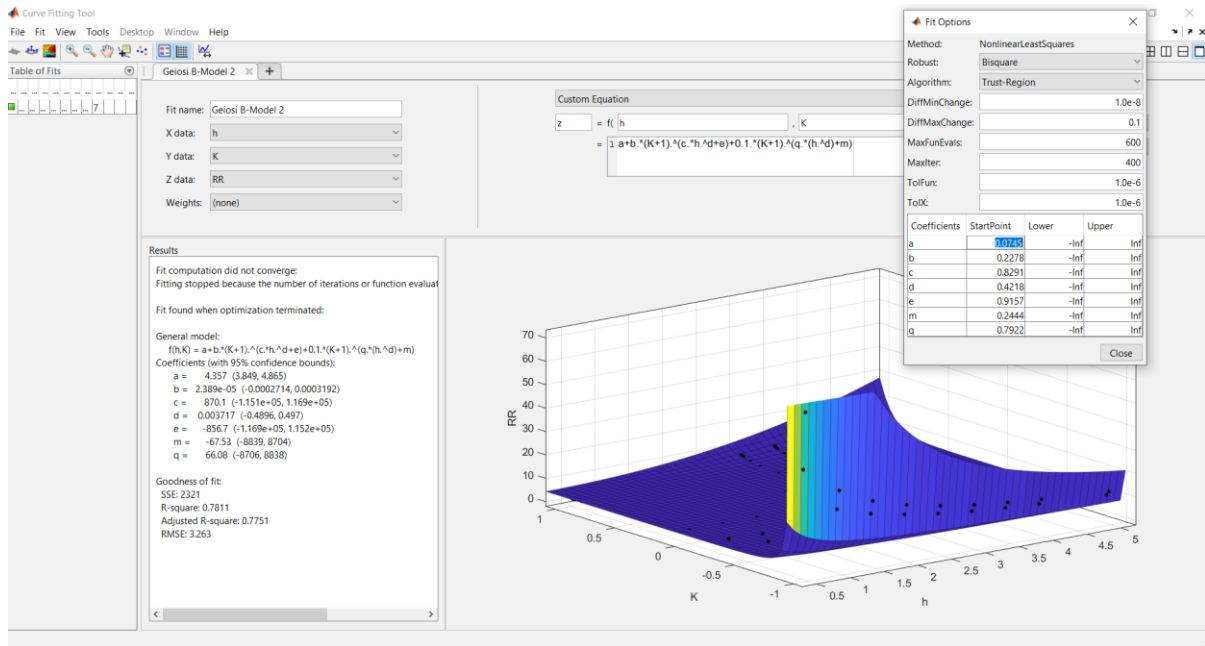
και

$$RR = 100 \cdot R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)$$

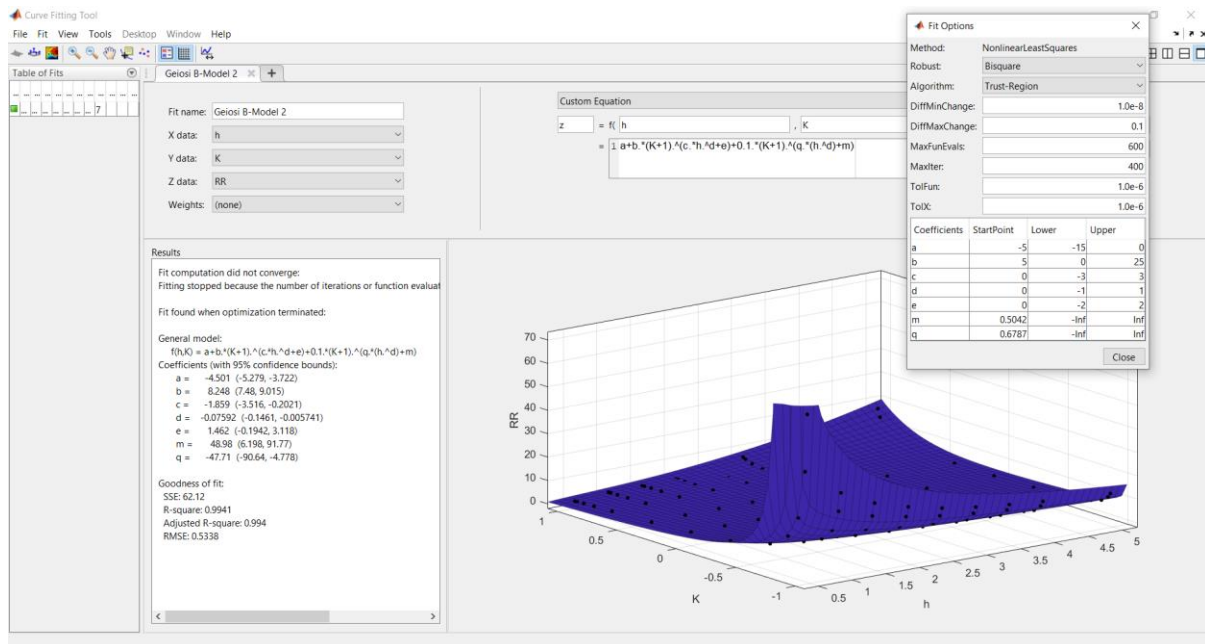
στις μετρήσεις για τη γείωση Α/Γ Β (Πίνακας 7.2) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:



**Σχήμα 8.7:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $R = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Β



**Σχήμα 8.8:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $R = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Β ~ *Fit Options*



**Σχήμα 8.9:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $R = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Β ~ *Fit Options* ~ Βελτιστοποίηση Δεδομένων

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω σχήματα:

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned} a &= -4.501 \\ b &= 8.248 \\ c &= -1.859 \\ d &= -0.07592 \\ e &= 1.462 \\ m &= 48.98 \\ q &= -47.71 \end{aligned}$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned} SSE &= 62.12 \\ R^2 &= 0.9941 \\ Adjusted R^2 &= 0.994 \\ RMSE &= 0.5338 \end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (*StartPoint*) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned} a &= -5 \\ b &= 5 \\ c &= 0 \\ d &= 0 \\ e &= 0 \\ m &= 0.5042 \\ q &= 0.6787 \end{aligned}$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left( -4.501 + 8.248 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-1.859 \cdot h^{-0.07592} + 1.462} + 0,1 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-47.71 \cdot h^{-0.07592} + 48.98} \right)$$

# 8.5 Προσαρμογή στο Μοντέλο της Γείωσης Ανεμογεννήτριας Γ

## Απλό Εκθετικό Μοντέλο

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

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

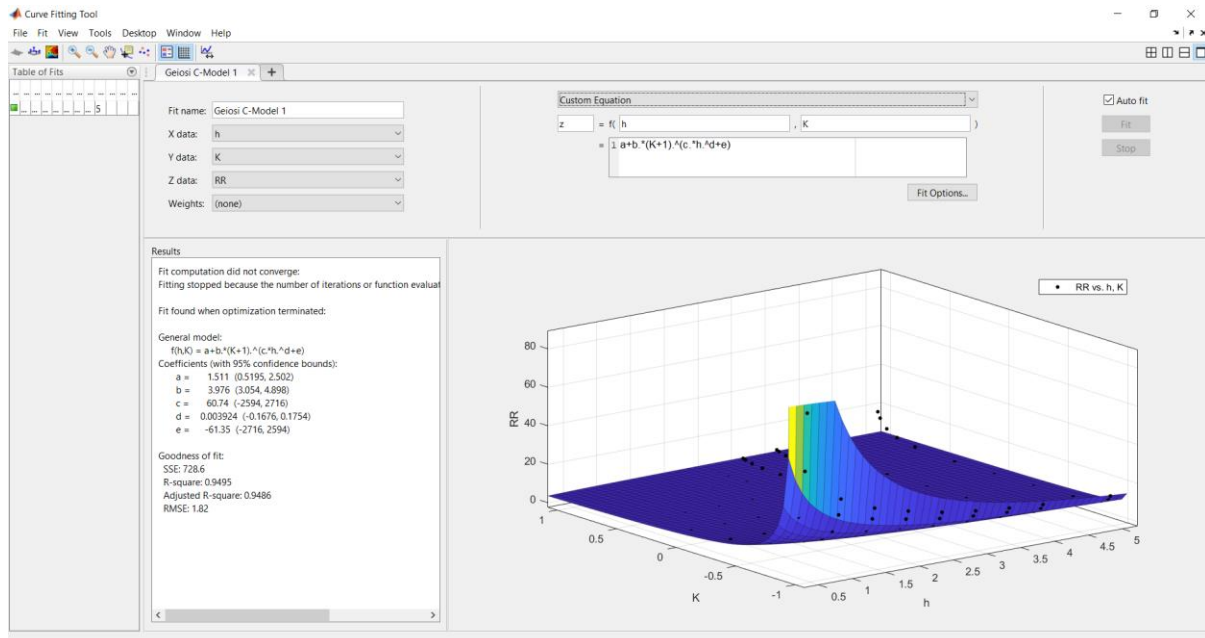
όπου

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

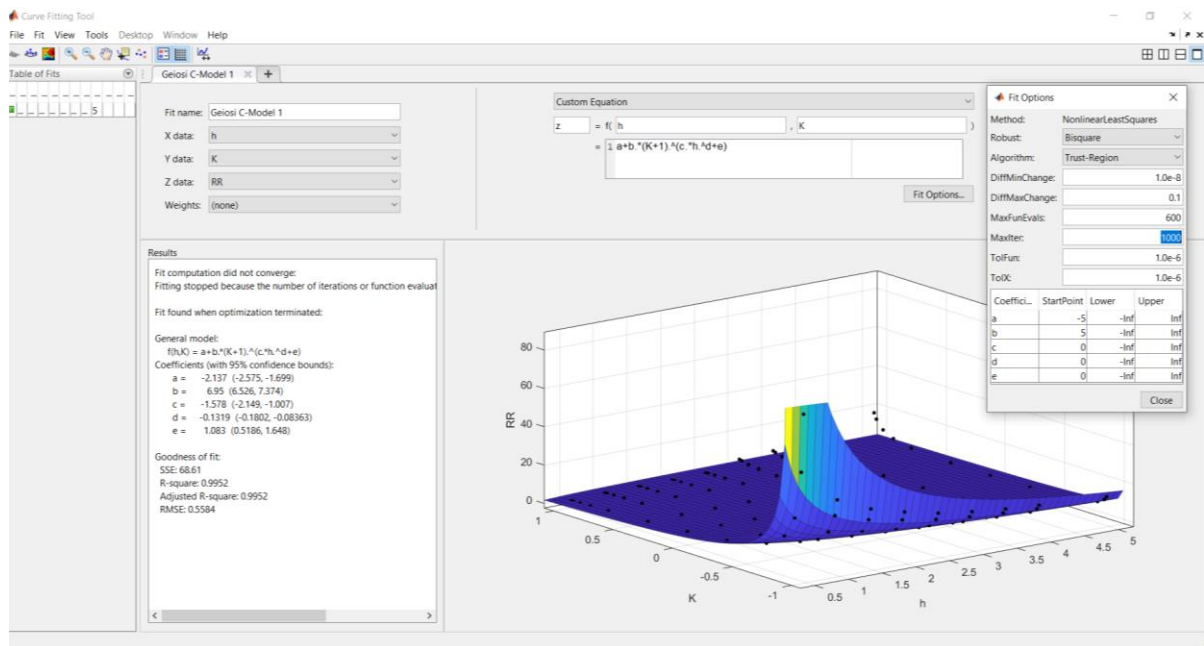
και

$$RR = 100 \cdot R_{\text{γείωσης}} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)$$

στις μετρήσεις για τη γείωση Α/Γ Γ (Πίνακας 7.3) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:



**Σχήμα 8.10:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Γ



**Σχήμα 8.11:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b \cdot K^{c \cdot h^d + e}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ  $\Gamma \sim Fit Options$

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω σχήματα:

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned}
 a &= -2.137 \\
 b &= 6.95 \\
 c &= -1.578 \\
 d &= -0.1319 \\
 e &= 1.083
 \end{aligned}$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned}
 SSE &= 68.61 \\
 R^2 &= 0.9952 \\
 Adjusted R^2 &= 0.9952 \\
 RMSE &= 0.5584
 \end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (*StartPoint*) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned}
 a &= -5 \\
 b &= 5 \\
 c &= 0 \\
 d &= 0
 \end{aligned}$$

$$e = 0$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των M-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\gamma\epsilon\acute{\iota}\omega\sigma\eta\varsigma} = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)} \cdot \left( -2.137 + 6.95 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-0.1578 \cdot h^{-0.1319} + 1.083} \right)$$

## Μοντέλο Αθροίσματος Εκθετικών

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

$$RR = M(K, h) = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0.1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$$

όπου

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

$$RR = 100 \cdot R_{\gamma\epsilon\acute{\iota}\omega\sigma\eta\varsigma} \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)$$

στις μετρήσεις για τη γείωση Α/Γ Γ (Πίνακας 7.3) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:

Όπως βλέπουμε από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.13), οι συντελεστές παίρνουν τις τιμές:

$$a = -6.794$$

$$b = 11.32$$

$$c = -2.091$$

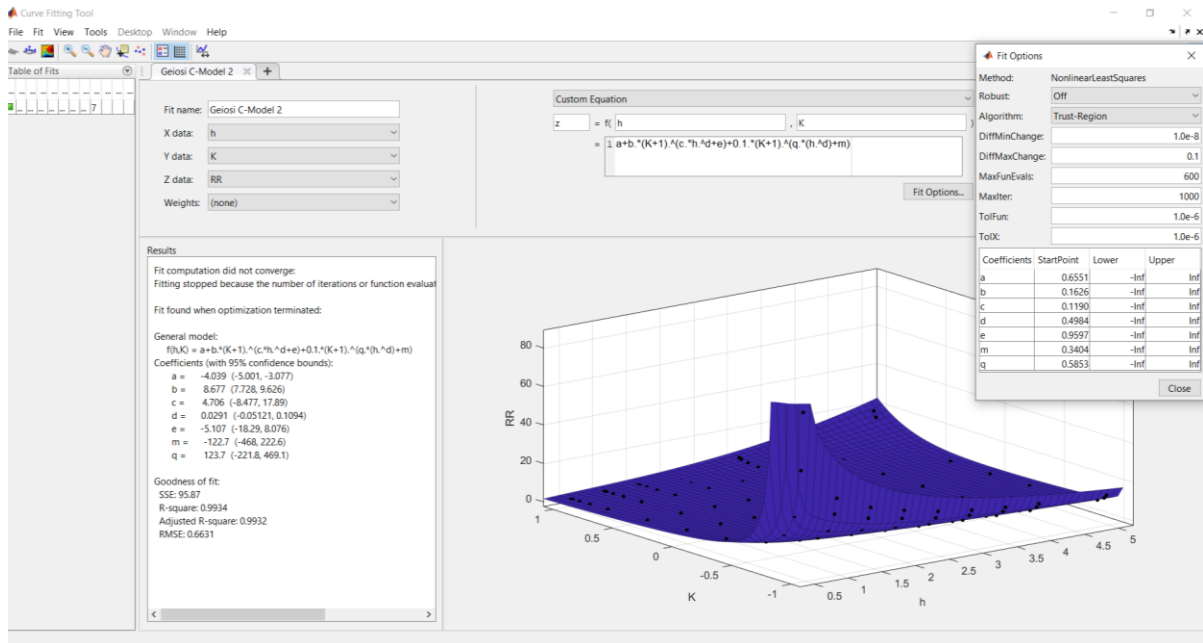
$$d = -0.06741$$

$$e = 1.738$$

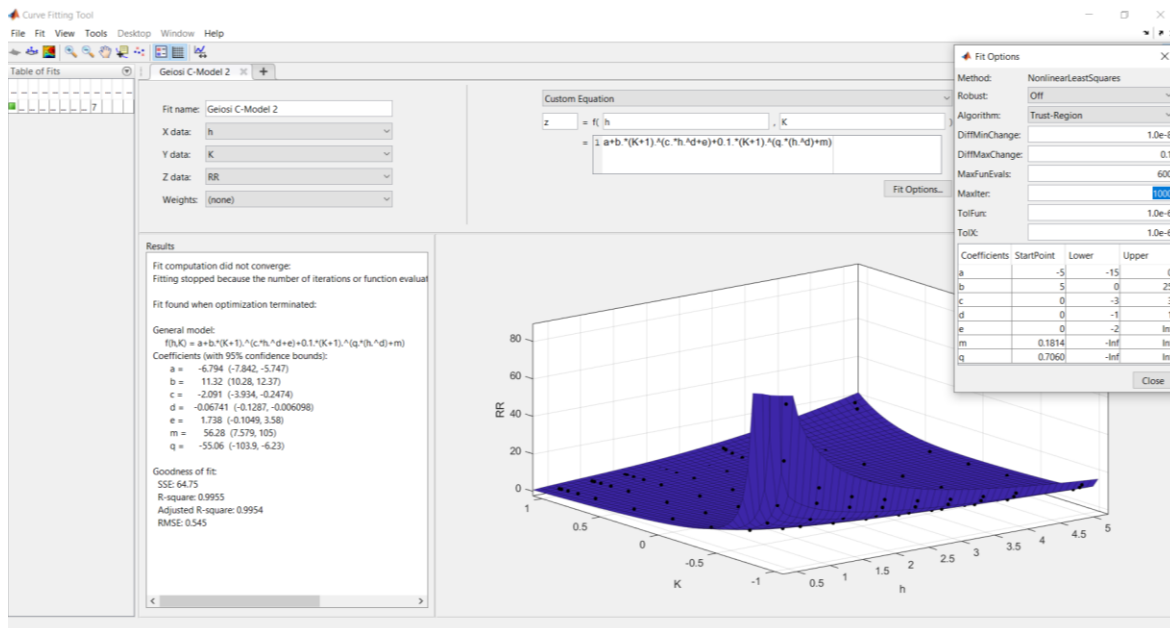
$$m = 56.28$$

$$q = -55.06$$





**Σχήμα 8.12:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $R = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Γ



**Σχήμα 8.13:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $R = M(K, h) = a + b \cdot K^c \cdot h^{d+e} + 0,1 \cdot K^q \cdot h^{d+m}$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Γ ~ Fit Options

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned}
SSE &= 64.75 \\
R^2 &= 0.9955 \\
Adjusted R^2 &= 0.9954 \\
RMSE &= 0.545
\end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (*StartPoint*) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned}
a &= -5 \\
b &= 5 \\
c &= 0 \\
d &= 0 \\
e &= 0 \\
m &= 0.1814 \\
q &= 0.7060
\end{aligned}$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 \cdot \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} \cdot \left( -6.794 + 11.32 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-2.091 \cdot h^{-0.06741} + 1.738} + 0,1 \cdot \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-55.06 \cdot h^{-0.06741} + 56.28} \right)$$

## 8.6 Μεθοδολογία για τη Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ & Προσαρμογή Μοντέλων

Με βάση τη μεθοδολογία, που ακολουθήσαμε για τις γειώσεις Α/Γ Α, Β και Γ, αναλυτική περιγραφή των οποίων έγινε στο κεφάλαιο 8.2, δημιουργήσαμε δύο νέες μαθηματικές σχέσεις για τη γείωση Α/Γ Δ.

Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί για τις γειώσεις Α/Γ Α, Β και Γ, τα μεγεθή που μετρούσαμε για να βρούμε την αντίσταση γείωσης, ήταν η ειδική αντίσταση πρώτου και δεύτερου στρώματος, καθώς και το ύψος του πρώτου στρώματος.

Αναπτύσσοντας, λοιπόν, την ήδη υπάρχουσα έρευνα, αυτό που θέλαμε να πετύχουμε, ήταν να δούμε πως μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης γείωσης της Α/Γ, χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μεγέθη, αλλά τώρα και το εμβαδό γείωσης, καθώς και το συνολικό θαμμένο μήκος του κύριου ηλεκτροδίου. Το μαθηματικό αυτό μοντέλο το έχουμε ονομάσει «Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους».

Στη συνέχεια και θέλοντας να εμβαθύνουμε και άλλο την έρευνα, διακρίναμε το συνολικό εμβαδό σε εμβαδό πρώτου και δεύτερου στρώματος και το συνολικό μήκος καλωδίου σε μήκος καλωδίου πρώτου και δεύτερου στρώματος αντίστοιχα. Το μαθηματικό αυτό μοντέλο το έχουμε ονομάσει «Μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων»

## Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους

Η τιμή της αντίστασης γείωσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση (6.21), όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω στο κεφάλαιο 6.

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

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

$$RR = M(K1, K2) = a \cdot K1^m \cdot K2^n$$

όπου

$$K1 = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}}$$

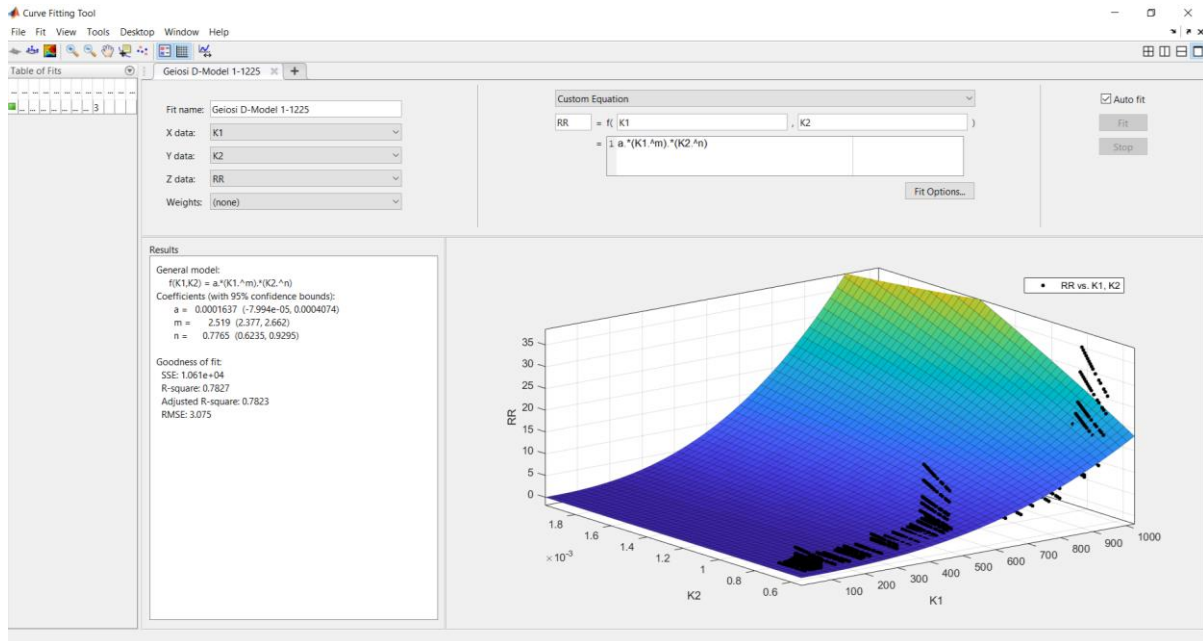
$$K2 = \frac{1}{E}$$

και

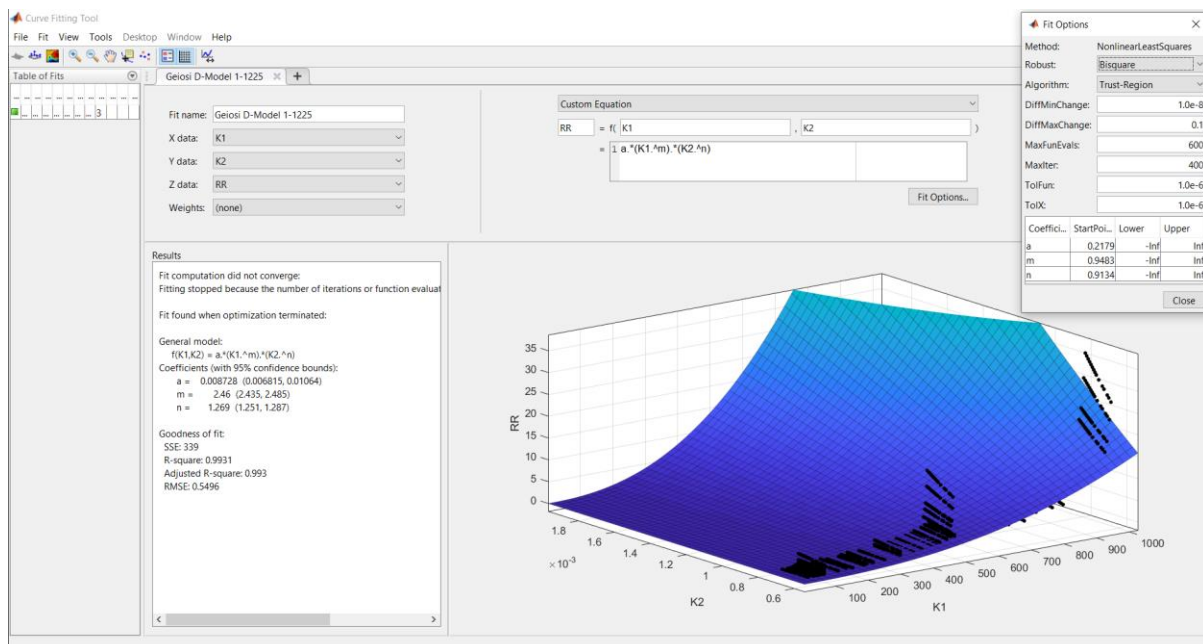
$$RR = R \cdot K1 \cdot K2$$

$$RR = R \cdot \left[ \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{E} \right]$$

στις μετρήσεις για τη γείωση Α/Γ Δ και τις 1125 μετρήσεις (Πίνακας 7.4) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:



**Σχήμα 8.14:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K1, K2) = a \cdot K1^m \cdot K2^n$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Δ των 1125 μετρήσεων



**Σχήμα 8.15:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K1, K2) = a \cdot K1^m \cdot K2^n$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Δ των 1125 μετρήσεων ~ *Fit Options*

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω σχήματα:

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned}
 a &= 0.008728 \\
 m &= 2.46 \\
 n &= 1.269
 \end{aligned}$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned}
 SSE &= 339 \\
 R^2 &= 0.9931 \\
 Adjusted R^2 &= 0.993 \\
 RMSE &= 0.5496
 \end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (StartPoint) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned}
 a &= 0.2179 \\
 m &= 0.9483 \\
 n &= 0.9134
 \end{aligned}$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = 0.008728 \cdot \left[ \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{2.46-1} \cdot \left[ \frac{1}{E} \right]^{1.269-1}$$

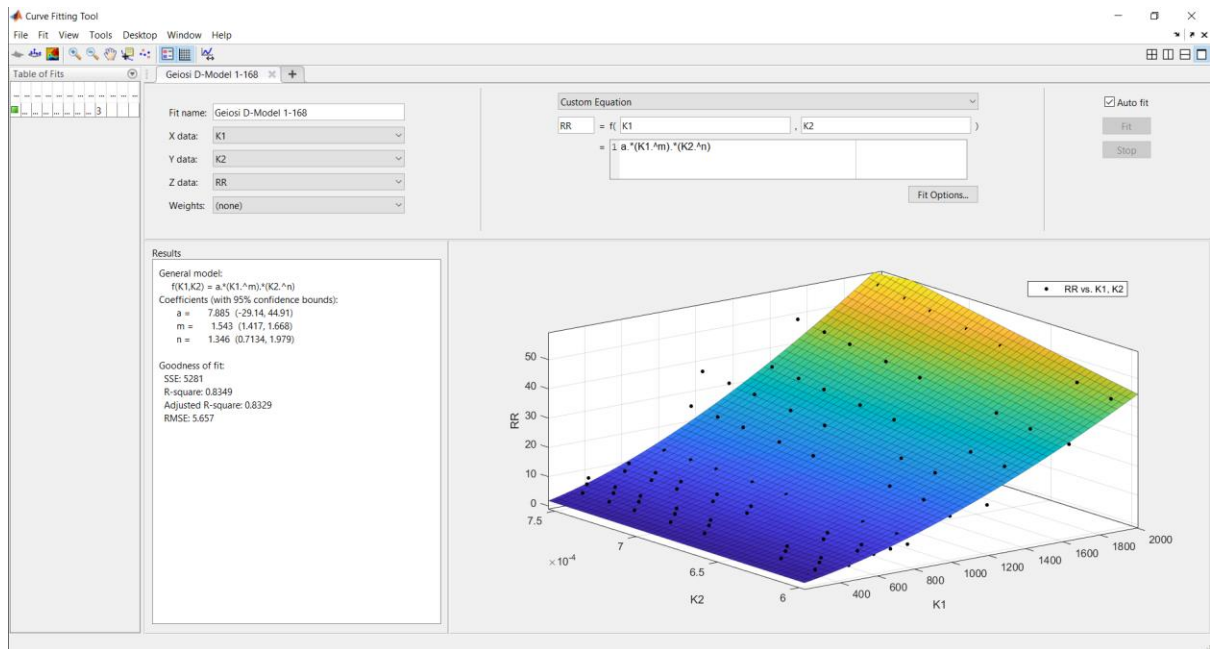
Τώρα όσον αφορά τη γείωση Α/Γ Δ και τις 168 μετρήσεις για διαφορετικούς τύπους εδαφών (Πίνακας 7.5) πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα (8.18), το μαθηματικό μοντέλο «Μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους» για τις 168 μετρήσεις δεν επιδέχεται περαιτέρω βελτιστοποίηση.

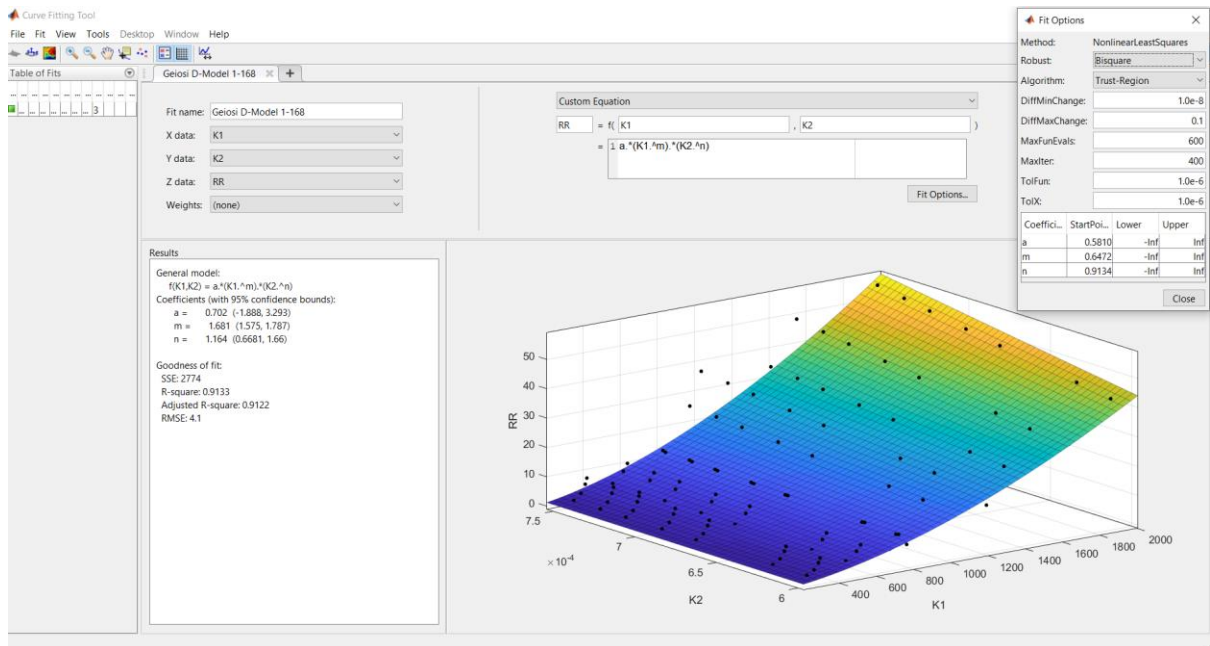
Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω σχήματα:

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

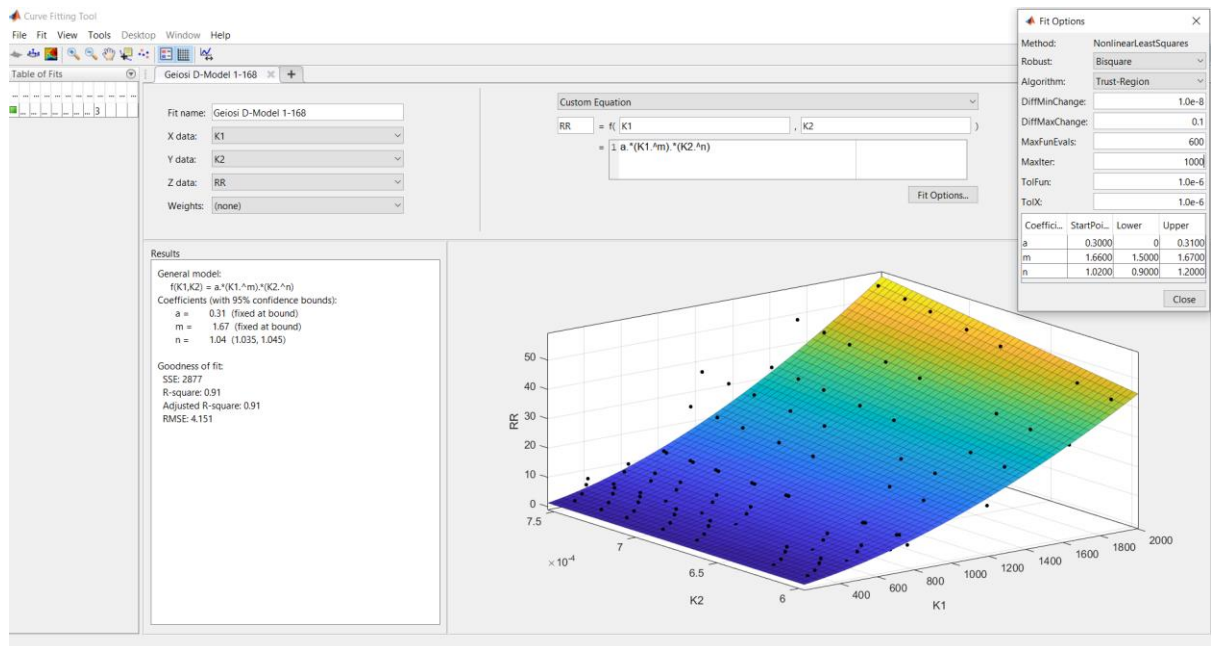
$$\begin{aligned}
 a &= 0.702 \\
 m &= 1.681 \\
 n &= 1.164
 \end{aligned}$$



**Σχήμα 8.16:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K1, K2) = a \cdot K1^m \cdot K2^n$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Δ των 168 μετρήσεων



**Σχήμα 8.17:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K1, K2) = a \cdot K1^m \cdot K2^n$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Δ των 168 μετρήσεων ~ *Fit Options*



**Σχήμα 8.18:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K1, K2) = a \cdot K1^m \cdot K2^n$  στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Δ των 168 μετρήσεων ~ *Fit Options*

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$SSE = 2774$$

$$R^2 = 0.9133$$

$$Adjusted R^2 = 0.9122$$

$$RMSE = 4.1$$

Αρχικές τιμές (StartPoint) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$a = 0.5810$$

$$m = 0.6472$$

$$n = 0.9134$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\gamma\epsilon\omega\sigma\eta\varsigma} = 0.702 \cdot \left[ \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \frac{\rho_2}{h}} \right]^{1.681-1} \cdot \left[ \frac{1}{E} \right]^{1.164-1}$$

## Μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων

Η τιμή της αντίστασης γείωσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση (6.22), όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω στο κεφάλαιο 6. Η λύση της παρακάτω σχέσης για να μπορεί να λυθεί με την εντολή *cftool* στο λογισμικό του *matlab* αποδεικνύεται στο κεφάλαιο 6.

$$R(\rho_1, \rho_2, l_1, l_2, h, E_1, E_2) = \left( \frac{h}{\rho_1} \right)^a \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l_1 \cdot l_2}{b \frac{\rho_1 \cdot l_1}{E_1} + c \frac{\rho_2 \cdot l_2}{E_2}}$$

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

$$RR = M(K1, K2) = K1^a \cdot \frac{1}{b K2 + c}$$

$$RR = M(K1, K2) = \left[ \frac{h}{\rho_1} \right]^a \cdot \frac{1}{b \frac{E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1}{E_1 \cdot \rho_2 \cdot l_2} + c}$$

όπου

$$K1 = \frac{h}{\rho_1}$$

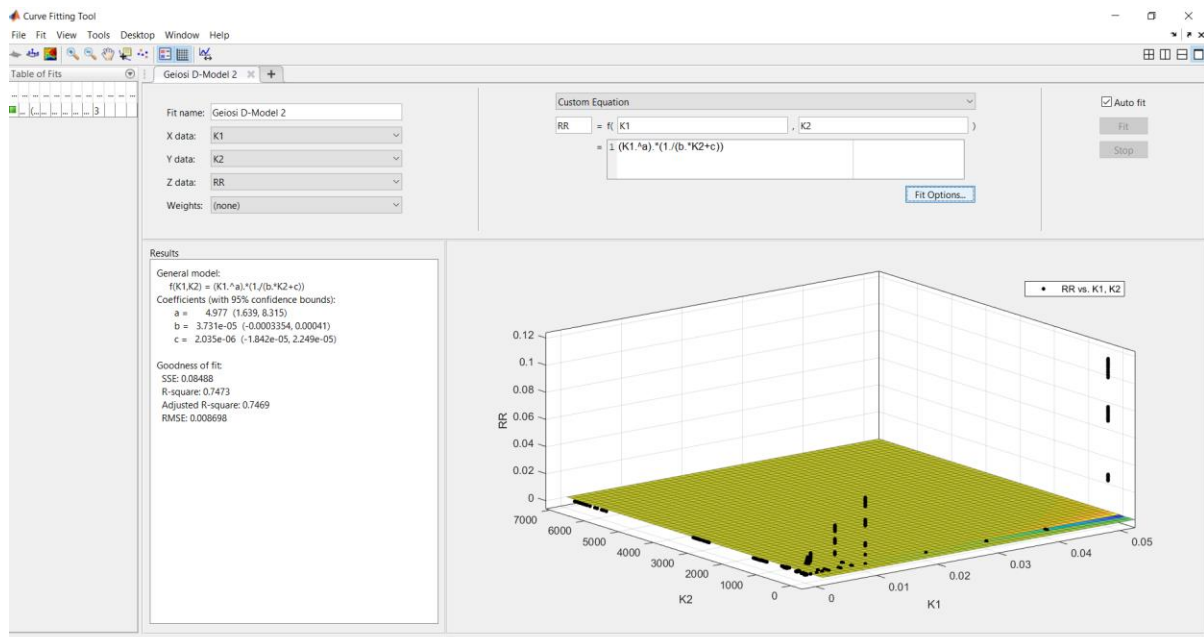
$$K2 = \frac{E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1}{E_1 \cdot \rho_2 \cdot l_2}$$

και

$$RR = \frac{R}{E_2 \cdot \rho_1 \cdot l_1}$$

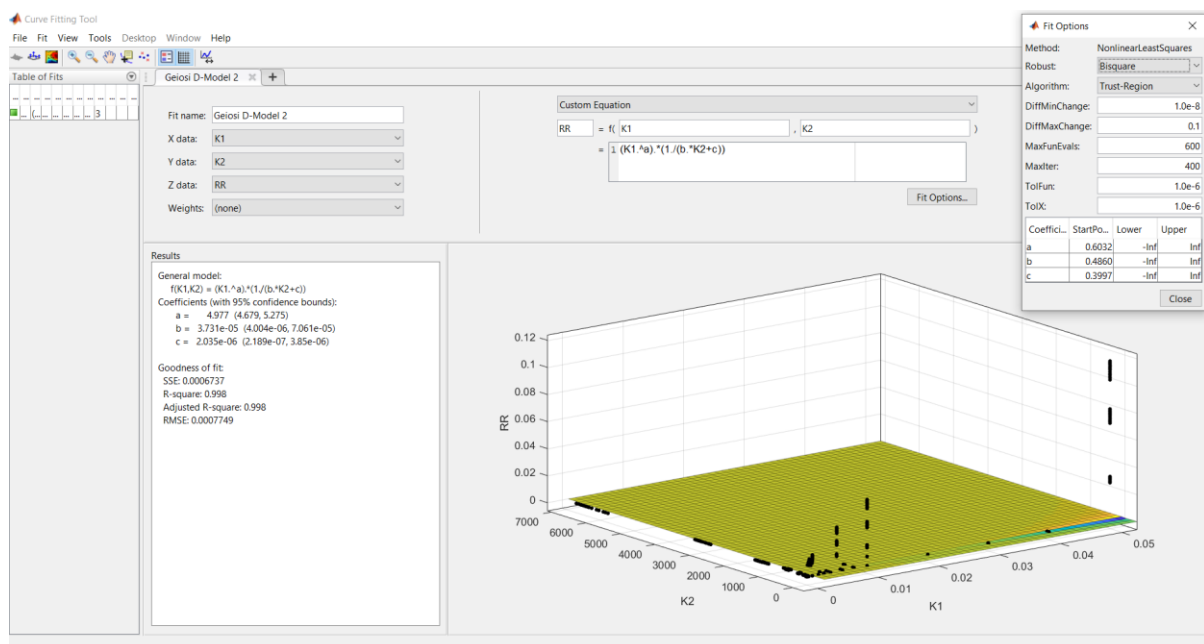
στις μετρήσεις για τη γείωση Α/Γ Δ και τις 1125 μετρήσεις (Πίνακας 7.6) και έτσι πήραμε τις παρακάτω απεικονίσεις:





**Σχήμα 8.19:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K1, K2) = K1^a \cdot \frac{1}{b K2 + c}$

στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Δ για το «Μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων»



**Σχήμα 8.20:** Προσαρμογή της Επιφάνειας  $RR = M(K1, K2) = K1^a \cdot \frac{1}{b K2 + c}$

στα Πειραματικά Δεδομένα για τη Γείωση Α/Γ Δ για το «Μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων» ~ *Fit Options*

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω σχήματα:

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned}a &= 4.977 \\b &= 0.00003731 \\c &= 0,000002035\end{aligned}$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$\begin{aligned}SSE &= 0.0006737 \\R^2 &= 0.998 \\Adjusted R^2 &= 0.998 \\RMSE &= 0.000749\end{aligned}$$

Αρχικές τιμές (*StartPoint*) που χρησιμοποιήθηκαν:

$$\begin{aligned}a &= 0.6032 \\b &= 0.4860 \\c &= 0.3997\end{aligned}$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο *Trust Region Algorithm*. Παράλληλα, έγινε και χρήση της ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *bisquare*, που αποτελεί ειδική περίπτωση των *M*-εκτιμητών.

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\gammaείωσης} = \left(\frac{h}{\rho_1}\right)^{4.977} \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot l_1 \cdot l_2}{0.00003731 \frac{\rho_1 \cdot l_1}{E_1} + 0.000002035 \frac{\rho_2 \cdot l_2}{E_2}}$$

## 8.7 Κώδικας *MATLAB* στη Μελέτη μας

Ακολουθεί ο κώδικας, που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα μαθηματικά μοντέλα και για όλους τους τύπους γείωσης.

### 8.7.1 Γειώσεις Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ

```
r1=VarName1; %Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος
r2=VarName2; % Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος
h=VarName3; %Ύψος Πρώτου Στρώματος
K = (r1-r2)/(r1+r2);
L=((r1-r2)/(r1+r2))+1; %K+1
R=VarName4; %Αντίσταση Γείωσης από Μετρήσεις
RR=100.*R.*((1./r1)+(1./r2)+(1./sqrt(r1.*r2)));
x=[r1;r2;h;R]';
```

### 8.7.2 Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους

```
r1=VarName1; %Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος
r2=VarName2; % Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος
h=VarName3; %Ύψος Πρώτου Στρώματος
E=VarName4; %Εμβαδό Γείωσης
l=VarName5; %Μήκος Κύριου Ηλεκτροδίου
K1 = r1.*r2./(r1+r2./h);
K2=1./E;
R=VarName6; %Αντίσταση Γείωσης από Μετρήσεις
RR=R.*K1.*K2;
x=[r1;r2;h;A;l;R]';
```

### 8.7.3 Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων

```
r1=VarName1; %Ειδική Αντίσταση Πρώτου Στρώματος
r2=VarName2; % Ειδική Αντίσταση Δεύτερου Στρώματος
h=VarName3; %Ύψος Πρώτου Στρώματος
E1=VarName4; %Εμβαδό Γείωσης Πρώτου Στρώματος
E2=VarName5; %Εμβαδό Γείωσης Δεύτερου Στρώματος
l1=VarName6; %Μήκος Κύριου Ηλεκτροδίου Πρώτου Στρώματος
l2=VarName7; %Μήκος Κύριου Ηλεκτροδίου Δεύτερου Στρώματος
K1 = h./r1;
K2=(E2.*r1.*l1)/(E1.*r2.*l2);
R=VarName8; %Αντίσταση Γείωσης από Μετρήσεις
RR=R./(E2.*r1.*l1);
x=[r1;r2;h;E1;E2;l1;l2;R]';
```



# Κεφάλαιο 9

## Επίλογος

### 9.1 Σύνοψη

Στα δύο πρώτα κεφάλαια της εργασίας έγινε μία σύντομη εισαγωγή στις ΑΠΕ, στα χαρακτηριστικά τους και τη διεθνή, ευρωπαϊκή και ελληνική ανάπτυξη, που παρουσιάζουν τα τελευταία έτη. Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε αναφορά στην αιολική ενέργεια και τις Α/Γ, προσδίδοντας κάποια στοιχεία και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Ακολούθησαν τρία κεφάλαια για τα συστήματα γείωσης, το ρόλο, την ορολογία και το σχεδιασμό τους. Παράλληλα, αναλύθηκαν κάποια βασικά χαρακτηριστικά των εδαφών και δόθηκαν εισαγωγικές έννοιες για τη μοντελοποίηση τους σε μονοστρωματικά, διστρωματικά ή πολυστρωματικά μοντέλα. Ταυτόχρονα, περιγράφηκαν αναλυτικά τα συστήματα γειώσεων Α/Γ, που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία. Δόθηκαν ορισμένα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά, που βοήθησαν στη σύλληψη και τη σχεδίαση των γειώσεων αυτών, καθώς και κάποιες εικόνες από προσωπική μου επίσκεψη σε αιολικό πάρκο, που απεικονίζουν συστήματα γείωσης Α/Γ.

Στο έκτο κεφάλαιο έγινε μία εισαγωγή στη μη γραμμική πολλαπλή ανάλυση παλινδρόμησης για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, μαθηματικό μοντέλο, που όπως είδαμε, αποτέλεσε κυρίαρχο στοιχείο της εργασίας. Πρόκειται για μία μοντελοποίηση της ποσότητας της αντίστασης γείωσης σε ένα μοντέλο, ίδιο για όλους τους τύπους γειώσεων Α/Γ, στο οποίο θα αλλάζουν μόνο οι σταθεροί συντελεστές κατά περίπτωση.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφηκε η λειτουργία του λογισμικού *CDEGS*, που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις, όπως και η διαδικασία λήψης των αποτελεσμάτων. Αναλύθηκε ο επιλύτης *MALZ*, με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις της τιμής αντίστασης γείωσης για τις γειώσεις Α/Γ Α, Β και Γ, καθώς και ο επιλύτης *MALT*, με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις της τιμής αντίστασης γείωσης για τη γείωση Α/Γ Δ.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των δεδομένων σε επιφάνειες προς δημιουργία των μαθηματικών μοντέλων και των εξισώσεων. Ταυτόχρονα, υπήρξαν απεικονίσεις από το *cftool* του *matlab*, καθώς και ο κώδικας, που χρησιμοποιήθηκε, για όλα τα μαθηματικά μοντέλα και για κάθε τύπο γείωσης.

## 9.2 Συμπεράσματα

### 9.2.1 Γειώσεις Ανεμογεννητριών Α, Β & Γ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τις γειώσεις Α/Γ Α, Β και Γ ήταν να μπορέσουμε να εξάγουμε ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο θα έχει ως είσοδο τις ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1$  και  $\rho_2$  ενός διστρωματικού μοντέλου εδάφους, καθώς και το βάθος  $h$  του άνω στρώματος και θα δίνει ως αποτέλεσμα την αντίσταση γείωσης της Α/Γ.

Σημαντική προϋπόθεση ήταν το μοντέλο αυτό να ισχύει για κάθε τύπο γείωσης ανεμογεννήτριας, αλλάζοντας μόνο τους σταθερούς συντελεστές. Έτσι, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις μας πάνω στις γειώσεις, την παλινδρομική ανάλυση, τις βελτιστοποιήσεις και κάνοντας πολλές δοκιμές καταλήξαμε σε δύο πιθανά μοντέλα:

- **Απλό εκθετικό μοντέλο**
- **Μοντέλο αθροίσματος εκθετικών**

Έτσι κάνοντας χρήση της παλινδρομικής ανάλυσης προσαρμόσαμε τα μοντέλα αυτά στις μετρήσεις που είχαμε.

Ο αναγνώστης μπορεί εύκολα να αντιληφθεί από τα γραφήματα, που παρουσιάστηκαν, ότι και στα δύο μοντέλα η ποιότητα της προσαρμογής είναι εξαιρετική. Ιδιαίτερης σημασίας χρήζει μάλιστα το γεγονός, ότι η προσαρμογή είναι εξαιρετική ανεξάρτητα από τον τύπο γείωσης. Συνεπώς, όπως ακριβώς θέλαμε, το ίδιο μοντέλο, με αλλαγμένους τους σταθερούς συντελεστές, μπορεί να προβλέψει την αντίσταση γείωσης για όλους τους τύπους γείωσης, που χρησιμοποιήσαμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Εύκολα μπορεί κάποιος να διαπιστώσει, ότι η ποιότητα της προσαρμογής είναι λίγο καλύτερη στο μοντέλο αθροίσματος εκθετικών. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό είναι πιο πολύπλοκο σε σχέση με το απλό μοντέλο και είναι πολύ πιο δύσκολο να γίνει η προσαρμογή του στα δεδομένα, μιας και έχει πολύ πιο πολλές σταθερές, άρα και περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι η βελτιστοποίηση ενδέχεται να «κολλήσει» σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και όχι στο ολικό ελάχιστο.

Ιδιαίτερο κέρδος των δύο αυτών μαθηματικών μοντέλων είναι η εύρεση σχέσεων, που μπορούν να περιγράψουν την αντίσταση γείωσης μιας Α/Γ ανεξάρτητα από τον τύπο της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο αναγνώστης να μπορεί, για οποιοδήποτε τύπο Α/Γ θέλει, να προσαρμόσει τις μετρήσεις του στο μοντέλο και να πάρει τη δική του εξίσωση, άρα και τις δικές του σταθερές.

Ακολουθεί η μεθοδολογία με την οποία ο χρήστης μπορεί, για το δικό του τύπο γείωσης μιας Α/Γ, να προσαρμόσει τις μετρήσεις στην εξίσωση:

1. Σχεδιασμός του συστήματος γείωσης της Α/Γ στο πακέτο *SESCAD* του λογισμικού *CDEGS* ή εναλλακτικά στο *AutoCAD* (αποθήκευση κάτοψης γείωσης ως *.dxf*) και η εισαγωγή του στο *CDEGS*. Έπειτα, ακολουθεί εκτέλεση των προσομοιώσεων. Αν δεν πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις μπορεί κάποιος να κάνει χρήση πραγματικών μετρήσεων. Εγγραφή των αποτελεσμάτων σε φύλλο *excel*, το οποίο θα περιέχει για κάθε τιμή της αντίστασης γείωσης τις ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , καθώς και το βάθος του πρώτου στρώματος  $h$ .
2. Εφαρμογή των παραπάνω δεδομένων ( $\rho_1, \rho_2, h, R_{\text{γείωσης}}$ ) στο *excel* και εισαγωγή τους στο λογισμικό *matlab*, χρησιμοποιώντας τον κώδικα του κεφαλαίου 8.7.1.
3. Εκκίνηση του πακέτου *sftool* του *matlab* ή του πακέτου *cftool* (χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία) για νεότερες εκδόσεις και επιλογή προσαρμογής με προσαρμοσμένη εξίσωση (*Custom Equation*).
4. Πληκτρολόγηση του απλού εκθετικού μοντέλου στη θέση της εξίσωσης και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *Bisquare*.
5. Υπολογισμός των τιμών από το *matlab*. Ενδέχεται στο στάδιο αυτό να μην είναι σωστή η προσαρμογή. Αυτό δεν πρέπει να μας ανησυχεί, διότι μπορεί να οφείλεται στη λανθασμένη επιλογή αρχικών τιμών, οι οποίες, όπως έχουμε αναφέρει, είναι ιδιαίτερα σημαντικές ώστε η βελτιστοποίηση να βρει το ολικό ελάχιστο και να μην κολλήσει σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.
6. Ορθή επιλογή των αρχικών τιμών. Δυστυχώς, δεν υπάρχει υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία, γεγονός που κάνει το έργο μας δυσκολότερο. Παρ' όλ' αυτά υπάρχει σίγουρα κάποιος συνδυασμός αρχικών τιμών, ο οποίος θα κάνει πολύ καλή την προσαρμογή. Η χρήση αρχικών τιμών, που έχουν ήδη δοθεί εδώ, αποτελεί μία αρκετά καλή ιδέα, ειδικά αν τα δεδομένα έχουν τιμές τις ίδιας τάξης μεγέθους. Το πιθανότερο είναι η προσαρμογή να κριθεί αρκετά καλή.
7. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο με το οποίο αποφασίζουμε, ότι η προσαρμογή, που έχουμε, κάνει, είναι η τιμή  $R^2$  να είναι πάνω από 0.99.
8. Εξάγουμε την εξίσωση του μοντέλου και κάνοντας τους αντίστροφους μετασχηματισμούς καταλήγουμε σε μία σχέση της μορφής  $R = R(\rho_1, \rho_2, h)$
9. Τώρα αν επιθυμούμε αντί για το απλό εκθετικό μοντέλο να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών, τότε συνεχίζουμε ακριβώς εκεί που είχαμε μείνει, γράφοντας την υπόλοιπη εξίσωση και ξανακάνοντας *fit*. Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ακόμη και τώρα να μην είναι αμέσως σωστή η προσαρμογή, διότι θα πρέπει να «παίζουμε» με τις αρχικές τιμές. Ακολουθούμε ακριβώς την ίδια διαδικασία με πριν.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι καλό είναι να μην προσθέσουμε άλλη μία μεταβλητή στο μοντέλο αθροίσματος εκθετικών π.χ. να κάνουμε την σταθερά 0.1 μεταβλητή σταθερά ή γενικότερα να βάλουμε και άλλη μεταβλητή. Αυτό διότι το συγκεκριμένο μοντέλο έχει ήδη πολλούς βαθμούς ελευθερίας και η προσθήκη μιας ακόμη μεταβλητής αυξάνει δραματικά τον κίνδυνο να κολλήσει η βελτιστοποίηση σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και να μην βρει το ολικό ελάχιστο. Έτσι έχει προκύψει η εξίσωση  $R_{\text{γείωσης}} = R(\rho_1, \rho_2, h)$ , που αναζητούσαμε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της αντίστασης γείωσης για κάθε διστρωματικό έδαφος.

## 9.2.2 Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους

Για τη γείωση A/Γ Δ του μαθηματικού μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους εξάχθηκε μία μαθηματική σχέση, η οποία θα έχει ως είσοδο τις ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1$  και  $\rho_2$  ενός διστρωματικού μοντέλου εδάφους, το βάθος  $h$  του άνω στρώματος, το εμβαδό γείωσης  $E$ , καθώς και το μήκος του κύριου ηλεκτροδίου  $l$  και θα δίνει ως αποτέλεσμα την αντίσταση γείωσης της A/Γ.

Σημαντική προϋπόθεση, σε σχέση με τα μαθηματικά μοντέλα των γειώσεων A/Γ A, B και Γ, ήταν να προσθέσουμε άλλες δύο μεταβλητές ( $E$ ,  $l$ ) και ιδίως το εμβαδό γείωσης και να δούμε πώς μεταβάλλεται η τιμή αντίστασης γείωσης για τον ίδιο τύπο γείωσης αλλά για 15 διαφορετικά εμβαδά στη μία περίπτωση και για 7 εμβαδά στη δεύτερη περίπτωση. Έτσι, χρησιμοποιώντας πάλι τις γνώσεις μας πάνω στις γειώσεις, την παλινδρομική ανάλυση, τις βελτιστοποιήσεις και κάνοντας πολλές δοκιμές καταλήξαμε στο μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους.

Κάνοντας, λοιπόν, χρήση της παλινδρομικής ανάλυσης, προσαρμόσαμε το μοντέλο αυτό στις 1125 μετρήσεις, που έγιναν μέσω του *CDEGS* για τα 15 διαφορετικά εμβαδά της γείωσης A/Γ Δ και στις 168 μετρήσεις για τα 7 διαφορετικά εμβαδά αντίστοιχα.

Ο αναγνώστης μπορεί εύκολα να αντιληφθεί από τα γραφήματα, που παρουσιάστηκαν, ότι η ποιότητα της προσαρμογής είναι εξαιρετική στις 1125 μετρήσεις, ωστόσο παρά τη βελτιστοποίηση, που προσπαθήσαμε, δεν μπορούμε να ξεπεράσουμε την τιμή 0.91 για το  $R^2$  στις 168 μετρήσεις. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός της διαφορετικής τάξης μεγέθους μετρήσεων ( $10^3 \sim 168, 10^4 \sim 1125$ ), που «διαβάζει» το λογισμικό *matlab* και έχει ως αποτέλεσμα να μην δίνει την υψηλή ακρίβεια, που χρειαζόμαστε, για το  $R^2$ .

Ιδιαίτερο κέρδος του μαθηματικού αυτού μοντέλου είναι η εύρεση σχέσης, που μπορεί να περιγράψει την αντίσταση γείωσης μίας A/Γ για διαφορετικές τιμές εμβαδών της γείωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο αναγνώστης να μπορεί για διαφορετικά εμβαδά γείωσης να προσαρμόσει τις μετρήσεις του στο μοντέλο και να πάρει τη δική του εξίσωση, άρα και τις δικές του σταθερές.



Ακολουθεί η μεθοδολογία με την οποία ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει τις μετρήσεις στην εξίσωση:

1. Σχεδιασμός του συστήματος γείωσης της Α/Γ στο πακέτο *SESCAD* του λογισμικού *CDEGS* ή εναλλακτικά στο *AutoCAD* (αποθήκευση κάτοψης γείωσης ως .dxf) για οποιοδήποτε εμβαδό γείωσης και η εισαγωγή του στο *CDEGS*. Έπειτα, ακολουθεί εκτέλεση των προσομοιώσεων. Αν δεν πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις μπορεί κάποιος να κάνει χρήση πραγματικών μετρήσεων. Εγγραφή των αποτελεσμάτων σε φύλλο *excel*, το οποίο θα περιέχει για κάθε τιμή της αντίστασης γείωσης τις ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1, \rho_2$ , το βάθος του πρώτου στρώματος  $h$ , το εμβαδό γείωσης  $E$ , καθώς και το συνολικό θαμμένο μήκος κύριου ηλεκτροδίου  $l$ .
2. Εφαρμογή των παραπάνω δεδομένων ( $\rho_1, \rho_2, h, E, l, R_{\text{γείωσης}}$ ) στο *excel* και εισαγωγή τους στο λογισμικό *matlab*, χρησιμοποιώντας τον κώδικα του κεφαλαίου 8.7.2.
3. Εκκίνηση του πακέτου *sftool* του *matlab* ή του πακέτου *cftool* (χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία) για νεότερες εκδόσεις και επιλογή προσαρμογής με προσαρμοσμένη εξίσωση (*Custom Equation*).
4. Πληκτρολόγηση του μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους στη θέση της εξίσωσης και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *Bisquare*.
5. Υπολογισμός των τιμών από το *matlab*. Ενδέχεται στο στάδιο αυτό να μην είναι σωστή η προσαρμογή. Αυτό δεν πρέπει να μας ανησυχεί, διότι μπορεί να οφείλεται στη λανθασμένη επιλογή αρχικών τιμών, οι οποίες, όπως έχουμε αναφέρει, είναι ιδιαίτερα σημαντικές ώστε η βελτιστοποίηση να βρει το ολικό ελάχιστο και να μην κολλήσει σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.
6. Ορθή επιλογή των αρχικών τιμών. Δυστυχώς, δεν υπάρχει υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία, γεγονός που κάνει το έργο μας δυσκολότερο. Παρ' όλ' αυτά υπάρχει σίγουρα κάποιος συνδυασμός αρχικών τιμών, ο οποίος θα κάνει πολύ καλή την προσαρμογή. Η χρήση αρχικών τιμών, που έχουν ήδη δοθεί εδώ, αποτελεί μία αρκετά καλή ιδέα, ειδικά αν τα δεδομένα έχουν τιμές τις ίδιας τάξης μεγέθους. Το πιθανότερο είναι η προσαρμογή να κριθεί αρκετά καλή.
7. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο με το οποίο αποφασίζουμε, ότι η προσαρμογή, που έχουμε, κάνει, είναι η τιμή  $R^2$  να είναι πάνω από 0.99, που όπως είδαμε αυτό συμβαίνει στις 1125 μετρήσεις, αλλά όχι στις 168 ( $R^2 \approx 0.91$ ).
8. Εξάγουμε την εξίσωση του μοντέλου και κάνοντας τους αντίστροφους μετασχηματισμούς καταλήγουμε σε μία σχέση της μορφής  $R = R(\rho_1, \rho_2, h, E, l)$ .

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι καλό είναι να μην προσθέσουμε άλλη μία μεταβλητή στο μοντέλο εμβαδού μήκους, διότι ελοχεύει ο κίνδυνος να κολλήσει η βελτιστοποίηση σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και να μην βρει το ολικό ελάχιστο, τουλάχιστον στις 1125 μετρήσεις, που βρίσκουμε και το επιθυμητό αποτέλεσμα ( $R^2 \approx 0.99$ ). Έτσι έχει προκύψει μία νέα τώρα εξίσωση  $R_{\text{γείωσης}} = R(\rho_1, \rho_2, h, E, l)$ , στην οποία παρατηρούμε τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης σε σχέση και με το εμβαδό γείωσης.

Συνεπώς, το νέο αυτό μαθηματικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της αντίστασης γείωσης για κάθε διστρωματικό έδαφος για διαφορετικά εμβαδά του ίδιου τύπου γείωσης.

### 9.2.3 Γείωση Ανεμογεννήτριας Δ Μοντέλου Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων

Μπορεί στις 1125 μετρήσεις και για τα 15 διαφορετικά εμβαδά του ίδιου τύπου γείωσης (Γείωση Α/Γ Δ) να είχαμε ικανοποιητικότερα αποτελέσματα, όπως είδαμε, ωστόσο στις 168 μετρήσεις και για τα 7 διαφορετικά εμβαδά, η τιμή του  $R^2$  δεν άγγιξε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Έτσι και έπειτα από πολλές προσπάθειες βελτιστοποίησης του μοντέλου Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους οδηγηθήκαμε στη σκέψη για ένα νέο μαθηματικό μοντέλο. Αυτή τη φορά αποφασίσαμε να αυξήσουμε ακόμα περισσότερο τις παραμέτρους από 5 (μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους) σε 7 αυτή τη φορά, μετατρέποντας το ενιαίο εμβαδό γείωσης  $E$  σε εμβαδό γείωσης πρώτου στρώματος  $E_1$  και εμβαδό γείωσης δεύτερου στρώματος  $E_2$ , καθώς και το συνολικό θαμμένο μήκος κύριου ηλεκτροδίου  $l$  σε μήκους κύριου ηλεκτροδίου πρώτου στρώματος  $l_1$  και μήκος κύριου ηλεκτροδίου δεύτερου στρώματος  $l_2$ .

Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι για τη γείωση Α/Γ Δ του μαθηματικού μοντέλου Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων εξάχθηκε μία μαθηματική σχέση, η οποία θα έχει ως είσοδο τις ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1$  και  $\rho_2$  ενός διστρωματικού μοντέλου εδάφους, το βάθος  $h$  του άνω στρώματος, το εμβαδό γείωσης πρώτου στρώματος  $E_1$ , το εμβαδό γείωσης δεύτερου στρώματος  $E_2$ , το μήκος του κύριου ηλεκτροδίου πρώτου στρώματος  $l_1$ , καθώς και το μήκος του κύριου ηλεκτροδίου δεύτερου στρώματος  $l_2$ . και θα δίνει ως αποτέλεσμα την αντίσταση γείωσης της ανεμογεννήτριας.

Σημαντική προϋπόθεση, σε σχέση τώρα με το μαθηματικά μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους της γείωσης Α/Γ Δ, ήταν να προσθέσουμε άλλες δύο μεταβλητές, μετατρέποντας το εμβαδό γείωσης  $E$  σε  $E_1$ , και  $E_2$  και το μήκος κύριου ηλεκτροδίου  $l$  σε  $l_1$  και  $l_2$ . Χρησιμοποιήσαμε τις μετρήσεις, που είχαμε για τα 15 διαφορετικά εμβαδά και κάναμε μετρήσεις για τις τιμές των  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $l_1$  και  $l_2$ . Στόχος μας ήταν να δούμε πώς μεταβάλλεται η τιμή αντίστασης γείωσης για τον ίδιο τύπο γείωσης σε σχέση με τις παραπάνω τιμές. Έτσι, χρησιμοποιώντας πάλι τις γνώσεις μας πάνω στις γειώσεις, την παλινδρομική ανάλυση, τις βελτιστοποιήσεις και κάνοντας πολλές δοκιμές καταλήξαμε στο μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων και καταλήξαμε σε ένα βέλτιστο πάλι αποτέλεσμα. Κάνοντας, λοιπόν, χρήση της παλινδρομικής ανάλυσης, προσαρμόσαμε το μοντέλο αυτό στις 1125 μετρήσεις, που έγιναν μέσω του CDEGS για τα 15 διαφορετικά εμβαδά της γείωσης Α/Γ Δ.

Ο αναγνώστης μπορεί εύκολα να αντιληφθεί από τα γραφήματα, που παρουσιάστηκαν, ότι η ποιότητα της προσαρμογής είναι και εδώ εξαιρετική. Συνεπώς, όπως ακριβώς, θέλαμε και σε αυτή την περίπτωση βρίσκουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα ( $R^2 \approx 0.99$ ). Ιδιαίτερο κέρδος του μαθηματικού αυτού μοντέλου είναι η εύρεση σχέσης, που μπορεί να περιγράψει την αντίσταση γείωσης μίας ανεμογεννήτριας για διαφορετικές τιμές εμβαδών της γείωσης πρώτου και δεύτερου στρώματος, καθώς και για διαφορετικές τιμές μήκους του ηλεκτροδίου πρώτου και δεύτερου στρώματος.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο αναγνώστης να μπορεί για διαφορετικά εμβαδά γείωσης και για διαφορετικά μήκη να προσαρμόσει τις μετρήσεις του στο μοντέλο και να πάρει τη δική του εξίσωση, άρα και τις δικές του σταθερές.

Ακολουθεί η μεθοδολογία με την οποία ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει τις μετρήσεις στην εξίσωση:

1. Σχεδιασμός του συστήματος γείωσης της ανεμογεννήτριας στο πακέτο *SESCAD* του λογισμικού *CDEGS* ή εναλλακτικά στο *AutoCAD* (αποθήκευση κάτοψης γείωσης ως .dxf) για οποιοδήποτε εμβαδό γείωσης πρώτου και δεύτερου στρώματος και η εισαγωγή του στο *CDEGS*. Έπειτα, ακολουθεί εκτέλεση των προσομοιώσεων. Αν δεν πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις μπορεί κάποιος να κάνει χρήση πραγματικών μετρήσεων. Εγγραφή των αποτελεσμάτων σε φύλλο *excel*, το οποίο θα περιέχει για κάθε τιμή της αντίστασης γείωσης τις ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1, \rho_2$ , το βάθος του πρώτου στρώματος  $h$ , το εμβαδό γείωσης του πρώτου στρώματος  $E_1$ , το εμβαδό γείωσης του δεύτερου στρώματος  $E_2$ , το συνολικό θαμμένο μήκος κύριου ηλεκτροδίου του πρώτου στρώματος  $l_1$ , καθώς και το συνολικό θαμμένο μήκος κύριου ηλεκτροδίου του δεύτερου στρώματος  $l_2$ .
2. Εφαρμογή των παραπάνω δεδομένων ( $\rho_1, \rho_2, h, E_1, E_2, l_1, l_2, R_{\text{γείωσης}}$ ) στο *excel* και εισαγωγή τους στο λογισμικό *matlab*, χρησιμοποιώντας τον κώδικα του κεφαλαίου 8.7.3.
3. Εκκίνηση του πακέτου *sftool* του *matlab* ή του πακέτου *cftool* (χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία) για νεότερες εκδόσεις και επιλογή προσαρμογής με προσαρμοσμένη εξίσωση (*Custom Equation*).
4. Πληκτρολόγηση του μοντέλου Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων στη θέση της εξίσωσης και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου *Bisquare*.
5. Υπολογισμός των τιμών από το *matlab*. Ενδέχεται στο στάδιο αυτό να μην είναι σωστή η προσαρμογή. Αυτό δεν πρέπει να μας ανησυχεί, διότι μπορεί να οφείλεται στη λανθασμένη επιλογή αρχικών τιμών, οι οποίες, όπως έχουμε αναφέρει, είναι ιδιαίτερα σημαντικές ώστε η βελτιστοποίηση να βρει το ολικό ελάχιστο και να μην κολλήσει σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.
6. Ορθή επιλογή των αρχικών τιμών. Δυστυχώς, δεν υπάρχει υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία, γεγονός που κάνει το έργο μας δυσκολότερο. Παρ' όλ' αυτά υπάρχει σίγουρα κάποιος συνδυασμός αρχικών τιμών, ο οποίος θα κάνει πολύ καλή την προσαρμογή. Η χρήση αρχικών τιμών, που έχουν ήδη δοθεί εδώ, αποτελεί μία αρκετά καλή ιδέα, ειδικά αν τα δεδομένα έχουν τιμές τις ίδιας τάξης μεγέθους. Το πιθανότερο είναι η προσαρμογή να κριθεί αρκετά καλή.
7. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο με το οποίο αποφασίζουμε, ότι η προσαρμογή, που έχουμε, κάνει, είναι η τιμή  $R^2$  να είναι πάνω από 0.99, που όπως είδαμε αυτό συμβαίνει.
8. Εξάγουμε την εξίσωση του μοντέλου και κάνοντας τους αντίστροφους μετασχηματισμούς καταλήγουμε σε μία σχέση της μορφής  $R = R(\rho_1, \rho_2, h, E_1, E_2, l_1, l_2, R_{\text{γείωσης}})$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι καλό είναι να μην προσθέσουμε και άλλες μεταβλητές στο μοντέλο εμβαδού μήκους, διότι αφενός έχουμε ήδη 7 μεταβλητές και αφετέρου ελοχεύει ο κίνδυνος να κολλήσει η βελτιστοποίηση σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και να μην βρει το ολικό ελάχιστο. Έτσι έχει προκύψει ξανά μία νέα εξίσωση  $R_{γείωσης} = R(\rho_1, \rho_2, h, E1, E2, l1, l2)$ , στην οποία παρατηρούμε τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης σε σχέση και με τις τιμές των εμβαδών γείωσης και το μήκος του ηλεκτροδίου στα δύο στρώματα. Συνεπώς, το νέο αυτό μαθηματικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της αντίστασης γείωσης για κάθε διστρωματικό έδαφος για διαφορετικά τιμές εμβαδών και μηκών του ίδιου τύπου γείωσης.

## 9.3 Μελλοντικές Προτάσεις για Έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μέγιστη τιμή ειδικής αντίστασης γείωσης, που χρησιμοποιήσαμε, ήταν  $10000\Omega m$ . Συνεπώς, μία εύλογη επέκταση της παρούσας διπλωματικής θα ήταν ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών της ειδικής αντίστασης εδάφους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αυτό κατέστη αδύνατο, διότι στην πρώτη περίπτωση είχαμε ήδη 225 προσομοιώσεις για κάθε τύπο γείωσης (Γείωση A/Γ A, B και Γ ~ συνολικά 675 προσομοιώσεις), ενώ στη δεύτερη περίπτωση (μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους) μας ενδιέφερε να δούμε τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης κυρίως ανάλογα με το εμβαδό γείωσης (1125 και 168 προσομοιώσεις) και στην τελευταία περίπτωση (μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων) ανάλογα με τα εμβαδά και μήκη ηλεκτροδίου του πρώτου και δεύτερου στρώματος (1225 προσομοιώσεις). Έτσι, αυξάνοντας την τιμή της ειδικής αντίστασης γείωσης θα μπορούσε να επιτευχθεί ακόμα καλύτερη δυνατότητα πρόβλεψης της αντίστασης γείωσης.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα επέκταση της παρούσας διπλωματικής θα ήταν να εισέλθει ως νέα παράμετρος, η ισχύς της A/Γ σε ένα από τα δύο διαθέσιμα μαθηματικά μοντέλα (απλό εκθετικό μοντέλο-μοντέλο αθροίσματος εκθετικών). Οι τύποι γείωσης A/Γ A, B και Γ, που μελετήσαμε, αφορούν συγκεκριμένες διαστάσεις, συνεπώς αφορούν βάσεις A/Γ συγκεκριμένων διαστάσεων, άρα και συγκεκριμένου εύρους ονομαστικών ισχύων. Θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον να μελετηθούν γειώσεις σε αρκετά μεγαλύτερες ή αρκετά μικρότερες ισχύες από αυτές της έρευνας και να γίνει προσπάθεια να εισέλθει η ισχύς ως μία νέα παράμετρος στο παρόν μοντέλο. Όσο αλλάζει η ισχύς, αλλάζει το θεμέλιο και έτσι έχουμε μεταβολή των διαστάσεων. Αυτό θα απαιτούσε φυσικά παλινδρομική ανάλυση 3 ανεξάρτητων μεταβλητών και θεωρητικά δεν θα υπήρχε γραφική απεικόνιση.

Στην περίπτωση αυτή, θα έπρεπε να λύναμε τη μαθηματική σχέση, όπως κάναμε στην περίπτωση της γείωσης A/Γ Δ, προσαρμόζοντας τις 3 μεταβλητές σε ένα νέο μαθηματικό μοντέλο δύο μεταβλητών.

Στη γείωση A/Γ Δ, τα νέα μεγέθη, που προσθέσαμε, ήταν κυρίως το εμβαδό, αλλά και το μήκος στο μοντέλο Ενιαίου Εμβαδού-Μήκους, ενώ στο μοντέλο Εμβαδών-Μηκών Δύο Στρωμάτων τα εμβαδά και μήκη του πρώτου και δεύτερου στρώματος. Υπάρχει ήδη αρκετή πληροφορία, ιδίως στο τελευταίο μαθηματικό μοντέλο, οπότε υπάρχει ο κίνδυνος να κολλήσει η βελτιστοποίηση σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και να μην βρει το ολικό ελάχιστο.

Τέλος, το λογισμικό *CDEGS* δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες για προσομοίωση σε ποικιλία τύπων εδάφους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά το διστρωματικό έδαφος για κάθε τύπο γείωσης. Δίνεται έτσι η δυνατότητα για εξαγωγή νέων μαθηματικών μοντέλων για τους ίδιους ή άλλους τύπους γείωσης, αλλά σε μονοστρωματικά ή πολυστρωματικά εδάφη.



# Βιβλιογραφία

- [1] "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας". Allaboutenergy.gr. 2021. [Online]. Available: <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>.
- [2] "EU solar boom: over 100% solar market increase in 2019". Solarpowereurope.org. 2021. [Online]. Available: <https://www.solarpowereurope.org/eu-solar-boom-over-100-solar-market-increase-in-2019/>.
- [3] "Wind energy in Europe in 2018 - Trends and statistics | WindEurope". WindEurope. 2021. [Online]. Available: <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/wind-energy-in-europe-in-2018-trends-and-statistics/>.
- [4] IENE. «Ο Ελληνικός ενεργειακός τομέας». Ετήσια Έκθεση 2019. Αθήνα. Φεβ. 2019.
- [5] ΔΑΠΕΕΠ. Διεύθυνση Εγγυήσεων Προέλευσης και Ενεργειακού Μείγματος. «Ενεργειακό μείγμα 2019». Ιούλ. 2020
- [6] Η Καθημερινή. «Έως το 2023 θα κλείσουν όλες οι εν λειτουργία λιγνιτικές μονάδες». [Online]. <https://www.kathimerini.gr/1056209/article/oikonomia/epixeirhseis/ews-to-2023-8a-kleisoyn-oles-oi-en-leitoyrgia-lignitikes-monades>. Δεκ. 2019.
- [7] D. C. Fessler. "The energy disruption triangle: Three sectors that will change how we generate, use and store energy". Wiley. Dec. 2018.
- [8] Η Καθημερινή. «Η πανδημία δεν ανακόπτει το σχέδιο μετάβασης στην πράσινη ενέργεια». [Online]. <https://www.kathimerini.gr/1074501/article/oikonomia/ellhnikh-oikonomia/h-pandhmia-den-anakoptei-to-sxedio-metavashs-sthn-prasinh-energeia>. Απρ. 2020.
- [9] B. Talebi, P. A. Mirzaei, A. Bastani and F. Haghghat. "A review of district heating systems: Modeling and optimization". *Front. Built Environ.*, vol. 2, article 22, Oct. 2016.
- [10] Κ. Θ. Δέρβος. «Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Από τη Θεωρία στην Πράξη». Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.. Αθήνα. 2013
- [11] Portal.tee.gr. 2021. [Online]. Available: <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teelar/EKDILWSEIS/damConference/eisigiseis/5.2.pdf>.
- [12] IEA (2015). Energy Technology Perspectives 2015. IEA. Paris <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2015>

- [13] "Biomass: The renewable energy source supporting the zero-carbon transition". Opusenergy.com. 2021. [Online]. Available: <https://www.opusenergy.com/blog/biomass-supports-zero-carbon-transition/>.
- [14] Bu.edu. 2021. [Online]. Available: <https://www.bu.edu/eci/files/2019/06/RenewableEnergyEcon.pdf>.
- [15] "geothermal energy | Description. Uses. History. & Pros and Cons". Encyclopedia Britannica. 2021. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/geothermal-energy>.
- [16] I. N. Κιοσκερίδης. «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος». Εκδόσεις Τζιόλα. Θεσσαλονίκη. 2019
- [17] "The European Wind Energy Association| EWEA". Ewea.org. 2021. [Online]. Available: <https://www.ewea.org/>.
- [18] "Risø National Laboratory | Tethys". Tethys.pnnl.gov. 2021. [Online]. Available: <https://tethys.pnnl.gov/organization/riso-national-laboratory>.
- [19] "Global Energy Network Institute - GENI - Global Electricity Grid - Linking Renewable Energy Resources Around the World". Geni.org. 2021. [Online]. Available: <http://www.geni.org/>.
- [20] Eletaen.gr. 2021. [Online]. Available: <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2021/01/2021-01-26-2020-HWEA-Statistics-Greece.pdf>
- [21] "ΠΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ". Rae.gr. 2021. [Online]. Available: <http://www.rae.gr/site/portal.csp>.
- [22] Zafeiratou, Eleni & Spataru, Catalina & Bleischwitz, Raimund. (2016). Wind offshore energy in the Northern Aegean Sea islanding region. 10.1109/EEEIC.2016.7555518.
- [23] "TESLA INSTITUTE - School of Electrical Engineering. Electronics, Automation and Computer Technology - Main components of a wind turbine". Tesla-institute.com. 2021. [Online]. Available: <http://www.tesla-institute.com/index.php/renewable-energy-articles/213-main-components-of-a-wind-turbine>.
- [24] IEEE Std 80-2013. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Power and Energy Society
- [25] R. Markowska, A. Sowa and J. Wiater. "Step and Touch Voltage Distributions at GSM Base Station during Direct Lightning Stroke". Semantic scholar.org. 2021. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Step-and-Touch-Voltage-Distributions-at-GSM-Base-Markowska-Sowa/40b2ecee303132429b70457fd9cee9f723a36f44>.



- [26] "Ground Electrode". Electrical Equipment. 2021. [Online]. Available: <http://engineering.electrical-equipment.org/electrical-distribution/ground-electrode.html>.
- [27] IEEE Std 80-2013. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- [28] EPRI EL-3982. Soil resistivity tests using modeling techniques. Ohio State University. May 1985
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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
- [32] EPRI TR-100863. Seasonal variations of grounding parameters by field tests. SEI/Georgia Power Research Center. July 1992.
- [33] Β.Θ. Κονταργύρη. Ι.Φ. Γκόνος. Ι.Α. Σταθόπουλος. Συστήματα Γείωσης Ανεμογεννητριών. Ελληνική CIGRE
- [34] 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
- [35] 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. 1. pp. 334–342. Jan. 1994
- [36] Fujimoto. N.. Dick. E. P.. Boggs. S. A.. and Ford. G. L. "Transient ground potential rise in gasinsulated substations: Experimental studies." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. PAS101. no. 10. pp. 3603–3609. Oct. 1982.
- [37] 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.
- [38] EPRI TR-100622. Substation grounding programs. vols. 1–5. May 1992
- [39] Moore. R.. "An empirical method of interpretation of earth resistivity measurements." *American Institute of Mining Engineering*. Column 164. pp. 197–231. 1945

- [40] "Κουλιακή μαρμαρυγή | Heart Rhythm Center". Heart Rhythm Center. 2021. [Online]. Available: <http://www.eponline.gr/koiliaki-marmarigi/>.
- [41] Towne. H. M.. "Lightning arrester grounds—Parts I. II. and III." *General Electric Review*. vol. 35. pp. 173–280. Mar.–May 1932.
- [42] Dalziel. C. F.. "Dangerous electric currents." *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. 65. pp. 579–585. 1123–1124. 1946.
- [43] Biegelmeier. U. G.. and Rotter. K.. "Elektrische Widerstrände und Strome in Merischlicken Korper." *E&M*. vol. 89. pp. 104–109. 1971.
- [44] Lee. W. R.. "Death from electrical shock." *Proceedings of the IEEE*. vol. 113. no. 1. pp. 144–148. Jan. 1966
- [45] Biegelmeier. U. G.. "Die Bedeatung der Z-Schwelle des Herzkammerfilim-merns fur die Festlegung von Berührungsspanungs greuzeu bei den Schutzma Bradhmer gegen elektrische Unfate." *E&M*. vol. 93. no. 1. pp. 1–8. 1976.
- [46] 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.
- [47] Lee. W. R.. "Death from electrical shock." *Proceedings of the IEEE*. vol. 113. no. 1. pp. 144–148. Jan. 1966
- [48] 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.
- [49] Dalziel. C. F.. "Electric shock hazard." *IEEE Spectrum*. pp. 41–50. Feb. 1972.
- [50] Osypka. P.. "Quantitative investigation of current strength and routing in AC electrocution accident involving human beings and animals." *Technische Hochschule Braunschweig*. Brunswick. West Germany. 1966/SLA Translation Center TT-6611470.
- [51] Loucks. W. W.. "A new approach to substation grounding." *Electrical News and Engineering*. May 15. 1954.
- [52] Bodier. M. G.. "La Secrites des Personnes et la Question des Mises a la Terre dans les Postes de Distribution." *Bulletin de la Societé Francaise des Electriciens*. ser. 6th. vol. VII. no. 74. pp. 545–562. Oct. 1947.
- [53] Langer. H.. "Messungen von Erderspannungen in einem 220 kV Umspanwerk." *Electrotechnische Zietschrift*. vol. 75. no. 4. pp 97–105. Feb. 1954 (English translation available in AIEE No. 80-1961. Appendix V. pp. 91–102).

- [54] Dawalibi, F. P., Southey, R. D. and Baishiki, R. S.. “Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric shocks.” *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 5. no. 2. pp. 613–626. 1990.
- [55] Dawalibi, F. P., Xiong, W., and Ma, J.. “Effects of deteriorated and contaminated substation surface covering layers on foot resistance calculations.” *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 8. no. 1. pp. 104–113. Jan. 1993.
- [56] Thapar, B., Gerez, V., and Kejriwal, H.. “Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards.” *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 9. no. 1. pp. 360–368. Jan. 1994.
- [57] Laurent, P. G.. “Les Bases Generales de la Technique des Mises a la Terre dans les Installations Electriques.” *Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens*. vol. 1. ser. 7. pp. 368–402. July 1951.
- [58] 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
- [59] Wind turbines - Part 24: Lightning protection. IEC 61400-24 ed. 1.0. 2010.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] R. Hoerauf. "Considerations in wind farm grounding designs". *IEEE Trans. on Industry Applications*. vol. 50. no. 2. March/April 2014.
- [65] 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.

- [66] A. Esmaeilian. A. A. S. Akmal. M. S. Naderi. "Wind farm grounding systems design regarding the maximum permissible touch & step voltage". in *Proc. 2012 11<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. pp. 74 – 79.
- [67] H. K. Kargar. M. Sedighzadeh. A. Mosavi. "New grounding system of wind turbines". in *Proc. 2008 43<sup>rd</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2008)*. pp. 1 – 6.
- [68] 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 (ICFPEE)*. pp. 99 – 102.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] B. Markovski. L. Grcev. V. Arnautovski-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.
- [72] V. T. Kontargyri. I. F. Gonos. I. A. Stathopoulos. "Frequency response of grounding systems for wind turbine generators". in *Proc. of the 14<sup>th</sup> International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2005)*. Beijing, China. August 25-29, 2005. paper B-13.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] V. P. Androvitsaneas. I. F. Gonos. I. A. Stathopoulos. "Artificial neural network methodology for the estimation of ground enhancing compounds resistance". *IET Science, Measurement & Technology*. vol. 8. no. 6. pp. 552-570. Nov. 2014.
- [76] Ι. Φ. Γκόνοϋ. Β. Θ. Κονταργύρη. Γ. Π. Φώτης. Ι. Α. Σταθόπουλοϋ. Γ. Α Μάνοϋ. «Σχεδίαση, ανάλυση και μέτρηση ϋστημάτων γείωϋηϋ σε αιολικά πάρκα». Σύνοδοϋ Ε.Ε. CIGRE. Αθήνα. 15-16 Δεκεμβρίου 2005. Ενότητα Δ: Ηλεκτρικέϋ Μονώϋειϋ και Γειώϋειϋ: Δ5. ϋελ. 201-208.

- [77] 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.
- [78] E.K. Saraoja. electromagnetic analysis of grounds “Ligtning Grounds”. Chapter 18 of “Lightning – Volume 2” edited by R.H. Golde. Academic Press.
- [79] BS 6651. “Lightning Protection of Structures”. 1992.
- [80] Steven W. Saylor. Panel Session “ arge Wind Plant Collector Design” Wind Farm Collector System Grounding. IEEE PES Transmission and Distribution Conference. 2008.
- [81] V. T. Kontargyri. I. F. Gonos and I. A. Stathopulos. "Study on Wind Farm Grounding System." in *IEEE Transactions on Industry Applications*. vol. 51. no. 6. pp. 4969-4977. Nov.-Dec. 2015
- [82] Pastromas. S. and S. Pyrgioti. “Protection Measures on Wind Turbines against Lightning Strikes.” *Renewable energy & power quality journal* 1 (2017): 394-399.
- [83] "Lightning and surge protection for wind turbines - EE Publishers". EE Publishers. 2021. [Online]. Available: <https://www.ee.co.za/article/lightning-surge-protection-wind-turbines-2.html>.
- [84] "Looking for lightning | Wind Systems Magazine". Windsystemsmag.com. 2021. [Online]. Available: <https://www.windsystemsmag.com/looking-for-lightning/>.
- [85] "Regression analysis". En.wikipedia.org. 2021. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Regression\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis).
- [86] Norman R. Draper. Harry Smith. Applied Regression Analysis Third Edition. John Wiley and Sons. 1998
- [87] "Evaluating Goodness of Fit- MATLAB & Simulink". Mathworks.com. 2021. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>.
- [88] "CDEGS - SES (Safe Engineering Service & technologies) - Worldwide Leader in Grounding. Earthing. Lightning. EMC and Electrical Interference Analysis". Sestech.com. 2021. [Online]. Available: <http://www.sestech.com/products/softpackages/cdegs.htm>.
- [89] Siahpoosh. Massood & Li. Li & Dorrell. David. (2017). Wind farm grounding system analysis. 4780-4785. 10.1109/ECCE.2017.8096813.
- [90] "Computation Modules - SES (Safe Engineering Service & technologies) - Worldwide Leader in Grounding. Earthing. Lightning. EMC and Electrical Interference Analysis". Sestech.com. 2021. [Online]. Available: <http://www.sestech.com/products/SoftModule/Malz.htm>.

- [91] "MALT | Low Frequency Grounding / Earthing Analysis - SES (Safe Engineering Service & technologies) - Worldwide Leader in Grounding. Earthing. Lightning. EMC and Electrical Interference Analysis". Sestech.com. 2021. [Online]. Available: <https://www.sestech.com/en/Product/Module/MALT>.
- [92] Rüdénberg. R.. "Distribution of short-circuit currents in ground." *Electrotechnische Zeitschrift*. vol. 31. 1921.
- [93] Sunde. E. D.. *Earth conduction effects in transmission systems*. New York: McMillan. 1968.
- [94] Wenner. F.. "A method of measuring earth resistances." *Bulletin of the Bureau of Standards*. Report no 258. vol. 12. no. 3. pp. 469–482. Feb. 1916.
- [95] Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.). Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου. Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου. Αθήνα 1980.
- [96] *Manual on ground resistance testing*. Publication no. 25-J. James G. Biddle Co.. 1970.
- [97] Tagg. G. F.. *Earth resistances*. New York: Pitman. 1964
- [98] 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
- [99] 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.
- [100] Roman. I.. "Some interpretations of earth resistivity data." *American Institute of Mining and Metallurgical Engineering*. vol. 110. pp. 183–200. 1934.
- [101] 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
- [102] IEEE Tutorial Course 86 EH0253-5-PWR. "Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986. IEEE Guide for Safety. Chapter 2. (Soil Resistivity Analysis)."
- [103] 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
- [104] 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

- [105] 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
- [106] EPRI EL-2699. Transmission line grounding. Chapter 4. (Resistivity) and Chapter 9 (Field Measurement Techniques). Safe Engineering Services. Oct. 1982
- [107] Sunde. E. D.. Earth conduction effects in transmission systems. New York: McMillan. 1968
- [108] 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
- [109] 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.
- [110] IEEE Std 142™-1991. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book).
- [111] Meliopoulos. A. P.. and Papelexopoulos. A. D.. “Interpretations of soil resistivity measurement experience with the model SOMIP.” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-1. no. 4. pp. 142–151. Oct. 1986
- [112] Kiselev. “Research into electric shock.” Electrical Review. vol. 31. Dec. 1965.
- [113] Palmer. L. S.. “Examples of geotechnical surveys.” Proceedings of the IEE. Paper 2791-M. vol. 106. pp. 231–244. June 1959.
- [114] Armstrong. H. R.. “Grounding electrode characteristics from model tests.” AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. pp. 1301–1306. Dec. 1953
- [115] Meliopoulos. A. P.. Papelexopoulos. 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.
- [116] Δημήτριος Χ. Ζάρρας, «Προσομοίωση και Έλεγχος Συστημάτων Αποθήκευσης Υδρογόνου για Συμμετοχή στη Ρύθμιση Συχνότητας», Διπλωματική Εργασία, Οκτώβριος 2020
- [117] Κονδύλης Γεώργιος, «Εκτίμηση της τιμής της αντίστασης γείωσης σε συστήματα γείωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2016

- [118] MATLAB-MathWorks", *Mathworks.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [119] G. P. Kondylis, K. D. Damianaki, V. P. Androvitsaneas and I. F. Gonos, "Simplified Formulae Method for Estimating Wind Turbine Generators Ground Resistance," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 2829-2836, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2839061.
- [120] Gieiges. K. S.. "Electric shock hazard analysis." *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. 75. part III. pp. 1329–1331. 1956.
- [121] Geddes. L. A.. and Baker. L. E.. "Response of passage of electric current through the body." *Journal of Association for the Advancement of Medical Instruments*. vol. 2. pp. 13–18. Feb. 1971.