



---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ  
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»***

**Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

Γεωργίου Κονδύλη

**Επιβλέπων**

Ιωάννης Γκόνος, Επ. Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων  
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

---

Αθήνα, Ιούλιος 2016





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΕ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»***

**Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

Γεωργίου Κονδύλη

**Επιβλέπων**

Ιωάννης Γκόνος, Επ. Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και  
Μηχανικών Υπολογιστών

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
.....  
.....  
Ιωάννης Γκόνος  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

---

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΟΝΔΥΛΗΣ

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

Copyright © Γεώργιος Π. Κονδύλης 2016

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

<b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b>	<b>«Εκτίμηση της τιμής της αντίστασης γείωσης σε συστήματα γείωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας»</b>
<b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>	<b>Κονδύλης Γεώργιος</b>
<b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>	<b>Ιωάννης Γκόνος, Επ. Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών</b>
<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>	<b>2015-16</b>

## Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της δομής του εδάφους (μεταβολή της ειδικής αντίστασης) στην τιμή της αντίστασης γείωσης σε τυπικά συστήματα γείωσης που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μελετώνται συστήματα γείωσης σε ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα. Όσον αφορά τα συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας λογισμικό προσομοίωσης μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης γείωσης για διάφορους τύπους εδαφών, χρησιμοποιώντας μοντέλο διστρωματικού εδάφους. Στη συνέχεια, 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. Όσον αφορά τα συστήματα γείωσης των φωτοβολταϊκών πάρκων, θεωρώντας μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους, θα επιχειρηθεί, να δοθεί η μαθηματική έκφραση που εκφράζει την αντίσταση γείωσης σε συνάρτηση με την αντίσταση του εδάφους και την ισχύ της εγκατάστασης ΑΠΕ.

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

Τέλος, θα επιχειρηθεί να γίνει σύγκριση και με τιμές αντίστασης γείωσης που εμφανίζονται σε πραγματικά συστήματα γείωσης ώστε να επαληθευτεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων της εργασίας.

## Περίληψη

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μία ανασκόπηση στα θέματα των γειώσεων. Αρχικά, δίνονται ορισμένες βασικές έννοιες και ορισμοί που είναι χρήσιμοι για τη συνέχεια της εργασίας. Έπειτα γίνεται εκτενής αναφορά στα εδάφη και συγκεκριμένα στην ειδική αντίσταση του εδάφους, στους τρόπους πειραματικής μέτρησής της, στα μοντέλα προσομοίωσης των εδαφών και στην ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης. Τέλος, γίνεται αναφορά στα κυκλώματα σφάλματος προς γη όταν παρεμβάλλεται άνθρωπος, στην αντοχή του ανθρώπου στα ρεύματα που τον διαπερνούν καθώς και στη συμβολή των γειώσεων στην προστασία των ανθρώπων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ειδική μνεία για τα συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών. Εξηγείται αναλυτικά η ανάλυση και η σχεδίαση των συστημάτων γείωσης για ανεμογεννήτριες και παρουσιάζονται συγκεκριμένα συστήματα γείωσης τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε μετέπειτα στις προσομοιώσεις. Επιπλέον, παρουσιάζονται και τα συστήματα γείωσης για τα φωτοβολταϊκά πάρκα που θα χρησιμοποιηθούν στις αντίστοιχες προσομοιώσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής μαθηματική ανασκόπηση στην 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. Έπειτα, το πρόβλημα τυποποιείται μαθηματικά στη γενική περίπτωση και στη συνέχεια εξηγείται αναλυτικά πως γίνεται η προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις, δηλαδή η εκτίμηση των παραμέτρων, με διάφορες μεθόδους. Τέλος, γίνεται αναφορά στη διαδικασία

ποσοτικοποίησης της ποιότητας της προσαρμογής ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί αν το μοντέλο ή/και η προσαρμογή ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις που έχουν τεθεί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού CDEGS και του επιλύτη MALZ που θα χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις της αντίστασης γείωσης των ανεμογεννητριών. 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 ανεμογεννητριών ανάλογα με τον τύπο του συστήματος γείωσης που χρησιμοποιήθηκε. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά και ξεχωριστά για κάθε μία προσομοίωση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξηγείται αρχικά η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την εύρεση ενός γενικού μαθηματικού μοντέλου το οποίο να ισχύει για όλους τους τύπους γειώσεων με εξαιρετική ακρίβεια, μεταβάλλοντας μόνο τους σταθερούς όρους (παραμέτρους) του μοντέλου κατά περίπτωση. Στη συνέχεια εξηγείται αναλυτικά και ανά περίπτωση η διαδικασία της προσαρμογής των προσομοιώσεων από κάθε τύπο γείωσης στην εξίσωση προκειμένου να υπολογισθούν οι παράμετροι του μοντέλου. Επιπλέον ελέγχεται η ποιότητα της προσαρμογής ώστε να πληροί τα πολύ αυστηρά κριτήρια που έχουν τεθεί. Τέλος, τα αποτελέσματα της προσαρμογής παρουσιάζονται σημείο προς σημείο και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ώστε να εκτιμηθεί η ποιότητα της προσαρμογής.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στις προσομοιώσεις και στη διαδικασία προσαρμογής σε καμπύλες για τις γειώσεις των φωτοβολταϊκών πάρκων. Αρχικά εξηγείται η διαδικασία γείωσης των φωτοβολταϊκών πάρκων με πλέγματα γείωσης και στη συνέχεια γίνονται προσομοιώσεις προκειμένου να υπολογισθεί η αντίσταση γείωσης ανάλογα με το μέγεθος του πλέγματος γείωσης. Τέλος, γίνεται ανάλυση παλινδρόμησης σε μία μεταβλητή (προσαρμογή σε καμπύλη) προκειμένου να εξαχθεί το μοντέλο (η εξίσωση) που συνδέει την αντίσταση γείωσης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου σε συνάρτηση με την εγκατεστημένη ισχύ του.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική ανακεφαλαίωση της εργασίας και αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από κάθε κεφάλαιο της εργασίας. Συνεπώς ξεκαθαρίζεται η συμβολή της εργασίας στη διευκόλυνση των μελετών γείωσης και στην πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης πριν την εγκατάσταση μιας μονάδας ΑΠΕ. Τέλος αναφέρονται οι μελλοντικές προοπτικές και η περαιτέρω μελέτες που θα μπορούσαν να γίνουν με αφορμή την εργασία αυτή.

**POST-GRADUATE THESIS:** «Estimation of grounding resistance value in renewable energy systems»

**STUDENT:** Kondylis Georgios

**SUPERVISOR:** Ioannis Gonos, Assistant Professor, School of Electrical and Computer Engineering, NTUA

**ACADEMIC YEAR:** 2015-16

## **Abstract**

This thesis aims to study the effect of ground soil structure (variation of resistivity) in grounding the resistance value of typical grounding systems that are frequently used in renewable energy facilities.

Grounding systems in both wind turbines and photovoltaic systems are studied. For wind turbines' case, grounding resistance value is calculated using computer software for various soil types, considering a two layer soil structure model. Moreover, a regression analysis is carried out in an attempt to extract approximate mathematical formulas which are used to estimate grounding resistance depending on the resistivity of the two soil layer as well as the depth of the first one. Regarding photovoltaic parks, it is attempted to extract a mathematical formula connecting grounding resistance value with the nominal output power of the park. The resistance value depends on soil resistivity and a uniform soil structure model is considered in this case.

The need for such a study is obvious. With its completion, the supervisor engineer of renewable energy projects will be able to accurately predict grounding resistance and know if it meets the imposed standards, or if it is necessary to apply adequate measures to improve the grounding system, simply by entering soil resistivity values and technical characteristics into an equation.

Finally, the validity of measurements and regression analysis is checked using real grounding resistance values which have appeared in real life grounding systems.

## **Summary**

The first chapter is about reviewing grounding systems issues. Initially, several basic concepts and definitions are presented which are useful for the whole thesis. Then, there is an extended report on soils and specifically in soil resistivity, in means of measuring soil resistivity in practice, in soil simulation models and in interpreting resistivity measurements. Finally accidental ground circuits are analyzed, and the human body tolerance in currents is discussed so as to indicate the aid of grounding systems in rescuing humans and equipment.

In the second chapter wind turbine grounding systems are specifically mentioned. The analysis and design of such grounding systems is thoroughly analyzed and some specific systems which will be used later on in simulations are presented. Moreover, photovoltaic parks' grounding systems which will be used in simulations are also presented.

In chapter three there is an extensive mathematical review in multiple non linear regression analysis. Initially, the problem is described and the process of making an educated guess for a non linear model that explains a natural phenomenon is explained. Then, the problem is mathematically formulated in the general case and it the process of estimating the model's parameters by using various methods is presented. Finally, there is a short discussion on quantifying the quality of the fit by using both visual and statistical methods so as to determine whether the fit is good

enough to meet the imposed standards.

In chapter four, the basic characteristics of CDEGS software and MALZ solver, which will be used throughout the wind turbines' and photovoltaics' grounding resistance simulations, are presented. Then, the processes of data insertion, simulation and results extraction are presented and explained. The results, regarding wind turbines grounding resistance, are presented analytically and separately for each simulation.

In chapter five the process followed for estimating a mathematical model which would suit all grounding types with exceptional accuracy, by alternating only the constant parameters per case, is described. Then, the process of adopting the simulations of chapter four in the equation of the model so as to estimate model's parameters per case is carefully presented and explained. Moreover, the quality of the fit is controlled so as to meet the strict criteria imposed in such cases. Finally, the results of the fit and its quality are presented point by point are compared to the simulation results so as to present the quality of the fit in first hand.

Chapter six is about the simulation and curve fitting processes for photovoltaic parks' grounding systems. Initially, grounding systems for photovoltaic systems using grounding grids are presented and then the simulations that estimate grounding resistance depending on ground grid dimensions are carried out. Finally, a simple regression analysis takes place (curve fitting) so as to export the equation that links grounding resistance with nominal power of a photovoltaic park.

Last but not least, in chapter seven there is a brief summing up of the thesis and then the conclusions of each chapter as well as the conclusions of the whole project are reported. Consequently, the contributions of this paper in facilitating the study of grounding systems and aiding in grounding resistance value prediction before the installation of a renewable energy unit is made clear. Finally the future prospects and further studying opportunities that arise from this paper are briefly discussed.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Κατ'αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Κύριο Ιωάννη Γκόνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας καθώς και για την βοήθεια και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την διδάκτορα και ΕΔΙΠ Κυρία Βάσω Κονταργύρη για τη βοήθεια που μου παρείχε στο σκέλος των γειώσεων και της προσομοίωσης με το λογισμικό CDEGS καθώς και την υποψήφια διδάκτορα Κυρία Κάτια Δαμιανάκη για την πολύτιμη βοήθειά της σχετικά με το λογισμικό CDEGS.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όλη την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ .....	- 13 -
1.1 Εισαγωγή-Ορισμοί .....	- 13 -
1.2 Χαρακτηριστικά του εδάφους.....	- 18 -
1.2.1 Το έδαφος ως μέσο γείωσης .....	- 18 -
1.2.2 Επίδραση της κλίσης της τάσης .....	- 18 -
1.2.3 Επίδραση του πλάτους του ρεύματος .....	- 18 -
1.2.4 Επίδραση της υγρασίας, θερμοκρασίας και χημικού περιεχομένου .....	- 19 -
1.3 Δομή του εδάφους και επιλογή του μοντέλου εδάφους.....	- 20 -
1.3.1 Έρευνα για τη δομή του εδάφους .....	- 20 -
1.3.2 Κατάταξη των εδαφών και εύρος ειδικών αντιστάσεων .....	- 20 -
1.3.3 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης.....	- 20 -
1.4 Ερμηνεία των μετρήσεων ειδικής αντίστασης εδάφους .....	- 24 -
1.4.1 Υπόθεση ομοιόμορφου εδάφους.....	- 25 -
1.4.2 Υπόθεση μη ομοιόμορφου εδάφους .....	- 26 -
1.5 Ασφάλεια στις γειώσεις .....	- 27 -
1.6 Όριο ανεκτού από το ανθρώπινο σώμα ρεύματος .....	- 30 -
1.7 Τυχαίο κύκλωμα γείωσης .....	- 32 -

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	- 39 -
2.1 Συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών.....	- 39 -
2.1.1 Εισαγωγή.....	- 39 -
2.1.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου .....	- 40 -
2.1.3 Κατασκευή συστήματος γείωσης ανεμογεννήτριας .....	- 42 -
2.1.4 Συστήματα γείωσης που θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη .....	- 43 -
2.2 Συστήματα γείωσης φωτοβολταϊκών πάρκων .....	- 48 -

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ .....	- 51 -
3.1 Ανάλυση παλινδρόμησης.....	- 51 -
3.2 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για μη γραμμικά μοντέλα .....	- 52 -
3.2.1 Εισαγωγή .....	- 52 -
3.2.2 Μη γραμμικά μοντέλα .....	- 52 -
3.2.3 Μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων στη μη γραμμική περίπτωση .....	- 53 -
3.3 Εκτίμηση των παραμέτρων ενός μη γραμμικού συστήματος.....	- 55 -
3.3.1 Γραμμικοποίηση .....	- 55 -
3.3.2 Μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου .....	- 57 -
3.3.3 Μέθοδος του συμβιβασμού του Marquardt .....	- 58 -
3.3.4 Άλλες μέθοδοι .....	- 59 -
3.4 Διαστήματα εμπιστοσύνης.....	- 59 -

3.5 Η σημασία των καλών αρχικών τιμών.....	- 60 -
3.6 Μαντεύοντας αρχικές τιμές $\theta_0$ .....	- 60 -
3.7 Ανθεκτική παλινδρόμηση.....	- 61 -
3.8 Καταλληλότητα της προσαρμογής.....	- 61 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CDEGS.....	- 65 -
4.1 Το λογισμικό CDEGS.....	- 65 -
4.2 Επιλύτης MALZ.....	- 66 -
4.3 Προσομοίωση με το λογισμικό CDEGS.....	- 67 -
4.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στο CDEGS.....	- 68 -
4.3.2 Πραγματοποίηση της προσομοίωσης.....	- 70 -
4.3.3 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων.....	- 70 -
4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	- 71 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	- 91 -
5.1 Εισαγωγή.....	- 91 -
5.2 Μονοστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή σε εξίσωση.....	- 94 -
5.3 Διστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή στην εξίσωση της γείωσης τύπου Α.....	- 95 -
5.4 Διστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή στην εξίσωση της γείωσης τύπου Β.....	- 109 -
5.5 Διστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή στην εξίσωση της γείωσης τύπου Γ.....	- 123 -
5.6 Συγκρίσεις.....	- 136 -
5.6.1 Μονοστρωματικό έδαφος.....	- 136 -
5.6.2 Διστρωματικό έδαφος.....	- 139 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	- 147 -
6.1 Μέτρηση του εμβαδού γης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	- 147 -
6.2 Προσομοίωση αντίστασης γείωσης φωτοβολταϊκών πάρκων.....	- 148 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	- 153 -
7.1 Ανακεφαλαίωση.....	- 153 -
7.2 Συμπεράσματα για την αντίσταση γείωσης των ανεμογεννητριών.....	- 153 -
7.3 Συμπεράσματα για τη γείωση των φωτοβολταϊκών πάρκων.....	- 156 -
7.4 Μελλοντικές προοπτικές-Περεταίρω μελέτη.....	- 156 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 159 -
-------------------	---------

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

### 1.1 Εισαγωγή-Ορισμοί<sup>[1]</sup>

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν σύντομα κάποια βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων γείωσης και θα δοθούν αρκετοί ορισμοί για τη διευκόλυνση της κατανόησης κάποιων όρων. Η ορολογία που θα χρησιμοποιηθεί βασίζεται στο πρότυπο IEEE Std 80-2013 [1].

Βοηθητικό ηλεκτρόδιο γείωσης: Ένα ηλεκτρόδιο γείωσης με συγκεκριμένους περιορισμούς σχεδίασης ή λειτουργίας. Η κύρια λειτουργία του μπορεί να είναι άλλη από την αγωγή του ρεύματος γης προς τη γη.

Συνεχές περίβλημα: Ένα περίβλημα ζυγού στο οποίο τα διαδοχικά τμήματα της στέγασης κατά μήκος του αγωγού της ίδιας φάσης συνδέονται μαζί για να παραχθεί ένας ηλεκτρικά συνεχής διάδρομος ρεύματος σε ολόκληρο το μήκος του περιβλήματος. Διασταυρούμενες συνδέσεις, δηλαδή συνδέσεις με τα περιβλήματα άλλων φάσεων, γίνονται μόνο στις άκρες της εγκατάστασης και σε λίγα επιλεγμένα ενδιάμεσα σημεία.

DC συνιστώσα: Διαφορά μεταξύ του συμμετρικής κυματομορφής του ρεύματος και της πραγματικής κυματομορφής του ρεύματος κατά τη μεταβατική κατάσταση ενός συστήματος ισχύος. Μαθηματικά, το πραγματικό ρεύμα σφάλματος μπορεί να σπάσει σε δύο κομμάτια, ένα συμμετρικό κομμάτι εναλλασσομένου ρεύματος και ένα μονής κατεύθυνσης (dc) κομμάτι. Το μονής κατεύθυνσης κομμάτι μπορεί να έχει οποιαδήποτε πολικότητα, αλλά δεν θα αλλάξει πολικότητα, και θα μειωθεί σε κάποιο προαποφασισμένο ρυθμό.

Συντελεστής εξασθένισης ( $D_f$ ): Ένας συντελεστής προσαρμογής που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον παράγοντα συμμετρικού ρεύματος σφάλματος προς γη σε υπολογισμούς γείωσης που σχετίζονται με την ασφάλεια. Καθορίζει την rms (ενεργό) ισοδύναμη της μη συμμετρικής κυματομορφής του ρεύματος για μία δεδομένη διάρκεια σφάλματος,  $t_f$ , λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της αρχικής dc συνιστώσας και της απόσβεσής της κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος: Η rms τιμή της μη συμμετρικής κυματομορφής ρεύματος ολοκληρωμένη στο διάστημα της διάρκειας του σφάλματος (σχήμα 1.1)

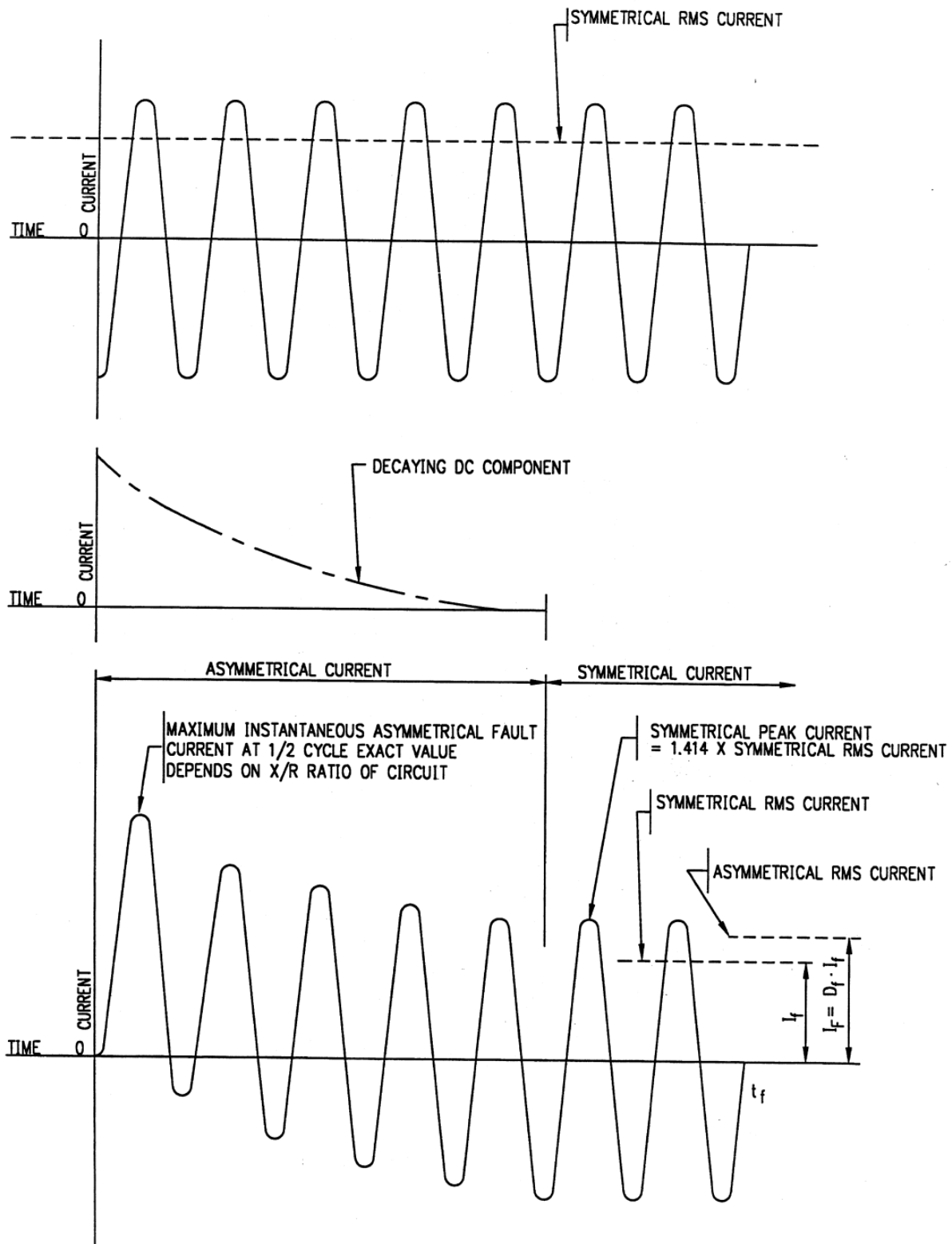
$$I_F = D_f \times I_f \quad (1.1)$$

όπου

$I_F$  είναι το πραγματικό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος σε A

$I_f$  είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη σε A

$D_f$  είναι ο συντελεστής εξασθένισης



Σχήμα 1.1: Σχέση μεταξύ των πραγματικών τιμών του ρεύματος σφάλματος και των τιμών των  $I_F$ ,  $I_f$  και  $D_f$  για διάρκεια σφάλματος  $t_f$  [1]

Ρεύματα περιβλημάτων: Ρεύματα τα οποία απορρέουν από τις τάσεις που αναπτύσσονται στο μεταλλικό περίβλημα από ρεύματα τα οποία ρέουν στους αγωγούς του περιβλήματος.

Παράγοντας διαίρεσης ρεύματος σφάλματος: Ένας παράγοντας που αντιπροσωπεύει το αντίστροφο του λόγου του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος σε εκείνο το τμήμα του ρεύματος που ρέει μεταξύ του πλέγματος γείωσης και της περιβάλλουσας γης.

$$S_f = \frac{I_g}{3I_o} \quad (1.2)$$

όπου

$S_f$  είναι ο παράγοντας διαίρεσης του ρεύματος σφάλματος

$I_g$  είναι το rms συμμετρικό ρεύμα πλέγματος σε A

$I_o$  είναι το ρεύμα σφάλματος μηδενικής ακολουθίας σε A

Υποσταθμός με μόνωση αερίου: Μία συμπαγής κατασκευή που αποτελείται από πολλά τμήματα και περιέχεται σε ένα γειωμένο μεταλλικό στέγασμα στο οποίο το κύριο μονωτικό μέσο είναι αέριο και αυτό αποτελείται συνήθως από ζυγούς, αποζεύκτες και σχετικό εξοπλισμό.

Γείωση: Μία αγωγή σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, με την οποία ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή εξοπλισμός συνδέεται με τη γη ή με ένα αγωγή στοιχείο σχετικά μεγάλης έκτασης που παίζει το ρόλο της γης.

Γειωμένο: Ένα σύστημα, κύκλωμα ή συσκευή μαζί με μία γείωση για τη δημιουργία ενός κυκλώματος επιστροφής γης και για τη διατήρηση του δυναμικού του σχεδόν ίσου με το δυναμικό της γης.

Ηλεκτρόδιο γείωσης: Ένας αγωγός τοποθετημένος μέσα στη γη που χρησιμοποιείται για τη συλλογή του ρεύματος γης από τη γη ή για τη διοχέτευση του ρεύματος γης μέσα στη γη.

Πλέγμα γείωσης: Ένα σύστημα διασυνδεδεμένων ηλεκτροδίων γείωσης τοποθετημένων με ένα πρότυπο πάνω σε μία συγκεκριμένη επιφάνεια, θαμμένο κάτω από την επιφάνεια της γης.

Κάλυμμα γείωσης (ground mat): Μία συμπαγής μεταλλική πλάκα ή ένα σύστημα κοντινών μεταξύ τους γυμνών αγωγών η οποία τοποθετείται συχνά σε μικρά βάθη πάνω από ένα πλέγμα γείωσης ή αλλού στην επιφάνεια της γης ώστε να υπάρχει ένα έξτρα προστατευτικό μέτρο που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο έκθεσης σε βηματικές τάσεις ή τάσεις επαφής σε μία κρίσιμη λειτουργική περιοχή ή σε μέρη που χρησιμοποιούνται συχνά από ανθρώπους. Κοινές μορφές καλύμματος γείωσης είναι οι γειωμένες μεταλλικές σχάρες, που τοποθετούνται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ή πλέγματα καλωδιώσεων που τοποθετούνται ακριβώς κάτω από το υλικό της επιφάνειας.

Ανύψωση δυναμικού γης (GPR): Το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που μπορεί να πάρει ένα ηλεκτρόδιο γείωσης σχετικά με ένα απομακρυσμένο σημείο γείωσης το οποίο θεωρείται ως δυναμικό της απομακρυσμένης γης. Αυτό το δυναμικό, GPR, είναι ίσο το μέγιστο ρεύμα του πλέγματος πολλαπλασιασμένο την αντίσταση του πλέγματος.

Κύκλωμα επιστροφής γης: Ένα κύκλωμα στο οποίο η γη ή ένας ισοδύναμος αγωγός χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση του κυκλώματος και επιτρέπει την κυκλοφορία του ρεύματος από ή προς την πηγή του.

Σύστημα γείωσης: Αποτελείται από όλες τις διασυνδεδεμένες εγκαταστάσεις γείωσης σε μία συγκεκριμένη περιοχή.

Κύριος ζυγός γείωσης: Ένας αγωγός ή ένα σύστημα αγωγών για την σύνδεση όλων των καθορισμένων μεταλλικών χαρακτηριστικών του υποσταθμού με μόνωση αερίου σε ένα σύστημα γείωσης του υποσταθμού.

Μέγιστο ρεύμα πλέγματος: Μία τιμή σχεδίασης του μέγιστου ρεύματος πλέγματος, ορίζεται ως ακολούθως:

$$I_G = D_f \times I_g \quad (1.3)$$

όπου

$I_G$  είναι το μέγιστο ρεύμα πλέγματος σε A

$D_f$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης για ολόκληρη την διάρκεια του σφάλματος  $t_f$

$I_g$  είναι το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος σε A

Τάση πλέγματος: Η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης

Τάση επαφής μετάλλου με μέταλλο: Η διαφορά στο δυναμικό μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων ή δομών μέσα στην τοποθεσία του υποσταθμού η οποία μπορεί να γεφυρωθεί με άμεση χέρι με χέρι ή χέρι με πόδι επαφή.

Μη συνεχές περίβλημα: Ένα περίβλημα ζυγών στο οποίο τα διαδοχικά τμήματα της στέγασης του αγωγού της ίδιας φάσης είναι ηλεκτρικά απομονωμένα (ή μονωμένα το ένα από το άλλο) ώστε να μην μπορεί να υπάρξει ροή ρεύματος πέρα από κάθε τμήμα περιβλήματος.

Κυρίως ηλεκτρόδιο γείωσης: Ένα ηλεκτρόδιο γείωσης το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο ή προσαρμοσμένο για την αποφόρτιση του ρεύματος σφάλματος προς γη στο έδαφος, συχνά με ένα συγκεκριμένο πρότυπο αποφόρτισης, όπως απαιτείται από το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης.

Βηματική τάση: Η διαφορά στο δυναμικό επιφανείας που μπορεί να διαπιστωθεί από έναν άνθρωπο ο οποίος γεφυρώνει μία απόσταση 1m με τα πόδια χωρίς να ακουμπά κανένα γειωμένο αντικείμενο.

Υπομεταβατική αντίδραση: Αντίδραση μιας γεννήτριας κατά την εκκίνηση ενός σφάλματος. Αυτή η αντίδραση χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς του αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος. Το ρεύμα συνεχώς μειώνεται, αλλά υποτίθεται ότι είναι σταθερό σε αυτή την τιμή σαν πρώτο βήμα, διαρκώντας περίπου 0,05 s μετά την εφαρμογή ενός σφάλματος.

Υλικό επιφανείας: Ένα υλικό το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω από το έδαφος και αποτελείται κυρίως από βράχο ή θρυμματισμένη πέτρα, ασφαλτο, ή άλλα υλικά. Το υλικό επιφανείας, ανάλογα με την αντίσταση του υλικού, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το ρεύμα που περνά από το σώμα για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής περιλαμβανομένων και των ποδιών ενός ανθρώπου.



Συμμετρικό ρεύμα σφάλματος: Εκείνο το μέρος του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος προς γη το οποίο ρέει ανάμεσα στο πλέγμα γείωσης και στην περιβάλλουσα γη. Μπορεί να εκφρασθεί ως:

$$I_g = S_f \times I_f \quad (1.4)$$

όπου:

$I_g$  η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος σε A

$I_f$  η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος προς γη σε A

$S_f$  ο συντελεστής εξασθένησης ρεύματος σφάλματος

Συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη: Η μέγιστη rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος μετά τη στιγμή της αρχής ενός σφάλματος προς γη. Ως τέτοιο, 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:

$$I_{f(0+)} = 3I_o'' \quad (1.5)$$

όπου:

$I_{f(0+)}$  είναι το αρχικό rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη

$I_o''$  είναι η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος μηδενικής ακολουθίας που αναπτύσσεται αμέσως μετά την έναρξη ενός σφάλματος, αντικατοπτρίζοντας την υπομεταβατική αντίδραση των περιστρεφόμενων μηχανών που συμβάλλουν στο σφάλμα.

Το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος φαίνεται στο συντομευμένο συμβολισμό ως  $I_f$ , ή συμβολίζεται απλά με  $3I_0$ . Ο λόγος για τον τελευταίο συμβολισμό είναι ότι το αρχικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος υποτίθεται ότι παραμένει σταθερό για όλη τη διάρκεια του σφάλματος.

Τάση επαφής: Η διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανύψωσης δυναμικού του εδάφους ενός πλέγματος γείωσης ή ενός συστήματος και του δυναμικού επιφανείας σε ένα σημείο όπου ένας άνθρωπος θα μπορούσε να στεκόταν ενώ την ίδια στιγμή ευρίσκεται σε επαφή με μία γειωμένη δομή. Οι μετρήσεις τάσεως επαφής μπορεί να είναι «ανοικτού κυκλώματος» (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η ισοδύναμη αντίσταση του σώματος στο κύκλωμα μέτρησης) ή «κλειστού κυκλώματος» (η ισοδύναμη αντίσταση του σώματος συμπεριλαμβάνεται στο κύκλωμα μέτρησης).

Μεταφερόμενο δυναμικό: Μία ειδική περίπτωση του δυναμικού επαφής όπου το δυναμικό μεταφέρεται μέσα ή έξω από τον υποσταθμό από ή προς ένα απομακρυσμένο σημείο έξω από την τοποθεσία του υποσταθμού.

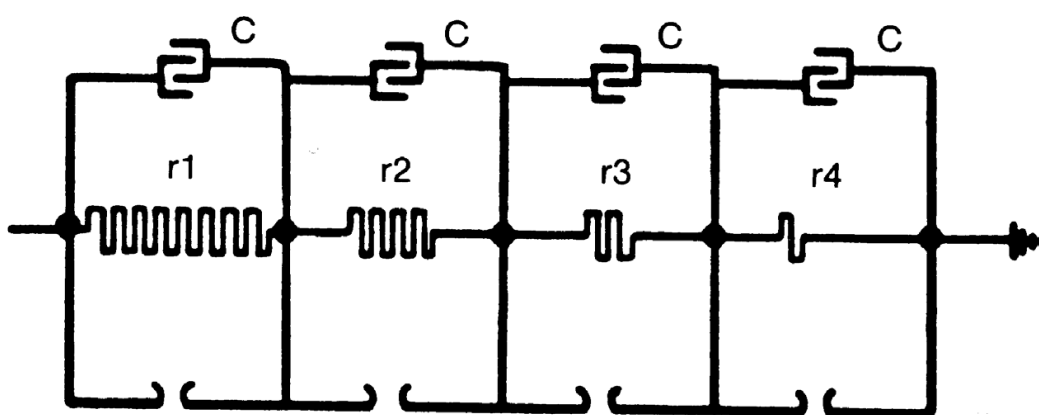
Μεταβατικό δυναμικό περιβλήματος: Πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα τα οποία γίνονται στο γειωμένο περίβλημα των συστημάτων υποσταθμών με μόνωση αερίου. Συνήθως, τα καλώδια γείωσης είναι πολύ μακριά (επαγωγικά) στις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν ώστε να αποτρέψουν αποτελεσματικά την εμφάνιση μεταβατικού δυναμικού περιβλήματος.

Λόγος X/R: Λόγος αντίδρασης προς αντίσταση για το σύστημα. Είναι ενδεικτικός για το ρυθμό μείωσης κάθε συνιστώσας dc. Ένας μεγάλος λόγος X/R αντικατοπτρίζει μία μεγάλη σταθερά χρόνου και ένα μικρό ρυθμό μείωσης.

## 1.2 Χαρακτηριστικά του εδάφους<sup>[1]</sup>

### 1.2.1 Το έδαφος ως μέσο γείωσης

Η συμπεριφορά ενός ηλεκτροδίου γείωσης που είναι θαμμένο στο έδαφος μπορεί να αναλυθεί με όρους ηλεκτρικού κυκλώματος όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Τα περισσότερα εδάφη συμπεριφέρονται τόσο ως αγωγοί αντίστασης  $r$  όσο και ως διηλεκτρικά. Εκτός από περιπτώσεις υψηλής συχνότητας και απότομου μετώπου κυματομορφές που διεισδύουν σε ένα έδαφος με μεγάλη ειδική αντίσταση, το ρεύμα φόρτισης μπορεί να αγνοηθεί σε σχέση με το ρεύμα διαρροής και η γη μπορεί να αναπαρασταθεί ως μία απλή ωμική αντίσταση.



Σχήμα 1.2: Μοντέλο του εδάφους [1]

### 1.2.2. Επίδραση της κλίσης της τάσης

Η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζεται από την κλίση της τάσης εκτός αν η τελευταία ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή εξαρτάται από το υλικό του εδάφους αλλά συνήθως έχει την τιμή μερικών κιλοβολτ ανά εκατοστό. Μόλις ξεπεραστεί θα δημιουργηθούν τόξα στο ηλεκτρόδιο επιφανείας και θα προχωρήσουν μέσα στη γη ώστε θα αυξηθεί το ενεργό μέγεθος του ηλεκτροδίου μέχρι οι κλίσεις να μειωθούν σε τιμές τις οποίες το υλικό του εδάφους μπορεί να αντέξει. Αυτή η συνθήκη παρουσιάζεται με την παρουσία των κενών στο σχήμα 1.2. Επειδή το σύστημα γείωσης του υποσταθμού συνήθως σχεδιάζεται ώστε να ικανοποιεί πολύ πιο αυστηρά κριτήρια για τα όρια βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, η κλίση μπορεί πάντοτε να υποτεθεί ότι είναι κάτω από το κρίσιμο εύρος.

### 1.2.3 Επίδραση του πλάτους του ρεύματος

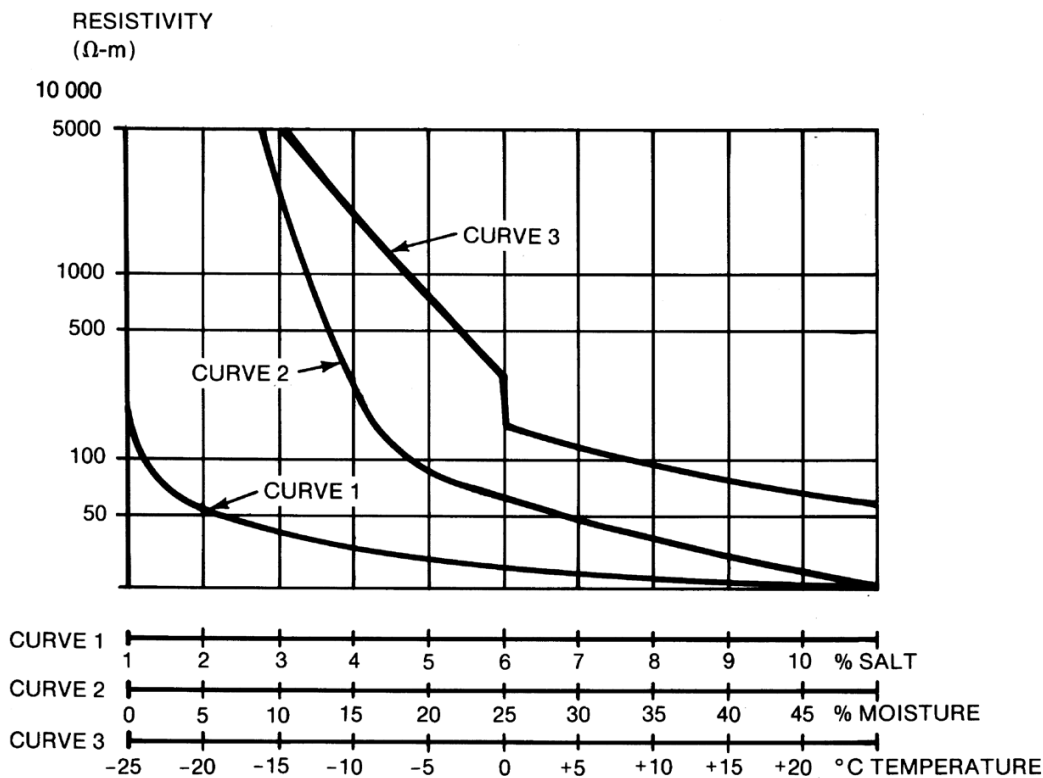
Η ειδική αντίσταση του εδάφους στην περιοχή των ηλεκτροδίων γείωσης μπορεί να επηρεαστεί από τα ρεύματα που ρέουν από τα ηλεκτρόδια στο περιβάλλον έδαφος. Τα θερμικά χαρακτηριστικά και η υγρασία του εδάφους θα καθορίσουν αν ένα ρεύμα δεδομένου πλάτους και διάρκειας θα προκαλέσει σημαντική ξήρανση και συνεπώς θα αυξήσει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Μία

συντηρητική τιμή πυκνότητας ρεύματος, όπως δίνεται στη [2] είναι να μην ξεπεραστούν τα 200 A/m<sup>2</sup> για 1 s.

#### 1.2.4 Επίδραση της υγρασίας, θερμοκρασίας και χημικού περιεχομένου

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο έδαφος είναι κυρίως ηλεκτρολυτική. Για το λόγο αυτό η ειδική αντίσταση των περισσότερων εδαφών αυξάνεται απότομα όταν η περιεχόμενη υγρασία είναι λιγότερη από 15% του συνολικού βάρους του εδάφους. Το ποσοστό της υγρασίας εξαρτάται επίσης από μέγεθος των κόκκων, την μεταβλητότητα του μεγέθους των κόκκων και από το πόσο συμπαγείς είναι οι κόκκοι. Όμως, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 η ειδική αντίσταση επηρεάζεται λίγο όταν το ποσοστό της υγρασίας ξεπεράσει το 22%, όπως φαίνεται στο IEEE Std 142 [3]

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους είναι σχεδόν αμελητέα για θερμοκρασίες πάνω από το σημείο πήξης. Στους 0°C το νερό του εδάφους αρχίζει να παγώνει και η αγωγιμότητα αυξάνεται ραγδαία. Η καμπύλη 3 του σχήματος 1.3 δείχνει αυτή την τυπική διακύμανση για ένα αμμώδες παχύ έδαφος που περιέχει 15,2 % κατά βάρος υγρασία.



Σχήμα 1.3: Επίδραση της υγρασίας, της θερμοκρασίας και του άλατος στην ειδική αντίσταση του εδάφους [1]

Η σύνθεση και το ποσό των διαλυτών αλάτων, οξέων ή βάσεων που υπάρχει στο έδαφος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ειδική του αντίσταση. Η καμπύλη 1 του σχήματος 1.3 δείχνει την τυπική επίδραση του άλατος (χλωριούχο νάτριο) στην ειδική αντίσταση ενός εδάφους το οποίο περιέχει 30% κατά βάρος υγρασία [4].

## 1.3 Δομή του εδάφους και επιλογή του μοντέλου εδάφους<sup>[1]</sup>

### 1.3.1 Έρευνα για την δομή του εδάφους

Οι έρευνες ειδικής αντίστασης στην τοποθεσία ενός υποσταθμού είναι απαραίτητες για τον καθορισμό τόσο της γενικής σύνθεσης του εδάφους όσο και του βαθμού της ομογένειας. Δείγματα καθώς και άλλες γεωλογικές έρευνες παρέχουν συχνά χρήσιμες πληροφορίες για την παρουσία πολλαπλών στρωμάτων και την φύση του υλικού του εδάφους, που οδηγούν σε κάποιες ιδέες σχετικά με το εύρος της ειδικής αντίστασης στον τόπο.

### 1.3.2. Κατάταξη των εδαφών και εύρος ειδικών αντιστάσεων

Υπάρχουν πολλοί πίνακες στη βιβλιογραφία που δείχνουν το εύρος των ειδικών αντιστάσεων για πολλά εδάφη και βράχους. Η πινακοποίηση του [5] έχει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας. Πιο λεπτομερή δεδομένα μπορούν να βρεθούν στα [6] και [7] καθώς και στους Ελληνικούς Κανονισμούς Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων [8]

Πίνακας 1-1: Εύρος ειδικής αντίστασης για διάφορα εδάφη [1]

Τύπος εδάφους	Μέση ειδική αντίσταση ( $\Omega \cdot m$ )
Βρεγμένο οργανικό έδαφος	10
Πλειοψηφία εδαφών	$10^2$
Στεγνό έδαφος	$10^3$
Βραχώδες υπόστρωμα	$10^4$

Πίνακας 1-2: Ενδεικτικές μέσες τιμές ειδικής αντίστασης εδαφών κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε. [8]

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ( $\Omega \cdot m$ )
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

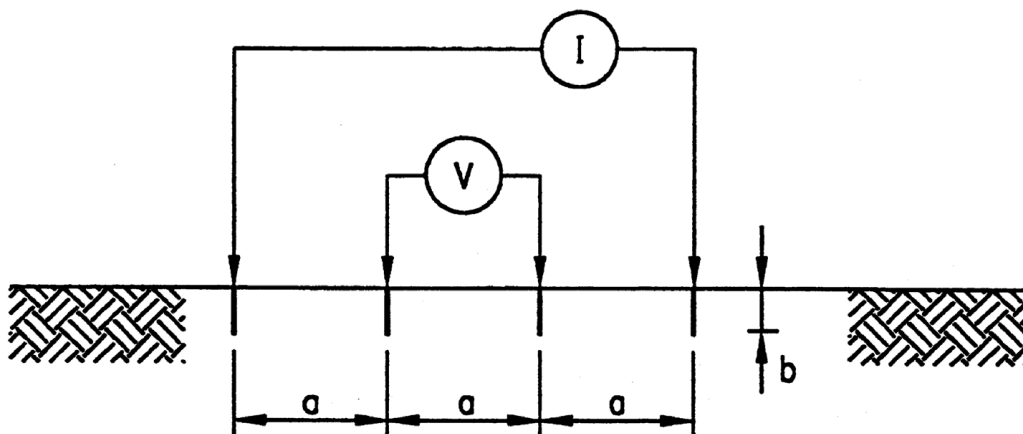
### 1.3.3 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης

Οι εκτιμήσεις που βασίζονται στην κατάταξη του εδάφους αποτελούν μόνο μία χονδροειδή εκτίμηση της ειδικής αντίστασης. Συνεπώς είναι επιτακτική η ανάγκη για μετρήσεις ειδικής αντίστασης. Αυτές πρέπει να γίνουν σε συγκεκριμένο αριθμό σημείων στην τοποθεσία. Οι θέσεις των υποσταθμών όπου το έδαφος μπορεί να έχει ομοιόμορφη κατανομή ειδικής αντίστασης σε όλη την περιοχή προς εξέταση και σε ένα αξιосέβαστο βάθος είναι πολύ σπάνιες. Συνήθως υπάρχουν αρκετά στρώματα κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετική ειδική αντίσταση. Συχνά, συμβαίνουν και αλλαγές στο οριζόντιο επίπεδο αλλά σε σύγκριση με τις κάθετες αλλαγές είναι πολύ πιο ομαλές. Οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους πρέπει οπωσδήποτε να γίνουν ώστε να καθοριστεί αν υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Ο αριθμός

αυτών των μετρήσεων πρέπει να είναι μεγαλύτερος αν οι διακυμάνσεις είναι μεγάλες ειδικά αν κάποιες τιμές είναι τόσο υψηλές ώστε να προκαλείται πιθανό ζήτημα ασφαλείας.

Αν η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σημαντικά με το βάθος είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο εύρος χώρου στους καθετήρες ομοαξονικών καλωδίων ώστε να γίνει εκτίμηση της ειδικής αντίστασης σε πιο βαθιά στρώματα. Αυτό είναι εφικτό διότι καθώς αυξάνεται ο χώρος των καθετήρων, το ρεύμα της πηγής δοκιμών διεισδύει όλο και περισσότερο στις απομακρυσμένες περιοχές τόσο σε κάθετες όσο και σε οριζόντιες κατευθύνσεις ανεξάρτητα από το πόσο πολύ διαστρέφεται ο συγκεκριμένος διάδρομος λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών εδάφους [9].

Πολλές τεχνικές μετρήσεων περιγράφονται λεπτομερώς στο IEEE Std 81 [10]. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η μέθοδος των τεσσάρων σημείων του Wenner, η οποία φαίνεται στο σχήμα 1.4. Εν συντομία, τέσσερα ηλεκτρόδια οδηγούνται προς τη γη σε ευθεία γραμμή, σε ίσες αποστάσεις  $a$  μεταξύ τους και οδηγούνται σε ένα βάθος  $b$ . Έπειτα μετράται η τάση μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων και διαιρείται με το ρεύμα μεταξύ των δύο εξωτερικών ηλεκτροδίων δίνοντας την τιμή της αντίστασης  $R$ .



Σχήμα 1.4: Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων του Wenner [1]

Έπειτα υπολογίζουμε:

$$\rho_{\alpha} = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (1.6)$$

όπου:

$\rho_{\alpha}$  είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε  $\Omega \cdot m$

$R$  είναι η μετρούμενη αντίσταση σε  $\Omega$

$a$  είναι η απόσταση μεταξύ των γειτονικών ηλεκτροδίων σε m

$b$  είναι το βάθος των ηλεκτροδίων σε m

Αν το  $b$  είναι μικρό σε σύγκριση με το  $a$  όπως στην περίπτωση όπου τα ηλεκτρόδια διεισδύουν στο έδαφος σε μικρό μόνο βάθος η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως:

$$\rho_a \cong 2\pi aR$$

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

Ο Palmer [11] έχει προτείνει μία τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου του Wenner. Αυτή η εκδοχή δίνει μεγαλύτερη ευαισθησία για μεγάλη χωροταξία των ηλεκτροδίων όπως περιγράφεται στο πρότυπο IEEE Std 81 [10].

Μία άλλη μέθοδος μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους που φαίνεται στο σχήμα 1.5 και περιγράφεται στο IEEE Std 81 [10] είναι η μέθοδος καθοδηγούμενης ράβδου που βασίζεται στη μέθοδο των τριών σημείων [12],[13],[14].

Στη μέθοδο αυτή, το βάθος  $L_r$  της καθοδηγούμενης ράβδου που βρίσκεται στο έδαφος προς εξέταση μεταβάλλεται. Οι άλλες δύο ράβδοι, που είναι γνωστές ως ράβδοι αναφοράς, οδηγούνται σε ρηχά βάθη σε ευθεία γραμμή. Η τοποθεσία της ράβδου τάσης μεταβάλλεται μεταξύ της ράβδου εξέτασης και της τρέχουσας ράβδου. Εναλλακτικά, η ράβδος τάσης μπορεί να τοποθετηθεί σε θέση απέναντι από την τρέχουσα ράβδο. Η εμφανής ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

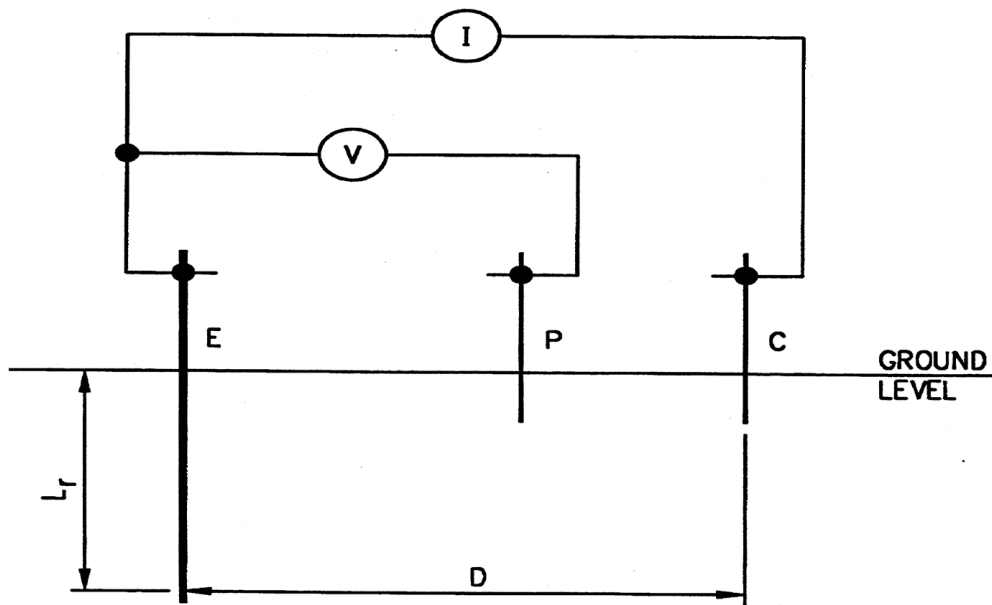
$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (1.7)$$

όπου:

$L_r$  είναι το μήκος της ράβδου σε m

$d$  είναι η διάμετρος της ράβδου σε m

Η γραφική παράσταση της μετρούμενης ειδικής αντίστασης  $\rho_a$  σε συνάρτηση με το μήκος της ράβδου  $L_r$  δίνει μία οπτική βοήθεια για τον καθορισμό των διακυμάνσεων της ειδικής αντίστασης της γης με το βάθος. Δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στο [15] έδειξαν ότι είτε η μέθοδος του Wenner είτε η μέθοδος της καθοδηγούμενης ράβδου μπορούν να παράσχουν τις πληροφορίες που απαιτούνται ώστε να αναπτυχθεί ένα μοντέλο εδάφους.



Σχήμα 1.5 : Κυκλωματικό διάγραμμα για τη μέθοδο κατευθυνόμενης ράβδου [1]

Η μέθοδος τεσσάρων σημείων του Wenner είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για αυτό. Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων αποκτά δεδομένα για την ειδική αντίσταση του εδάφους σε πιο βαθιά στρώματα χωρίς να οδηγήσει τα ηλεκτρόδια δοκιμής στα στρώματα αυτά. Δεν απαιτείται βαρύς εξοπλισμός για να γίνουν οι δοκιμές με τη μέθοδο αυτή. Τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται πολύ από την αντίσταση των ηλεκτροδίων δοκιμής ή από τις τρύπες που δημιουργούνται κατά την οδήγηση των ηλεκτροδίων δοκιμής μέσα στο έδαφος.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου κατευθυνόμενης ράβδου, αν και δεν σχετίζεται άμεσα με τις μετρήσεις, είναι η ικανότητα να καθορισθεί το βάθος στο οποίο πρέπει να τοποθετηθούν οι ράβδοι. Αν γνωρίζουμε εάν και πόσο βαθιά μπορούν να τοποθετηθούν οι ράβδοι στη γη μπορεί να μας απαλλάξει από την υποχρέωση να επανασχεδιάσουμε το πλέγμα της γείωσης. Συχνά, λόγω των σκληρών στρωμάτων στο έδαφος όπως βράχος, σκληρός πηλός κλπ είναι πρακτικά αδύνατο να τοποθετηθούν οι ράβδοι πιο βαθιά με αποτέλεσμα να μην παίρνουμε επαρκή δεδομένα. Μία τεχνική για την πρόβλεψη της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε ένα βάθος 10 φορές το βάθος της γνωστής τιμής ειδικής αντίστασης έχει αναπτυχθεί στο [12]. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε περιπτώσεις όπου το ηλεκτρόδιο μέτρησης δεν μπορεί να τοποθετηθεί βαθιά. Όμως ο χρήστης θα πρέπει να μελετήσει τους πρακτικούς περιορισμούς αυτής της τεχνικής πριν τη χρησιμοποιήσει. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου καθοδηγούμενης ράβδου είναι ότι όταν το ηλεκτρόδιο μέτρησης τοποθετηθεί βαθιά στο έδαφος, συνήθως χάνει την επαφή με το έδαφος λόγω των δονήσεων και της μεγαλύτερης διαμέτρου των συνδέσμων με αποτέλεσμα να μετρούνται μεγαλύτερες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Ένα πλέγμα γείωσης που έχει σχεδιασθεί με αυτές τις υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης μπορεί να είναι υπερβολικά συντηρητικό. Η μέθοδος καθοδηγούμενης ράβδου παρουσιάζει μία αβεβαιότητα στην τιμή της αντίστασης. Ο κανόνας του 62% ισχύει μόνο για μεγάλη διασπορά των ηλεκτροδίων και ομοιόμορφο έδαφος. Σε μη ομοιόμορφα εδάφη αυτή η υπόθεση μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα των μετρήσεων, όπως περιγράφεται στο IEEE Std 81 [10]. Αν χρησιμοποιηθεί το επίπεδο τμήμα της καμπύλης για τον καθορισμό της αντίστασης του ηλεκτροδίου μέτρησης, αυτό το επίπεδο τμήμα μπορεί να μην δώσει

τη σωστή αντίσταση σε μη ομοιόμορφο έδαφος και το επίπεδο τμήμα μπορεί να μην εξαχθεί καν εκτός αν η διασπορά του ηλεκτροδίου μέτρησης και του τρέχοντος ηλεκτροδίου είναι πολύ μεγάλη [16], [17].

Τα αρχεία μετρήσεων ειδικής αντίστασης θα πρέπει να περιλαμβάνουν δεδομένα θερμοκρασίας και πληροφορίες σχετικά με το περιεχόμενο υγρασίας του εδάφους την ώρα των μετρήσεων. Επίσης θα πρέπει να καταγραφούν και όλα τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τα θαμμένα αγώγιμα αντικείμενα στην περιοχή.

Τα θαμμένα αγώγιμα αντικείμενα σε επαφή με το έδαφος μπορεί να αχρηστεύσουν μετρήσεις που γίνονται με τις μεθόδους που περιγράφηκαν αν είναι αρκετά κοντά ώστε να μεταβάλλουν το πρότυπο της ροής του ρεύματος δοκιμής. Αυτό ισχύει ενικά για μεγάλα ή μακριά αντικείμενα. Για το σκοπό αυτό οι μετρήσεις ειδικής αγωγιμότητας είναι πιο πιθανό να αλλοιωθούν σε μία περιοχή όπου είναι ήδη εγκατεστημένοι αγωγοί δικτύου, εκτός αν πρόκειται για μετρήσεις μικρού βάθους ή κοντά στο κέντρο ενός πολύ μεγάλου τετραγωνικού πλέγματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να παρθούν μερικές προσεγγιστικές μετρήσεις σε μία μικρή απόσταση έξω από το δίκτυο με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του δικτύου στο πρότυπο ροής του ρεύματος. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσεγγίσεις, ειδικά αν υπάρχουν ενδείξεις ότι το έδαφος σε όλη την περιοχή είναι ομοιόμορφο, αν και δεν είναι αδιαμφισβήτητες ως προς τις συνθήκες μέσα στο δίκτυο.

#### **1.4 Ερμηνεία των μετρήσεων ειδικής αντίστασης εδάφους<sup>[1]</sup>**

Η ερμηνεία των μετρήσεων ειδικής αντίστασης που λαμβάνονται στον αγρό μπορεί να είναι το πιο δύσκολο κομμάτι της διαδικασίας των μετρήσεων. Ο βασικός στόχος είναι να εξαχθεί ένα μοντέλο εδάφους που προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα το πραγματικό έδαφος. Η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται πλευρικά και σε σχέση με το βάθος ανάλογα με τη διαστρωμάτωση του εδάφους. Μπορεί να προκύψουν και εποχικές διακυμάνσεις στην ειδική αντίσταση του εδάφους λόγω της μεταβλητότητας των καιρικών συνθηκών όπως περιγράφεται στο [18]. Πρέπει να αναγνωρισθεί ότι το μοντέλο εδάφους είναι μόνο μία προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών και συνεπώς είναι απίθανο ένα τέλειο ταίριασμα.

Τα δύο πιο κοινά χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι το ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους και το διστρωματικό μοντέλο εδάφους. Τα διστρωματικά μοντέλα αποτελούν συχνά μία καλή προσέγγιση για μία πληθώρα δομών εδάφους ενώ τα πολυστρωματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για πιο πολύπλοκα εδάφη. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα είτε με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή όπως περιγράφεται στα [12], [13], [19], [20], [21], [15], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29].

Ένα ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν υπάρχει μικρή διακύμανση στη μετρούμενη ειδική αντίσταση. Σε ομογενείς συνθήκες εδάφους, οι οποίες πολύ σπάνια επικρατούν στην πράξη, το ομοιόμορφο μοντέλο μπορεί να είναι αρκετά ακριβές. Αν υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης, το ομοιόμορφο μοντέλο είναι απίθανο να δώσει ακριβή αποτελέσματα.



Μία πιο εύστοχη αντιπροσώπευση των πραγματικών συνθηκών εδάφους μπορεί να εξαχθεί χρησιμοποιώντας ένα διστρωματικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα άνω στρώμα πεπερασμένου βάθους με διαφορετική ειδική αντίσταση από ένα κάτω στρώμα απείρου βάθους. Υπάρχουν πολλές τεχνικές για να καθορισθεί το ισοδύναμο διστρωματικό μοντέλο από τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης που παίρνονται από τον αγρό. Σε μερικές περιπτώσεις ένα διστρωματικό μοντέλο μπορεί να προσεγγισθεί 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 [30], [13], [31]. Θα πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι η πλειοψηφία των εδαφών μπορεί να προσεγγισθεί από ένα διστρωματικό μοντέλο [32].

Υπάρχουν λογισμικά που είναι διαθέσιμα στη βιομηχανία τα οποία μπορούν επίσης να εξάγουν διστρωματικά και πολυστρωματικά μοντέλα εδάφους [33], [21], [22], [34].

Σε μερικές περιπτώσεις 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 τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό μοντέλο εδάφους, όπως ένα πολυστρωματικό μοντέλο, όπως εξηγείται στα [35], [33].

#### 1.4.1 Υπόθεση ομοιόμορφου εδάφους

Όταν δεν είναι διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία για διστρωματικά ή πολυστρωματικά μοντέλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους. Δυστυχώς είναι δύσκολο να εκτιμηθεί γενικά ένα άνω όριο του σφάλματος σε όλες τις σχετικές παραμέτρους γείωσης, αλλά όταν η αντίθεση μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων ειδικών αντιστάσεων είναι μικρή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μέση ειδική αντίσταση ως μία πρώτη εκτίμηση ώστε να καθορισθεί η τάξη των πλατών. Η προσεγγιστική ομοιόμορφη ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να υπολογισθεί παίρνοντας των αριθμητικό μέσο όρο των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\rho_{\alpha(av1)} = \frac{\rho_{\alpha(1)} + \rho_{\alpha(2)} + \rho_{\alpha(3)} + \dots + \rho_{\alpha(n)}}{n} \quad (1.8)$$

όπου

$\rho_{\alpha(1)}, \rho_{\alpha(2)}, \rho_{\alpha(3)}, \dots, \rho_{\alpha(n)}$  είναι τα 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  $\Omega \cdot m$

$n$  είναι ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων

Η πλειοψηφία των εδαφών δεν πληροί τα κριτήρια της παραπάνω εξίσωσης. Είναι δύσκολο να αναπτυχθεί ένα ομοιόμορφο μοντέλο εδάφους όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται σημαντικά. Επειδή οι εξισώσεις βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής πολλές φορές βασίζονται σε ομοιόμορφα μοντέλα εδάφους, έγινε μία προσπάθεια να αναπτυχθεί ένας τρόπος ώστε να προσεγγίζονται μη ομοιόμορφα εδάφη με μοντέλα ομοιόμορφων εδαφών [1].

Υπάρχουν πολλές προτάσεις που προτείνονται από διάφορους συγγραφείς προκειμένου να προσεγγισθεί ένα μη ομοιόμορφο έδαφος από ένα μοντέλο ομοιόμορφου εδάφους. Μία από αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνει τη χρήση του μέσου της ειδικής αντίστασης του πάνω στρώματος για τους υπολογισμούς των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής και τη χρήση του μέσω του κάτω στρώματος για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του συστήματος. Οι εργασίες [33], [35], [22], [36], [37] μπορούν να παράσχουν επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την ερμηνεία των μετρημένων δεδομένων εδάφους και την επιρροή των πολυστρωματικών, διστρωματικών και ομοιόμορφων μοντέλων εδάφους στις παραμέτρους γείωσης.

#### 1.4.2 Υπόθεση μη ομοιόμορφου εδάφους

Μία άλλη προσέγγιση σε περιπτώσεις όπου η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σημαντικά με το βάθος προτείνεται στο [38] και σε άλλα βιβλία. Για παράδειγμα, είναι συχνά εφικτό από μετρήσεις στον αγρό που έχουν παρθεί με μεγάλο εύρος χωροταξίας των ηλεκτροδίων να εξαχθεί μία διαστρωμάτωση της γη σε δύο ή περισσότερα στρώματα κατάλληλου πάχους τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη τις διακυμάνσεις των μετρήσεων [26].

##### Διστρωματικό μοντέλο

Ένα διστρωματικό μοντέλο μπορεί να αντιπροσωπευθεί από ένα πάνω στρώμα πεπερασμένου βάθους πάνω από ένα κάτω στρώμα απείρου βάθους. Η απότομη αλλαγή της ειδικής αντίστασης στα όρια κάθε στρώματος εδάφους μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός συντελεστή ανάκλασης. Ο συντελεστής ανάκλασης,  $K$ , ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (1.8)$$

όπου

$\rho_1$  η ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος του εδάφους σε  $\Omega \cdot m$

$\rho_2$  η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους σε  $\Omega \cdot m$

Ενώ η πιο ακριβής αντιπροσώπευση ενός συστήματος γείωσης θα πρέπει σίγουρα να βασίζεται στις πραγματικές διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους που επικρατούν στην συγκεκριμένη τοποθεσία, σπάνια θα είναι οικονομικά ανεκτό ή τεχνικά εφικτό να μοντελοποιηθούν όλες αυτές οι διακυμάνσεις. Όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις, η αντιπροσώπευση ενός ηλεκτροδίου εδάφους που βασίζεται σε ένα ισοδύναμο διστρωματικό μοντέλο εδάφους είναι ικανοποιητικό για το σχεδιασμό ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης.

Το πρότυπο IEEE Std 81 παρέχει μεθόδους για τον καθορισμό των ισοδύναμων ειδικών αντιστάσεων του πάνω και του κάτω στρώματος του εδάφους και του βάθους του πάνω στρώματος για ένα τέτοιο μοντέλο.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που έχουν προταθεί από συγγραφείς προκειμένου να καθορισθεί ένα διστρωματικό μοντέλο και χρησιμοποιώντας την αντίσταση του άνω στρώματος για υπολογισμούς βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής και το κάτω στρώμα για την αντίσταση γείωσης και μέθοδοι που τροποποιούν τις παραπάνω εξισώσεις προκειμένου να χρησιμοποιηθούν

σε διστρωματικά μοντέλα. Τέτοιες εργασίες μπορεί να παράσχουν στο σχεδιαστή περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ερμηνεία των εδαφών και την επίδραση των πολυστρωματικών, διστρωματικών και ομοιόμορφων μοντέλων [33], [35], [37].

## 1.5 Ασφάλεια στις γειώσεις<sup>[1]</sup>

Ένα ασφαλές σύστημα γείωσης θα πρέπει να εκπληρώνει δύο στόχους:

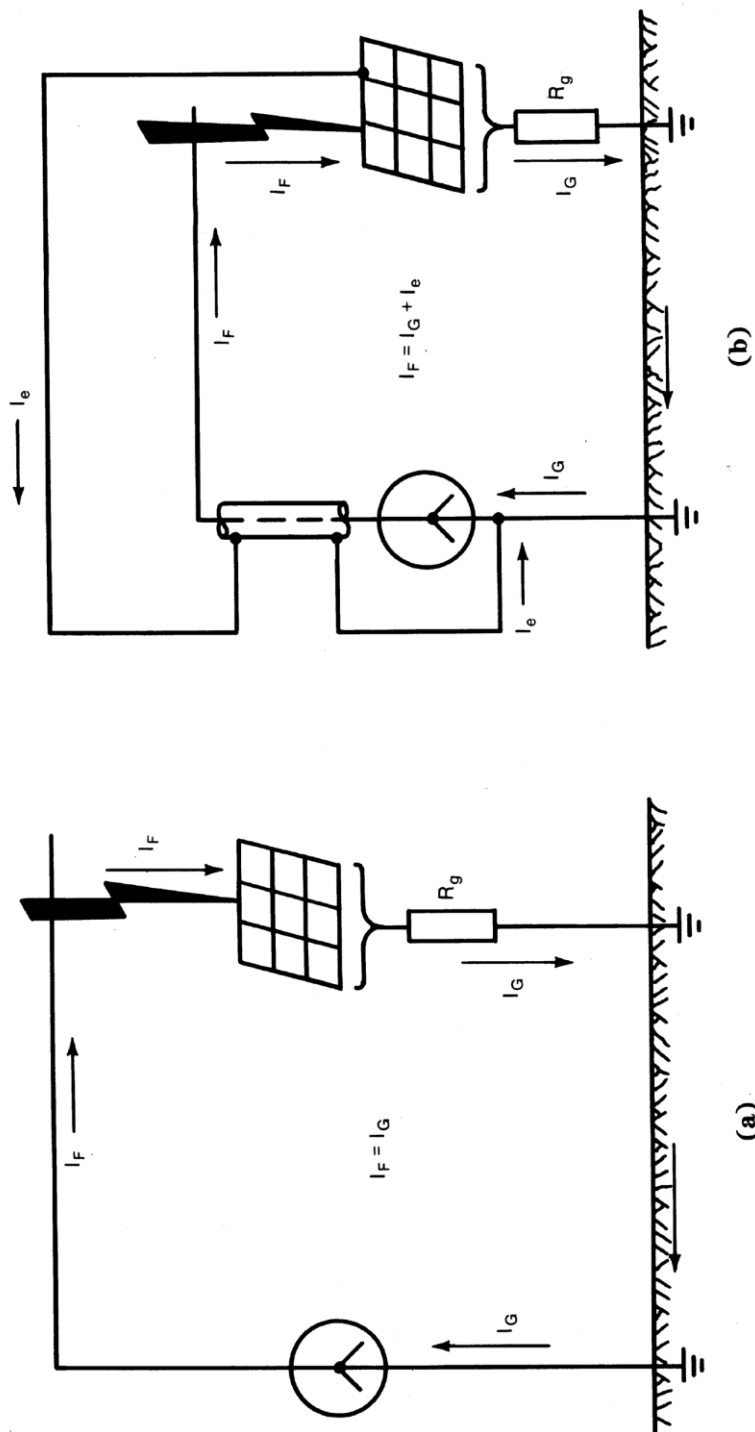
A) Να παρέχει τα μέσα για τη μεταφορά των ηλεκτρικών ρευμάτων προς της γη κάτω από κανονικές συνθήκες και συνθήκες σφάλματος χωρίς να υπερβαίνεται κανένα λειτουργικό όριο ή όριο στον εξοπλισμό ή να επηρεάζεται δυσμενών η συνέχεια της υπηρεσίας

B) Να μειώνεται ο κίνδυνος για έναν άνθρωπο, στη γειτονιά των γειωμένων εγκαταστάσεων, που εκτίθεται στον κίνδυνο θανατηφόρας ηλεκτροπληξίας

Μία πρακτική προσέγγιση στην ασφαλή γείωση απασχολείται και πασχίζει για τον έλεγχο της αλληλεπίδρασης των δύο συστημάτων γείωσης ως ακολούθως:

- Της σκόπιμης γείωσης, που αποτελείται από ηλεκτρόδια γείωσης που είναι θαμμένα σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης
- Της τυχαίας γείωσης, η οποία γίνεται προσωρινά από έναν άνθρωπο ο οποίος εκτίθεται σε ένα δυναμικό στη γειτονιά της γειωθείσας εγκατάστασης.

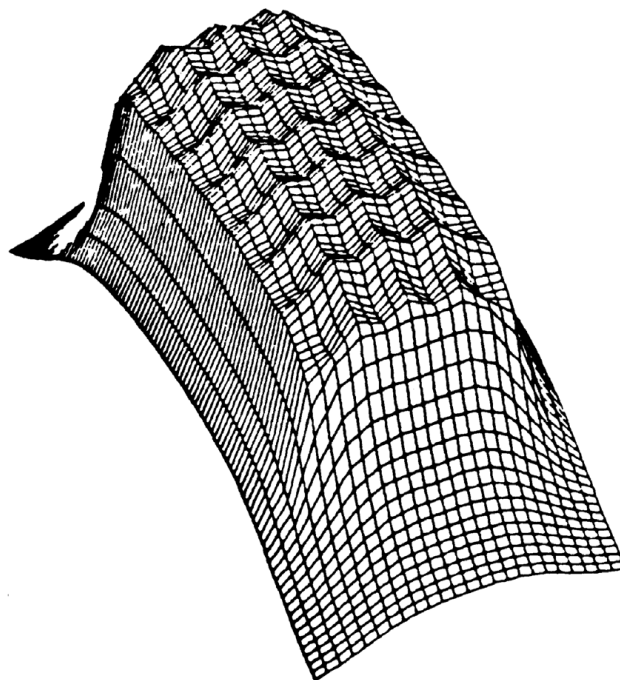
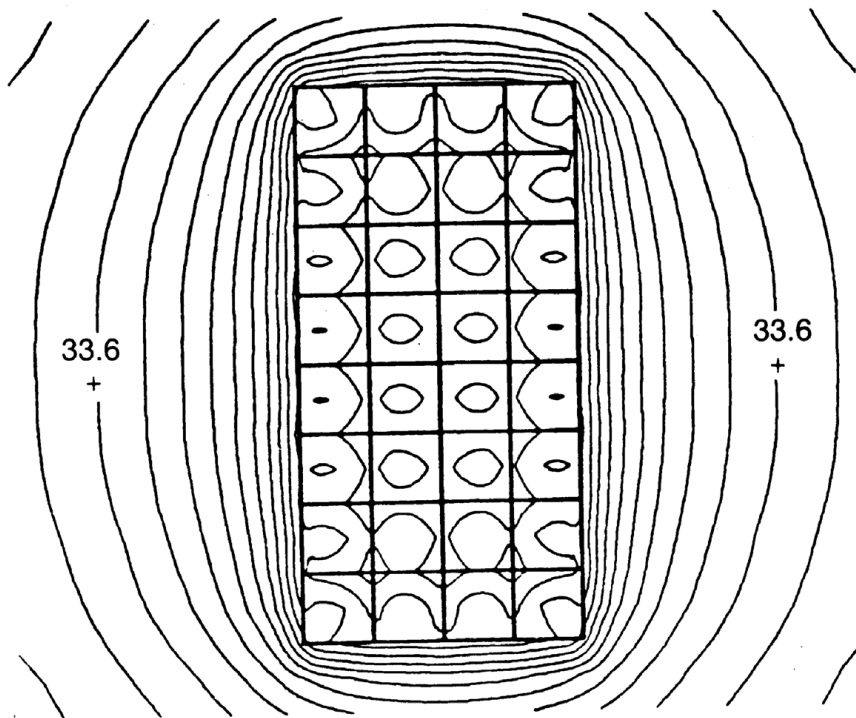
Οι άνθρωποι συχνά νομίζουν ότι μπορούν να ακουμπήσουν κάθε γειωμένο αντικείμενο με ασφάλεια. Μία χαμηλή αντίσταση γείωσης σε έναν υποσταθμό δεν εγγυάται απαραίτητως την ασφάλεια. Δεν υπάρχει απλή σχέση μεταξύ της αντίστασης του συστήματος γείωσης ως μία οντότητα και του μέγιστου ρεύματος που μπορεί να πλήξει έναν άνθρωπο. Συνεπώς ακόμη και ένας υποσταθμός με χαμηλή αντίσταση γείωσης μπορεί να είναι επικίνδυνος, ενώ ένας άλλος υποσταθμός με πολύ 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. Τα περισσότερα, αν όχι όλα, συνολικά ρεύματα σφάλματος προς γη εισέρχονται στη γη προκαλώντας μία απότομη αύξηση του τοπικού δυναμικού του εδάφους (σχήμα 1.6). Αν χρησιμοποιηθεί ουδέτερος αγωγός, ζυγός με μόνωση αερίου ή υπόγειος κόμβος καλωδίων τότε ένα μέρος του ρεύματος σφάλματος γυρίζει μέσω αυτής της μεταλλικής οδού κατευθείαν στην πηγή. Αφού αυτή η μεταλλική σύνδεση προσδίδει μία χαμηλής αντίστασης οδό παράλληλη προς το κύκλωμα επιστροφής, η ανύψωση του τοπικού δυναμικού είναι τελικά μικρότερου πλάτους (σχήμα 1.6). Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση αυτού του μέρους του ρεύματος σφάλματος που μπαίνει στη γη μέσα στην περιοχή του υποσταθμού πρέπει να αναλυθεί περεταίρω. Αν η γεωμετρία, η τοποθεσία των ηλεκτροδίων, τα τοπικά χαρακτηριστικά του εδάφους και άλλοι παράγοντες συμβάλλουν σε μία πολύ μεγάλη κλίση του δυναμικού στην επιφάνεια της γης, το σύστημα γείωσης μπορεί να είναι ακατάλληλο παρόλη τη δυνατότητά του να μεταφέρει το ρεύμα σφάλματος σε μέτρα και διάρκειες που επιτρέπονται από τους ηλεκτρονόμους προστασίας.



Σχήμα 1.6: Υποσταθμός εν σφάλμα με ή χωρίς πολλαπλές γειώσεις [1]

### Συνθήκες κινδύνου

Κατά τη διάρκεια των τυπικών συνθηκών σφαλμάτων προς γη, η ροή του ρεύματος προς τη γη θα παράξει πιθανές κλίσεις δυναμικού μέσα ή γύρω από τον υποσταθμό. Το σχήμα 1.7 δείχνει αυτή την επίδραση για έναν υποσταθμό με ένα απλό τετραγωνικό πλέγμα γείωσης σε ομογενές έδαφος.



Σχήμα 1.7: Ισοδυναμικά γραφήματα ενός τυπικού πλέγματος γείωσης [1]

Αν δεν παρθούν κατάλληλες προφυλάξεις κατά το σχεδιασμό, οι μέγιστες κλίσεις των δυναμικών κατά μήκος της επιφάνειας της γης μπορεί να έχουν ικανό πλάτος κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος προς γη ώστε να θέσουν σε κίνδυνο έναν άνθρωπο στην περιοχή. Επιπλέον, μπορεί να αναπτυχθούν επικίνδυνες τάσεις μεταξύ των γειωμένων δομών και των πλαισίων εξοπλισμού στη γειτονική γη.

Οι συνθήκες που προκαλούν τα ατυχήματα ηλεκτροπληξίας συμπεριλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- A) Σχετικά υψηλό ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με την επιφάνεια του συστήματος γείωσης και της αντίστασής του με την απομακρυσμένη γη
- B) Ειδική αντίσταση εδάφους και κατανομή των ρευμάτων προς γη τέτοια ώστε οι υψηλές κλίσεις δυναμικού να μπορούν να συμβούν σε σημεία της επιφάνειας της γης.
- Γ) Παρουσία ενός ανθρώπου σε τέτοιο σημείο, θέση και ώρα ώστε το σώμα του να γεφυρώσει δύο σημεία με υψηλή διαφορά δυναμικού.
- Δ) Απουσία επαρκούς αντίστασης επαφής ή άλλης εν σειρά αντίστασης ώστε να μειωθεί το ρεύμα διαμέσου του σώματος σε ασφαλή τιμή κάτω από τις συνθήκες A) και Γ)
- E) Διάρκεια του σφάλματος και της επαφής του σώματος και συνεπώς της ροής του ρεύματος μέσω του ανθρώπινου σώματος για επαρκή χρόνο ώστε να προκληθεί ζημιά στη δεδομένη ένταση του ρεύματος.

Η σχετικά μικρή συχνότητα των σφαλμάτων οφείλεται κυρίως στη μικρή πιθανότητα των συμπτώσεων όλων των δυσμενών συνθηκών που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

## 1.6 Όριο ανεκτού από το ανθρώπινο σώμα ρεύματος<sup>[1]</sup>

Το πλάτος και η διάρκεια του ρεύματος που άγεται μέσω του ανθρώπινου σώματος στα 50 Hz ή στα 60 Hz πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή που μπορεί να προκαλέσει κοιλιακή μαρμαρυγή στην καρδιά.

### Μαθηματική έκφραση για τη διάρκεια

Η διάρκεια για την οποία ένα ρεύμα των 50 ή 60 Hz μπορεί να γίνει ανεκτό από την πλειοψηφία των ανθρώπων σχετίζεται με το πλάτος του. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των [39], [40] υποτίθεται ότι το 99,5% των ανθρώπων μπορούν να αντέξουν με ασφάλεια, χωρίς κοιλιακή μαρμαρυγή, τη διέλευση ενός ρεύματος με πλάτος και διάρκεια που καθορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (1.9)$$

όπου

$$k = \sqrt{S_B}$$

και:

$$S_B = (I_B)^2 \times t_s$$

με:

$I_B$  η rms τιμή του πλάτους του ρεύματος που ρέει μέσω του σώματος σε A

$t_s$  η διάρκεια της έκθεσης στο ρεύμα σε s

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

Σύμφωνα με το [39] η ενέργεια της ηλεκτροπληξίας από την οποία μπορεί να επιβιώσει το 99,5% των ανθρώπων που ζυγίζουν περίπου 50 kg είναι  $S_B = 0,0135$ . Συνεπώς  $k_{50} = 0,116$  και η σχέση για το επιτρεπόμενο ρεύμα παίρνει την τιμή:

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ για σώμα } 50 \text{ kg} \quad (1.10)$$

Η παραπάνω εξίσωση δίνει τιμή 116 mA για  $t_s = 1$  s και 367 mA για  $t_s = 0,1$  s.

Επειδή οι εξισώσεις αυτές ισχύουν για δοκιμές από 0,03 έως 3 s δεν ισχύουν για πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες διάρκειες.

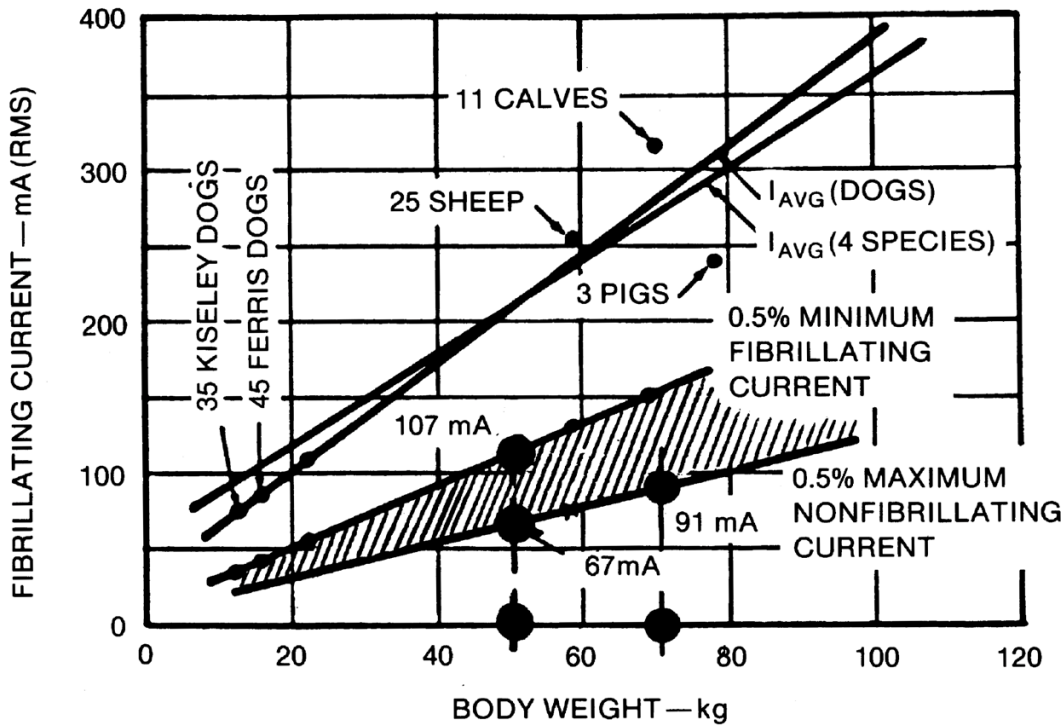
Κατά τη διάρκεια των ετών άλλοι ερευνητές έχουν προτείνει διαφορετικές τιμές για το  $I_B$ . Στο [41] προτείνονται τα 100 mA ως το όριο για κοιλικακή μαρμαρυγή. Η τιμή των 100 mA προέκυψε από εκτεταμένα πειράματα στο πανεπιστήμιο Columbia. Στα πειράματα αυτά, ζώα που έχουν σώμα και βάρος παρόμοιο με τον άνθρωπο υπέστησαν ηλεκτροπληξία διάρκειας 3 s. 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 50 kg τα [42],[43] προτείνουν τιμές κατωφλίου 500 mA και 50 mA αντίστοιχα. Άλλες μελέτες σε αυτό το θέμα έχουν επίσης γίνει [44],[45]

Εναλλακτικές υποθέσεις

Το ρεύμα της μαρμαρυγής υποτίθεται ότι είναι συνάρτηση του ατομικού σωματικού βάρους όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8. Το σχήμα δείχνει τη σχέση μεταξύ του κρίσιμου ρεύματος και του σωματικού βάρους για διάφορα είδη ζώων και μία 0,5% κοινή περιοχή κατωφλίου για τα θηλαστικά.

Σε μία πιο σύγχρονη έκδοση, οι σταθερές  $S_B$  και  $k$  των εξισώσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι  $S_B = 0,0272$  και  $k = 0,165$  και ισχύουν για το 99,5% του πληθυσμού βάρους περίπου 70 kg. Άλλες μελέτες [46],[40] δίνουν εναλλακτικά  $k = 0,157$  και  $S_B = 0,0246$  για ανθρώπους 70 kg. Συνεπώς:

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ για άνθρωπο βάρους } 70 \text{ kg} \quad (1.11)$$



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 1.8: Ρεύμα μαρμαρυγής σε συνάρτηση με το σωματικό βάρος για διάφορα ζώα βάσει μίας ηλεκτροπληξίας διάρκειας 3 s [1]

Η τελευταία εξίσωση δείχνει ότι όπου λειτουργούν ταχύτατες συσκευές προστασίας που περιορίζουν τη διάρκεια του σφάλματος μπορούν να επιτραπούν πολύ μεγαλύτερα ρεύματα που διαπερνούν το σώμα. Επαφίεται στην κρίση του μελετητή να χρησιμοποιήσει το χρόνο κάθαρσης των πρωτεύοντων ηλεκτρονόμων υψηλής ταχύτητας, το χρόνο της εφεδρικής προστασίας κλπ ως τη βάση για τον υπολογισμό.

## 1.7 Τυχαίο κύκλωμα γείωσης<sup>[1]</sup>

### Αντίσταση του ανθρώπινου σώματος

Για dc και ac ρεύματα συχνότητας 50 ή 60 Hz, το ανθρώπινο σώμα μπορεί να προσεγγισθεί ως μία ωμική αντίσταση. Η οδός του ρεύματος τυπικά θεωρείται από το ένα χέρι και στα δύο πόδια ή από το ένα πόδι στο άλλο. Η εσωτερική αντίσταση του σώματος είναι περίπου 300 Ω, ενώ οι τιμές της αντίστασης του σώματος όπου συμπεριλαμβάνεται και η αντίσταση του δέρματος κυμαίνονται από 500 Ω έως 3000 Ω [39], [47], [48], [49], [50]. Η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μειώνεται αν υπάρχει ζημιά ή τρύπα στο δέρμα στο σημείο επαφής.



Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής, οι ακόλουθες αντιστάσεις, σε σειρά με την αντίσταση του σώματος, θεωρούνται ως ακολούθως:

A) Οι αντιστάσεις επαφής των χεριών και των ποδιών είναι ίσες με μηδέν

B) Οι αντιστάσεις των γαντιών και των παπουτσιών είναι ίσες με μηδέν

Μία τιμή  $1000 \Omega$  που αναπαριστά την αντίσταση ενός ανθρώπινου σώματος από το χέρι προς το πόδι και από το χέρι προς το χέρι αλλά και από το ένα πόδι στο άλλο θα χρησιμοποιηθεί από εδώ και πέρα, δηλαδή  $R_B = 1000 \Omega$ .

Δίοδοι ρεύματος μέσα στο σώμα

Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι η επιλογή της τιμής αντίστασης των  $1000 \Omega$  σχετίζεται με διαδρόμους όπως αυτοί μεταξύ του χεριού και ενός ή και των δύο ποδιών ενώ ένα μεγάλο μέρος του ρεύματος περνά από μέρη του σώματος που περιέχουν ζωτικά όργανα όπως η καρδιά. Είναι κοινά αποδεκτό ότι το ρεύμα που περνά από το ένα πόδι στο άλλο είναι λιγότερο επικίνδυνο. Μάλιστα, πολύ υψηλότερα ρεύματα από πόδι σε πόδι μπορούν να χρησιμοποιηθούν 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]

Με βάση τη διαπίστωση αυτή, μπορούν να επιτραπούν τιμές αντίστασης μεγαλύτερες από  $1000 \Omega$  για διαδρόμους από πόδι σε πόδι. Όμως θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ακόλουθοι παράγοντες:

A) Μία τάση μεταξύ των δύο ποδιών, επίπονη αλλά όχι θανατηφόρος, μπορεί να καταλήξει σε πτώση η οποία θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη ροή ρεύματος μέσω του στήθους. Ο βαθμός της επικινδυνότητας αυτής μπορεί να εξαρτάται περεταίρω και από τη διάρκεια του σφάλματος και από την πιθανότητα μιας διαδοχικής ηλεκτροπληξίας.

B) Ένας άνθρωπος μπορεί να εργάζεται ή να ξεκουράζεται μπρούμυτα όταν συμβεί ένα σφάλμα.

Οι κίνδυνοι από την επαφή ποδιού με πόδι φαίνεται να είναι πολύ λιγότεροι από τον άλλο τύπο. Όμως επειδή έχουν συμβεί θάνατοι από την περίπτωση A είναι ένας κίνδυνος που δεν πρέπει να αγνοείται [52],[53].

### Ισοδύναμα κυκλώματα ατυχημάτων

Χρησιμοποιώντας την τιμή του ανεκτού από το σώμα ρεύματος και τις κατάλληλες κυκλωματικές σταθερές είναι δυνατόν να καθορισθεί η ανεκτή τάση μεταξύ δύο σημείων επαφής:

Οι ακόλουθοι συμβολισμοί χρησιμοποιούνται για το ισοδύναμο κύκλωμα ατυχήματος που φαίνεται στο σχήμα 1.9.

$I_f$  είναι το συνολικό ρεύμα σφάλματος σε A

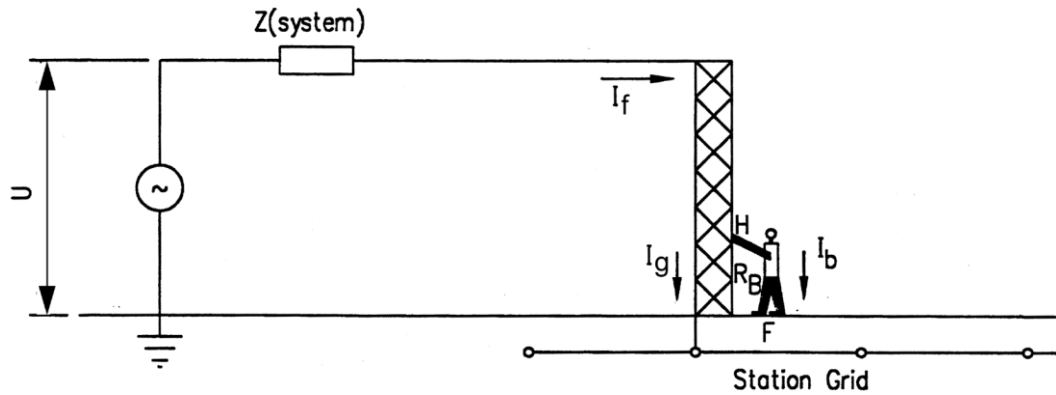
$I_g$  είναι το ρεύμα που ρέει στο πλέγμα σε A

$I_b$  είναι το ρεύμα που ρέει από το σώμα σε A

$R_B$  είναι η αντίσταση του σώματος σε A

$U$  είναι η ενεργή τάση του κυκλώματος ατυχήματος (βηματική τάση ή τάση επαφής) σε V

$H$  και  $F$  είναι τα σημεία επαφής με το σώμα



Σχήμα 1.9: Έκθεση σε τάση επαφής [1]

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

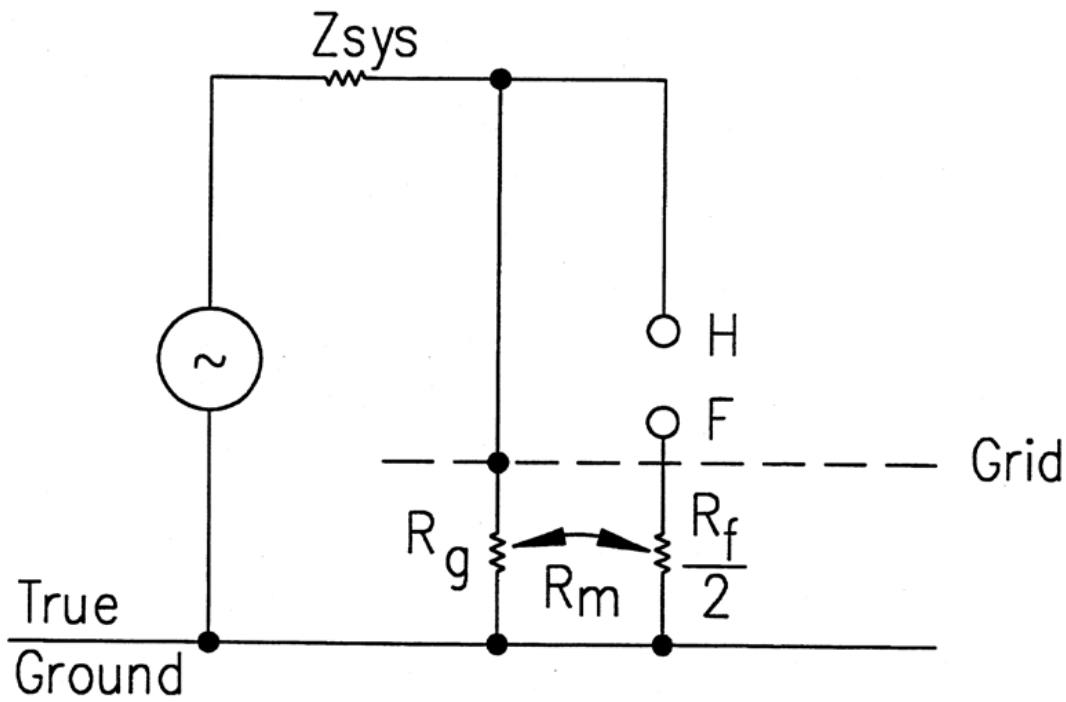
Το σχήμα 1.9 δείχνει το ρεύμα σφάλματος  $I_f$  να αποφορτίζεται στο έδαφος από το σύστημα γείωσης του υποσταθμού και έναν άνθρωπο να αγγίζει μία γειωμένη μεταλλική δομή στο H. Στο σχήμα 1.10 φαίνονται πολλές επαγωγικές αντιδράσεις. Ο κόμβος H είναι ένα σημείο του συστήματος στο ίδιο δυναμικό με το δίκτυο μέσα στο οποίο ρέει το ρεύμα σφάλματος και ο κόμβος F είναι μία μικρή περιοχή στην επιφάνεια της γης η οποία είναι σε επαφή με τα δύο πόδια του ανθρώπου. 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 1.10 από το κύκλωμα του σχήματος 1.11 [54], [55].

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

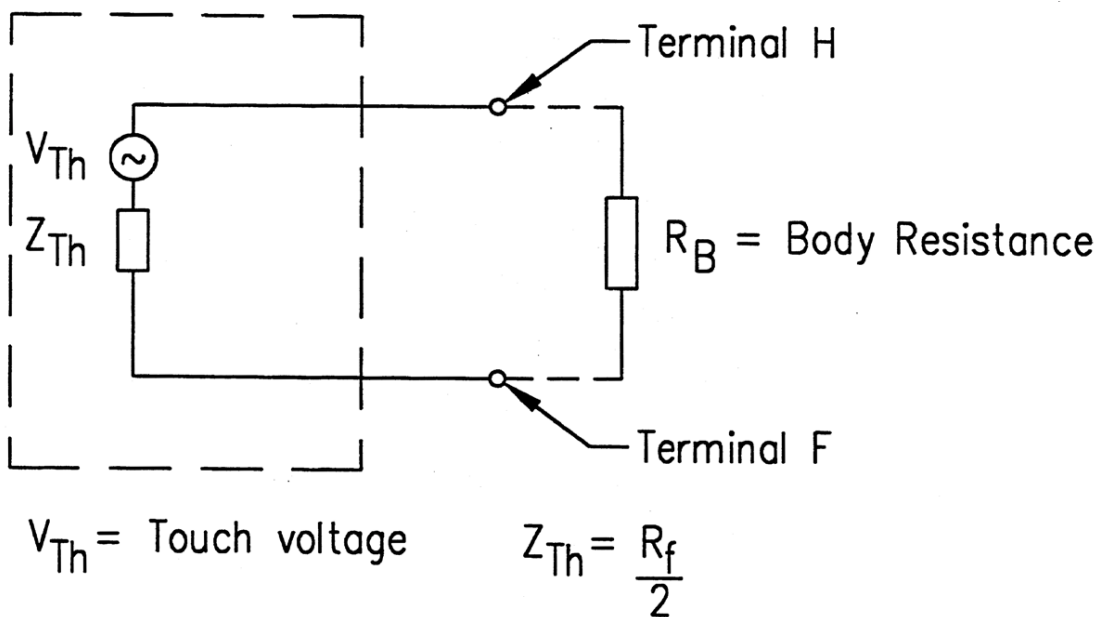
$$I_b = \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_B} \quad (1.12)$$

όπου:

$R_B$  η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος σε  $\Omega$



Σχήμα 1.10: Αντιστάσεις στο κύκλωμα τάσης επαφής [1]

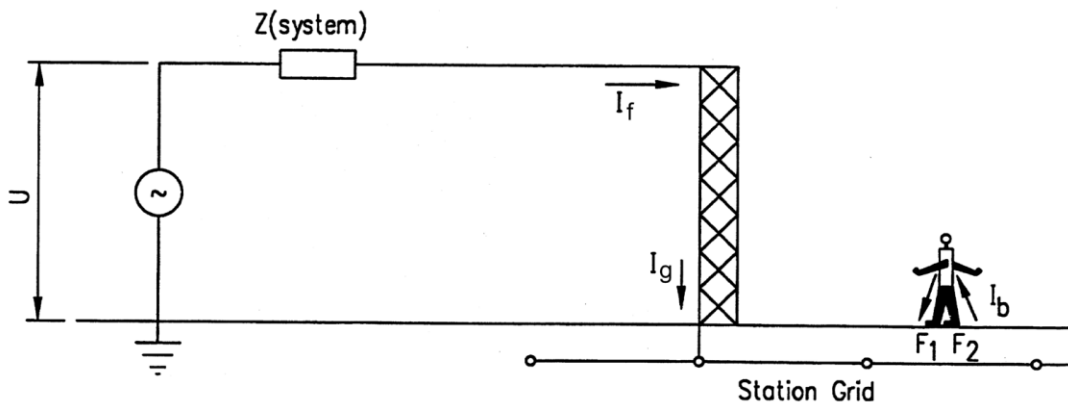


Σχήμα 1.11: Κύκλωμα τάσης επαφής [1]

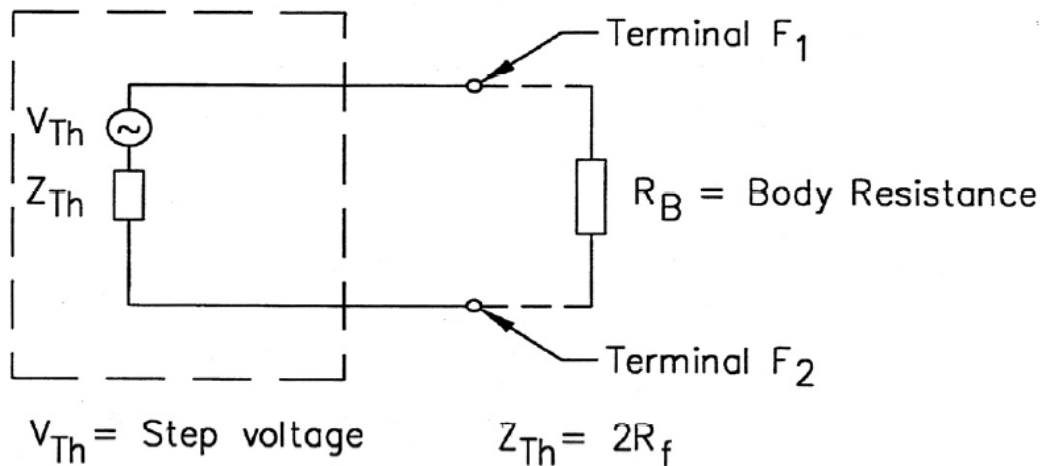
Για τις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, οι επιδράσεις της  $Z_{sys}$ , της αντίστασης του δικτύου και της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ του δικτύου και των ποδιών του ανθρώπου μπορούν να αγνοηθούν στο συνολικό κύκλωμα Thevenin ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης. Συνεπώς η  $Z_{th}$  αντιπροσωπεύεται από την ισοδύναμη αντίσταση των ποδιών του ανθρώπου.

Το σχήμα 1.12 δείχνει το ρεύμα σφάλματος  $I_f$  να αποφορτίζεται στο έδαφος μέσω 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 οι οποίες είναι σε επαφή με τα δύο πόδια, αντίστοιχα. Το θεώρημα Thevenin επιτρέπει την αντιπροσώπευση αυτού του δικτύου δύο κόμβων ( $F_1, F_2$ ) στο σχήμα 1.12. 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.

Η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin  $Z_{th}$  υπολογίζεται με πολλούς τρόπους [54],[55],[21],[56],[57].



Σχήμα 1.12: Έκθεση σε βηματική τάση [1]



Σχήμα 1.13: Κύκλωμα βηματικής τάσης [1]

Για το κύκλωμα της τάσης επαφής έχουμε:

$$Z_{th} = \frac{R_f}{2} \quad (1.13)$$

Και για το κύκλωμα της βηματικής τάσης

$$Z_{th} = 2R_f \quad (1.14)$$

όπου

$R_f$  είναι η αντίσταση γης του ενός ποδιού (αγνοώντας την παρουσία του συστήματος γείωσης του υποσταθμού) σε  $\Omega$

Για τις ανάγκες της κυκλωματικής ανάλυσης το ανθρώπινο πόδι συνήθως αντιπροσωπεύεται από ένα μεταλλικό δίσκο και η αντίσταση επαφής των ποδιών, καλτσών κλπ αγνοείται. Η αντίσταση γη σε  $\Omega$  ενός μεταλλικού δίσκου ακτίνας  $b$  (m) στην επιφάνεια ομογενούς εδάφους με ειδική αντίσταση  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ) είναι [57]

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (1.15)$$

Παραδοσιακά ο μεταλλικός δίσκος που αντιπροσωπεύει το πόδι λαμβάνεται ως ένα κυκλικό πιάτο ακτίνας 0,08 m. Με μικρή προσέγγιση, οι εξισώσεις για τη  $Z_{th}$  μπορούν να ληφθούν σε αριθμητική μορφή και να εκφραστούν ως συνάρτηση του  $\rho$ :

Για το κύκλωμα τάσης επαφής:

$$Z_{th} = 1,5\rho \quad (1.16)$$

Για το κύκλωμα βηματικής τάσης

$$Z_{th} = 6,0\rho \quad (1.17)$$

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

$$E_{επαφής} = I_B (R_B + 1,5\rho) \quad (1.18)$$

$$E_{βηματική} = I_B (R_B + 6,0\rho) \quad (1.19)$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

#### 2.1 Συστήματα γείωσης ανεμογεννητριών

##### 2.1.1 Εισαγωγή <sup>[32]</sup>

Σε ένα αιολικό πάρκο, το σύστημα γείωσης αποσκοπεί στην προστασία τόσο του ανθρώπινου δυναμικού όσο και του εξοπλισμού κατά την διάρκεια ενός πιθανού βραχυκυκλώματος [58]. Πολλές φορές, όμως, η υψηλή ειδική αντίσταση του εδάφους και άλλοι παράγοντες καθιστούν δύσκολη την κατασκευή αντίστασης γείωσης με ικανοποιητικές προδιαγραφές και τιμή μικρότερη από 10 Ω. Συνεπώς πρέπει να γίνει σωστή μελέτη και κατασκευή ώστε η γείωση να λειτουργεί σωστά και με ασφάλεια σε όλη τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου.

Η εγκατάσταση νέων αιολικών πάρκων καθιστά επιτακτική τη σχεδίαση και κατασκευή κατάλληλων συστημάτων γείωσης ώστε να εξασφαλισθεί η ασφαλής και ομαλή λειτουργία των ανεμογεννητριών κάθε στιγμή. Αρχικά, θα πρέπει να καθορισθεί το πρότυπο βάσει του οποίου θα σχεδιασθεί το σύστημα γείωσης και έπειτα θα πρέπει να γίνουν γνωστά τα απαραίτητα στοιχεία για την προσομοίωση όπως ο τύπος και η μορφολογία του εδάφους (μονοστρωματικό, διστρωματικό, τριστρωματικό κλπ), η συχνότητα λειτουργίας, το τυπικό βάρος του ανθρώπου καθώς και το κόστος που έχει προϋπολογιστεί για τη σχεδίαση και την κατασκευή του συστήματος γείωσης. Επιπλέον θα πρέπει να έχουν καθορισθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης καθώς και η διαστασιολόγηση των αγωγών. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, θα πρέπει να παρασχεθούν στοιχεία για τον υπολογισμό τους. Τέλος, θα πρέπει να προβλεφθούν τρόποι για τον περιορισμό της αντίστασης γείωσης καθώς και να εξασφαλισθεί ότι οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων.

Μέθοδοι για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης των ανεμογεννητριών καθώς επίσης και μεθοδολογία για τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης καθώς και τρόποι υπολογισμού των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής περιγράφονται στο πρότυπο IEEE Std. 80-2013 [1]. Επιπλέον, η αντικεραυνική προστασία των ανεμογεννητριών αποτελεί αντικείμενο του προτύπου IEC 61400-24 [59]. Η αξιοπιστία και η ασφάλεια ενός συστήματος γείωσης καθώς επίσης και οι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν έχουν προταθεί σε διάφορες μελέτες [60], [61], [62], [63]. Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα γείωσης ως ασφαλές, και άρα να εγγυάται την προστασία του εξοπλισμού, είναι απαραίτητο οι βηματικές τάσεις καθώς και οι τάσεις επαφής να είναι εντός των ορίων. Υπάρχουν συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες στο σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης για αιολικά πάρκα και απαιτούνται ειδικές μελέτες για το σκοπό αυτό [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74].

Η ύπαρξη πολύ υψηλού αιολικού δυναμικού στις κορυφογραμμές της Ελλάδας καθιστά ελκυστική την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στις περιοχές αυτές. Δυστυχώς, όμως, οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν υψηλή ειδική αντίσταση στο έδαφός τους. Έχουν εξεταστεί πολυάριθμες

διατάξεις συστημάτων γείωσης [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70] ώστε να προσδιορισθεί η βέλτιστη διάταξη διότι αν αυξηθεί η αντίσταση γείωσης τότε υπάρχει κίνδυνος οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής που αναπτύσσονται να ξεπεράσουν τα επιτρεπτά όρια. Η μείωση της αντίστασης γείωσης έχει μελετηθεί εκτενώς και έχουν προταθεί πολλές εναλλακτικές για το σκοπό αυτό οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως. Σε ορισμένες μελέτες [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70] ασχολούνται με τη σχεδίαση ενός ασφαλούς και αξιόπιστου συστήματος γείωσης και για το σκοπό αυτό προτείνεται, μεταξύ άλλων, και η σύνδεση των επιμέρους συστημάτων γείωσης των ανεμογεννητριών προς σχηματισμό ενός ενιαίου συστήματος γείωσης για το αιολικό πάρκο. Τέλος, υπάρχουν και μελέτες [72], [73], [74], [75] που έχουν ως αντικείμενο τα μεταβατικά φαινόμενα των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής των ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια κεραυνοπληξιών.

### 2.1.2 Σχεδίαση συστήματος γείωσης αιολικού πάρκου

Η σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης για ένα αιολικό πάρκο στην Ελλάδα, μπορεί να θεωρηθεί ως μία τυποποιημένη διαδικασία η οποία αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Καθορισμός της μέγιστης τιμής του ρεύματος σφάλματος του αιολικού πάρκου.
2. Επιλογή των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης των ανεμογεννητριών και των κέντρων ελέγχων
3. Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη μέθοδο Wenner για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας ή κέντρου ελέγχου
4. Εντοπισμός άλλων θέσεων στο αιολικό πάρκο που θα μπορούσαν να μειώσουν την αντίσταση γείωσης (πηγάδια, χώμα κλπ)
5. Υπολογισμός του μοντέλου εδάφους, βάσει μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, για όλες στις οποίες έχουμε μετρήσεις
6. Σχεδιασμός τυπικού πλέγματος γείωσης, για κάθε ανεμογεννήτρια ή υποσταθμό
7. Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης για κάθε σύστημα γείωσης
8. Υπολογισμός του εγγεόμενου ρεύματος σφάλματος σε κάθε σύστημα γείωσης.
9. Υπολογισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης ασφαλούς βηματικής τάσης και της μέγιστης επιτρεπόμενης ασφαλούς τάσεως επαφής για κάθε σύστημα γείωσης.
10. Υπολογισμός της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής για κάθε σημείο στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το πλέγμα γείωσης.
11. Έλεγχος των τιμών των παραπάνω μεγεθών. Είναι επιθυμητό:
  - η συνολική αντίσταση γείωσης του πάρκου να είναι μικρότερη από  $1\Omega$ ,
  - η αντίσταση γείωσης της κάθε ανεμογεννήτριας να είναι μικρότερη από  $10\Omega$ ,



- οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής να μην ξεπερνούν τα ασφαλή όρια, όπως αυτά ορίζονται από το Πρότυπο [1].
12. Εάν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του βήματος 11, τότε η σχεδίαση έχει ολοκληρωθεί (οπότε ακολουθεί το βήμα 15), αλλιώς το επόμενο βήμα 13.
13. Βελτίωση συστήματος γείωσης με:
- 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 προς το αυστηρότερο του κριτηρίου για τον χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος. Εφ' όσον εξασφαλίζεται από τα μέσα προστασίας ότι ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρότερος, τότε τα όρια ασφαλείας για τη βηματική τάση και την τάση επαφής έχουν μεγαλύτερες τιμές,
  - χρήση κατάλληλου υλικού επιφανείας, συνήθως χαλκιού, στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης, εάν αυτό επιφέρει αλλαγή στα όρια ασφαλείας.
14. Επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας από το βήμα 4.
15. Κατασκευή του συστήματος γείωσης.
16. Μέτρηση της αντίστασης γείωσης.
17. Πραγματοποίηση τυχόν επιπλέον βελτιώσεων, όπου τούτο είναι τεχνικά αναγκαίο και εφικτό. [58]

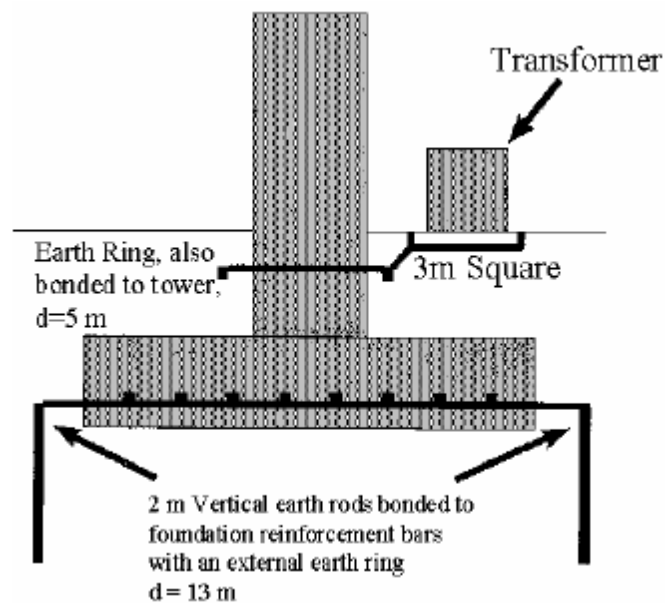
Όπως προείπαμε στην εισαγωγή, τα αιολικά πάρκα δύναται να τοποθετηθούν σε ορεινές περιοχές με βραχώδες έδαφος το οποίο έχει έδαφος με υψηλή ειδική αντίσταση. Έτσι, μπορεί το σύστημα γείωσης που θα προκύψει να μην ικανοποιεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές αξιοπιστίας και ασφάλειας [76], [77]. Τροχοπέδη στη βελτίωση του συστήματος γείωσης αποτελεί το γεγονός ότι η βάση της ανεμογεννήτριας είναι δεδομένη και συνεπώς δεδομένο είναι και το θεμελιακό σύστημα γείωσης. Όμως, είναι δυνατό να τροποποιηθεί και να επεκταθεί το περιμετρικό σύστημα γείωσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αύξηση της έκτασης του συστήματος γείωσης που, ως γνωστόν, οδηγεί σε περιορισμό της αντίστασης γείωσης. Το θεμελιακό σύστημα γείωσης θα πρέπει να ενισχυθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος. Ο τρόπος με τον οποίο δύναται να περιορισθεί η τιμή της αντίστασης γείωσης βρίσκεται με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού.

Ένας κατάλληλος τρόπος είναι η εκμετάλλευση των υφιστάμενων χωματουργικών εργασιών στην «πλατεία» της ανεμογεννήτριας. Μπορεί να σχηματίζεται βρόχος στο περιμετρικό σύστημα γείωσης αλλά μπορεί και να μην σχηματίζεται. Όπως είναι γνωστό, το συνολικό εμβαδό του

συστήματος γείωσης και η δομή του εδάφους καθορίζουν την τιμή της αντίστασης γείωσης στη μόνιμη κατάσταση. Η ύπαρξη βρόχου περιορίζει τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής αλλά επίσης οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές για τη μεταβατική αντίσταση.

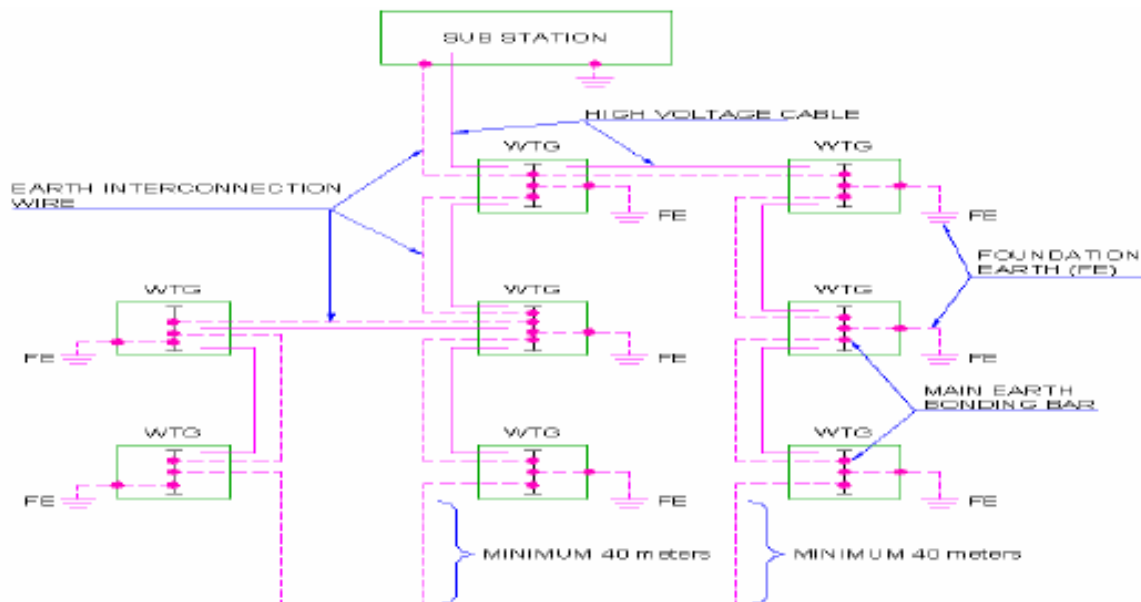
### 2.1.3 Κατασκευή συστήματος γείωσης ανεμογεννήτριας

Το σύστημα γείωσης μίας ανεμογεννήτριας, στις περισσότερες περιπτώσεις, κατασκευάζεται τοποθετώντας και συγκολλώντας ένα δακτυλιοειδές ηλεκτρόδιο γείωσης γύρω από τη θεμελίωση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Η θεμελίωση ενισχύεται με ράβδους ενίσχυσης οι οποίοι ενώνονται είτε απευθείας είτε μέσω του πυλώνα με τον εσωτερικό δακτύλιο και λειτουργούν ως ηλεκτρόδιο γείωσης διότι η ειδική αντίσταση του σκυροδέματος είναι προσεγγιστικά ίση με αυτή του εδάφους που το περιβάλλει [78]. Μερικές φορές όμως οι ράβδοι ενίσχυσης αμελούνται οπότε λαμβάνονται πιο συντηρητικές τιμές για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής που αναπτύσσονται. Επιπλέον, για τη μείωση της αντίστασης γείωσης, μπορεί να τοποθετηθούν ράβδοι οριζόντιας ή εγκάρσιας κατεύθυνσης, συμπληρωματικά με το δακτυλίδι (σχήμα 2.1). Μία αντίσταση γείωσης που έχει τιμή μικρότερη ή ίση από  $10 \Omega$  μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή από τα διεθνή πρότυπα [59], [79] τόσο για την αντικεραυνική προστασία όσο και για την προστασία από της αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.



Σχήμα 2.1: Διάταξη του συστήματος γείωσης μιας ανεμογεννήτριας [58]

Έπειτα, τα συστήματα γείωσης των μεμονωμένων ανεμογεννητριών μπορούν να συνδεθούν μέσω της μεταλλικής θωράκισης του κεντρικού καλωδίου μέσης τάσης προς σχηματισμό μίας ενιαίας γείωσης για όλο το αιολικό πάρκο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυνατότητα περιορισμού της συνολικής αντίστασης γείωσης του αιολικού πάρκου στα επίπεδα του 1-2  $\Omega$ . Συνήθως, όμως, τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται, όπως προείπαμε, σε περιοχές με υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης εδάφους. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη και η επιπρόσθετη διασύνδεση των ανεξάρτητων συστημάτων γείωσης κάθε ανεμογεννήτριας με ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 2.2: Διασύνδεση των μεμονομένων συστημάτων γείωσης κάθε ανεμογεννήτριας προς σχηματισμό του ενιαίου συστήματος γείωσης του αιολικού πάρκου [80]

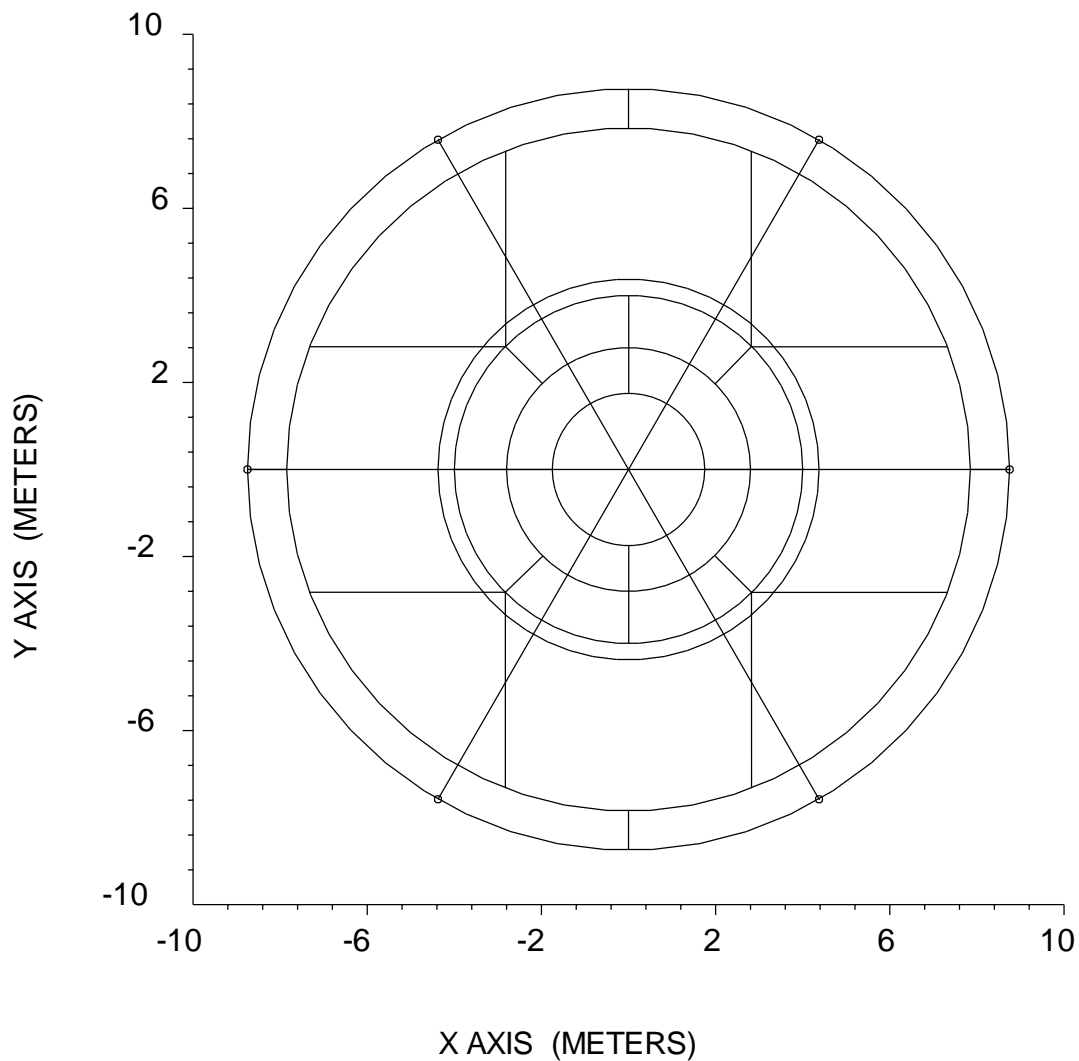
Επίσης είναι απαραίτητο να δοθεί η δυνατότητα ανεξαρτητοποίησης κάθε επιμέρους συστήματος γείωσης ώστε να μπορεί να μετρηθεί η αντίστασή του όταν κατασκευάζεται το σύστημα. Για το σκοπό αυτό, κατά το στάδιο της κατασκευής, τα επιμέρους ανεξάρτητα συστήματα γείωσης των ανεμογεννητριών διαχωρίζονται μεταξύ τους με φρεάτια. Συνεπώς, είναι εγγυημένη η ακρίβεια των μετρήσεων και επιπλέον δίνεται η δυνατότητα της ενίσχυσης του συστήματος γείωσης αν αυτό κριθεί απαραίτητο [58]

#### 2.1.4 Συστήματα γείωσης που θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη <sup>[81]</sup>

Κατασκευάζονται διαφορετικά συστήματα γείωσης για κάθε ανεμογεννήτρια και μετά τα μεμονωμένα αυτά συστήματα γείωσης διασυνδέονται μεταξύ τους με ένα χάλκινο αγωγό που είναι θαμμένος απευθείας στο έδαφος. Στη μελέτη μας εξετάζονται 3 διαφοροποιήσεις του συστήματος γείωσης.

##### Γείωση τύπου Α

Η κάτοψη της γείωσης τύπου Α φαίνεται στο σχήμα 2.3



Top View of Conductors

Σχήμα 2.3: Κάτοψη της γείωσης τύπου A [32]

Το σύστημα γείωσης τύπου A αποτελείται από:

- Εξωτερική γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30 mm x 3,5 mm ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε ένα βάθος 2,4 m και διάμετρο 15,7 m.
- Μεσαία γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30 mm x 3,5 mm που είναι ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε ένα βάθος 2,4 m και διάμετρο 8 m.
- Μεσαία γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30 mm x 3,5 mm που είναι ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε ένα βάθος 0,8 m και διάμετρο 8 m.
- Εσωτερική γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30 mm x 3,5 mm που είναι ενσωματωμένη μέσα στο σκυρόδεμα σε ένα βάθος 0,8 m και διάμετρο 3,5 m.
- Τέσσερις γαλβανισμένες ατσάλινες ταινίες 30 mm x 3,5 mm που είναι ενσωματωμένες μέσα στο σκυρόδεμα και ενώνουν την εσωτερική ταινία με τη μεσαία ταινία διαμέτρου 8 m

- Οκτώ γαλβανισμένες ατσάλινες ταινίες 30 mm x 3,5 mm που είναι ενσωματωμένες μέσα στο σκυρόδεμα και ενώνουν την εξωτερική ταινία με τη μεσαία ταινία διαμέτρου 8 m, τοποθετημένη στο σκυρόδεμα σε ένα βάθος 2,4 m

Το περιμετρικό διάγραμμα γείωσης αποτελείται από:

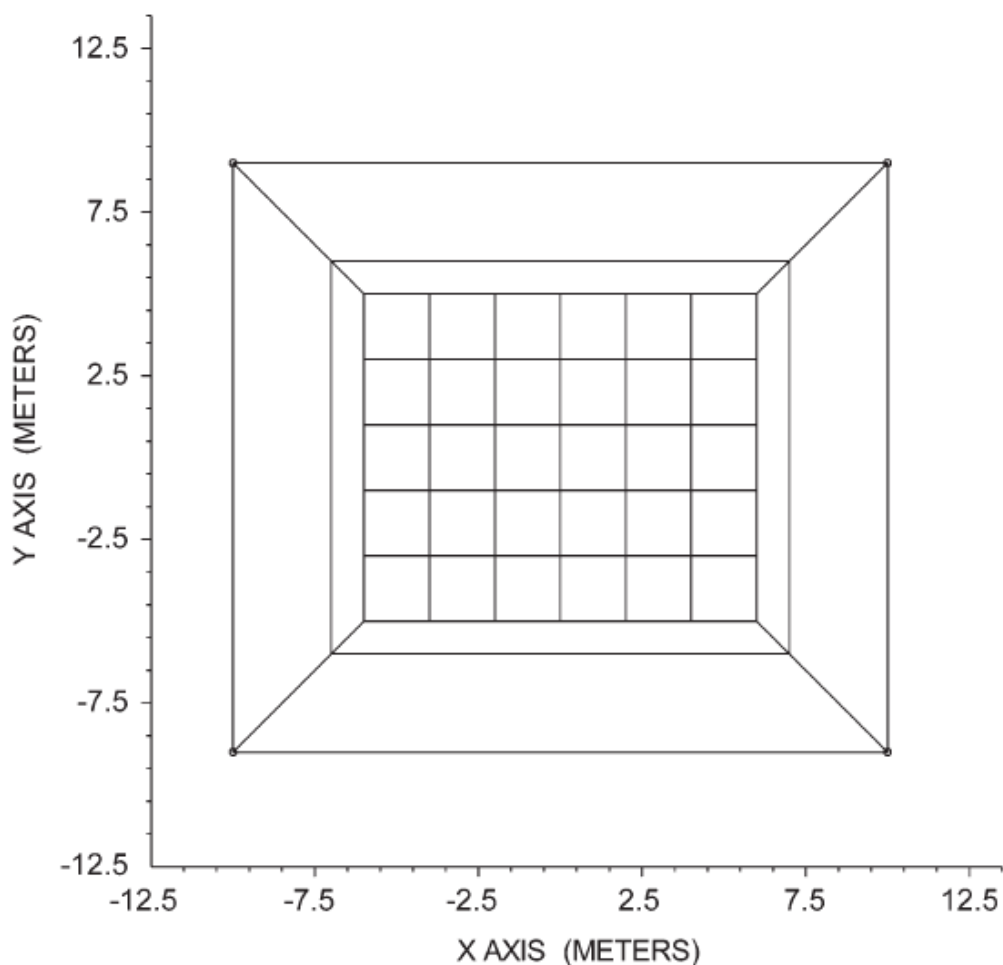
- Εξωτερική επικασσιτερωμένη εν θερμό χάλκινη ταινία 25 mm x 4mm, τοποθετημένη σε ένα βάθος 2,6 m και διαμέτρου  $\Phi=17,5$  m
- Εσωτερική επικασσιτερωμένη εν θερμό χάλκινη ταινία 25 mm x 4mm, τοποθετημένη σε ένα βάθος 2,6 m και διαμέτρου  $\Phi=8,75$  m
- Έξι ακτινικές επικασσιτερωμένες εν θερμό χάλκινες ταινίες 25 mm x 4 mm που ενώνουν την εξωτερική και την εσωτερική ταινία
- Έξι κάθετες ατσάλινες ράβδοι γείωσης με 250  $\mu$ m επικάλυψη χαλκού, διάμετρο  $\Phi 17$  και μήκος 3 m, τοποθετημένες στις άκρες των έξι ακτινικών ταινιών
- Τέσσερις επικασσιτερωμένες εν θερμό χάλκινες ταινίες 25 mm x 4 mm που ενώνουν την εξωτερική ταινία του συστήματος γείωσης της περιμέτρου με την εξωτερική ταινία του πλέγματος θεμελιακής γείωσης, με αλουμινοθερμική συγκόλληση.

Το συνολικό μήκος του δικτύου των αγωγών για κάθε ανεμογεννήτρια είναι 314,7 m και η συνολική επιφάνεια είναι 240,5 m<sup>2</sup>.

Το σύστημα γείωσης του υποσταθμού ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 2.4 και αποτελείται από τα ακόλουθα:

- Θεμελιακό δίκτυο γείωσης 10 m x 12 m με πλέγμα περίπου 2 m x 2 m από γαλβανισμένη ατσάλινη ταινία 30 mm x 3,5 mm, που είναι ενσωματωμένη στο σκυρόδεμα σε ένα βάθος 0,7 m
- Ενδιάμεση επικασσιτερωμένη εν θερμό χάλκινη ταινία 25 mm x 4 mm που είναι ενσωματωμένη στο έδαφος (έξω από το σκυρόδεμα). Το ηλεκτρόδιο γείωσης είναι τοποθετημένο σε ένα βάθος 0,7 m, και 1 m από τη θεμελίωση του υποσταθμού ελέγχου.
- Εξωτερική επικασσιτερωμένη εν θερμό χάλκινη ταινία 25 mm x 4 mm που είναι ενσωματωμένη στο έδαφος (έξω από το σκυρόδεμα). Το ηλεκτρόδιο γείωσης είναι τοποθετημένο σε ένα βάθος 0,7 m, και 4 m από τη θεμελίωση του υποσταθμού ελέγχου.
- Επικασσιτερωμένες εν θερμό χάλκινες ταινίες 25 mm x 4 mm που είναι ενσωματωμένες στο έδαφος σε ένα βάθος 0,7 m, 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 3 m που είναι τοποθετημένες στις άκρες της εξωτερικής ταινίας.

Το συνολικό μήκος του δικτύου των αγωγών του υποσταθμού ελέγχου είναι 304,6 m και η συνολική επιφάνεια 360 m<sup>2</sup>

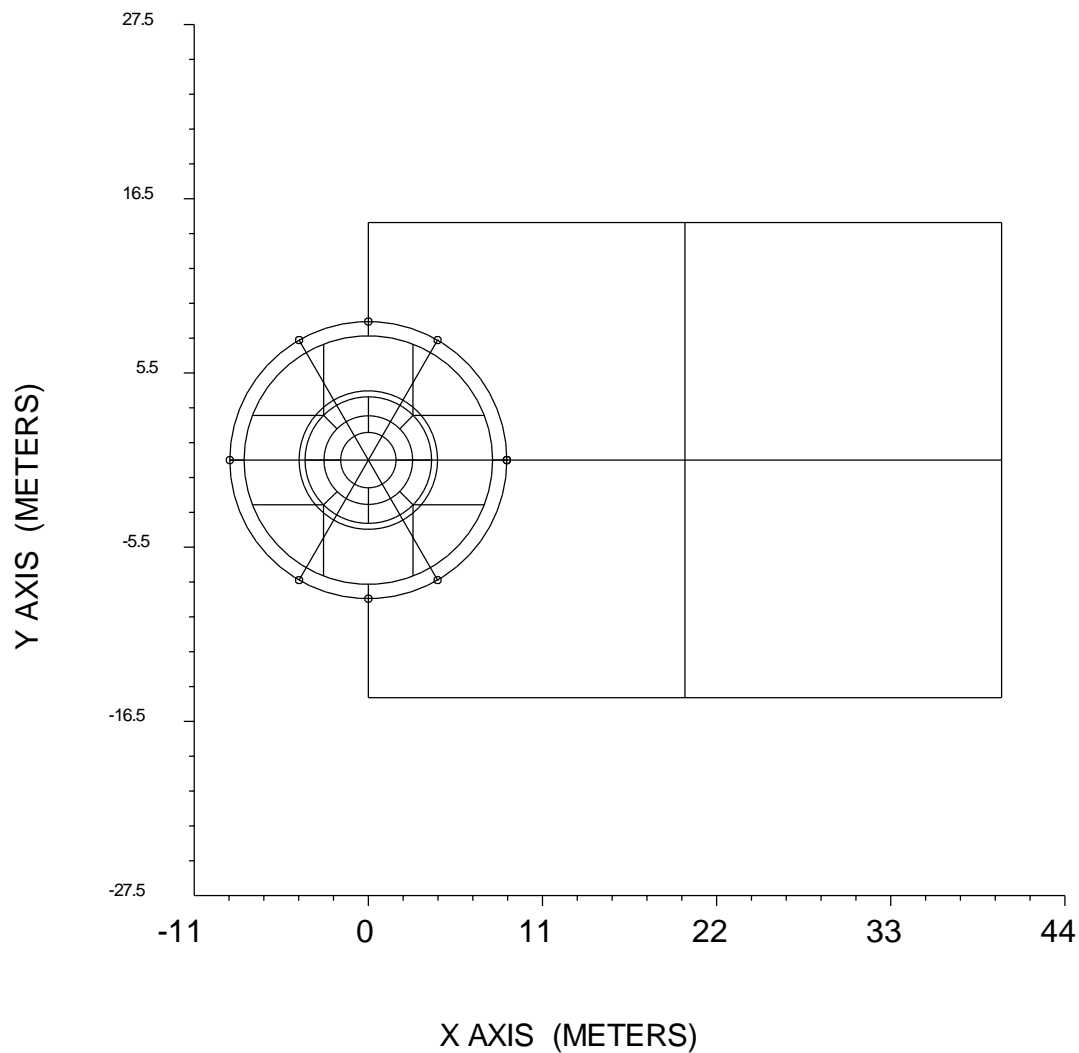


Top View of Conductors

Σχήμα 2.4: Σύστημα γείωσης του υποσταθμού ελέγχου [81]

### Γείωση τύπου B

Το σύστημα γείωσης τύπου B βασίζεται στην γείωση τύπου A μόνο που είναι ενισχυμένο με την προσθήκη ενός τετραγωνικού συστήματος γείωσης 40 m x 30 m (με ένα σταυρό στη μέση) στο σύστημα γείωσης της περιμέτρου που είναι τοποθετημένο σε ένα βάθος 0,6 m. Αυτό αποτελείται από μία επικασσιτερωμένη εν θερμώ χάλκινη ταινία 25 mm x 4 mm. Το συνολικό μήκος του δικτύου των αγωγών κάθε ανεμογεννήτριας είναι 504,4 m και η συνολική επιφάνεια 1320,3 m<sup>2</sup>. Το σύστημα γείωσης τύπου B φαίνεται στο σχήμα 2.5.

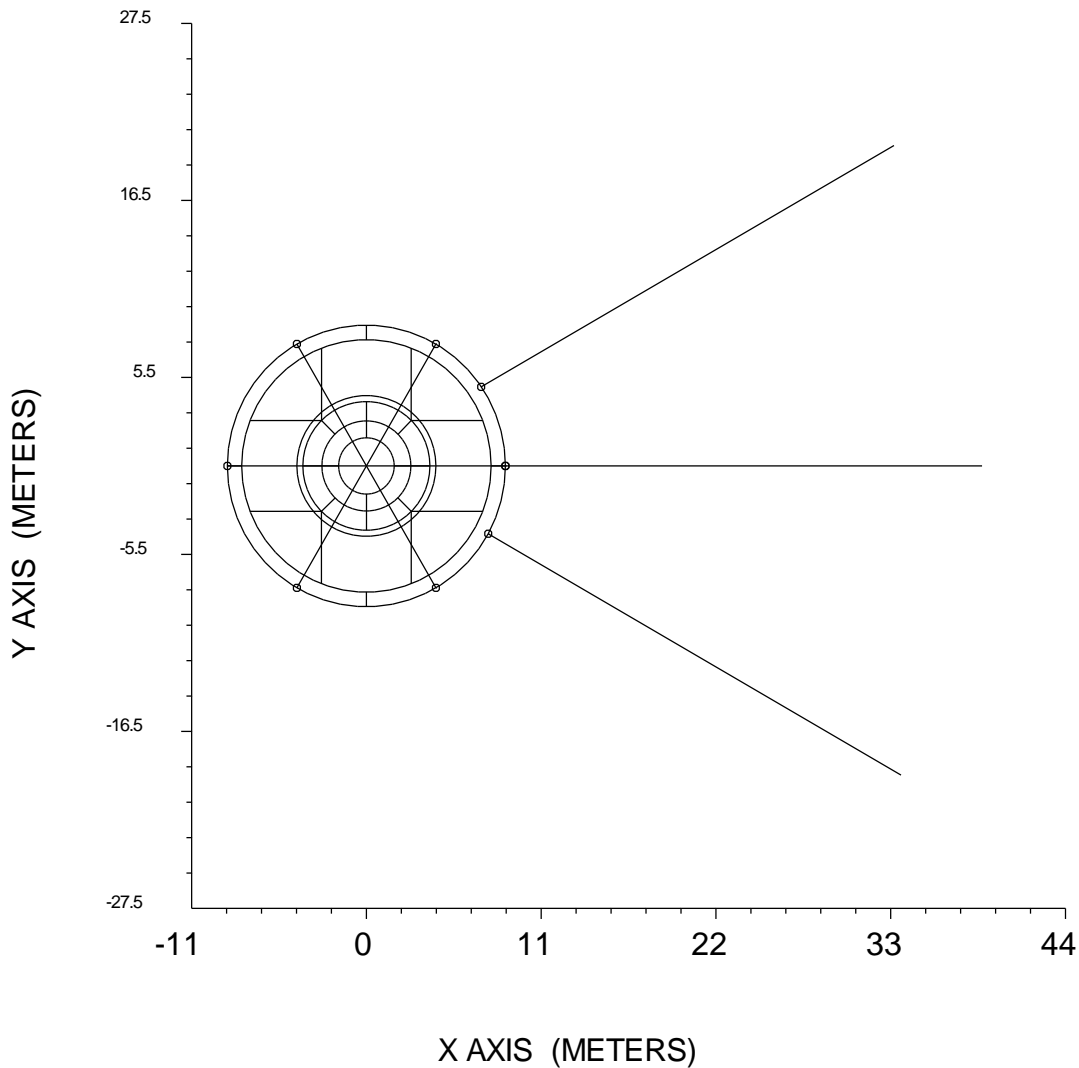


Top View of Conductors

Σχήμα 2.5: Κάτοψη της γείωσης τύπου B [32]

### Γείωση τύπου Γ

Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα γείωσης της ανεμογεννήτριας είναι ενισχυμένο με την προσθήκη ακτινικών αγωγών (χάλκινες ταινίες 25 mm x 4 mm σε ένα μήκος 30 m) στο σύστημα γείωσης της περιμέτρου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6, που είναι τοποθετημένες σε ένα βάθος 0,6 m. Το συνολικό μήκος του δικτύου των αγωγών κάθε ανεμογεννήτριας είναι 410,7 m και η συνολική επιφάνεια είναι 946,1 m.



Top View of Conductors

Σχήμα 2.6: Κάτοψη της γείωσης τύπου Γ [32]

## 2.2. Συστήματα γείωσης φωτοβολταϊκών πάρκων

Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απαραίτητο να γίνει εγκατάσταση γείωσης για την προστασία τόσο της ίδιας της εγκατάστασης όσο και των χειριστών της. Σκοπός μιας εγκατάστασης γείωσης είναι ο έλεγχος των επικίνδυνων δυναμικών που αναπτύσσονται λόγω κεραυνών ή βραχυκυκλωμάτων προς τη γη. Παρακάτω θα προταθεί ένας τρόπος γείωσης μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης [82]. Τα μεταλλικά πλαίσια των συλλεκτών γειώνονται μέσω της βάσης στήριξης της εγκατάστασης καθώς συνδέονται με βίδες ή σφυχτήρες με αυτήν. Η βάση στήριξης αποτελείται από χαλύβδινες δοκούς που φθάνουν σε 1,5m κάτω από το έδαφος. Επίσης, τοποθετείται περιμετρική γείωση όπως εξηγείται στη συνέχεια.

### Θέση τοποθέτησης

Θα πρέπει να κατασκευαστεί κλειστός βρόχος ταινίας γειώσεως περιμετρικά στο οικόπεδο στο οποίο τοποθετείται η φωτοβολταϊκή παραγωγή. Κάθε σημείο της ταινίας αυτής θα πρέπει να απέχει



πέντε μέτρα από την περιφραξη του οικοπέδου. Με άλλα λόγια, σε κάτοψη, αν έχουμε τετράγωνη περιφραξη του οικοπέδου, το τετράγωνο της ταινίας γείωσης θα πρέπει να περικλύεται μέσα στο τετράγωνο που σχηματίζει η περίμετρος και κάθε σημείο του να απέχει πέντε μέτρα από το αντίστοιχο σημείο της περιφραξης. Η ταινία αυτή τοποθετείται μέσα στο έδαφος και κάτω από τη ζώνη παγετού της περιοχής σε περιμετρικό χαντάκι. Ανά τακτές αποστάσεις κατασκευάζονται εγκάρσιες συνδέσεις. Όλες οι γειώσεις συνδέονται μεταξύ τους προς δημιουργία του ενιαίου πλέγματος γείωσης.

#### Υλικά περιμετρικής γείωσης

Η περιμετρική γείωση θα κατασκευαστεί από χάλκινη επικασσιτερωμένη ταινία ή από χαλύβδινη επιψευδαργυρωμένη ταινία και εξαρτήματα. Τα υλικά αυτά εξασφαλίζουν τη βασική απαίτηση των γειώσεων, δηλαδή της αντοχή στη διάβρωση και τα κρουστικά ρεύματα καθώς είναι πάρα πολύ δύσκολη η μελλοντική επέμβαση στη γείωση. Η σύνδεση των διάφορων υλικών μεταξύ τους πραγματοποιείται από ανοξείδωτα υλικά.

#### Εξίσωση δυναμικού-αγώγιμη σύνδεση πάνελ

Είναι απαραίτητη η αγώγιμη σύνδεση των πάνελ με τη μεταλλική βάση της κατασκευής προς εξίσωση του δυναμικού μεταξύ των ηλιακών συλλεκτών. Έτσι, κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ πρέπει να γειώνεται σε κάθε σημείο του πλαισίου του που έχει το σύμβολο της γείωσης. Είναι βέβαια πολύ σημαντικό να γίνει μέτρηση της τιμής της αντίστασης γείωσης η οποία θα πρέπει να είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

#### 3.1 Ανάλυση παλινδρόμησης<sup>[83]</sup>

Η ανάλυση παλινδρόμησης είναι μία στατιστική διαδικασία για την εκτίμηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Περιλαμβάνει πολλές τεχνικές για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση πολλών μεταβλητών όταν ο στόχος είναι η εύρεση της σχέσης που συνδέει μία εξαρτημένη μεταβλητή με μία ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση παλινδρόμησης βοηθά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η τυπική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής αλλάζει όταν μεταβάλλεται μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές. Ο τελικός στόχος είναι η εύρεση μίας συνάρτησης των ανεξάρτητων μεταβλητών που ονομάζεται συνάρτηση παλινδρόμησης. Στην ανάλυση παλινδρόμησης ενδιαφέρει επίσης ο χαρακτηρισμός της εξαρτημένης μεταβλητής γύρω από την συνάρτηση παλινδρόμησης, που μπορεί να περιγραφεί από μία κατανομή πιθανότητας [83].

Η ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιείται ευρέως για προβλέψεις και πολλές φορές η χρήση της επικαλύπτεται με τον τομέα της μηχανικής μάθησης (machine learning). Η ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιείται επίσης για να γίνουν κατανοητοί οι τρόποι με τους οποίους οι ανεξάρτητες μεταβλητές συνδέονται με την εξαρτημένη μεταβλητή ώστε να ερευνηθούν αυτές οι σχέσεις εξάρτησης. Σε λίγες περιπτώσεις η ανάλυση παλινδρόμησης μπορεί να υπονοήσει σχέση αιτίου-αιτιατού μεταξύ των ανεξάρτητων και των εξαρτημένων μεταβλητών. Όμως, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα καθώς η συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών δεν σημαίνει πως η μία «οδηγεί» την άλλη [83].

Έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές για την ανάλυση παλινδρόμησης. Οι πιο κοινές μέθοδοι όπως η γραμμική παλινδρόμηση και η κοινή μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων είναι παραμετρικές. Συνεπώς, η συνάρτηση παλινδρόμησης ορίζεται χρησιμοποιώντας ένα πεπερασμένο σύνολο άγνωστων παραμέτρων η οποίες εκτιμούνται με βάση τα δεδομένα. Η μη παραμετρική ανάλυση παλινδρόμησης αναφέρεται σε τεχνικές που επιτρέπουν στην συνάρτηση παλινδρόμησης να βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο σύνολο συναρτήσεων, το οποίο μπορεί να έχει και μη πεπερασμένη διάσταση [83].

Η απόδοση των μεθόδων ανάλυσης παλινδρόμησης στην πράξη εξαρτώνται από τη διαδικασία της συλλογής των δεδομένων-μετρήσεων και πως συσχετίζεται με την παλινδρομική προσέγγιση που χρησιμοποιείται. Μιας και η πραγματική μορφή της διεργασίας που παράγει τα δεδομένα συνήθως δεν είναι γνωστή, η ανάλυση παλινδρόμησης συχνά εξαρτάται, ως ένα βαθμό τουλάχιστον, από παραδοχές σχετικά με τη διεργασία. Αυτές οι υποθέσεις είναι συχνά βάσιμες αν είναι διαθέσιμος ένας ικανοποιητικός όγκος δεδομένων. Τα παλινδρομικά μοντέλα προβλέψεων είναι συχνά χρήσιμα ακόμα και όταν οι παραδοχές παραβιάζονται μερικώς, αν και μπορεί να μην λειτουργούν βέλτιστα. Όμως, σε πολλές εφαρμογές, ειδικά με μικρές επιδράσεις αιτιατότητας που βασίζονται στις μετρήσεις, οι παλινδρομικές μέθοδοι μπορεί να οδηγήσουν σε παραπλανητικά αποτελέσματα. [83]

## 3.2 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για μη γραμμικά μοντέλα

### 3.2.1 Εισαγωγή<sup>[84]</sup>

Αυτή η ενότητα ασχολείται με τη μη γραμμική εκτίμηση, δηλαδή με την προσαρμογή μη γραμμικών μοντέλων στα δεδομένα από μετρήσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Οι κανονικές εξισώσεις είναι μη γραμμικές στις περιπτώσεις αυτές και κατά συνέπεια παρουσιάζουν δυσκολία στην επίλυσή τους. Συνήθως πραγματοποιείται ευθεία ελαχιστοποίηση της συνάρτησης του αθροίσματος των τετραγώνων. Αυτό συνήθως απαιτεί δύσκολους επαναληπτικούς υπολογισμούς και τη χρήση κατάλληλων λογισμικών. Αν και οι λεπτομέρειες και οι έξοδοι των διάφορων τέτοιων προγραμμάτων ποικίλλουν, η μεθοδολογία του κεφαλαίου αυτού ισχύει ανεξάρτητα από το λογισμικό που χρησιμοποιείται [84].

### 3.2.2 Μη γραμμικά μοντέλα<sup>[84]</sup>

Τα γραμμικά μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης έχουν τη μορφή:

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

όπου τα  $Z_i$  μπορούν να αναπαραστήσουν οποιοσδήποτε συναρτήσεις των βασικών προβλεπουσών μεταβλητών  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . Αν και η εξίσωση (3.1) μπορεί να αναπαραστήσει ένα μεγάλο εύρος σχέσεων, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες ένα μοντέλο αυτής της μορφής δεν είναι κατάλληλο, για παράδειγμα όταν υπάρχουν βέβαιες πληροφορίες για τη μορφή της σχέσης που συνδέει την εξαρτημένη μεταβλητή με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να είναι η άμεση γνώση της μορφής του φυσικού μοντέλου ή η αντιπροσώπευση του μοντέλου από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο. Πολλές φορές οι πληροφορίες οδηγούν σε διαφορετικά εναλλακτικά μοντέλα (στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρουν οι μέθοδοι διάκρισης μεταξύ τους). Όταν οδηγούμαστε σε χρήση μοντέλου που έχει μη γραμμική μορφή συνήθως προτιμούμε να προσαρμόσουμε ένα τέτοιο μοντέλο, αν είναι δυνατόν, αντί να οδηγηθούμε στην προσαρμογή ενός εναλλακτικού, λιγότερο ρεαλιστικού, γραμμικού μοντέλου.

Κάθε μοντέλο που δεν είναι στη μορφή της εξίσωσης (3.1) θα καλείται μη γραμμικό μοντέλο, δηλαδή θα είναι μη γραμμικό ως προς τις παραμέτρους. Δύο παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι:

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

$$Y = \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_2} [e^{-\theta_2 t} - e^{-\theta_1 t}] + \varepsilon \quad (3.3)$$

Στα παραδείγματα αυτά οι παράμετροι που θα εκτιμηθούν συμβολίζονται με  $\theta$ , ενώ οι προβλέπουσες (ανεξάρτητες) μεταβλητές συμβολίζονται με  $t$ . Το  $\varepsilon$  συμβολίζει το τυχαίο σφάλμα με  $E(\varepsilon) = 0, V(\varepsilon) = \sigma^2$ . Μπορούσαμε επίσης να γράψουμε αυτά τα μοντέλα χωρίς το  $\varepsilon$  και να αντικαταστήσουμε το  $Y$  με το  $\eta$ . Τότε τα μοντέλα θα έδειχναν πως οι πραγματικές τιμές της απόκρισης,  $\eta$ , εξαρτώνται από το  $t$ . Εδώ θέλουμε να είμαστε συγκεκριμένοι σχετικά με το πώς υπεισέρχεται το σφάλμα στο μοντέλο ώστε να διευκολυνθεί η συζήτηση που θα ακολουθήσει.

Τα μοντέλα των εξισώσεων (3.2) και (3.3) είναι 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. Η εξίσωση (3.2) μπορεί να μετασχηματιστεί, λογαριθμίζοντας με βάση το  $e$ , στη μορφή:

$$\ln Y = \theta_1 + \theta_2 t + \varepsilon \quad (3.4)$$

η οποία στη μορφή (3.4) είναι γραμμική στις παραμέτρους. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο που δίνεται στην εξίσωση (3.2) είναι εγγενώς γραμμικό αφού μπορεί να μετασχηματισθεί σε γραμμική μορφή.

Όμως είναι αδύνατο να μετατραπεί η εξίσωση (3.3) σε μορφή που είναι γραμμική ως προς τις παραμέτρους. Ένα τέτοιο μοντέλο ονομάζεται εγγενώς μη γραμμικό. Ενώ, μερικές φορές, μπορεί να είναι χρήσιμο να μετασχηματισθεί ένα μοντέλο αυτής της μορφής ώστε να μπορεί να γίνει πιο εύκολα η προσαρμογή, εν τούτοις θα παραμείνει ένα μη γραμμικό μοντέλο οποιονδήποτε μετασχηματισμό και αν εφαρμόσουμε. Όλα τα μοντέλα από εδώ και πέρα θα θεωρούνται εγγενώς μη γραμμικά [84].

### 3.2.3 Μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων στη μη γραμμική περίπτωση<sup>[84]</sup>

Υποθέτουμε ένα μη γραμμικό μοντέλο της μορφής:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) + \varepsilon \quad (3.5)$$

όπου  $\xi_k$  είναι οι προβλέπουσες (ανεξάρτητες) μεταβλητές,  $\theta_k$  είναι οι παράμετροι και  $\varepsilon_k$  είναι οι παρατηρήσεις.

Αν γράψουμε

$$\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)'$$

$$\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)'$$

μπορούμε να πούμε ότι:

$$Y = f(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\theta}) + \varepsilon \quad (3.6)$$

ή

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

αν υποθέσουμε ότι  $E(\varepsilon) = 0$ . Θα υποθέσουμε επίσης ότι τα σφάλματα είναι ασυσχέτιστα, ότι  $V(\varepsilon) = \sigma^2$ , και, συνήθως, 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  $u = 1, 2, \dots, n$  μπορούμε να γράψουμε το μοντέλο στη μορφή:

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

όπου  $\varepsilon_u$  είναι το  $u$ -οστό σφάλμα. Αυτό μπορεί να συντομευθεί ως εξής:

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

όπου  $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)'$ . Η παραδοχή της κανονικότητας και της ανεξαρτησίας των σφαλμάτων μπορεί να γραφεί ως  $\boldsymbol{\varepsilon} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I}\sigma^2)$  όπου  $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)'$  και  $\boldsymbol{\theta}$  είναι ένα διάνυσμα από μηδενικά και  $\mathbf{I}$  είναι ο μοναδιαίος πίνακας, με κατάλληλες διαστάσεις. Ορίζουμε το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων για το μη γραμμικό μοντέλο ως εξής:

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

Αφού τα  $Y_u$  και  $\xi_u$  είναι συγκεκριμένες μετρήσεις, το άθροισμα των τετραγώνων είναι μόνο συνάρτηση του  $\boldsymbol{\theta}$ . Η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων του  $\boldsymbol{\theta}$ , δηλαδή η τιμή του  $\boldsymbol{\theta}$  για την οποία ελαχιστοποιείται η  $S(\boldsymbol{\theta})$  θα συμβολίζεται με  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ . Μπορεί να αποδειχτεί ότι αν  $\boldsymbol{\varepsilon} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I}\sigma^2)$  τότε η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων του  $\boldsymbol{\theta}$  είναι επίσης και η εκτιμήτρια μέγιστης πιθανοφάνειας του  $\boldsymbol{\theta}$ .

Για να βρούμε την εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  πρέπει να διαφορίσουμε την (3.9) ως προς  $\boldsymbol{\theta}$ . Αυτό μας δίνει τις  $p$  κανονικές εξισώσεις η οποίες πρέπει να επιλυθούν ως προς  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ . Οι κανονικές εξισώσεις θα έχουν την ακόλουθη μορφή:

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

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

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

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

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι ακόμα και η εκτίμηση μιας παραμέτρου σε ένα σχετικά απλό μη γραμμικό μονοπαραμετρικό μοντέλο δεν είναι εύκολη υπόθεση. Όταν μάλιστα υπεισέρχονται περισσότερες παράμετροι και το μοντέλο γίνεται πιο πολύπλοκο η επίλυση των κανονικών εξισώσεων μπορεί να γίνει πάρα πολύ δύσκολη και πρέπει να καταστρωθούν επαναληπτικές μέθοδοι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις. Ακόμα χειρότερα, μπορεί να υπάρχουν πολλές λύσεις, που

αντιστοιχούν σε πολλές στατικές τιμές της συνάρτησης  $S(\boldsymbol{\theta})$ . Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε τεχνικές για την εκτίμηση των παραμέτρων σε μη γραμμικά συστήματα [84].

### 3.3 Εκτίμηση των παραμέτρων ενός μη γραμμικού συστήματος

Σε κάποια μη γραμμικά προβλήματα είναι βολικό να γράψουμε τις κανονικές εξισώσεις (3.10) και να αναπτύξουμε μία επαναληπτική τεχνική για την επίλυσή τους. Το αν θα δουλέψει ικανοποιητικά αυτό εξαρτάται από τη μορφή των εξισώσεων και από την επαναληπτική τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί. Εκτός από την προσέγγιση αυτή υπάρχουν αρκετές άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως προκειμένου να γίνει εκτίμηση των παραμέτρων με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Εμείς θα ασχοληθούμε με τρεις από αυτές: τη μέθοδο της γραμμικοποίησης, τη μέθοδο της πιο ταχείας καθόδου και τη μέθοδο του συμβιβασμού του Marquardt [84].

#### 3.3.1 Γραμμικοποίηση<sup>[84]</sup>

Η τεχνική της γραμμικοποίησης (με σειρές Taylor) χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων σε διαδοχικά στάδια. Έστω ότι το μοντέλο έχει τη μορφή της εξίσωσης (3.8). Αν  $\theta_{1o}, \theta_{2o}, \dots, \theta_{po}$  είναι οι αρχικές τιμές για τις παραμέτρους  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ . Αυτές οι αρχικές εκτιμήσεις μπορεί να είναι έξυπνες «μαντεψιές» ή πρώιμες εκτιμήσεις που βασίζονται σε όποια πληροφορία είναι διαθέσιμη. Αυτές οι αρχικές τιμές, πιθανότατα, θα βελτιωθούν μετά από τις διαδοχικές επαναλήψεις που θα περιγραφούν παρακάτω. Αν κάνουμε το ανάπτυγμα Taylor της  $f(\boldsymbol{\xi}_u, \boldsymbol{\theta})$  γύρω από το σημείο  $\boldsymbol{\theta}_o$ , όπου  $\boldsymbol{\theta}_o = (\theta_{1o}, \theta_{2o}, \dots, \theta_{po})'$  και σταματήσουμε το ανάπτυγμα στις πρώτες παραγώγους, μπορούμε να πούμε ότι, προσεγγιστικά, όταν το  $\boldsymbol{\theta}$  είναι κοντά με το  $\boldsymbol{\theta}_o$ ,

$$f(\boldsymbol{\xi}_u, \boldsymbol{\theta}) = f(\boldsymbol{\xi}_u, \boldsymbol{\theta}_o) + \sum_{i=1}^p \left[ \frac{\partial f(\boldsymbol{\xi}_u, \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} \right]_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}_o} (\theta_i - \theta_{io}) \quad (3.11)$$

Αν θέσουμε:

$$\begin{aligned} f_u^0 &= f(\boldsymbol{\xi}_u, \boldsymbol{\theta}_o) \\ \beta_i^0 &= \theta_i - \theta_{io} \\ Z_{iu}^0 &= \left[ \frac{\partial f(\boldsymbol{\xi}_u, \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} \right]_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}_o} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Τότε η εξίσωση (3.8) παίρνει προσεγγιστικά τη μορφή:

$$Y_u - f_u^0 = \sum_{i=1}^p \beta_i^0 Z_{iu}^0 + \varepsilon_u \quad (3.13)$$

Η μορφή αυτή έχει τη γραμμική μορφή της εξίσωσης (3.1) για την επιλεγθείσα τάξη της προσέγγισης. Τώρα μπορούμε να εκτιμήσουμε τις παραμέτρους  $\beta_i^0$ ,  $i = 1, \dots, p$  εφαρμόζοντας τη θεωρία των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Αν γράψουμε:

$$\mathbf{Z}_o = \begin{bmatrix} Z_{11}^o & Z_{21}^o & \cdots & Z_{p1}^o \\ Z_{12}^o & Z_{22}^o & \cdots & Z_{p2}^o \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1u}^o & Z_{2u}^o & \cdots & Z_{pu}^o \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1n}^o & Z_{2n}^o & \cdots & Z_{pn}^o \end{bmatrix} = \{Z_{iu}^o\}, n \times p \quad (3.14)$$

$$\mathbf{b}_o = \begin{bmatrix} b_1^o \\ b_2^o \\ \vdots \\ b_p^o \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{y}_o = \begin{bmatrix} Y_1 - f_1^o \\ Y_2 - f_2^o \\ \vdots \\ Y_n - f_n^o \end{bmatrix} = \mathbf{Y} - \mathbf{f}^o \quad (3.15)$$

Τότε η εκτιμήτρια του  $\boldsymbol{\beta}_o = (\beta_1^o, \beta_2^o, \dots, \beta_p^o)'$  δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{b}_o = (\mathbf{Z}'_o \mathbf{Z}_o)^{-1} \mathbf{Z}'_o (\mathbf{Y} - \mathbf{f}^o) \quad (3.16)$$

Το διάνυσμα  $\mathbf{b}_o$ , συνεπώς, θα ελαχιστοποιήσει το άθροισμα των τετραγώνων

$$SS(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^n \left\{ Y_u - f(\xi_u, \boldsymbol{\theta}_o) - \sum_{i=1}^p \beta_i^o Z_{iu}^o \right\}^2 \quad (3.17)$$

Αντίστοιχα με τα  $\beta_i^o$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$  όπου  $\beta_i^o = \theta_i - \theta_{i0}$ . Αν γράψουμε  $b_{io} = \theta_{i1} - \theta_{i0}$  τότε τα  $\theta_{i1}$  με  $i = 1, \dots, p$  μπορούν να θεωρηθούν ως οι βελτιωμένες-αναθεωρημένες εκτιμήτριες του  $\boldsymbol{\theta}$ .

Θα πρέπει να τονισθεί η διαφορά μεταξύ του αθροίσματος των τετραγώνων  $S(\boldsymbol{\theta})$  της εξίσωσης (3.9) όπου χρησιμοποιείται το κατάλληλο μη γραμμικό μοντέλο και του αθροίσματος των τετραγώνων  $SS(\boldsymbol{\theta})$  της (3.17) όπου χρησιμοποιείται η προσεγγιστική γραμμική έκφραση του μοντέλου.

Τώρα μπορούμε να τοποθετήσουμε τις τιμές  $\theta_{i1}$ , τις αναθεωρημένες εκτιμήτριες, στους ίδιους ρόλους που έπαιζαν πριν οι τιμές  $\theta_{i0}$  και να κάνουμε πάλι ακριβώς την ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις εξισώσεις (3.11) έως (3.17), αντικαθιστώντας όμως όλους τους μηδενικούς δείκτες με άσσους. Αυτό οδηγεί σε ένα άλλο σύνολο αναθεωρημένων εκτιμητριών  $\theta_{i2}$  κ.ο.κ. Σε διανυσματική μορφή, επεκτείνοντας τον προηγούμενο συμβολισμό με προφανή τρόπο, γράφουμε:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_{j+1} &= \boldsymbol{\theta}_j + \mathbf{b}_j \\ \boldsymbol{\theta}_{j+1} &= \boldsymbol{\theta}_j + (\mathbf{Z}'_j \mathbf{Z}_j)^{-1} \mathbf{Z}'_j (\mathbf{Y} - \mathbf{f}^j) \end{aligned} \quad (3.18)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_j &= \{Z_{iu}^j\} \\ \mathbf{f}^j &= (f_1^j, f_2^j, \dots, f_n^j)' \\ \boldsymbol{\theta}^j &= (\theta_1^j, \theta_2^j, \dots, \theta_n^j)' \end{aligned}$$



Αυτή η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να συγκλίνει η ακολουθία, 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. Στο σημείο αυτό η επαναληπτική διαδικασία,  $S(\theta_j)$  μπορεί να εκτιμηθεί ως προς το αν επιτεύχθηκε μείωση στην τιμή της.

Η διαδικασία της γραμμικοποίησης έχει κάποια μειονεκτήματα σε κάποια προβλήματα όπως:

A) Μπορεί να συγκλίνει πολύ αργά. Με άλλα λόγια μπορεί να χρειασθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός επαναλήψεων παρόλο που το άθροισμα των τετραγώνων  $S(\theta_j)$  μειώνεται καθώς το  $j$  αυξάνεται.

B) Μπορεί να ταλαντώνεται ευρέως, αλλάζοντας συνεχώς κατευθύνσεις, και πιθανόν να αυξάνει ή να μειώνει διαδοχικά το άθροισμα των τετραγώνων. Παρόλα αυτά μπορεί τελικά το άθροισμα να σταθεροποιηθεί.

Γ) Μπορεί να μην συγκλίνει καθόλου, ακόμα και να αποκλίνει, οπότε το άθροισμα των τετραγώνων αυξάνει σε κάθε επανάληψη χωρίς φραγμό [84].

### 3.3.2 Μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου<sup>[84]</sup>

Η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου επικεντρώνεται στη συνάρτηση αθροίσματος των τετραγώνων  $S(\theta)$  όπως ορίζεται από την εξίσωση (3.9) και στη χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας για την εύρεση του ελαχίστου της. Η βασική ιδέα είναι η μετακίνηση από ένα αρχικό σημείο  $\theta_o$  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 αλλάζουν συνεχώς καθώς ακολουθείται το μονοπάτι. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό πρακτικά, χωρίς να εκτιμούμε παραγώγους συναρτήσεων, είναι να εκτιμήσουμε την κλίση του διανύσματος σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας  $S(\theta)$  προσαρμόζοντας επίπεδες προσεγγιστικές συναρτήσεις. Αυτή η τεχνική έχει μεγάλη αξία στις ερευνητικές εργασίες για την εύρεση στατικών τιμών στις επιφάνειες απόκρισης.

Η διαδικασία έχει ως εξής. Ξεκινώντας από μία συγκεκριμένη περιοχή του  $\theta$ -χώρου, γίνονται 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. Τα τρεξίματα συνήθως επιλέγονται σε ένα μοτίβο σχεδιασμού δύο επιπέδων. Χρησιμοποιώντας την εκτιμώμενες τιμές  $S(\theta)$  ως μετρήσεις μίας εξαρτημένης μεταβλητής και το συνδυασμό των επιπέδων των  $\theta_1, \dots, \theta_p$  ως τις μετρήσεις των αντίστοιχων μεταβλητών πρόβλεψης, προσαρμόζουμε το μοντέλο

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

μέσω συνήθων ελαχίστων τετραγώνων. Εδώ το  $\bar{\theta}_l$  συμβολίζει το μέσο των επιπέδων  $\theta_{iu}$ ,  $u = 1, \dots, n$  των  $\theta_i$  που χρησιμοποιήθηκαν στα τρεξίματα, και  $s_i$  ο παράγοντας διαβάθμισης που επιλέχθηκε ώστε  $\sum_{u=1}^n (\theta_{iu} - \bar{\theta}_l)^2 / s_i^2 = \text{σταθερό}$ . Αυτό υπονοεί ότι πιστεύουμε ότι η πραγματική επιφάνεια που ορίζεται από το  $S(\boldsymbol{\theta})$  μπορεί να προσεγγισθεί από ένα επίπεδο στην περιοχή του θ-χώρου στο οποίο έγιναν τα τρεξίματα. Οι εκτιμούμενοι 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 σημαίνει όσο η γραμμική προσέγγιση είναι ρεαλιστική η μέγιστη κάθοδος της  $S(\boldsymbol{\theta})$  βρίσκεται καθώς κινούμαστε κατά μήκος της γραμμής η οποία περιέχει σημεία τέτοια ώστε  $(\theta_i - \bar{\theta}_l) / s_i \propto -b_i$ . Αν ο συντελεστής της αναλογίας συμβολισθεί με  $\lambda > 0$ , το μονοπάτι της πιο απότομης καθόδου περιλαμβάνει σημεία  $(\theta_1, \dots, \theta_p)$  τέτοια ώστε:

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

ή

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

Δίνοντας στο  $\lambda$  επιλεγμένες τιμές μπορεί να ακολουθηθεί το μονοπάτι της πιο ταχείας καθόδου. Επιλέγεται ένας αριθμός από τιμές του  $\lambda$  και το μονοπάτι ακολουθείται καθώς το  $S(\boldsymbol{\theta})$  μειώνεται. Όταν δεν συμβαίνει αυτό, καταστρώνεται ένα άλλο πειραματικό σχήμα και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να συγκλίνει στην τιμή  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  που ελαχιστοποιεί το  $S(\boldsymbol{\theta})$ .

Αν και θεωρητικά η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου θα συγκλίνει, αυτό μπορεί να γίνεται πολύ αργά. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν είναι αναλλοίωτη ως προς την κλίμακα. Η υποδεικνυόμενη κατεύθυνση της κίνησης αλλάζει αν μεταβληθούν οι κλίμακες  $s_i$  με την εξαίρεση όλες να μεταβάλλονται με τον ίδιο παράγοντα. Η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου συνολικά προτιμάται λιγότερο από τη μέθοδο της γραμμικοποίησης αλλά θα δουλέψει ικανοποιητικά για πολλά μη γραμμικά προβλήματα.

Συνολικά η μέθοδος αυτή δουλεύει καλά αν η τρέχουσα θέση στον θ-χώρο είναι μακριά από το επιθυμητό  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ , το οποίο συμβαίνει κυρίως στις αρχικές επαναλήψεις. Καθώς προσεγγίζεται το  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  η συμπεριφορά ζικ-ζακ της μεθόδου είναι αρκετά πιθανή με αποτέλεσμα οι μέθοδοι γραμμικοποίησης να δουλεύουν καλύτερα [84].

### 3.3.3 Η μέθοδος του συμβιβασμού του Marquardt<sup>[84]</sup>

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

Η ιδέα της μεθόδου θα εξηγηθεί παρακάτω. Υποθέτουμε ότι ξεκινούμε από ένα συγκεκριμένο σημείο του θ-χώρου. Αν η μέθοδος της πιο ταχείας καθόδου εφαρμοσθεί, ένα συγκεκριμένο

διάνυσμα κατεύθυνσης,  $\delta_g$ , όπου το  $g$  συμβολίζει την κλίση (gradient), αποκτάται για κάθε κίνηση μακριά από το αρχικό σημείο. Λόγω 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. Όμως, η βέλτιστη κατεύθυνση 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 (3.16). Ο Marquardt βρήκε ότι για έναν αριθμό πρακτικών προβλημάτων που μελέτησε ότι η γωνία, έστω  $\varphi$ , μεταξύ του  $\delta_g$  και του  $\delta$  έπεσε στο εύρος  $80^\circ < \varphi < 90^\circ$ . Με άλλα λόγια οι δύο κατευθύνσεις ήταν σχεδόν στις σωστές γωνίες. Ο αλγόριθμος του Marquardt δίνει μία μέθοδο για την παρεμβολή μεταξύ των διανυσμάτων  $\delta_g$  και  $\delta$  και για την απόκτηση κατάλληλου μεγέθους του βήματος επίσης [84].

### 3.3.4 Άλλες μέθοδοι

Το όλο πρόβλημα στην περίπτωση της προσαρμογής των παραμέτρων ενός μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα έγκειται στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων  $S(\theta)$ . Δηλαδή πρόκειται ουσιαστικά για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που στοχεύει στην εύρεση του ελαχίστου μιας 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). Εμείς απλώς αναφέραμε χαρακτηριστικά παραδείγματα αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται ευρέως στα προβλήματα αυτά.

## 3.4 Διαστήματα εμπιστοσύνης<sup>[84]</sup>

Μία ιδέα για τη μη γραμμικότητα του μελετούμενου μοντέλου μπορεί να εξαχθεί μετά την εκτίμηση του  $\theta$  εκτιμώντας την ελλειψοειδή περιοχή εμπιστοσύνης που εξάγεται από την παραδοχή ότι η γραμμικοποιημένη μορφή του μοντέλου είναι έγκυρη γύρω από το  $\hat{\theta}$ . Αυτό δίνεται από τη σχέση

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

όπου το  $\hat{Z}$  συμβολίζει ένα πίνακα της μορφής της εξίσωσης (3.14) αλλά με το  $\hat{\theta}$  να έχει αντικατασταθεί στα στοιχεία από το  $\theta_0$  παντού, και όπου

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

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι 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 η  $S(\hat{\theta})$  είναι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης  $S(\theta)$  στην εξίσωση (3.9) σύμφωνα με την εισαχθείσα ακρίβεια της συνθήκης τερματισμού. Αυτό, μπορούμε να το δούμε από την εξίσωση (3.17) 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  $b_{j+1} = \mathbf{0}$ . Το παραπάνω ελλειψοειδές δεν θα είναι ένα

πραγματικό διάστημα εμπιστοσύνης όταν το μοντέλο είναι μη γραμμικό. Μπορούμε όμως να καθορίσουμε τα σημεία τερματισμού στους κύριους άξονες του ελλειψοειδούς με κανονική αναγωγή. Οι πραγματικές τιμές της  $S(\theta)$  μπορούν να εκτιμηθούν στα σημεία αυτά και να συγκριθούν μεταξύ τους. Υπό τη γραμμική θεώρηση όλες αυτές οι τιμές θα είναι οι ίδιες.

Ένα ακριβές διάστημα εμπιστοσύνης λαμβάνεται αν θεωρήσουμε  $S(\theta) = \text{σταθερό}$ , αλλά αφού δεν ξέρουμε τις ακριβείς ιδιότητες της κατανομής στη γενική μη γραμμική μορφή, δεν μπορούμε να εξαγάγουμε ένα ακριβές επίπεδο πιθανότητας. Μπορούμε, όμως, για παράδειγμα, να επιλέξουμε ένα διάστημα τέτοιο ώστε

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

το οποίο, αν το μοντέλο είναι γραμμικό, παράγει ένα ακριβώς ελλειψοειδές με όριο  $100(1-a)\%$  και το ονομάζουμε ως ένα προσεγγιστικό διάστημα εμπιστοσύνης  $100(1-a)\%$  στη μη γραμμική περίπτωση. Σημειώνεται ότι το διάστημα αυτό θα είναι ένα σωστό διάστημα εμπιστοσύνης σε αυτήν την περίπτωση (και δεν θα είναι ελλειπτικό γενικά) και μόνο το επίπεδο πιθανότητας θα είναι προσεγγιστικό [84].

### 3.5 Η σημασία των καλών αρχικών τιμών

Όλες οι επαναληπτικές διαδικασίες απαιτούν αρχικές τιμές  $\theta_{10}, \dots, \theta_{p0}$  των παραμέτρων  $\theta_1, \dots, \theta_p$ . Όλη η πρότερη γνώση θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ώστε οι αρχικές αυτές τιμές να είναι όσο πιο αξιόπιστες γίνεται. Οι καλές αρχικές τιμές θα επιτρέψουν στην επαναληπτική διεργασία να συγκλίνει σε μία λύση πολύ πιο γρήγορα. Επίσης, αν υπάρχουν πολλά τοπικά ελάχιστα, οι κακές αρχικές τιμές μπορεί να οδηγήσουν στη σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο το οποίο δεν είναι το επιθυμητό. Αυτό το μη επιθυμητό σημείο μπορεί να έχει τιμές παραμέτρων που είναι αδύνατες από τη φύση της διεργασίας ή που δεν περιγράφουν το ολικό ελάχιστο της  $S(\theta)$ . Μία προκαταρκτική εκτίμηση της  $S(\theta)$  σε μία πληθώρα σημείων του παραμετρικού χώρου είναι χρήσιμη για τη σωστή επιλογή των αρχικών τιμών [84].

### 3.6 Μαντεύοντας αρχικές τιμές $\theta_0$

Δεν υπάρχει διαδικασία-τυφλοσούρτης προκειμένου να γίνουν αρχικές εκτιμήσεις για τις παραμέτρους, που να ισχύει για κάθε μη γραμμικό πρόβλημα. Κάποιες μέθοδοι που μπορούν να φανούν χρήσιμες είναι οι ακόλουθες:

A) Αν υπάρχουν  $p$  παράμετροι, αντικαθιστούμε για  $p$  σύνολα παρατηρήσεων  $(Y_u, \xi_u)$  στο μοντέλο αγνοώντας το σφάλμα. Επιλύουμε τις  $p$  εξισώσεις που προκύπτουν για τις παραμέτρους (αν είναι δυνατό). Τα ευρέως διασκορπισμένα  $\xi_u$  συχνά είναι τα καλύτερα.

B) Θεωρούμε τη συμπεριφορά της συνάρτησης απόκρισης καθώς τα  $\xi_i$  πλησιάζουν το μηδέν ή το άπειρο και τα αντικαθιστούμε στις παρατηρήσεις οι οποίες είναι πιο κοντά στις συνθήκες αυτές στο πλαίσιο του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε. Έπειτα λύνουμε αν είναι δυνατόν τις εξισώσεις που προκύπτουν. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη μέθοδο A.

Γ) Ελέγχουμε τη μορφή του μοντέλου για να δούμε αν το μοντέλο μπορεί να μετασχηματιστεί κατάλληλα σε κάποιο άλλο στο οποίο είναι πιο εύκολο να ευρεθούν κατάλληλες αρχικές τιμές

Δ) Αν όλα τα άλλα αποτυγχάνουν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της γραφικής απεικόνισης των δεδομένων προκειμένου να «μαντέψουμε» σωστές αρχικές τιμές [84].

### 3.7 Ανθεκτική παλινδρόμηση

Όταν πραγματοποιούμε παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας η παρατηρήσεις για ένα  $p$ -παραμετρικό μοντέλο, κάνουμε μερικές ιδανικές παραδοχές για το διάνυσμα των σφαλμάτων, δηλαδή, ότι ακολουθεί την κατανομή  $N(\mathbf{0}, I\sigma^2)$ . Στην πράξη, υπάρχουν αποκλίσεις από αυτές τις παραδοχές. Αν οι αποκλίσεις είναι σημαντικές, ελπίζουμε να τις εντοπίσουμε στη συμπεριφορά των υπολοίπων ώστε να κάνουμε τις κατάλληλες τροποποιήσεις στο μοντέλο. Για παράδειγμα, μπορεί να τροποποιήσουμε τη μεταβλητή απόκρισης (εξαρτημένη) ή μία ή περισσότερες από τις προβλέπουσες (ανεξάρτητες) μεταβλητές, ή απλά να τροποποιήσουμε το μοντέλο προσθέτοντας όρους μεγαλύτερης τάξης. Για την πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι αποκλίσεις, αν υπάρχουν, δεν είναι τόσο σημαντικές ώστε να δικαιολογήσουν διορθωτικές κινήσεις [84].

Αν η ανάλυσή μας καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα σφάλματα ακολουθούν μη κανονική κατανομή θα πρέπει να σκεφτούμε την εφαρμογή μίας ανθεκτικής μεθόδου παλινδρόμησης, ειδικά στις περιπτώσεις εκείνες όπου η κατανομή των σφαλμάτων πιο οπισθοβαρής από την κανονική, δηλαδή έχει μεγαλύτερη πιθανότητα στις ουρές από ότι η κανονική. Τέτοιες οπισθοβαρείς κατανομές είναι πιο πιθανό να παράγουν μεγαλύτερα σφάλματα από την κανονική. Μία ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων σταθμίζει κάθε παρατήρηση ισότιμα για την εκτίμηση των παραμέτρων. Οι ανθεκτικές μέθοδοι επιτρέπουν την ανισοβαρή στάθμιση των παραμέτρων. Κατ' ουσίαν, οι παρατηρήσεις που παράγουν μεγάλα υπόλοιπα είναι συνήθως υπο-σταθμισμένες σε μία ανθεκτική μέθοδο εκτίμησης. Υπάρχει διαθέσιμη μία πληθώρα από μεθόδους. Γενικά, οι ανθεκτικές μέθοδοι παλινδρόμησης απαιτούν πολύ περισσότερο υπολογιστικό χρόνο από τα ελάχιστα τετράγωνα και επίσης απαιτείται να γίνουν κάποιες υποθέσεις σχετικά με τη διαδικασία υπο-στάθμισης. Τέτοιες μέθοδοι είναι [84]:

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

### 3.8 Καταλληλότητα της προσαρμογής<sup>[85]</sup>

Μετά την προσαρμογή των δεδομένων σε ένα ή περισσότερα μοντέλα, θα πρέπει να εκτιμηθεί η ποιότητα της προσαρμογής. Το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση είναι η οπτική αξιολόγηση της προσαρμογής στην καμπύλη/επιφάνεια.

Μία «καλή προσαρμογή» θα μπορούσε να είναι ένα μοντέλο:

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

Μία συγκεκριμένη εφαρμογή θα μπορούσε επίσης να απαιτεί επιπλέον χαρακτηριστικά ώστε να χαρακτηριστεί μία προσαρμογή ως «καλή» όπως για παράδειγμα ένα απλό μοντέλο το οποίο να μπορεί να εξηγηθεί εύκολα.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ποιότητας της προσαρμογής μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες: γραφικές και αριθμητικές. Η γραφική απεικόνιση των υπολοίπων και των ορίων της πρόβλεψης είναι γραφικές μέθοδοι οι οποίες βοηθούν την οπτική ερμηνεία, ενώ ο υπολογισμός των στατιστικών της ποιότητας της προσαρμογής και των διαστημάτων εμπιστοσύνης των συντελεστών αποτελούν αριθμητικές μεθόδους που βοηθούν τη στατιστική εξήγηση.

Γενικά, οι γραφικές μέθοδοι είναι πιο επικερδείς από τις αριθμητικές επειδή επιτρέπουν στο χρήστη να δει ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων με μία ματιά, με αποτέλεσμα ο χρήστης να μπορεί εύκολα να οπτικοποιήσει ένα μεγάλο εύρος σχέσεων μεταξύ του μοντέλου και των δεδομένων. Οι αριθμητικές μέθοδοι συνήθως επικεντρώνονται σε ένα λιγότερο ευρύ φάσμα σε μία συγκεκριμένη όψη των δεδομένων και συχνά προσπαθούν να συμπίεσουν αυτή την πληροφορία ώστε να παρουσιασθεί ένας μεμονωμένος αριθμός. Στην πράξη, ανάλογα με τα δεδομένα και τις απαιτήσεις της ανάλυσης, μπορεί να χρειασθούν και οι δύο μέθοδοι προκειμένου να εκτιμηθεί η ποιότητα της προσαρμογής.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει πιθανότητα καμία από τις προσαρμογές να μην θεωρηθεί κατάλληλη για τα δεδομένα, βασισμένη σε αυτές τις μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να αλλαχθεί το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης. Όμως, 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. Σε αυτή την περίπτωση η κατανόηση του τι αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα και πως πάρθηκαν οι μετρήσεις είναι το ίδιο σημαντικό με την αξιολόγηση της ποιότητας της προσαρμογής [85].

Στατιστικές μέθοδοι εκτίμησης της ποιότητας της προσαρμογής [85]

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα αναφερθούμε σε 4 στατιστικές μεθόδους για την αξιολόγηση της προσαρμογής:

- Άθροισμα των τετραγώνων λόγω του σφάλματος (SSE-Sum of squares due to error)
- $R^2$
- Προσαρμοσμένο  $R^2$  (Adjusted R-square)
- Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE-Root mean square error)

### Άθροισμα των τετραγώνων λόγω του σφάλματος

Αυτό το στατιστικό εργαλείο υπολογίζει τη συνολική απόκλιση των τιμών της απόκρισης της προσαρμογής σε σχέση με τις μετρήσεις. Καλείται επίσης και αθροισμένο τετράγωνο των υπολοίπων και συνήθως συμβολίζεται ως SSE

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

Μία τιμή κοντά στο 0 δείχνει ότι το μοντέλο έχει μικρότερο στοιχείο τυχαίου σφάλματος και ότι η προσαρμογή θα είναι πιο χρήσιμη για προβλέψεις [85].

### R-τετράγωνο

Αυτό το στατιστικό εργαλείο μετρά πόσο επιτυχημένη είναι η προσαρμογή στην εξήγηση της διακύμανσης των δεδομένων. Με άλλα λόγια, το R-τετράγωνο είναι το τετράγωνο των συσχετίσεων μεταξύ των μετρήσεων και των τιμών που προβλέπει η προσαρμογή. Καλείται επίσης και το τετράγωνο των συντελεστών πολλαπλών συσχετίσεων.

Το R-τετράγωνο ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των τετραγώνων της παλινδρόμησης (SSR) και του συνολικού αθροίσματος των τετραγώνων (SST). Το SSR ορίζεται ως:

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

Το SST ορίζεται ως

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

όπου  $SST = SSR + SSE$

Συνεπώς το R-τετράγωνο ορίζεται ως:

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

Το R-τετράγωνο μπορεί να πάρει κάθε τιμή μεταξύ 0 και 1. Μία τιμή κοντά στο 1 δείχνει ότι μία μεγαλύτερη αναλογία διακύμανσης λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο. Για παράδειγμα, μία τιμή για το R-τετράγωνο ίση με 0.8234 σημαίνει ότι η προσαρμογή εξηγεί το 82,34% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων γύρω από τη μέση τιμή.

Αν αυξηθεί ο αριθμός των συντελεστών προς προσαρμογή στο μοντέλο το R-τετράγωνο μπορεί να αυξηθεί χωρίς όμως η προσαρμογή να βελτιωθεί με πρακτική έννοια. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι βαθμοί ελευθερίας του προσαρμοσμένου R-τετραγώνου που περιγράφεται πιο κάτω [85].

### Προσαρμοσμένο R-τετράγωνο

Αυτό το στατιστικό εργαλείο χρησιμοποιεί το R-τετράγωνο που περιγράφηκε πιο πάνω και το προσαρμόζει βασιζόμενο στους βαθμούς ελευθερίας των υπολοίπων. Οι υπολειπόμενοι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται ως ο αριθμός των τιμών απόκρισης  $n$  μείον τον αριθμό των συντελεστών προς προσαρμογή  $m$  που εκτιμάται από τις τιμές απόκρισης.

$$v = n - m$$

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

Το προσαρμοσμένο R-τετράγωνο είναι συνήθως ο καλύτερος δείκτης της ποιότητας της προσαρμογής όταν συγκρίνονται δύο μοντέλα που είναι φωλιασμένα—δηλαδή μία σειρά τέτοιων μοντέλο στα οποία το κάθε ένα προσθέτει επιπλέον συντελεστές σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο.

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

Το προσαρμοσμένο R-τετράγωνο μπορεί να λάβει τιμές που είναι μικρότερες από 1. Μία τιμή κοντά στο 1 δείχνει καλύτερη προσαρμογή [85].

### Ρίζα του μέσου τετραγώνου του σφάλματος

Αυτό το στατιστικό εργαλείο είναι μία εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της τυχαίας συνιστώσας των δεδομένων και ορίζεται ως:

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

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 [85].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CDEGS

#### 4.1 Το λογισμικό CDEGS

Για την εύρεση της αντίστασης γείωσης σε κάθε μία από τις τρεις διατάξεις γείωσης των ανεμογεννητριών καθώς και στη θεμελιακή γείωση των φωτοβολταϊκών, θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis). Αρχικά, θα πούμε με δύο λόγια για το λογισμικό, για τις δυνατότητές του καθώς και για τους τομείς στους οποίους χρησιμοποιείται [86].

Το λογισμικό πακέτο CDEGS είναι ένα ισχυρό σύνολο ενσωματωμένων εργαλείων λογισμικού για μηχανικούς που είναι σχεδιασμένο για την ακριβή ανάλυση προβλημάτων που αφορούν γειώσεις, ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και μελέτες μετριάσμου των AC/DC παρεμβολών και διάφορες πτυχές της ανάλυσης των καθοδικών προστασιών σε παγκόσμια κλίμακα, αρχίζοντας στην κυριολεξία από το μηδέν. Το λογισμικό CDEGS υπολογίζει ρεύματα αγωγών και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από ένα αυθαίρετο δίκτυο από φορτισμένους αγωγούς σε κάθε σημείο πάνω ή κάτω από το έδαφος για κανονικές συνθήκες, συνθήκες σφάλματος, συνθήκες κεραυνοπληξίας καθώς και μεταβατικές συνθήκες. Το CDEGS μοντελοποιεί απλούς αγωγούς καθώς και αγωγούς που αποτελούνται από πολλά τμήματα στα οποία συμπεριλαμβάνονται γυμνοί αγωγοί, μονωμένοι αγωγοί καθώς και συστήματα αγωγών εντός σωλήνων που βρίσκονται μέσα σε πολύπλοκες δομές εδάφους. Το CDEGS και τα υποπακέτα του μπορούν να επιλύσουν προβλήματα κλιμακούμενης πολυπλοκότητας από το σχεδιασμό απλών συστημάτων γείωσης μέχρι τη συμπεριφορά πολύπλοκων δικτύων που βρίσκονται τόσο πάνω όσο και κάτω από το έδαφος και τα οποία πλήττονται από κεραυνικά ή άλλα μεταβατικά φαινόμενα. Επιπλέον, το λογισμικό έχει ένα ισχυρό εργαλείο σχεδιασμού το οποίο επιτρέπει την εισαγωγή γραφικών από το AutoCAD καθώς και από άλλα λογισμικά κάνοντας εύκολη την εισαγωγή των δεδομένων. Επιπλέον η ευέλικτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων και οι γραφικές απεικονίσεις βοηθούν στην κατανόηση των αποτελεσμάτων και στην απομόνωση ενδιαφερόντων συμπερασμάτων [86].

Συνοπτικά, οι δυνατότητες του CDEGS είναι [86]:

- Ανάλυση της αντίστασης του εδάφους και ερμηνεία της δομής του 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 κλπ)

Το πλήρες πακέτο του λογισμικού CDEGS περιλαμβάνει τους ακόλουθους 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

Από όλους αυτούς τους επιλύτες, εμείς θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τον MALZ στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας

## 4.2 Επιλύτης MALZ

Ο επιλύτης MALZ αναλύει την απόδοση στο πεδίο της συχνότητας των υπόγειων δικτύων αγωγών και υπολογίζει τις ακόλουθες ποσότητες: Δυναμικό γης και αγωγού, κατανομή του διαμήκους ρεύματος διαφυγής στους αγωγούς, πυκνότητα ρεύματος και ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος ή στην επιφάνεια της γης καθώς και μαγνητικά πεδία στον αέρα. Αυτό το ισχυρό πακέτο γείωσης είναι το ιδανικό εργαλείο σε μονωμένους αγωγούς ή στην περίπτωση όπου οι μεταλλικοί αγωγοί δεν μπορούν πλέον να προσεγγισθούν ως ισοδυναμικές επιφάνειες [87].

Ο επιλύτης MALZ αναπτύχθηκε 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 [87].

- Ο MALZ είναι ειδικά σχεδιασμένος για να ταιριάζει στη μοντελοποίηση εκτεταμένων δικτύων στο έδαφος αλλά είναι και ένα εξαιρετικό εργαλείο για την ανάλυση δικτύων αγωγών που φορτίζονται από ρεύματα συχνοτήτων από 0 έως 1 MHz.
- Οι αγωγοί μπορεί 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 μπορεί να φορτίζεται σε διαφορετικές τοποθεσίες από ρεύματα μιγαδικής τιμής. Κάθε πηγή ρεύματος μπορεί να εγγείει ένα ρεύμα το οποίο διαφέρει από τις υπόλοιπες πηγές τόσο σε μέτρο όσο και σε γωνία.

- Ο χρήστης μπορεί επίσης 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 MALZ διαχωρίζει αυτόματα τους αγωγούς σε κατηγορίες και κατά συνέπεια καθορίζεται ποιοι αγωγοί αποτελούν διακριτά συστήματα.

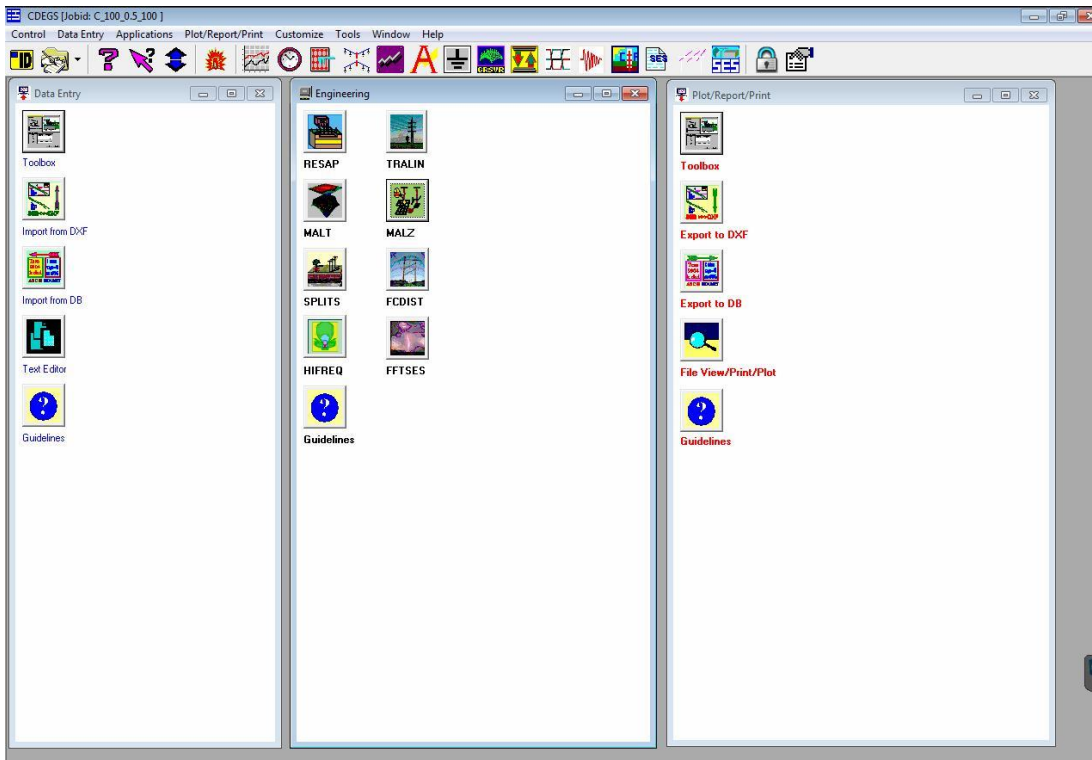
#### Τεχνικά χαρακτηριστικά [87]:

Ο MALZ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή 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 σχετικά με την παρουσία σωληνώσεων (μονωμένων ή μη) ή άλλων παρόμοιων μεταλλικών διαδρόμων (φράκτες κλπ). Ο MALZ μπορεί επίσης να αναλύσει τις επιδράσεις των ηλεκτροδίων επιστροφής (δίκτυα γείωσης όπου τα ρεύματα γης επιστρέφουν στο σύστημα ως πηγές)
- Καθορισμός των ηλεκτρικών πεδίων και της πυκνότητας ρεύματος σε καθορισμένα σημεία παρατήρησης στο έδαφος ή στην επιφάνεια της γης.
- Καθορισμός 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.

### **4.3 Προσομοίωση με το λογισμικό CDEGS**

Το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού CDEGS φαίνεται στο σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1: Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού CDEGS

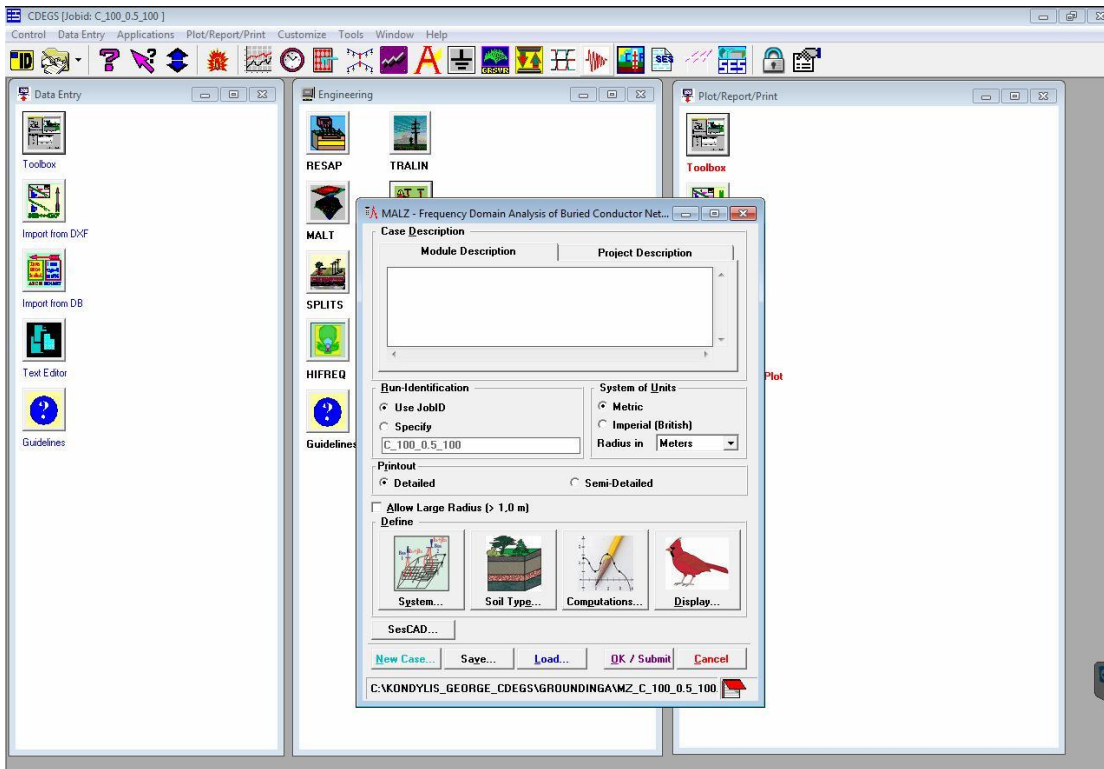
Όπως προείπαμε, στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί μόνο ο επιλύτης MALZ. Το περιβάλλον εργασίας χωρίζεται σε 3 κύριες ενότητες:

- Εισαγωγή δεδομένων (αριστερά)
- Διαδικασία επίλυσης/προσομοίωσης (κέντρο)
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων (δεξιά)

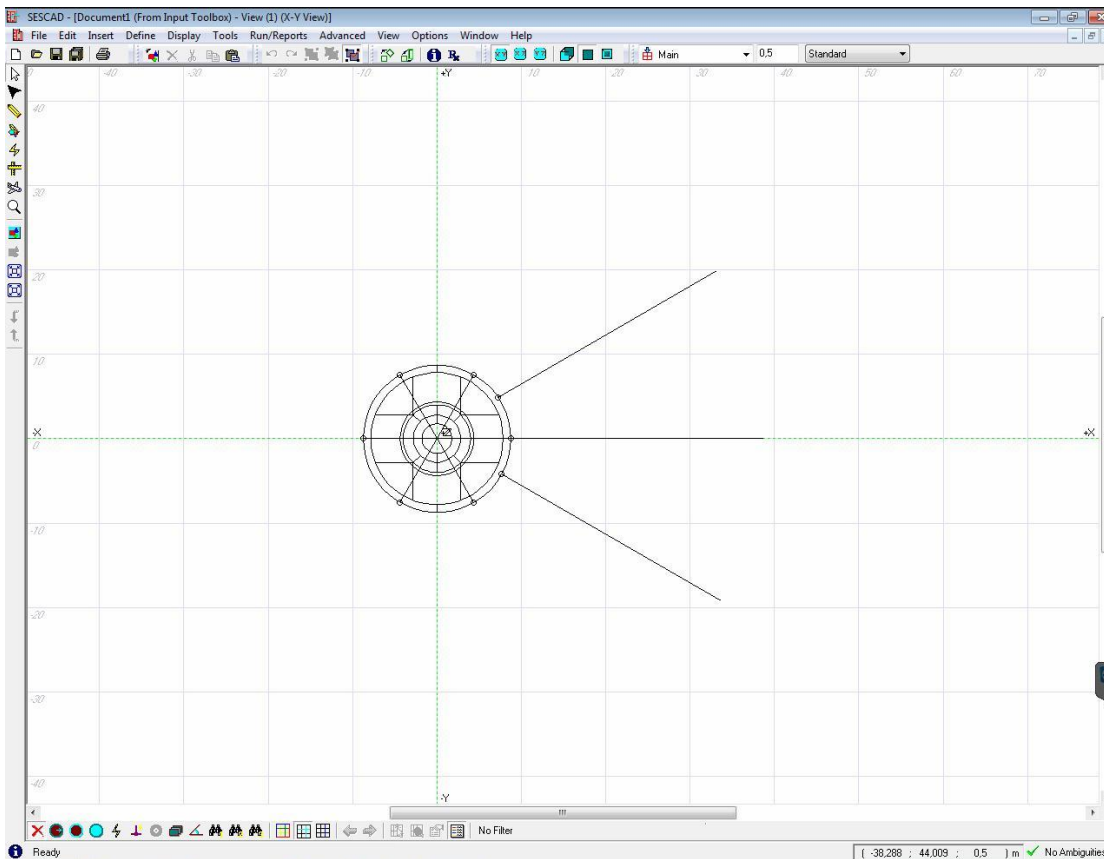
Η διαδικασία της προσομοίωσης έχει ως εξής: Αρχικά στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων επιλέγουμε το Toolbox και μετά τον επιλύτη που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε (MALZ). Στη συνέχεια εισάγουμε τα δεδομένα όπως περιγράφεται παρακάτω. Έπειτα εκτελούμε την προσομοίωση. Τέλος, στο παράθυρο της εξαγωγής των αποτελεσμάτων επιλέγουμε Toolbox και μετά τον επιλύτη που χρησιμοποιήσαμε.

#### 4.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στο CDEGS

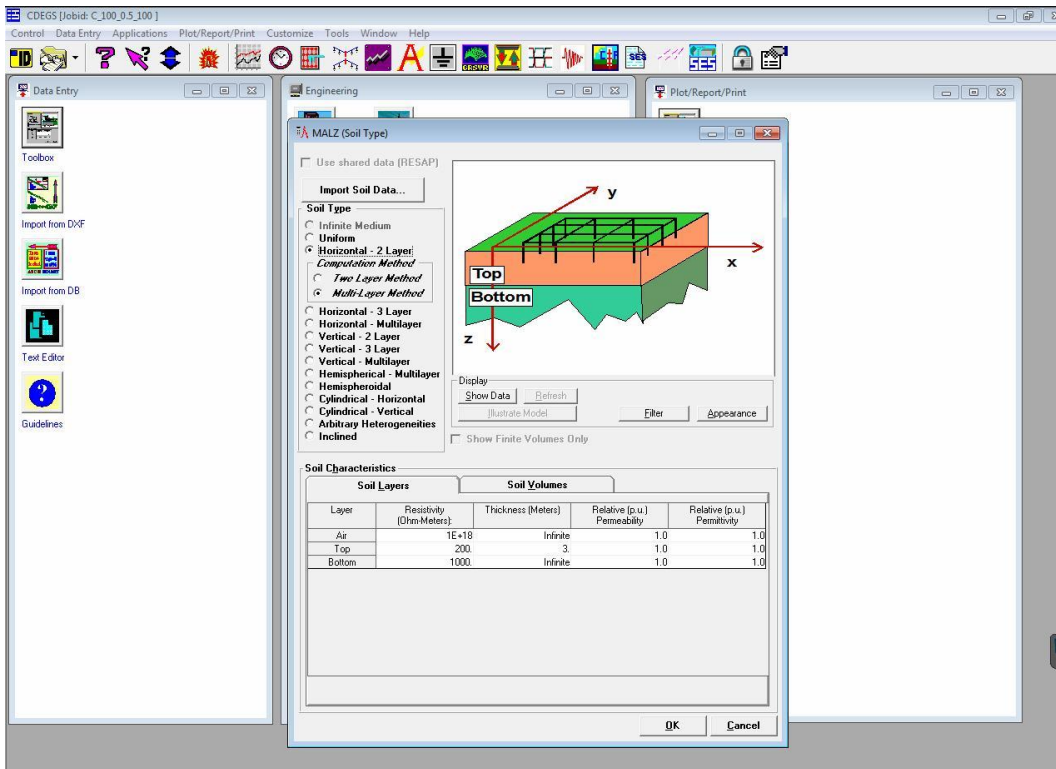
Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων είναι απαραίτητο να εισαχθούν τα πραγματικά δεδομένα για τη γείωση και για το έδαφος. Το γενικό παράθυρο της εισαγωγής δεδομένων για τον επιλύτη MALZ φαίνεται στο σχήμα 4.2. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να σχεδιασθεί αναλυτικά η γείωση μέσω του πακέτου SESCAD του CDEGS (σχήμα 4.3) και επιπλέον εισαχθούν οι ειδικές αντιστάσεις των δύο στρωμάτων του διστρωματικού εδάφους καθώς και το βάθος του πρώτου στρώματος (σχήμα 4.4)



Σχήμα 4.2: Γενικό παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τον επιλύτη MALZ



Σχήμα 4.3: Παράθυρο σχεδίασης της γείωσης μέσω του πακέτου SESCOAD του CDEGS



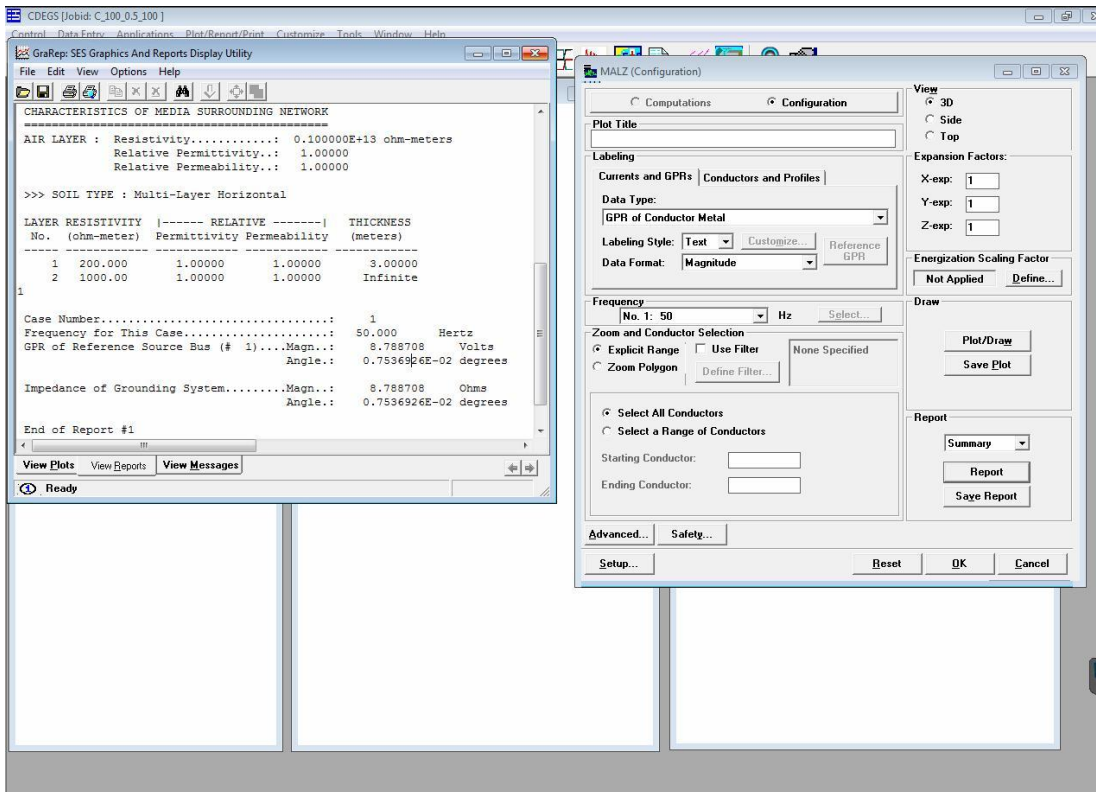
Σχήμα 4.4: Παράθυρο εισαγωγής των παραμέτρων του εδάφους για τον επιλύτη MALZ

### 4.3.2 Πραγματοποίηση της προσομοίωσης

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης κοιτάμε το μεσαίο παράθυρο. Εκεί επιλέγουμε τον αντίστοιχο επιλύτη για τον οποίο έχουμε εισάγει δεδομένα κατά το προηγούμενο στάδιο και η επίλυση ξεκινά

### 4.3.3 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, στο δεξί παράθυρο επιλέγουμε Toolbox και μετά τον επιλύτη που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο στάδιο (MALZ). Εκεί μας εμφανίζεται ένα Report με διάφορα αποτελέσματα που προέκυψαν στην προσομοίωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Εμείς ενδιαφερόμαστε και κρατάμε την αντίσταση του συστήματος γείωσης.



Σχήμα 4.5: Παράθυρο εξαγωγής αποτελεσμάτων για τον επιλύτη MALZ

#### 4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

- Για μονοστρωματική περίπτωση εδάφους

Στην περίπτωση του μονοστρωματικού και ομοιόμορφου εδάφους πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων για πολλές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους  $\rho$ . Αυτό που έγινε πολύ εύκολα αντιληπτό παρατηρώντας τις μετρήσεις είναι ότι η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ενδεικτικά παραθέτουμε τις μετρήσεις για ειδική αντίσταση του εδάφους ίση με  $500 \Omega \cdot m$  και  $1000 \Omega \cdot m$

Πίνακας 4-1: Ενδεικτικές μετρήσεις αντίστασης γείωσης για ειδική αντίσταση του εδάφους ίση με  $\rho=500 \Omega \cdot m$  και  $\rho=1000 \Omega \cdot m$ , για τους 3 τύπους γείωσης, για μονοστρωματική περίπτωση εδάφους

Τύπος γείωσης	$\rho=500 \Omega \cdot m$	$\rho=1000 \Omega \cdot m$
Γείωση Α	11,87572	23,75145
Γείωση Β	6,580537	13,16094
Γείωση Γ	8,023347	16,04650

- Για διστρωματική περίπτωση εδάφους

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο θα μελετήσουμε και θα προσομοιώσουμε 3 διαφορετικούς τύπους γειώσεων σε ανεμογεννήτριες. Για κάθε τύπο γείωσης, το έδαφος στο οποίο θα γίνει η μελέτη θεωρείται διστρωματικό και οι ειδικές αντιστάσεις  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  του πρώτου και του

δεύτερου στρώματος αντίστοιχα καθώς και το βάθος του πρώτου στρώματος  $h$  θα πάρουν τις εξής τιμές:

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

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

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

Συνεπώς για κάθε τύπο γείωσης θα γίνουν  $5 * 5 * 9 = 225$  προσομοιώσεις, αφού τα παραπάνω μεγέθη θα συνδυασθούν με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.

### Αποτελέσματα Γείωσης Α

Τα αποτελέσματα από τις 225 προσομοιώσεις που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ ειδικών αντιστάσεων των 2 στρωμάτων και βάθους του πρώτου στρώματος (δηλαδή όλους τους διαφορετικούς τύπους εδαφών που εξετάζουμε) για τη γείωση τύπου Α παρουσιάζονται στον πίνακα 4-1.

*Πίνακας 4-2: Γείωση Α: Αποτελέσματα για την αντίσταση γείωσης για τους δυνατούς συνδυασμούς ειδικών αντιστάσεων του εδάφους*

<b>Ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος <math>\rho_1</math> (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	<b>Ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος <math>\rho_2</math> (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	<b>Βάθος πρώτου στρώματος <math>h</math> (m)</b>	<b>Αντίσταση γείωσης R (<math>\Omega</math>)</b>
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 Β

Τα αποτελέσματα από τις 225 προσομοιώσεις που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ ειδικών αντιστάσεων των 2 στρωμάτων και βάθους του πρώτου στρώματος

(δηλαδή όλους τους διαφορετικούς τύπους εδαφών που εξετάζουμε) για τη γείωση τύπου Β παρουσιάζονται στον πίνακα 4-2.

Πίνακας 4-3: Γείωση Β: Αποτελέσματα για την αντίσταση γείωσης για τους δυνατούς συνδυασμούς ειδικών αντιστάσεων του εδάφους

Ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος $\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	Ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος $\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	Βάθος πρώτου στρώματος $h$ (m)	Αντίσταση γείωσης R ( $\Omega$ )
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 Γ

Τα αποτελέσματα από τις 225 προσομοιώσεις που αντικατοπτρίζουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ ειδικών αντιστάσεων των 2 στρωμάτων και βάθους του πρώτου στρώματος (δηλαδή όλους τους διαφορετικούς τύπους εδαφών που εξετάζουμε) για τη γείωση τύπου Γ παρουσιάζονται στον πίνακα 4-3.

*Πίνακας 4-4: Γείωση Γ: Αποτελέσματα για την αντίσταση γείωσης για τους δυνατούς συνδυασμούς ειδικών αντιστάσεων του εδάφους*

<b>Ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος <math>\rho_1</math> (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	<b>Ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος <math>\rho_2</math> (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>	<b>Βάθος πρώτου στρώματος <math>h</math> (m)</b>	<b>Αντίσταση γείωσης R (<math>\Omega</math>)</b>
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



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

#### 5.1 Εισαγωγή

Στην μονοστρωματική περίπτωση εδάφους, τα πράγματα είναι σχετικά απλά για εμάς. Θα πρέπει να προσαρμόσουμε τις μετρήσεις σε μία απλή εξίσωση αναλογίας της μορφής  $R_{\gamma} = K * \rho$  όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση του εδάφους. Η διστρωματική περίπτωση όμως παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες όπως εξηγείται παρακάτω.

Έχοντας πλέον τα δεδομένα της προσομοίωσης στα χέρια μας, θέλουμε να επιχειρήσουμε τη σύνδεση των δεδομένων μεταξύ τους ώστε να προκύψουν εξισώσεις της μορφής  $R_{\gamma_{\text{είωσης}}} = f(\rho_1, \rho_2, h)$ . Η εύρεση μίας τέτοιας εξίσωσης έχει προφανώς τεράστια οφέλη, αφού ο μελετητής της εγκατάστασης των ανεμογεννητριών θα μπορεί εύκολα και γρήγορα να υπολογίζει την αντίσταση γείωσης της εγκατάστασης, για οποιαδήποτε τιμή της ειδικής αντίστασης των δύο στρωμάτων του διστρωματικού εδάφους και για οποιαδήποτε τιμή βάθους.

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι σχέσεις της μορφής  $R_{\gamma_{\text{είωσης}}} = f(\rho_1, \rho_2, h)$  αναπαριστούν συναρτήσεις 3 ανεξάρτητων μεταβλητών, συνεπώς δεν μπορεί να υπάρξει γραφική αναπαράσταση. Έτσι, το έργο της εύρεσης της παραπάνω σχέσης καθίσταται ακόμη πιο δύσκολο. Επιπλέον, εμείς θα θέλαμε να βρούμε ένα μοντέλο το οποίο να ισχύει για όλες τις περιπτώσεις γειώσεων (Γείωση τύπου Α, Β, Γ) που μελετήσαμε, και στο οποίο θα αλλάζουν μόνο οι σταθεροί συντελεστές. Τέλος, παρατηρώντας τα δεδομένα και τις συσχετίσεις μεταξύ τους μπορεί να δει κανείς ότι η σχέση που ψάχνουμε δεν θα είναι γραμμική. Συμπερασματικά, το έργο της εύρεσης της ζητούμενης εξίσωσης είναι αρκετά δύσκολο.

Όπως έχουμε γράψει και στο κεφάλαιο 3, για να γίνει προσαρμογή (ανάλυση παλινδρόμησης) σε μη γραμμικά μοντέλα των οποίων δεν μπορούμε καν να γνωρίζουμε την εξίσωση εκ των προτέρων θα χρειασθεί αρκετή έμπνευση, πολλή παρατηρητικότητα και αρκετές δοκιμές.

Αρχικά, θα πρέπει να μειωθούν οι μεταβλητές της σχέσης  $R_{\gamma_{\text{είωσης}}} = f(\rho_1, \rho_2, h)$  από 3 σε 2. Το όφελος από αυτή την αλλαγή είναι προφανές. Τώρα θα μπορούμε να έχουμε γραφική απεικόνιση των μετρήσεων πράγμα που μας διευκολύνει τα μέγιστα στο να μαντέψουμε ποια μπορεί να είναι η συσχέτιση μεταξύ τους. Ένας τρόπος να συμβεί αυτό είναι για παράδειγμα να ορίσουμε ένα συντελεστή  $K$  τέτοιο 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 γείωσης  $R_{\gamma_{\text{είωσης}}}$  από τις ειδικές αντιστάσεις. Οπότε, αν χρησιμοποιήσουμε αυτόν τον συντελεστή θα πρέπει πλέον να βρούμε μια σχέση της μορφής  $R_{\gamma_{\text{είωσης}}} = g(K, h)$ . Το τελευταίο είναι σαφώς πιο εύκολο αφού στις 2 ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούμε να έχουμε γραφική απεικόνιση.

Μία άλλη μεγάλη δυσκολία του εγχειρήματος είναι ο μεγάλος όγκος των δεδομένων. Οι 225 μετρήσεις καθιστούν δύσκολη την προσαρμογή καθώς πρέπει να βρεθεί επιφάνεια που θα τις ικανοποιεί όλες. Θα ήταν λοιπόν χρήσιμο, με τους μετασχηματισμούς που κάνουμε, να μπορέσουμε να «μειώσουμε» τεχνητά το πλήθος των μετρήσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσεκτικής παρατήρησης των μετρήσεων. Για παράδειγμα βλέπουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις αν  $\rho'_1 = 10\rho_1$  και  $\rho'_2 = 10\rho_2$  τότε  $R'_{\gammaείωσης} = 10R_{\gammaείωσης}$ . Επιπλέον, μπορούμε να παρατηρήσουμε εύκολα ότι ο συνδυασμός τιμών  $\rho'_1, \rho'_2$  και ο συνδυασμών  $\rho_1$  και  $\rho_2$  έχουν ακριβώς τον ίδιο συντελεστή  $K$ . Οπότε ίσως να έχουμε κάνει ένα σωστό βήμα προς τη θετική κατεύθυνση.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να ειπωθεί για ακόμη μία φορά το εξής: Δεν υπάρχει συγκεκριμένος αλγόριθμος για την αντιμετώπιση των περιπτώσεων αυτών, που είναι μη γραμμικές. Η αντιμετώπιση της εύρεσης 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. Συνεπώς 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:

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

όπου  $a, b, c, d, e$  σταθερές.

Σημείωση: Οι δοκιμές αυτές περιελάμβαναν και την διεξαγωγή πολλαπλών αναλύσεων παλινδρόμησης σε μία μεταβλητή (δηλαδή για σταθερό  $h$ ) με σκοπό να δούμε πως μεταβάλλεται η εξίσωση προσαρμογής ανάλογα με τα διαφορετικά  $h$ , με απώτερο σκοπό να βρούμε πως το  $h$  θα «μπει» στη σχέση των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών.

Όμως η προσαρμογή όσο καλή και αν είναι, δεν μπορεί ποτέ να ικανοποιήσει στο 100% όλα τα σημεία. Το πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι το εξής. Εμείς ψάχνουμε 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

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

Η συνάρτηση  $M(K, h)$  περιέχει για κάθε σημείο της το σφάλμα της προσαρμογής. Εμείς, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την  $M(K, h)$  με το  $\rho_1$  για να πάρουμε την τιμή της  $R_{\gammaείωσης}$ . Όμως μαζί με την τιμή πολλαπλασιάζεται και το σφάλμα. Συμπερασματικά, όσο ανεβαίνει η τιμή του  $\rho_1$ ,

τόσο χειρότερη γίνεται η πρόβλεψη της  $R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}$  από την εξίσωση, με αποτέλεσμα η εξίσωση να αποτυγχάνει για μεγάλες τιμές του  $\rho_1$ .

Οπότε η δοκιμή  $RR = \frac{R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}}{\rho_1}$  απέτυχε. Όμως ήταν πολύ χρήσιμη, διότι για πρώτη φορά μπορέσαμε να δημιουργήσουμε μία σχέση μεταξύ των δεδομένων. Αν παρατηρήσουμε τις μονάδες του κλάσματος  $\frac{R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}}{\rho_1}$  παρατηρούμε ότι είναι  $m^{-1}$ . Αυτό έδωσε την ιδέα της δοκιμής άλλων σχημάτων με τις ίδιες μονάδες όπως  $\frac{R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}}{\rho_2}$ ,  $\frac{R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}}{\rho_1} + \frac{R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}}{\rho_2}$  κλπ. Παρατηρήσαμε 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  $m^{-1}$ . Το επόμενο στοίχημα ήταν να βρεθεί ένα  $RR$  (το οποίο φυσικά να έχει μονάδες  $m^{-1}$ ) αλλά το οποίο να μην έχει τις αρνητικές πολλαπλασιαστικές ιδιότητες του  $\frac{R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}}{\rho_1}$ . Ένα τέτοιο  $RR$  βρέθηκε και είναι το ακόλουθο:

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

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του συντελεστή, όπως θα φανεί αναλυτικά και τους πίνακες με τα αποτελέσματα, είναι ότι η τιμή

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

Με την οποία θα πολλαπλασιασθεί η  $M(K, h)$  ώστε να δώσει την τιμή της  $R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma}$  είναι πρακτικά η ίδια ανεξάρτητα από τα  $\rho_1, \rho_2$ . Επιπλέον, στους πίνακες μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι τιμές που έχουν το ίδιο  $K$  έχουν και τον ίδιο  $100 * R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma} * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right)$ . Συνεπώς έχουμε πετύχει και το στόχο της μείωσης του πλήθους των δεδομένων που τα προσαρμοσθούν. Το μόνο που μένει τώρα είναι να βρεθεί ο τύπος της επιφάνειας που συνδέει τα μεγέθη.

Ανακεφαλαιώνοντας, λοιπόν, ψάχνουμε μία σχέση της μορφής:

$$RR = M(K, h) \tag{5.1}$$

όπου

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \tag{5.2}$$

Και

$$RR = 100 * R_{\gamma\epsilon\iota\omega\sigma\eta\varsigma} * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} \right) \tag{5.3}$$

Μετά από έρευνα διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν δύο γενικοί τύποι  $M(K, h)$  που μπορούν να ικανοποιήσουν τα δεδομένα και για τις 3 περιπτώσεις γείωσης. Αυτοί είναι οι εξής:

$$M(K, h) = a + b * K^{c*h^{d+e}} \text{ (απλό εκθετικό μοντέλο)} \quad (5.4)$$

$$M(K, h) = a + b * K^{c*h^{d+e}} + 0,1 * K^{q*h^{n+m}} \text{ (μοντέλο αθροίσματος εκθετικών)} \quad (5.5)$$

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

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, το απλό εκθετικό μοντέλο είναι απλούστερο στην εφαρμογή αλλά έχει μικρότερη ακρίβεια σε αντίθεση με το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών που έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, άρα μεγαλύτερη δυσκολία στην προσαρμογή, αλλά και μεγαλύτερη ακρίβεια.

Για την προσαρμογή των επιφανειών στα δεδομένα θα χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή sftool του λογισμικού Matlab.

Όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 3, σημαντικό ρόλο στην μη γραμμική παλινδρομική ανάλυση παίζουν οι αρχικές τιμές που βάζουμε στις σταθερές του μοντέλου που θέλουμε να προσαρμόσουμε. Όπως έχουμε πει δεν υπάρχει κάποιος αλγοριθμικός τρόπος εύρεσης των αρχικών τιμών, οπότε τις τοποθετούμε βάσει εμπειρίας και παρατήρησης των μετρήσεων καθώς και κάνοντας δοκιμές.

## 5.2 Μονοστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή σε εξίσωση

Όπως ειπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η αντίσταση γείωσης σε περίπτωση μονοστρωματικού εδάφους είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Δηλαδή και για τους τρεις τύπους αντίστασης γείωσης θα πρέπει να ικανοποιείται μία σχέση της μορφής:

$$R_{\gamma} = K * \rho \quad (5.6)$$

όπου το  $K$  θα προσαρμόζεται σύμφωνα με τις μετρήσεις ανάλογα με τον τύπο της γείωσης. Επειδή υπάρχει απόλυτη σχέση αναλογίας μπορούμε να γράψουμε ότι:

- Γείωση Α:  $K_A = \frac{23,75145}{1000}$
- Γείωση Β:  $K_B = \frac{13,16094}{1000}$
- Γείωση Γ:  $K_{\Gamma} = \frac{16,0465}{1000}$

Οπότε οι εξισώσεις ανάλογα με τον τύπο της γείωσης μπορούν να γραφτούν ως εξής:

- Γείωση Α

$$R_{\gamma} = \frac{23,75145}{1000} * \rho \quad (5.7)$$

- Γείωση Β

$$R_{\gamma} = \frac{13,16094}{1000} * \rho \quad (5.8)$$

- Γείωση Γ

$$R_{\gamma} = \frac{16,0465}{1000} * \rho \quad (5.9)$$

### 5.3 Διστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή στην εξίσωση της γείωσης τύπου Α

Α) Προσαρμογή με το απλό εκθετικό μοντέλο

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

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

όπου

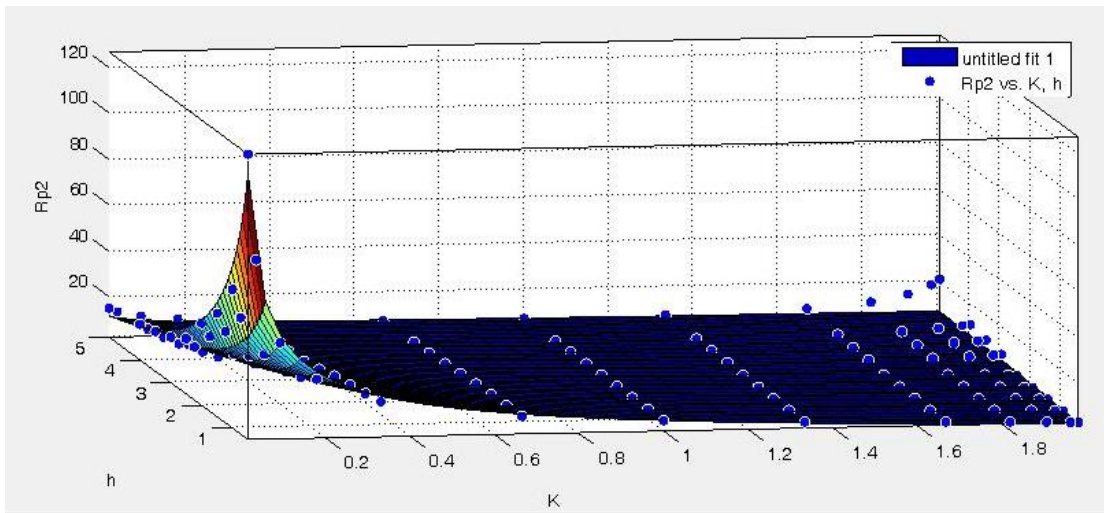
$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

$$RR = 100 * R_{\gamma_{\text{γείωσης}}} * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)$$

στις μετρήσεις για τη γείωση τύπου Α (πίνακας 4-1).

Η προσαρμογή της επιφάνειας στα δεδομένα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.1: Προσαρμογή της επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b * K^c * h^d + e$  στα πειραματικά δεδομένα για τη γείωση τύπου A

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$a = -10,65$$

$$b = 17,9$$

$$c = 0,7092$$

$$d = 0,2398$$

$$e = -1,103$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$SSE = 185,7$$

$$R^2 = 0,9947$$

$$Adjusted R^2 = 0,9946$$

$$RMSE = 0,9186$$

Αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν:

$$a = 0,9554$$

$$b = 0,0813$$

$$c = 0,5239$$

$$d = 0,5790$$

$$e = 0,4705$$



Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο Trust Region Algorithm.

Επίσης έγινε και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου bisquare (μία ειδική περίπτωση των M-εκτιμητών)

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} * \left( -10,65 + 17,9 * \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{0,7092 * h^{0,2398} - 1,103} \right) \quad (5.10)$$

Ο πίνακας δείχνει την ποιότητα της προσαρμογής για κάθε μέτρηση:

Πίνακας 5-1: Σύγκριση της αντίστασης γείωσης του CDEGS με την υπολογιζόμενη από την εξίσωση αντίσταση γείωσης για τη γείωση τύπου A στο απλό εκθετικό μοντέλο προσαρμογής

$\rho_1$	$\rho_2$	h	Αντίσταση γείωσης CDEGS	K	RR	Αντίσταση γείωσης εξίσωσης	Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	% Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	Συντελεστής πολ/μου ΣΠ
100	100	0,5	2,376628	1	7,129884	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	1	2,376677	1	7,130031	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	1,5	2,376663	1	7,129989	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	2	2,376686	1	7,130058	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	2,5	2,376856	1	7,130568	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	3	2,377527	1	7,132581	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	3,5	2,376773	1	7,130319	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	4	2,376201	1	7,128603	2,4166667	0,04	2%	0,980392
100	100	5	2,375847	1	7,127541	2,4166667	0,04	2%	0,980392
500	100	0,5	2,432446	1,666666667	4,0067581	1,9416165	-0,49	-20%	0,988142
500	100	1	2,490274	1,666666667	4,1020132	2,4212066	-0,07	-3%	0,988142
500	100	1,5	2,55733	1,666666667	4,2124687	2,7561145	0,20	8%	0,988142
500	100	2	2,641274	1,666666667	4,3507424	3,022867	0,38	14%	0,988142
500	100	2,5	2,864902	1,666666667	4,7191055	3,248623	0,38	13%	0,988142
500	100	3	3,704263	1,666666667	6,1017124	3,4465349	-0,26	-7%	0,988142
500	100	3,5	4,071213	1,666666667	6,7061574	3,6240861	-0,45	-11%	0,988142
500	100	4	4,443844	1,666666667	7,3199603	3,7859859	-0,66	-15%	0,988142
500	100	5	5,376601	1,666666667	8,8564103	4,0746208	-1,30	-24%	0,988142
1000	100	0,5	2,431161	1,818181818	3,4430777	1,8400448	-0,59	-24%	0,98912
1000	100	1	2,503103	1,818181818	3,544964	2,4679362	-0,04	-1%	0,98912
1000	100	1,5	2,582405	1,818181818	3,6572737	2,9098613	0,33	13%	0,98912
1000	100	2	2,681425	1,818181818	3,7975085	3,2638189	0,58	22%	0,98912
1000	100	2,5	2,965015	1,818181818	4,1991366	3,5647067	0,60	20%	0,98912
1000	100	3	4,482823	1,818181818	6,3486984	3,8294665	-0,65	-15%	0,98912
1000	100	3,5	5,102709	1,818181818	7,2265982	4,0677565	-1,03	-20%	0,98912
1000	100	4	5,782911	1,818181818	8,1899191	4,2856648	-1,50	-26%	0,98912
1000	100	5	7,859934	1,818181818	11,131457	4,6756027	-3,18	-41%	0,98912
5000	100	0,5	2,432451	1,960784314	2,8251005	1,8188687	-0,61	-25%	0,989903
5000	100	1	2,516129	1,960784314	2,922286	2,6525662	0,14	5%	0,989903
5000	100	1,5	2,604064	1,960784314	3,0244155	3,2433511	0,64	25%	0,989903

5000	100	2	2,715943	1,960784314	3,1543542	3,7188296	1,00	37%	0,989903
5000	100	2,5	3,062305	1,960784314	3,5566264	4,124574	1,06	35%	0,989903
5000	100	3	6,286211	1,960784314	7,3009397	4,4827541	-1,80	-29%	0,989903
5000	100	3,5	7,335683	1,960784314	8,5198189	4,8060287	-2,53	-34%	0,989903
5000	100	4	8,795638	1,960784314	10,215442	5,1023889	-3,69	-42%	0,989903
5000	100	5	15,61984	1,960784314	18,141216	5,6344327	-9,99	-64%	0,989903
10000	100	0,5	2,430063	1,98019802	2,6973699	1,8463575	-0,58	-24%	0,990001
10000	100	1	2,517786	1,98019802	2,7947425	2,7275471	0,21	8%	0,990001
10000	100	1,5	2,606871	1,98019802	2,8936268	3,3525411	0,75	29%	0,990001
10000	100	2	2,720483	1,98019802	3,0197361	3,8558694	1,14	42%	0,990001
10000	100	2,5	3,076031	1,98019802	3,4143944	4,2855944	1,21	39%	0,990001
10000	100	3	6,770336	1,98019802	7,515073	4,6651035	-2,11	-31%	0,990001
10000	100	3,5	7,923609	1,98019802	8,795206	5,0077539	-2,92	-37%	0,990001
10000	100	4	9,568646	1,98019802	10,621197	5,3219788	-4,25	-44%	0,990001
10000	100	5	18,31827	1,98019802	20,33328	5,8863325	-12,43	-68%	0,990001
100	500	0,5	10,85263	0,333333333	17,8766	12,406244	1,55	14%	0,988142
100	500	1	10,003	0,333333333	16,477078	10,283713	0,28	3%	0,988142
100	500	1,5	9,289183	0,333333333	15,301269	9,0027639	-0,29	-3%	0,988142
100	500	2	8,581978	0,333333333	14,136351	8,0826126	-0,50	-6%	0,988142
100	500	2,5	7,396016	0,333333333	12,182818	7,3651894	-0,03	0%	0,988142
100	500	3	6,566802	0,333333333	10,816926	6,7780889	0,21	3%	0,988142
100	500	3,5	6,164169	0,333333333	10,153703	6,2819393	0,12	2%	0,988142
100	500	4	5,833379	0,333333333	9,6088212	5,8529034	0,02	0%	0,988142
100	500	5	5,305738	0,333333333	8,7396838	5,1388306	-0,17	-3%	0,988142
500	500	0,5	11,88318	1	7,129908	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	1	11,88342	1	7,130052	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	1,5	11,88335	1	7,13001	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	2	11,88346	1	7,130076	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	2,5	11,88431	1	7,130586	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	3	11,88767	1	7,132602	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	3,5	11,8839	1	7,13034	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	4	11,88104	1	7,128624	12,083333	0,20	2%	0,996016
500	500	5	11,87927	1	7,127562	12,083333	0,20	2%	0,996016
1000	500	0,5	12,0167	1,333333333	5,304428	10,967148	-1,05	-9%	0,997009
1000	500	1	12,19851	1,333333333	5,3846828	12,080915	-0,12	-1%	0,997009
1000	500	1,5	12,39577	1,333333333	5,4717576	12,843168	0,45	4%	0,997009
1000	500	2	12,63157	1,333333333	5,5758448	13,441684	0,81	6%	0,997009
1000	500	2,5	13,19419	1,333333333	5,8241972	13,942494	0,75	6%	0,997009
1000	500	3	14,42275	1,333333333	6,3665099	14,377369	-0,05	0%	0,997009
1000	500	3,5	14,9867	1,333333333	6,6154494	14,764288	-0,22	-1%	0,997009
1000	500	4	15,51327	1,333333333	6,8478887	15,114515	-0,40	-3%	0,997009
1000	500	5	16,59182	1,333333333	7,3239837	15,732961	-0,86	-5%	0,997009
5000	500	0,5	12,1558	1,818181818	3,4430763	9,2002238	-2,96	-24%	0,997805
5000	500	1	12,51551	1,818181818	3,5449626	12,339681	-0,18	-1%	0,997805
5000	500	1,5	12,91202	1,818181818	3,6572722	14,549307	1,64	13%	0,997805
5000	500	2	13,40712	1,818181818	3,7975071	16,319094	2,91	22%	0,997805

5000	500	2,5	14,82507	1,818181818	4,1991352	17,823533	3,00	20%	0,997805
5000	500	3	22,41408	1,818181818	6,3486885	19,147333	-3,27	-15%	0,997805
5000	500	3,5	25,51351	1,818181818	7,2265883	20,338783	-5,17	-20%	0,997805
5000	500	4	28,91452	1,818181818	8,1899092	21,428324	-7,49	-26%	0,997805
5000	500	5	39,29964	1,818181818	11,131448	23,378014	-15,92	-41%	0,997805
10000	500	0,5	12,14988	1,904761905	3,094834	9,0282928	-3,12	-26%	0,997904
10000	500	1	12,55598	1,904761905	3,1982763	12,713443	0,16	1%	0,997904
10000	500	1,5	12,97876	1,904761905	3,3059674	15,318044	2,34	18%	0,997904
10000	500	2	13,51355	1,904761905	3,4421898	17,410406	3,90	29%	0,997904
10000	500	2,5	15,11731	1,904761905	3,8507018	19,19327	4,08	27%	0,997904
10000	500	3	26,64055	1,904761905	6,7859171	20,765185	-5,88	-22%	0,997904
10000	500	3,5	30,92283	1,904761905	7,8767053	22,182388	-8,74	-28%	0,997904
10000	500	4	36,09413	1,904761905	9,1939459	23,480362	-12,61	-35%	0,997904
10000	500	5	55,84581	1,904761905	14,225121	25,807668	-30,04	-54%	0,997904
100	1000	0,5	19,87907	0,181818182	28,153291	22,243374	2,36	12%	0,98912
100	1000	1	17,05759	0,181818182	24,157433	17,212907	0,16	1%	0,98912
100	1000	1,5	15,09995	0,181818182	21,384968	14,340419	-0,76	-5%	0,98912
100	1000	2	13,44037	0,181818182	19,034625	12,355967	-1,08	-8%	0,98912
100	1000	2,5	10,7163	0,181818182	15,176722	10,855869	0,14	1%	0,98912
100	1000	3	9,264979	0,181818182	13,121321	9,6597231	0,39	4%	0,98912
100	1000	3,5	8,543186	0,181818182	12,099097	8,671393	0,13	2%	0,98912
100	1000	4	7,962484	0,181818182	11,276691	7,8336719	-0,13	-2%	0,98912
100	1000	5	7,064405	0,181818182	10,004807	6,4748794	-0,59	-8%	0,98912
500	1000	0,5	23,0841	0,666666667	10,189815	25,586259	2,50	11%	0,997009
500	1000	1	22,54169	0,666666667	9,9503834	23,444627	0,90	4%	0,997009
500	1000	1,5	22,00132	0,666666667	9,7118525	22,068074	0,07	0%	0,997009
500	1000	2	21,41368	0,666666667	9,4524557	21,03421	-0,38	-2%	0,997009
500	1000	2,5	20,27261	0,666666667	8,948763	20,199128	-0,07	0%	0,997009
500	1000	3	19,04762	0,666666667	8,4080263	19,495168	0,45	2%	0,997009
500	1000	3,5	18,45294	0,666666667	8,1455218	18,884747	0,43	2%	0,997009
500	1000	4	17,94425	0,666666667	7,9209752	18,344694	0,40	2%	0,997009
500	1000	5	17,08207	0,666666667	7,5403905	17,418889	0,34	2%	0,997009
1000	1000	0,5	23,76635	1	7,129905	24,166667	0,40	2%	0,998004
1000	1000	1	23,76684	1	7,130052	24,166667	0,40	2%	0,998004
1000	1000	1,5	23,7667	1	7,13001	24,166667	0,40	2%	0,998004
1000	1000	2	23,76692	1	7,130076	24,166667	0,40	2%	0,998004
1000	1000	2,5	23,76863	1	7,130589	24,166667	0,40	2%	0,998004
1000	1000	3	23,77533	1	7,132599	24,166667	0,39	2%	0,998004
1000	1000	3,5	23,7678	1	7,13034	24,166667	0,40	2%	0,998004
1000	1000	4	23,76208	1	7,128624	24,166667	0,40	2%	0,998004
1000	1000	5	23,75854	1	7,127562	24,166667	0,41	2%	0,998004
5000	1000	0,5	24,32444	1,666666667	4,0067548	19,416165	-4,91	-20%	0,998801
5000	1000	1	24,90271	1,666666667	4,1020082	24,212066	-0,69	-3%	0,998801
5000	1000	1,5	25,57328	1,666666667	4,2124654	27,561145	1,99	8%	0,998801
5000	1000	2	26,41273	1,666666667	4,3507408	30,22867	3,82	14%	0,998801
5000	1000	2,5	28,649	1,666666667	4,7191022	32,48623	3,84	13%	0,998801

5000	1000	3	37,04258	1,666666667	6,1017041	34,465349	-2,58	-7%	0,998801
5000	1000	3,5	40,71208	1,666666667	6,7061492	36,240861	-4,47	-11%	0,998801
5000	1000	4	44,4384	1,666666667	7,3199537	37,859859	-6,58	-15%	0,998801
5000	1000	5	53,76597	1,666666667	8,8564037	40,746208	-13,02	-24%	0,998801
10000	1000	0,5	24,31159	1,818181818	3,4430749	18,400448	-5,91	-24%	0,998901
10000	1000	1	25,03102	1,818181818	3,5449626	24,679362	-0,35	-1%	0,998901
10000	1000	1,5	25,82403	1,818181818	3,6572708	29,098613	3,27	13%	0,998901
10000	1000	2	26,81424	1,818181818	3,7975071	32,638189	5,82	22%	0,998901
10000	1000	2,5	29,65013	1,818181818	4,1991337	35,647067	6,00	20%	0,998901
10000	1000	3	44,82816	1,818181818	6,3486885	38,294665	-6,53	-15%	0,998901
10000	1000	3,5	51,027	1,818181818	7,2265854	40,677565	-10,35	-20%	0,998901
10000	1000	4	57,82902	1,818181818	8,1899064	42,856648	-14,97	-26%	0,998901
10000	1000	5	78,59927	1,818181818	11,131447	46,756027	-31,84	-41%	0,998901
100	5000	0,5	69,35131	0,039215686	80,546093	69,266303	-0,09	0%	0,989903
100	5000	1	43,5019	0,039215686	50,524036	46,007286	2,51	6%	0,989903
100	5000	1,5	34,17865	0,039215686	39,695814	34,471508	0,29	1%	0,989903
100	5000	2	28,08703	0,039215686	32,620876	27,25344	-0,83	-3%	0,989903
100	5000	2,5	19,86056	0,039215686	23,066479	22,208731	2,35	12%	0,989903
100	5000	3	16,71377	0,039215686	19,411729	18,442219	1,73	10%	0,989903
100	5000	3,5	15,00783	0,039215686	17,430414	15,502667	0,49	3%	0,989903
100	5000	4	13,67629	0,039215686	15,883935	13,134081	-0,54	-4%	0,989903
100	5000	5	11,70284	0,039215686	13,591928	9,533857	-2,17	-19%	0,989903
500	5000	0,5	99,39789	0,181818182	28,15401	111,21687	11,82	12%	0,997805
500	5000	1	85,28993	0,181818182	24,157993	86,064534	0,77	1%	0,997805
500	5000	1,5	75,50137	0,181818182	21,385427	71,702096	-3,80	-5%	0,997805
500	5000	2	67,20319	0,181818182	19,035005	61,779835	-5,42	-8%	0,997805
500	5000	2,5	53,58267	0,181818182	15,177053	54,279343	0,70	1%	0,997805
500	5000	3	46,32588	0,181818182	13,1216	48,298615	1,97	4%	0,997805
500	5000	3,5	42,7168	0,181818182	12,099344	43,356965	0,64	1%	0,997805
500	5000	4	39,81321	0,181818182	11,276915	39,16836	-0,64	-2%	0,997805
500	5000	5	35,32267	0,181818182	10,004989	32,374397	-2,95	-8%	0,997805
1000	5000	0,5	108,5278	0,333333333	17,876847	124,06244	15,53	14%	0,998801
1000	5000	1	100,0313	0,333333333	16,477292	102,83713	2,81	3%	0,998801
1000	5000	1,5	92,89301	0,333333333	15,301463	90,027639	-2,87	-3%	0,998801
1000	5000	2	85,8208	0,333333333	14,136519	80,826126	-4,99	-6%	0,998801
1000	5000	2,5	73,96107	0,333333333	12,182968	73,651894	-0,31	0%	0,998801
1000	5000	3	65,66883	0,333333333	10,817059	67,780889	2,11	3%	0,998801
1000	5000	3,5	61,64246	0,333333333	10,15383	62,819393	1,18	2%	0,998801
1000	5000	4	58,33447	0,333333333	9,6089332	58,529034	0,19	0%	0,998801
1000	5000	5	53,05796	0,333333333	8,7397793	51,388306	-1,67	-3%	0,998801
5000	5000	0,5	118,8317	1	7,129902	120,83333	2,00	2%	0,9996
5000	5000	1	118,8341	1	7,130046	120,83333	2,00	2%	0,9996
5000	5000	1,5	118,8335	1	7,13001	120,83333	2,00	2%	0,9996
5000	5000	2	118,8346	1	7,130076	120,83333	2,00	2%	0,9996
5000	5000	2,5	118,8431	1	7,130586	120,83333	1,99	2%	0,9996
5000	5000	3	118,8766	1	7,132596	120,83333	1,96	2%	0,9996

5000	5000	3,5	118,8389	1	7,130334	120,83333	1,99	2%	0,9996
5000	5000	4	118,8103	1	7,128618	120,83333	2,02	2%	0,9996
5000	5000	5	118,7926	1	7,127556	120,83333	2,04	2%	0,9996
10000	5000	0,5	120,167	1,333333333	5,304428	109,67148	-10,50	-9%	0,9997
10000	5000	1	121,9851	1,333333333	5,3846828	120,80915	-1,18	-1%	0,9997
10000	5000	1,5	123,9576	1,333333333	5,4717532	128,43168	4,47	4%	0,9997
10000	5000	2	126,3156	1,333333333	5,5758403	134,41684	8,10	6%	0,9997
10000	5000	2,5	131,9418	1,333333333	5,8241928	139,42494	7,48	6%	0,9997
10000	5000	3	144,2275	1,333333333	6,3665099	143,77369	-0,45	0%	0,9997
10000	5000	3,5	149,8669	1,333333333	6,615445	147,64288	-2,22	-1%	0,9997
10000	5000	4	155,1326	1,333333333	6,8478843	151,14515	-3,99	-3%	0,9997
10000	5000	5	165,9181	1,333333333	7,3239793	157,32961	-8,59	-5%	0,9997
100	10000	0,5	113,9472	0,01980198	126,48139	106,08909	-7,86	-7%	0,990001
100	10000	1	56,69034	0,01980198	62,926277	65,964405	9,27	16%	0,990001
100	10000	1,5	42,86552	0,01980198	47,580727	47,282134	4,42	10%	0,990001
100	10000	2	34,52735	0,01980198	38,325359	36,098385	1,57	5%	0,990001
100	10000	2,5	24,082	0,01980198	26,73102	28,550917	4,47	19%	0,990001
100	10000	3	20,20838	0,01980198	22,431302	23,078657	2,87	14%	0,990001
100	10000	3,5	18,01749	0,01980198	19,999414	18,915123	0,90	5%	0,990001
100	10000	4	16,31878	0,01980198	18,113846	15,635163	-0,68	-4%	0,990001
100	10000	5	13,81532	0,01980198	15,335005	10,791262	-3,02	-22%	0,990001
500	10000	0,5	174,4896	0,095238095	44,446228	187,19106	12,70	7%	0,997904
500	10000	1	135,2093	0,095238095	34,440697	135,58078	0,37	0%	0,997904
500	10000	1,5	113,443	0,095238095	28,896355	107,80558	-5,64	-5%	0,997904
500	10000	2	97,15293	0,095238095	24,746926	89,400751	-7,75	-8%	0,997904
500	10000	2,5	72,26422	0,095238095	18,40724	75,940243	3,68	5%	0,997904
500	10000	3	61,52252	0,095238095	15,6711	65,500454	3,98	6%	0,997904
500	10000	3,5	55,97263	0,095238095	14,257424	57,079353	1,11	2%	0,997904
500	10000	4	51,57568	0,095238095	13,137427	50,092216	-1,48	-3%	0,997904
500	10000	5	44,92682	0,095238095	11,443821	39,065682	-5,86	-13%	0,997904
1000	10000	0,5	198,7957	0,181818182	28,153999	222,43374	23,64	12%	0,998901
1000	10000	1	170,5798	0,181818182	24,157985	172,12907	1,55	1%	0,998901
1000	10000	1,5	151,0027	0,181818182	21,385422	143,40419	-7,60	-5%	0,998901
1000	10000	2	134,4064	0,181818182	19,035008	123,55967	-10,85	-8%	0,998901
1000	10000	2,5	107,1653	0,181818182	15,177047	108,55869	1,39	1%	0,998901
1000	10000	3	92,65175	0,181818182	13,121598	96,597231	3,95	4%	0,998901
1000	10000	3,5	85,43359	0,181818182	12,099342	86,71393	1,28	1%	0,998901
1000	10000	4	79,6264	0,181818182	11,276912	78,336719	-1,29	-2%	0,998901
1000	10000	5	70,64535	0,181818182	10,004991	64,748794	-5,90	-8%	0,998901
5000	10000	0,5	230,8409	0,666666667	10,18981	255,86259	25,02	11%	0,9997
5000	10000	1	225,4168	0,666666667	9,950379	234,44627	9,03	4%	0,9997
5000	10000	1,5	220,0131	0,666666667	9,7118481	220,68074	0,67	0%	0,9997
5000	10000	2	214,1367	0,666666667	9,4524513	210,3421	-3,79	-2%	0,9997
5000	10000	2,5	202,726	0,666666667	8,9487586	201,99128	-0,73	0%	0,9997
5000	10000	3	190,4761	0,666666667	8,4080218	194,95168	4,48	2%	0,9997
5000	10000	3,5	184,5293	0,666666667	8,1455174	188,84747	4,32	2%	0,9997

5000	10000	4	179,4424	0,666666667	7,9209708	183,44694	4,00	2%	0,9997
5000	10000	5	170,8206	0,666666667	7,5403861	174,18889	3,37	2%	0,9997
10000	10000	0,5	237,6634	1	7,129902	241,66667	4,00	2%	0,9998
10000	10000	1	237,6682	1	7,130046	241,66667	4,00	2%	0,9998
10000	10000	1,5	237,6669	1	7,130007	241,66667	4,00	2%	0,9998
10000	10000	2	237,6691	1	7,130073	241,66667	4,00	2%	0,9998
10000	10000	2,5	237,6861	1	7,130583	241,66667	3,98	2%	0,9998
10000	10000	3	237,7532	1	7,132596	241,66667	3,91	2%	0,9998
10000	10000	3,5	237,6778	1	7,130334	241,66667	3,99	2%	0,9998
10000	10000	4	237,6206	1	7,128618	241,66667	4,05	2%	0,9998
10000	10000	5	237,5852	1	7,127556	241,66667	4,08	2%	0,9998

B) Προσαρμογή με το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$$RR = M(K, h) = a + b * K^{c*h^{d+e}} + 0,1 * K^q * h^{n+m}$$

όπου

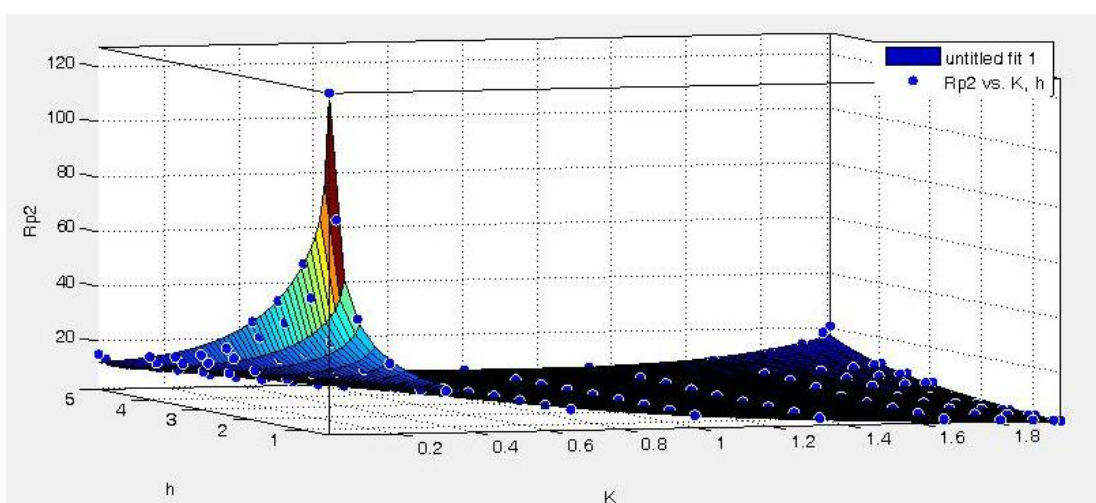
$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

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

στις μετρήσεις για τη γείωση τύπου A (πίνακας 4-1).

Η προσαρμογή της επιφάνειας στα δεδομένα φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.2: Προσαρμογή της επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b * K^{c*h^{d+e}} + 0,1 * K^q * h^{n+m}$  στα πειραματικά δεδομένα για τη γείωση τύπου A

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$a = -13,83$$

$$b = 20,82$$

$$c = 0,365$$

$$d = 0,3452$$

$$e = -0,6973$$

$$q = 5,775$$

$$m = -5,643$$

$$n = 0,4804$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$SSE = 92,8$$

$$R^2 = 0,9973$$

$$Adjusted R^2 = 0,9973$$

$$RMSE = 0,654$$

Αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν:

$$a = 0,9554$$

$$b = 0,0813$$

$$c = 0,5239$$

$$d = 0,5790$$

$$e = 0,4705$$

$$q = 0,9679$$

$$m = 0,6515$$

$$n = 0,1404$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο Trust Region Algorithm.

Επίσης έγινε και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου bisquare (μία ειδική περίπτωση των M-εκτιμητών)

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} * \left( -13,83 + 20,82 * \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{0,365 * h^{0,3452} - 0,6973} + 0,1 * \right) \quad (5.11)$$

$$\rho_1 - \rho_2 \rho_1 + \rho_2 + 15,775 * h^{0,4804} - 5,643$$

Ο πίνακας δείχνει την ποιότητα της προσαρμογής για κάθε μέτρηση:

Πίνακας 5-2: Σύγκριση της αντίστασης γείωσης του CDEGS με την υπολογιζόμενη από την εξίσωση αντίσταση γείωσης για τη γείωση τύπου Α στο προσαρμογής αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$	$\rho_2$	h	Αντίσταση γείωσης CDEGS	K	RR	Αντίσταση γείωσης εξίσωσης	Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	% Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	Συντελεστής πολ/μου ΣΠ
100	100	0,5	2,376628	1	7,129884	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	1	2,376677	1	7,130031	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	1,5	2,376663	1	7,129989	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	2	2,376686	1	7,130058	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	2,5	2,376856	1	7,130568	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	3	2,377527	1	7,132581	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	3,5	2,376773	1	7,130319	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	4	2,376201	1	7,128603	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	5	2,375847	1	7,127541	2,3633333	-0,01	-1%	0,980392
500	100	0,5	2,432446	1,666666667	4,0067581	1,883466	-0,55	-23%	0,988142
500	100	1	2,490274	1,666666667	4,1020132	2,3351648	-0,16	-6%	0,988142
500	100	1,5	2,55733	1,666666667	4,2124687	2,6956993	0,14	5%	0,988142
500	100	2	2,641274	1,666666667	4,3507424	3,0299451	0,39	15%	0,988142
500	100	2,5	2,864902	1,666666667	4,7191055	3,3682986	0,50	18%	0,988142
500	100	3	3,704263	1,666666667	6,1017124	3,732795	0,03	1%	0,988142
500	100	3,5	4,071213	1,666666667	6,7061574	4,1437872	0,07	2%	0,988142
500	100	4	4,443844	1,666666667	7,3199603	4,6226585	0,18	4%	0,988142
500	100	5	5,376601	1,666666667	8,8564103	5,8835724	0,51	9%	0,988142
1000	100	0,5	2,431161	1,818181818	3,4430777	1,7688075	-0,66	-27%	0,98912
1000	100	1	2,503103	1,818181818	3,544964	2,3633355	-0,14	-6%	0,98912
1000	100	1,5	2,582405	1,818181818	3,6572737	2,8491263	0,27	10%	0,98912
1000	100	2	2,681425	1,818181818	3,7975085	3,3182093	0,64	24%	0,98912
1000	100	2,5	2,965015	1,818181818	4,1991366	3,8217927	0,86	29%	0,98912
1000	100	3	4,482823	1,818181818	6,3486984	4,4051962	-0,08	-2%	0,98912
1000	100	3,5	5,102709	1,818181818	7,2265982	5,1179774	0,02	0%	0,98912
1000	100	4	5,782911	1,818181818	8,1899191	6,0192833	0,24	4%	0,98912
1000	100	5	7,859934	1,818181818	11,131457	8,6975082	0,84	11%	0,98912
5000	100	0,5	2,432451	1,960784314	2,8251005	1,7254597	-0,71	-29%	0,989903
5000	100	1	2,516129	1,960784314	2,922286	2,5186013	0,00	0%	0,989903
5000	100	1,5	2,604064	1,960784314	3,0244155	3,1807487	0,58	22%	0,989903



5000	100	2	2,715943	1,960784314	3,1543542	3,8464802	1,13	42%	0,989903
5000	100	2,5	3,062305	1,960784314	3,5566264	4,6049695	1,54	50%	0,989903
5000	100	3	6,286211	1,960784314	7,3009397	5,5492792	-0,74	-12%	0,989903
5000	100	3,5	7,335683	1,960784314	8,5198189	6,7941946	-0,54	-7%	0,989903
5000	100	4	8,795638	1,960784314	10,215442	8,4891634	-0,31	-3%	0,989903
5000	100	5	15,61984	1,960784314	18,141216	14,081813	-1,54	-10%	0,989903
10000	100	0,5	2,430063	1,98019802	2,6973699	1,7475412	-0,68	-28%	0,990001
10000	100	1	2,517786	1,98019802	2,7947425	2,5863887	0,07	3%	0,990001
10000	100	1,5	2,606871	1,98019802	2,8936268	3,2887167	0,68	26%	0,990001
10000	100	2	2,720483	1,98019802	3,0197361	3,9988385	1,28	47%	0,990001
10000	100	2,5	3,076031	1,98019802	3,4143944	4,8146799	1,74	57%	0,990001
10000	100	3	6,770336	1,98019802	7,515073	5,8405268	-0,93	-14%	0,990001
10000	100	3,5	7,923609	1,98019802	8,795206	7,2068309	-0,72	-9%	0,990001
10000	100	4	9,568646	1,98019802	10,621197	9,0851826	-0,48	-5%	0,990001
10000	100	5	18,31827	1,98019802	20,33328	15,36704	-2,95	-16%	0,990001
100	500	0,5	10,85263	0,333333333	17,8766	11,751374	0,90	8%	0,988142
100	500	1	10,003	0,333333333	16,477078	9,8651856	-0,14	-1%	0,988142
100	500	1,5	9,289183	0,333333333	15,301269	8,7615279	-0,53	-6%	0,988142
100	500	2	8,581978	0,333333333	14,136351	7,9463612	-0,64	-7%	0,988142
100	500	2,5	7,396016	0,333333333	12,182818	7,2906486	-0,11	-1%	0,988142
100	500	3	6,566802	0,333333333	10,816926	6,7390306	0,17	3%	0,988142
100	500	3,5	6,164169	0,333333333	10,153703	6,2617009	0,10	2%	0,988142
100	500	4	5,833379	0,333333333	9,6088212	5,8404424	0,01	0%	0,988142
100	500	5	5,305738	0,333333333	8,7396838	5,1214721	-0,18	-3%	0,988142
500	500	0,5	11,88318	1	7,129908	11,816667	-0,07	-1%	0,996016
500	500	1	11,88342	1	7,130052	11,816667	-0,07	-1%	0,996016
500	500	1,5	11,88335	1	7,13001	11,816667	-0,07	-1%	0,996016
500	500	2	11,88346	1	7,130076	11,816667	-0,07	-1%	0,996016
500	500	2,5	11,88431	1	7,130586	11,816667	-0,07	-1%	0,996016
500	500	3	11,88767	1	7,132602	11,816667	-0,07	-1%	0,996016
500	500	3,5	11,8839	1	7,13034	11,816667	-0,07	-1%	0,996016
500	500	4	11,88104	1	7,128624	11,816667	-0,06	-1%	0,996016
500	500	5	11,87927	1	7,127562	11,816667	-0,06	-1%	0,996016
1000	500	0,5	12,0167	1,333333333	5,304428	10,734902	-1,28	-11%	0,997009
1000	500	1	12,19851	1,333333333	5,3846828	11,770432	-0,43	-4%	0,997009
1000	500	1,5	12,39577	1,333333333	5,4717576	12,553063	0,16	1%	0,997009
1000	500	2	12,63157	1,333333333	5,5758448	13,222981	0,59	5%	0,997009
1000	500	2,5	13,19419	1,333333333	5,8241972	13,83258	0,64	5%	0,997009
1000	500	3	14,42275	1,333333333	6,3665099	14,40879	-0,01	0%	0,997009
1000	500	3,5	14,9867	1,333333333	6,6154494	14,968157	-0,02	0%	0,997009
1000	500	4	15,51327	1,333333333	6,8478887	15,522172	0,01	0%	0,997009
1000	500	5	16,59182	1,333333333	7,3239837	16,647597	0,06	0%	0,997009
5000	500	0,5	12,1558	1,818181818	3,4430763	8,8440377	-3,31	-27%	0,997805
5000	500	1	12,51551	1,818181818	3,5449626	11,816677	-0,70	-6%	0,997805
5000	500	1,5	12,91202	1,818181818	3,6572722	14,245631	1,33	10%	0,997805
5000	500	2	13,40712	1,818181818	3,7975071	16,591046	3,18	24%	0,997805

5000	500	2,5	14,82507	1,818181818	4,1991352	19,108963	4,28	29%	0,997805
5000	500	3	22,41408	1,818181818	6,3486885	22,025981	-0,39	-2%	0,997805
5000	500	3,5	25,51351	1,818181818	7,2265883	25,589887	0,08	0%	0,997805
5000	500	4	28,91452	1,818181818	8,1899092	30,096416	1,18	4%	0,997805
5000	500	5	39,29964	1,818181818	11,131448	43,487541	4,19	11%	0,997805
10000	500	0,5	12,14988	1,904761905	3,094834	8,6151593	-3,53	-29%	0,997904
10000	500	1	12,55598	1,904761905	3,1982763	12,114637	-0,44	-4%	0,997904
10000	500	1,5	12,97876	1,904761905	3,3059674	15,011779	2,03	16%	0,997904
10000	500	2	13,51355	1,904761905	3,4421898	17,878109	4,36	32%	0,997904
10000	500	2,5	15,11731	1,904761905	3,8507018	21,067114	5,95	39%	0,997904
10000	500	3	26,64055	1,904761905	6,7859171	24,925719	-1,71	-6%	0,997904
10000	500	3,5	30,92283	1,904761905	7,8767053	29,863629	-1,06	-3%	0,997904
10000	500	4	36,09413	1,904761905	9,1939459	36,397764	0,30	1%	0,997904
10000	500	5	55,84581	1,904761905	14,225121	57,113093	1,27	2%	0,997904
100	1000	0,5	19,87907	0,181818182	28,153291	20,72268	0,84	4%	0,98912
100	1000	1	17,05759	0,181818182	24,157433	16,195201	-0,86	-5%	0,98912
100	1000	1,5	15,09995	0,181818182	21,384968	13,833785	-1,27	-8%	0,98912
100	1000	2	13,44037	0,181818182	19,034625	12,129467	-1,31	-10%	0,98912
100	1000	2,5	10,7163	0,181818182	15,176722	10,785776	0,07	1%	0,98912
100	1000	3	9,264979	0,181818182	13,121321	9,676895	0,41	4%	0,98912
100	1000	3,5	8,543186	0,181818182	12,099097	8,7343589	0,19	2%	0,98912
100	1000	4	7,962484	0,181818182	11,276691	7,9161707	-0,05	-1%	0,98912
100	1000	5	7,064405	0,181818182	10,004807	6,5501647	-0,51	-7%	0,98912
500	1000	0,5	23,0841	0,666666667	10,189815	24,78166	1,70	7%	0,997009
500	1000	1	22,54169	0,666666667	9,9503834	22,852894	0,31	1%	0,997009
500	1000	1,5	22,00132	0,666666667	9,7118525	21,581238	-0,42	-2%	0,997009
500	1000	2	21,41368	0,666666667	9,4524557	20,606782	-0,81	-4%	0,997009
500	1000	2,5	20,27261	0,666666667	8,948763	19,805738	-0,47	-2%	0,997009
500	1000	3	19,04762	0,666666667	8,4080263	19,119767	0,07	0%	0,997009
500	1000	3,5	18,45294	0,666666667	8,1455218	18,516424	0,06	0%	0,997009
500	1000	4	17,94425	0,666666667	7,9209752	17,975676	0,03	0%	0,997009
500	1000	5	17,08207	0,666666667	7,5403905	17,032737	-0,05	0%	0,997009
1000	1000	0,5	23,76635	1	7,129905	23,633333	-0,13	-1%	0,998004
1000	1000	1	23,76684	1	7,130052	23,633333	-0,13	-1%	0,998004
1000	1000	1,5	23,7667	1	7,13001	23,633333	-0,13	-1%	0,998004
1000	1000	2	23,76692	1	7,130076	23,633333	-0,13	-1%	0,998004
1000	1000	2,5	23,76863	1	7,130589	23,633333	-0,14	-1%	0,998004
1000	1000	3	23,77533	1	7,132599	23,633333	-0,14	-1%	0,998004
1000	1000	3,5	23,7678	1	7,13034	23,633333	-0,13	-1%	0,998004
1000	1000	4	23,76208	1	7,128624	23,633333	-0,13	-1%	0,998004
1000	1000	5	23,75854	1	7,127562	23,633333	-0,13	-1%	0,998004
5000	1000	0,5	24,32444	1,666666667	4,0067548	18,83466	-5,49	-23%	0,998801
5000	1000	1	24,90271	1,666666667	4,1020082	23,351648	-1,55	-6%	0,998801
5000	1000	1,5	25,57328	1,666666667	4,2124654	26,956993	1,38	5%	0,998801
5000	1000	2	26,41273	1,666666667	4,3507408	30,299451	3,89	15%	0,998801
5000	1000	2,5	28,649	1,666666667	4,7191022	33,682986	5,03	18%	0,998801

5000	1000	3	37,04258	1,666666667	6,1017041	37,32795	0,29	1%	0,998801
5000	1000	3,5	40,71208	1,666666667	6,7061492	41,437872	0,73	2%	0,998801
5000	1000	4	44,4384	1,666666667	7,3199537	46,226585	1,79	4%	0,998801
5000	1000	5	53,76597	1,666666667	8,8564037	58,835724	5,07	9%	0,998801
10000	1000	0,5	24,31159	1,818181818	3,4430749	17,688075	-6,62	-27%	0,998901
10000	1000	1	25,03102	1,818181818	3,5449626	23,633355	-1,40	-6%	0,998901
10000	1000	1,5	25,82403	1,818181818	3,6572708	28,491263	2,67	10%	0,998901
10000	1000	2	26,81424	1,818181818	3,7975071	33,182093	6,37	24%	0,998901
10000	1000	2,5	29,65013	1,818181818	4,1991337	38,217927	8,57	29%	0,998901
10000	1000	3	44,82816	1,818181818	6,3486885	44,051962	-0,78	-2%	0,998901
10000	1000	3,5	51,027	1,818181818	7,2265854	51,179774	0,15	0%	0,998901
10000	1000	4	57,82902	1,818181818	8,1899064	60,192833	2,36	4%	0,998901
10000	1000	5	78,59927	1,818181818	11,131447	86,975082	8,38	11%	0,998901
100	5000	0,5	69,35131	0,039215686	80,546093	66,93854	-2,41	-3%	0,989903
100	5000	1	43,5019	0,039215686	50,524036	40,736032	-2,77	-6%	0,989903
100	5000	1,5	34,17865	0,039215686	39,695814	32,123856	-2,05	-6%	0,989903
100	5000	2	28,08703	0,039215686	32,620876	26,29559	-1,79	-6%	0,989903
100	5000	2,5	19,86056	0,039215686	23,066479	21,96725	2,11	11%	0,989903
100	5000	3	16,71377	0,039215686	19,411729	18,57975	1,87	11%	0,989903
100	5000	3,5	15,00783	0,039215686	17,430414	15,833309	0,83	6%	0,989903
100	5000	4	13,67629	0,039215686	15,883935	13,54891	-0,13	-1%	0,989903
100	5000	5	11,70284	0,039215686	13,591928	9,9428199	-1,76	-15%	0,989903
500	5000	0,5	99,39789	0,181818182	28,15401	103,6134	4,22	4%	0,997805
500	5000	1	85,28993	0,181818182	24,157993	80,976005	-4,31	-5%	0,997805
500	5000	1,5	75,50137	0,181818182	21,385427	69,168925	-6,33	-8%	0,997805
500	5000	2	67,20319	0,181818182	19,035005	60,647334	-6,56	-10%	0,997805
500	5000	2,5	53,58267	0,181818182	15,177053	53,928881	0,35	1%	0,997805
500	5000	3	46,32588	0,181818182	13,1216	48,384475	2,06	4%	0,997805
500	5000	3,5	42,7168	0,181818182	12,099344	43,671795	0,95	2%	0,997805
500	5000	4	39,81321	0,181818182	11,276915	39,580853	-0,23	-1%	0,997805
500	5000	5	35,32267	0,181818182	10,004989	32,750823	-2,57	-7%	0,997805
1000	5000	0,5	108,5278	0,333333333	17,876847	117,51374	8,99	8%	0,998801
1000	5000	1	100,0313	0,333333333	16,477292	98,651856	-1,38	-1%	0,998801
1000	5000	1,5	92,89301	0,333333333	15,301463	87,615279	-5,28	-6%	0,998801
1000	5000	2	85,8208	0,333333333	14,136519	79,463612	-6,36	-7%	0,998801
1000	5000	2,5	73,96107	0,333333333	12,182968	72,906486	-1,05	-1%	0,998801
1000	5000	3	65,66883	0,333333333	10,817059	67,390306	1,72	3%	0,998801
1000	5000	3,5	61,64246	0,333333333	10,15383	62,617009	0,97	2%	0,998801
1000	5000	4	58,33447	0,333333333	9,6089332	58,404424	0,07	0%	0,998801
1000	5000	5	53,05796	0,333333333	8,7397793	51,214721	-1,84	-3%	0,998801
5000	5000	0,5	118,8317	1	7,129902	118,16667	-0,67	-1%	0,9996
5000	5000	1	118,8341	1	7,130046	118,16667	-0,67	-1%	0,9996
5000	5000	1,5	118,8335	1	7,13001	118,16667	-0,67	-1%	0,9996
5000	5000	2	118,8346	1	7,130076	118,16667	-0,67	-1%	0,9996
5000	5000	2,5	118,8431	1	7,130586	118,16667	-0,68	-1%	0,9996
5000	5000	3	118,8766	1	7,132596	118,16667	-0,71	-1%	0,9996

5000	5000	3,5	118,8389	1	7,130334	118,16667	-0,67	-1%	0,9996
5000	5000	4	118,8103	1	7,128618	118,16667	-0,64	-1%	0,9996
5000	5000	5	118,7926	1	7,127556	118,16667	-0,63	-1%	0,9996
10000	5000	0,5	120,167	1,333333333	5,304428	107,34902	-12,82	-11%	0,9997
10000	5000	1	121,9851	1,333333333	5,3846828	117,70432	-4,28	-4%	0,9997
10000	5000	1,5	123,9576	1,333333333	5,4717532	125,53063	1,57	1%	0,9997
10000	5000	2	126,3156	1,333333333	5,5758403	132,22981	5,91	5%	0,9997
10000	5000	2,5	131,9418	1,333333333	5,8241928	138,3258	6,38	5%	0,9997
10000	5000	3	144,2275	1,333333333	6,3665099	144,0879	-0,14	0%	0,9997
10000	5000	3,5	149,8669	1,333333333	6,615445	149,68157	-0,19	0%	0,9997
10000	5000	4	155,1326	1,333333333	6,8478843	155,22172	0,09	0%	0,9997
10000	5000	5	165,9181	1,333333333	7,3239793	166,47597	0,56	0%	0,9997
100	10000	0,5	113,9472	0,01980198	126,48139	113,9709	0,02	0%	0,990001
100	10000	1	56,69034	0,01980198	62,926277	56,643873	-0,05	0%	0,990001
100	10000	1,5	42,86552	0,01980198	47,580727	43,22874	0,36	1%	0,990001
100	10000	2	34,52735	0,01980198	38,325359	34,432548	-0,09	0%	0,990001
100	10000	2,5	24,082	0,01980198	26,73102	28,078281	4,00	17%	0,990001
100	10000	3	20,20838	0,01980198	22,431302	23,222467	3,01	15%	0,990001
100	10000	3,5	18,01749	0,01980198	19,999414	19,367837	1,35	7%	0,990001
100	10000	4	16,31878	0,01980198	18,113846	16,222192	-0,10	-1%	0,990001
100	10000	5	13,81532	0,01980198	15,335005	11,378532	-2,44	-18%	0,990001
500	10000	0,5	174,4896	0,095238095	44,446228	173,50227	-0,99	-1%	0,997904
500	10000	1	135,2093	0,095238095	34,440697	124,54186	-10,67	-8%	0,997904
500	10000	1,5	113,443	0,095238095	28,896355	102,66996	-10,77	-9%	0,997904
500	10000	2	97,15293	0,095238095	24,746926	87,284943	-9,87	-10%	0,997904
500	10000	2,5	72,26422	0,095238095	18,40724	75,447981	3,18	4%	0,997904
500	10000	3	61,52252	0,095238095	15,6711	65,89334	4,37	7%	0,997904
500	10000	3,5	55,97263	0,095238095	14,257424	57,931685	1,96	4%	0,997904
500	10000	4	51,57568	0,095238095	13,137427	51,143617	-0,43	-1%	0,997904
500	10000	5	44,92682	0,095238095	11,443821	40,075495	-4,85	-11%	0,997904
1000	10000	0,5	198,7957	0,181818182	28,153999	207,2268	8,43	4%	0,998901
1000	10000	1	170,5798	0,181818182	24,157985	161,95201	-8,63	-5%	0,998901
1000	10000	1,5	151,0027	0,181818182	21,385422	138,33785	-12,66	-8%	0,998901
1000	10000	2	134,4064	0,181818182	19,035008	121,29467	-13,11	-10%	0,998901
1000	10000	2,5	107,1653	0,181818182	15,177047	107,85776	0,69	1%	0,998901
1000	10000	3	92,65175	0,181818182	13,121598	96,76895	4,12	4%	0,998901
1000	10000	3,5	85,43359	0,181818182	12,099342	87,343589	1,91	2%	0,998901
1000	10000	4	79,6264	0,181818182	11,276912	79,161707	-0,46	-1%	0,998901
1000	10000	5	70,64535	0,181818182	10,004991	65,501647	-5,14	-7%	0,998901
5000	10000	0,5	230,8409	0,666666667	10,18981	247,8166	16,98	7%	0,9997
5000	10000	1	225,4168	0,666666667	9,950379	228,52894	3,11	1%	0,9997
5000	10000	1,5	220,0131	0,666666667	9,7118481	215,81238	-4,20	-2%	0,9997
5000	10000	2	214,1367	0,666666667	9,4524513	206,06782	-8,07	-4%	0,9997
5000	10000	2,5	202,726	0,666666667	8,9487586	198,05738	-4,67	-2%	0,9997
5000	10000	3	190,4761	0,666666667	8,4080218	191,19767	0,72	0%	0,9997
5000	10000	3,5	184,5293	0,666666667	8,1455174	185,16424	0,63	0%	0,9997

5000	10000	4	179,4424	0,666666667	7,9209708	179,75676	0,31	0%	0,9997
5000	10000	5	170,8206	0,666666667	7,5403861	170,32737	-0,49	0%	0,9997
10000	10000	0,5	237,6634	1	7,129902	236,33333	-1,33	-1%	0,9998
10000	10000	1	237,6682	1	7,130046	236,33333	-1,33	-1%	0,9998
10000	10000	1,5	237,6669	1	7,130007	236,33333	-1,33	-1%	0,9998
10000	10000	2	237,6691	1	7,130073	236,33333	-1,34	-1%	0,9998
10000	10000	2,5	237,6861	1	7,130583	236,33333	-1,35	-1%	0,9998
10000	10000	3	237,7532	1	7,132596	236,33333	-1,42	-1%	0,9998
10000	10000	3,5	237,6778	1	7,130334	236,33333	-1,34	-1%	0,9998
10000	10000	4	237,6206	1	7,128618	236,33333	-1,29	-1%	0,9998
10000	10000	5	237,5852	1	7,127556	236,33333	-1,25	-1%	0,9998

## 5.4 Διστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή στην εξίσωση της γείωσης τύπου B

Α) Προσαρμογή με το απλό εκθετικό μοντέλο

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

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

όπου

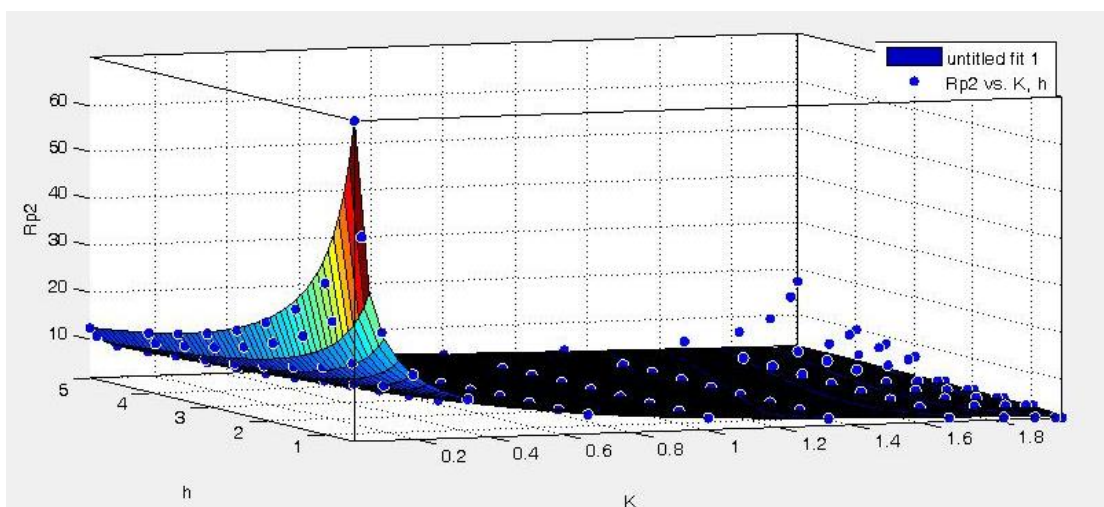
$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

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

στις μετρήσεις για τη γείωση τύπου B (πίνακας 4-2).

Η προσαρμογή της επιφάνειας στα δεδομένα φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.3: Προσαρμογή της επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b * K^{c * h^d + e}$  στα

πειραματικά δεδομένα για τη γείωση τύπου B

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$a = -1,559$$

$$b = 5,639$$

$$c = -1,199$$

$$d = -0,1629$$

$$e = 0,6942$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$SSE = 68,27$$

$$R^2 = 0,9936$$

$$Adjusted R^2 = 0,9934$$

$$RMSE = 0,5571$$

Αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν:

$$a = 0,3577$$

$$b = 0,2000$$

$$c = 0,0290$$

$$d = 0,0074$$

$$e = 0,5293$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο Trust Region Algorithm.

Επίσης έγινε και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου bisquare (μία ειδική περίπτωση των M-εκτιμητών)

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} * \left( -1,559 + 5,639 * \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-1,199 * h^{-0,1629} + 0,6942} \right) \quad (5.12)$$

Ο πίνακας δείχνει την ποιότητα της προσαρμογής για κάθε μέτρηση:

Πίνακας 5-3: Σύγκριση της αντίστασης γείωσης του CDEGS με την υπολογιζόμενη από την εξίσωση αντίσταση γείωσης για τη γείωση τύπου B στο απλό εκθετικό μοντέλο προσαρμογής

$\rho_1$	$\rho_2$	h	Αντίσταση γείωσης CDEGS	K	RR	Αντίσταση γείωσης εξίσωσης	Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	% Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	Συντελεστής πολ/μον ΣΠ
100	100	0,5	1,32	1	3,950277	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	1	1,32	1	3,950436	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	1,5	1,32	1	3,950265	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	2	1,32	1	3,950313	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	2,5	1,32	1	3,950541	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	3	1,32	1	3,950124	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	3,5	1,32	1	3,951072	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	4	1,32	1	3,950445	1,36	0,04	3%	0,980392
100	100	5	1,32	1	3,949317	1,36	0,04	3%	0,980392
500	100	0,5	1,37	1,666666667	2,2644015	1,5120347	0,14	10%	0,988142
500	100	1	1,80	1,666666667	2,9681735	1,6987801	-0,10	-6%	0,988142
500	100	1,5	1,88	1,666666667	3,1042383	1,8043875	-0,08	-4%	0,988142
500	100	2	1,95	1,666666667	3,2200621	1,8775486	-0,08	-4%	0,988142
500	100	2,5	2,08	1,666666667	3,4193519	1,9332418	-0,14	-7%	0,988142
500	100	3	2,41	1,666666667	3,9631119	1,9780436	-0,43	-18%	0,988142
500	100	3,5	2,56	1,666666667	4,2172407	2,0154206	-0,54	-21%	0,988142
500	100	4	2,70	1,666666667	4,4556831	2,0474209	-0,66	-24%	0,988142
500	100	5	3,02	1,666666667	4,9759242	2,1001048	-0,92	-30%	0,988142
1000	100	0,5	1,38	1,818181818	1,9507603	1,6018528	0,22	16%	0,98912
1000	100	1	2,03	1,818181818	2,8768968	1,8436376	-0,19	-9%	0,98912
1000	100	1,5	2,13	1,818181818	3,0204484	1,9816772	-0,15	-7%	0,98912
1000	100	2	2,23	1,818181818	3,1518461	2,0778392	-0,15	-7%	0,98912
1000	100	2,5	2,42	1,818181818	3,4257204	2,151327	-0,27	-11%	0,98912
1000	100	3	3,21	1,818181818	4,5507349	2,2106198	-1,00	-31%	0,98912
1000	100	3,5	3,54	1,818181818	5,0079697	2,2602049	-1,28	-36%	0,98912
1000	100	4	3,86	1,818181818	5,4627361	2,3027419	-1,55	-40%	0,98912
1000	100	5	4,67	1,818181818	6,6175933	2,3729417	-2,30	-49%	0,98912
5000	100	0,5	1,39	1,960784314	1,6183594	1,7958881	0,40	29%	0,989903
5000	100	1	2,38	1,960784314	2,7611387	2,1138382	-0,26	-11%	0,989903
5000	100	1,5	2,48	1,960784314	2,8795549	2,296865	-0,18	-7%	0,989903
5000	100	2	2,59	1,960784314	3,0118745	2,4249822	-0,17	-6%	0,989903
5000	100	2,5	2,91	1,960784314	3,3786293	2,523222	-0,39	-13%	0,989903
5000	100	3	5,53	1,960784314	6,4214592	2,6026904	-2,93	-53%	0,989903
5000	100	3,5	6,41	1,960784314	7,4474995	2,6692863	-3,74	-58%	0,989903
5000	100	4	7,49	1,960784314	8,6981679	2,7265152	-4,76	-64%	0,989903
5000	100	5	11,79	1,960784314	13,697943	2,8211584	-8,97	-76%	0,989903
10000	100	0,5	1,38	1,98019802	1,5339656	1,8581831	0,48	34%	0,990001
10000	100	1	2,44	1,98019802	2,7098663	2,1938223	-0,25	-10%	0,990001
10000	100	1,5	2,54	1,98019802	2,8192879	2,3872396	-0,15	-6%	0,990001
10000	100	2	2,66	1,98019802	2,9485052	2,5227154	-0,13	-5%	0,990001
10000	100	2,5	3,00	1,98019802	3,325711	2,6266434	-0,37	-12%	0,990001

10000	100	3	6,29	1,98019802	6,9821453	2,7107415	-3,58	-57%	0,990001
10000	100	3,5	7,37	1,98019802	8,1755785	2,7812362	-4,58	-62%	0,990001
10000	100	4	8,77	1,98019802	9,7314533	2,8418292	-5,93	-68%	0,990001
10000	100	5	15,33	1,98019802	17,011505	2,9420634	-12,38	-81%	0,990001
100	500	0,5	5,90	0,333333333	9,7171831	6,0308202	0,13	2%	0,988142
100	500	1	4,84	0,333333333	7,9694187	5,0143317	0,18	4%	0,988142
100	500	1,5	4,52	0,333333333	7,4422049	4,5330232	0,01	0%	0,988142
100	500	2	4,27	0,333333333	7,0332495	4,2322677	-0,04	-1%	0,988142
100	500	2,5	4,03	0,333333333	6,6357176	4,01926	-0,01	0%	0,988142
100	500	3	3,82	0,333333333	6,2975117	3,8570953	0,03	1%	0,988142
100	500	3,5	3,66	0,333333333	6,0237234	3,7276728	0,07	2%	0,988142
100	500	4	3,52	0,333333333	5,8050064	3,6208865	0,10	3%	0,988142
100	500	5	3,30	0,333333333	5,4362167	3,4527099	0,15	5%	0,988142
500	500	0,5	6,58	1	3,9499728	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	1	6,58	1	3,95013	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	1,5	6,58	1	3,9499608	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	2	6,58	1	3,9500076	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	2,5	6,58	1	3,9502368	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	3	6,58	1	3,9498204	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	3,5	6,58	1	3,9507654	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	4	6,58	1	3,9501414	6,8	0,22	3%	0,996016
500	500	5	6,58	1	3,9490134	6,8	0,22	3%	0,996016
1000	500	0,5	6,72	1,333333333	2,9676281	7,0698684	0,35	5%	0,997009
1000	500	1	7,52	1,333333333	3,3188357	7,5161257	0,00	0%	0,997009
1000	500	1,5	7,70	1,333333333	3,4007044	7,7623997	0,06	1%	0,997009
1000	500	2	7,85	1,333333333	3,4670699	7,9305945	0,08	1%	0,997009
1000	500	2,5	8,06	1,333333333	3,5573706	8,0573582	0,00	0%	0,997009
1000	500	3	8,34	1,333333333	3,6806882	8,1585566	-0,18	-2%	0,997009
1000	500	3,5	8,58	1,333333333	3,7872915	8,2424668	-0,34	-4%	0,997009
1000	500	4	8,75	1,333333333	3,8630584	8,3139395	-0,44	-5%	0,997009
1000	500	5	9,08	1,333333333	4,0094068	8,4308864	-0,65	-7%	0,997009
5000	500	0,5	6,89	1,818181818	1,9506195	8,009264	1,12	16%	0,997805
5000	500	1	10,16	1,818181818	2,8768684	9,2181882	-0,94	-9%	0,997805
5000	500	1,5	10,66	1,818181818	3,0204258	9,9083861	-0,76	-7%	0,997805
5000	500	2	11,13	1,818181818	3,1518234	10,389196	-0,74	-7%	0,997805
5000	500	2,5	12,09	1,818181818	3,4256963	10,756635	-1,34	-11%	0,997805
5000	500	3	16,07	1,818181818	4,5506882	11,053099	-5,01	-31%	0,997805
5000	500	3,5	17,68	1,818181818	5,0079145	11,301024	-6,38	-36%	0,997805
5000	500	4	19,29	1,818181818	5,4626737	11,51371	-7,77	-40%	0,997805
5000	500	5	23,36	1,818181818	6,6175112	11,864709	-11,50	-49%	0,997805
10000	500	0,5	6,95	1,904761905	1,7693391	8,4598576	1,51	22%	0,997904
10000	500	1	11,10	1,904761905	2,8265691	9,8704955	-1,23	-11%	0,997904
10000	500	1,5	11,63	1,904761905	2,9612122	10,679958	-0,95	-8%	0,997904
10000	500	2	12,16	1,904761905	3,09624	11,245528	-0,91	-7%	0,997904
10000	500	2,5	13,45	1,904761905	3,4249783	11,678642	-1,77	-13%	0,997904
10000	500	3	21,05	1,904761905	5,362282	12,028652	-9,02	-43%	0,997904



10000	500	3,5	23,84	1,904761905	6,0733851	12,321731	-11,52	-48%	0,997904
10000	500	4	26,86	1,904761905	6,8416731	12,57342	-14,29	-53%	0,997904
10000	500	5	36,15	1,904761905	9,2089031	12,989323	-23,16	-64%	0,997904
100	1000	0,5	10,85	0,181818182	15,364386	10,919478	0,07	1%	0,98912
100	1000	1	8,14	0,181818182	11,529973	8,3138361	0,17	2%	0,98912
100	1000	1,5	7,33	0,181818182	10,379637	7,1608233	-0,17	-2%	0,98912
100	1000	2	6,71	0,181818182	9,5025073	6,4679166	-0,24	-4%	0,98912
100	1000	2,5	6,17	0,181818182	8,7364627	5,9903599	-0,18	-3%	0,98912
100	1000	3	5,74	0,181818182	8,1356224	5,6342704	-0,11	-2%	0,98912
100	1000	3,5	5,42	0,181818182	7,678685	5,3547884	-0,07	-1%	0,98912
100	1000	4	5,15	0,181818182	7,2901825	5,1273768	-0,02	0%	0,98912
100	1000	5	4,70	0,181818182	6,6571811	4,7751507	0,07	2%	0,98912
500	1000	0,5	12,64	0,666666667	5,5793011	13,082354	0,44	4%	0,997009
500	1000	1	11,58	0,666666667	5,1102468	12,144385	0,57	5%	0,997009
500	1000	1,5	11,27	0,666666667	4,9729029	11,664769	0,40	4%	0,997009
500	1000	2	11,02	0,666666667	4,8637173	11,351431	0,33	3%	0,997009
500	1000	2,5	10,75	0,666666667	4,7466038	11,1225	0,37	3%	0,997009
500	1000	3	10,49	0,666666667	4,6295654	10,944023	0,46	4%	0,997009
500	1000	3,5	10,30	0,666666667	4,5467194	10,798836	0,50	5%	0,997009
500	1000	4	10,13	0,666666667	4,471126	10,67712	0,55	5%	0,997009
500	1000	5	9,83	0,666666667	4,3377598	10,481735	0,65	7%	0,997009
1000	1000	0,5	13,17	1	3,950277	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	1	13,17	1	3,950436	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	1,5	13,17	1	3,950265	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	2	13,17	1	3,950313	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	2,5	13,17	1	3,950541	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	3	13,17	1	3,950124	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	3,5	13,17	1	3,951072	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	4	13,17	1	3,950445	13,6	0,43	3%	0,998004
1000	1000	5	13,16	1	3,949317	13,6	0,44	3%	0,998004
5000	1000	0,5	13,75	1,666666667	2,2644015	15,120347	1,37	10%	0,998801
5000	1000	1	18,02	1,666666667	2,9681735	16,987801	-1,03	-6%	0,998801
5000	1000	1,5	18,85	1,666666667	3,1042383	18,043875	-0,80	-4%	0,998801
5000	1000	2	19,55	1,666666667	3,2200621	18,775486	-0,77	-4%	0,998801
5000	1000	2,5	20,76	1,666666667	3,4193519	19,332418	-1,43	-7%	0,998801
5000	1000	3	24,06	1,666666667	3,9631119	19,780436	-4,28	-18%	0,998801
5000	1000	3,5	25,60	1,666666667	4,2172407	20,154206	-5,45	-21%	0,998801
5000	1000	4	27,05	1,666666667	4,4556831	20,474209	-6,58	-24%	0,998801
5000	1000	5	30,21	1,666666667	4,9759242	21,001048	-9,21	-30%	0,998801
10000	1000	0,5	13,77	1,818181818	1,9507603	16,018528	2,24	16%	0,998901
10000	1000	1	20,31	1,818181818	2,8768968	18,436376	-1,88	-9%	0,998901
10000	1000	1,5	21,33	1,818181818	3,0204484	19,816772	-1,51	-7%	0,998901
10000	1000	2	22,26	1,818181818	3,1518461	20,778392	-1,48	-7%	0,998901
10000	1000	2,5	24,19	1,818181818	3,4257204	21,51327	-2,68	-11%	0,998901
10000	1000	3	32,13	1,818181818	4,5507349	22,106198	-10,03	-31%	0,998901
10000	1000	3,5	35,36	1,818181818	5,0079697	22,602049	-12,76	-36%	0,998901

10000	1000	4	38,57	1,818181818	5,4627361	23,027419	-15,55	-40%	0,998901
10000	1000	5	46,73	1,818181818	6,6175933	23,729417	-23,00	-49%	0,998901
100	5000	0,5	38,90	0,039215686	45,173762	38,269341	-0,63	-2%	0,989903
100	5000	1	22,03	0,039215686	25,585195	23,559653	1,53	7%	0,989903
100	5000	1,5	18,04	0,039215686	20,95376	18,086339	0,04	0%	0,989903
100	5000	2	15,48	0,039215686	17,979674	15,107782	-0,37	-2%	0,989903
100	5000	2,5	13,50	0,039215686	15,676087	13,192008	-0,31	-2%	0,989903
100	5000	3	12,10	0,039215686	14,049737	11,83681	-0,26	-2%	0,989903
100	5000	3,5	11,05	0,039215686	12,829316	10,817259	-0,23	-2%	0,989903
100	5000	4	10,18	0,039215686	11,825941	10,0164	-0,17	-2%	0,989903
100	5000	5	8,88	0,039215686	10,318683	8,8271256	-0,06	-1%	0,989903
500	5000	0,5	54,25	0,181818182	15,3647	54,59739	0,35	1%	0,997805
500	5000	1	40,71	0,181818182	11,530142	41,569181	0,86	2%	0,997805
500	5000	1,5	36,65	0,181818182	10,37974	35,804117	-0,84	-2%	0,997805
500	5000	2	33,55	0,181818182	9,5025597	32,339583	-1,21	-4%	0,997805
500	5000	2,5	30,84	0,181818182	8,736491	29,951799	-0,89	-3%	0,997805
500	5000	3	28,72	0,181818182	8,1356365	28,171352	-0,55	-2%	0,997805
500	5000	3,5	27,11	0,181818182	7,6786821	26,773942	-0,34	-1%	0,997805
500	5000	4	25,74	0,181818182	7,2901684	25,636884	-0,10	0%	0,997805
500	5000	5	23,50	0,181818182	6,6571457	23,875753	0,37	2%	0,997805
1000	5000	0,5	58,99	0,333333333	9,7171831	60,308202	1,32	2%	0,998801
1000	5000	1	48,38	0,333333333	7,9694187	50,143317	1,76	4%	0,998801
1000	5000	1,5	45,18	0,333333333	7,4422049	45,330232	0,15	0%	0,998801
1000	5000	2	42,70	0,333333333	7,0332495	42,322677	-0,38	-1%	0,998801
1000	5000	2,5	40,28	0,333333333	6,6357176	40,1926	-0,09	0%	0,998801
1000	5000	3	38,23	0,333333333	6,2975117	38,570953	0,34	1%	0,998801
1000	5000	3,5	36,57	0,333333333	6,0237234	37,276728	0,71	2%	0,998801
1000	5000	4	35,24	0,333333333	5,8050064	36,208865	0,97	3%	0,998801
1000	5000	5	33,00	0,333333333	5,4362167	34,527099	1,52	5%	0,998801
5000	5000	0,5	65,83	1	3,9499728	68	2,17	3%	0,9996
5000	5000	1	65,84	1	3,95013	68	2,16	3%	0,9996
5000	5000	1,5	65,83	1	3,9499608	68	2,17	3%	0,9996
5000	5000	2	65,83	1	3,9500076	68	2,17	3%	0,9996
5000	5000	2,5	65,84	1	3,9502368	68	2,16	3%	0,9996
5000	5000	3	65,83	1	3,9498204	68	2,17	3%	0,9996
5000	5000	3,5	65,85	1	3,9507654	68	2,15	3%	0,9996
5000	5000	4	65,84	1	3,9501414	68	2,16	3%	0,9996
5000	5000	5	65,82	1	3,9490134	68	2,18	3%	0,9996
10000	5000	0,5	67,23	1,333333333	2,9676281	70,698684	3,47	5%	0,9997
10000	5000	1	75,19	1,333333333	3,3188357	75,161257	-0,02	0%	0,9997
10000	5000	1,5	77,04	1,333333333	3,4007044	77,623997	0,58	1%	0,9997
10000	5000	2	78,54	1,333333333	3,4670699	79,305945	0,76	1%	0,9997
10000	5000	2,5	80,59	1,333333333	3,5573706	80,573582	-0,02	0%	0,9997
10000	5000	3	83,38	1,333333333	3,6806882	81,585566	-1,80	-2%	0,9997
10000	5000	3,5	85,80	1,333333333	3,7872915	82,424668	-3,37	-4%	0,9997
10000	5000	4	87,51	1,333333333	3,8630584	83,139395	-4,37	-5%	0,9997

10000	5000	5	90,83	1,333333333	4,0094068	84,308864	-6,52	-7%	0,9997
100	10000	0,5	63,05	0,01980198	69,989651	63,134328	0,08	0%	0,990001
100	10000	1	30,47	0,01980198	33,821367	35,383023	4,91	16%	0,990001
100	10000	1,5	24,11	0,01980198	26,760357	25,833043	1,72	7%	0,990001
100	10000	2	20,23	0,01980198	22,450061	20,861659	0,64	3%	0,990001
100	10000	2,5	17,37	0,01980198	19,283098	17,76128	0,39	2%	0,990001
100	10000	3	15,37	0,01980198	17,059646	15,619042	0,25	2%	0,990001
100	10000	3,5	13,89	0,01980198	15,419299	14,037521	0,15	1%	0,990001
100	10000	4	12,70	0,01980198	14,100053	12,814606	0,11	1%	0,990001
100	10000	5	10,92	0,01980198	12,122532	11,032234	0,11	1%	0,990001
500	10000	0,5	96,60	0,095238095	24,605225	95,502773	-1,09	-1%	0,997904
500	10000	1	65,03	0,095238095	16,56464	66,428864	1,40	2%	0,997904
500	10000	1,5	56,23	0,095238095	14,324121	54,465788	-1,77	-3%	0,997904
500	10000	2	50,11	0,095238095	12,763257	47,570467	-2,54	-5%	0,997904
500	10000	2,5	44,84	0,095238095	11,422253	42,95447	-1,89	-4%	0,997904
500	10000	3	41,00	0,095238095	10,44407	39,588099	-1,41	-3%	0,997904
500	10000	3,5	38,10	0,095238095	9,7052481	36,992676	-1,11	-3%	0,997904
500	10000	4	35,69	0,095238095	9,0909264	34,911954	-0,78	-2%	0,997904
500	10000	5	31,89	0,095238095	8,1225929	31,745972	-0,14	0%	0,997904
1000	10000	0,5	108,49	0,181818182	15,364386	109,19478	0,71	1%	0,998901
1000	10000	1	81,41	0,181818182	11,529973	83,138361	1,73	2%	0,998901
1000	10000	1,5	73,29	0,181818182	10,379637	71,608233	-1,68	-2%	0,998901
1000	10000	2	67,10	0,181818182	9,5025073	64,679166	-2,42	-4%	0,998901
1000	10000	2,5	61,69	0,181818182	8,7364627	59,903599	-1,78	-3%	0,998901
1000	10000	3	57,45	0,181818182	8,1356224	56,342704	-1,10	-2%	0,998901
1000	10000	3,5	54,22	0,181818182	7,678685	53,547884	-0,67	-1%	0,998901
1000	10000	4	51,48	0,181818182	7,2901825	51,273768	-0,20	0%	0,998901
1000	10000	5	47,01	0,181818182	6,6571811	47,751507	0,75	2%	0,998901
5000	10000	0,5	126,39	0,666666667	5,5793011	130,82354	4,43	4%	0,9997
5000	10000	1	115,77	0,666666667	5,1102468	121,44385	5,68	5%	0,9997
5000	10000	1,5	112,66	0,666666667	4,9729029	116,64769	3,99	4%	0,9997
5000	10000	2	110,18	0,666666667	4,8637173	113,51431	3,33	3%	0,9997
5000	10000	2,5	107,53	0,666666667	4,7466038	111,225	3,69	3%	0,9997
5000	10000	3	104,88	0,666666667	4,6295654	109,44023	4,56	4%	0,9997
5000	10000	3,5	103,00	0,666666667	4,5467194	107,98836	4,99	5%	0,9997
5000	10000	4	101,29	0,666666667	4,471126	106,7712	5,48	5%	0,9997
5000	10000	5	98,27	0,666666667	4,3377598	104,81735	6,55	7%	0,9997
10000	10000	0,5	131,66	1	3,949893	136	4,34	3%	0,9998
10000	10000	1	131,67	1	3,950052	136	4,33	3%	0,9998
10000	10000	1,5	131,66	1	3,949881	136	4,34	3%	0,9998
10000	10000	2	131,66	1	3,949929	136	4,34	3%	0,9998
10000	10000	2,5	131,67	1	3,950157	136	4,33	3%	0,9998
10000	10000	3	131,66	1	3,949743	136	4,34	3%	0,9998
10000	10000	3,5	131,69	1	3,950688	136	4,31	3%	0,9998
10000	10000	4	131,67	1	3,950061	136	4,33	3%	0,9998
10000	10000	5	131,63	1	3,948933	136	4,37	3%	0,9998

B) Προσαρμογή με το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$$RR = M(K, h) = a + b * K^{c*h^{d+e}} + 0,1 * K^q * h^{n+m}$$

όπου

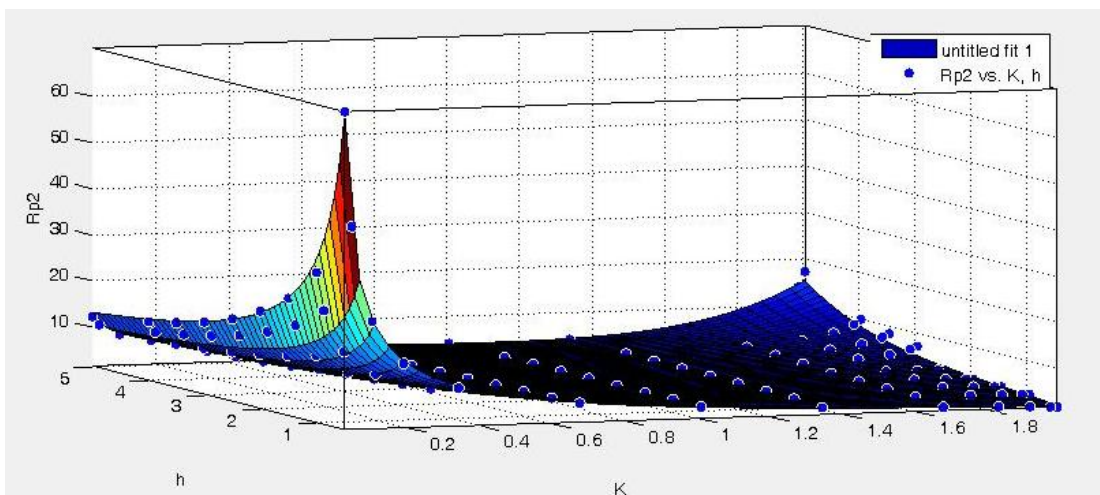
$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

$$RR = 100 * R_{\text{γείωσης}} * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)$$

στις μετρήσεις για τη γείωση τύπου A (πίνακας 4-2).

Η προσαρμογή της επιφάνειας στα δεδομένα φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.4: Προσαρμογή της επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b * K^{c*h^{d+e}} + 0,1 * K^q * h^{n+m}$  στα πειραματικά δεδομένα για τη γείωση τύπου B

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$a = -2,833$$

$$b = 6,661$$

$$c = -0,5164$$

$$d = -0,373$$

$$e = 0,06138$$

$$q = 1,471$$

$$m = 0,547$$

$$n = 0,9221$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$SSE = 26,48$$

$$R^2 = 0,9975$$

$$Adjusted R^2 = 0,9974$$

$$RMSE = 0,3493$$

Αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν:

$$a = 03577$$

$$b = 0,5763$$

$$c = 0,0290$$

$$d = 0,0074$$

$$e = 0,5293$$

$$q = 0,3094$$

$$m = 0,9054$$

$$n = -0,100$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο Trust Region Algorithm.

Επίσης έγινε και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου bisquare (μία ειδική περίπτωση των Μ-εκτιμητών)

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\gamma\epsilon\acute{\iota}\omega\sigma\eta\varsigma} = \frac{1}{100 * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} * \left( -2,833 + 6,661 * \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-0,5164 * h^{-0,373} + 0,06138} + \right. \\ \left. 0,1 * \rho_1 - \rho_2 \rho_1 + \rho_2 + 11,471 * h \right) / 0,9221 + 0,547 \quad (5.13)$$

Ο πίνακας δείχνει την ποιότητα της προσαρμογής για κάθε μέτρηση:

Πίνακας 5-4: Σύγκριση της αντίστασης γείωσης του CDEGS με την υπολογιζόμενη από την εξίσωση αντίσταση γείωσης για τη γείωση τύπου B στο μοντέλο προσαρμογής αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$	$\rho_2$	h	Αντίσταση γείωσης CDEGS	K	RR	Αντίσταση γείωσης εξίσωσης	Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	% Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	Συντελεστής πολ/μου ΣΠ
100	100	0,5	1,32	1	3,950277	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	1	1,32	1	3,950436	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	1,5	1,32	1	3,950265	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	2	1,32	1	3,950313	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	2,5	1,32	1	3,950541	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	3	1,32	1	3,950124	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	3,5	1,32	1	3,951072	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	4	1,32	1	3,950445	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
100	100	5	1,32	1	3,949317	1,3093333	-0,01	-1%	0,980392
500	100	0,5	1,37	1,666666667	2,2644015	1,3646011	-0,01	-1%	0,988142
500	100	1	1,80	1,666666667	2,9681735	1,6554356	-0,15	-8%	0,988142
500	100	1,5	1,88	1,666666667	3,1042383	1,8454077	-0,04	-2%	0,988142
500	100	2	1,95	1,666666667	3,2200621	2,0171754	0,06	3%	0,988142
500	100	2,5	2,08	1,666666667	3,4193519	2,2011696	0,13	6%	0,988142
500	100	3	2,41	1,666666667	3,9631119	2,4182809	0,01	1%	0,988142
500	100	3,5	2,56	1,666666667	4,2172407	2,6890658	0,13	5%	0,988142
500	100	4	2,70	1,666666667	4,4556831	3,0376056	0,33	12%	0,988142
500	100	5	3,02	1,666666667	4,9759242	4,098663	1,08	36%	0,988142
1000	100	0,5	1,38	1,818181818	1,9507603	1,4265772	0,05	4%	0,98912
1000	100	1	2,03	1,818181818	2,8768968	1,8187225	-0,21	-10%	0,98912
1000	100	1,5	2,13	1,818181818	3,0204484	2,0929849	-0,04	-2%	0,98912
1000	100	2	2,23	1,818181818	3,1518461	2,362181	0,14	6%	0,98912
1000	100	2,5	2,42	1,818181818	3,4257204	2,6762088	0,26	11%	0,98912
1000	100	3	3,21	1,818181818	4,5507349	3,0779612	-0,14	-4%	0,98912
1000	100	3,5	3,54	1,818181818	5,0079697	3,6175868	0,08	2%	0,98912
1000	100	4	3,86	1,818181818	5,4627361	4,3609836	0,50	13%	0,98912
1000	100	5	4,67	1,818181818	6,6175933	6,8555115	2,18	47%	0,98912
5000	100	0,5	1,39	1,960784314	1,6183594	1,580709	0,19	13%	0,989903
5000	100	1	2,38	1,960784314	2,7611387	2,1175241	-0,26	-11%	0,989903
5000	100	1,5	2,48	1,960784314	2,8795549	2,5185971	0,04	2%	0,989903
5000	100	2	2,59	1,960784314	3,0118745	2,9434665	0,35	14%	0,989903
5000	100	2,5	2,91	1,960784314	3,3786293	3,4777695	0,57	20%	0,989903
5000	100	3	5,53	1,960784314	6,4214592	4,2097592	-1,32	-24%	0,989903
5000	100	3,5	6,41	1,960784314	7,4474995	5,2553202	-1,16	-18%	0,989903
5000	100	4	7,49	1,960784314	8,6981679	6,778794	-0,71	-9%	0,989903
5000	100	5	11,79	1,960784314	13,697943	12,325266	0,53	5%	0,989903
10000	100	0,5	1,38	1,98019802	1,5339656	1,6330333	0,25	18%	0,990001
10000	100	1	2,44	1,98019802	2,7098663	2,2029014	-0,24	-10%	0,990001
10000	100	1,5	2,54	1,98019802	2,8192879	2,6325491	0,09	4%	0,990001
10000	100	2	2,66	1,98019802	2,9485052	3,0923659	0,44	16%	0,990001
10000	100	2,5	3,00	1,98019802	3,325711	3,6763085	0,68	23%	0,990001

10000	100	3	6,29	1,98019802	6,9821453	4,4833454	-1,81	-29%	0,990001
10000	100	3,5	7,37	1,98019802	8,1755785	5,6451553	-1,72	-23%	0,990001
10000	100	4	8,77	1,98019802	9,7314533	7,3501407	-1,42	-16%	0,990001
10000	100	5	15,33	1,98019802	17,011505	13,622819	-1,70	-11%	0,990001
100	500	0,5	5,90	0,333333333	9,7171831	6,1753521	0,28	5%	0,988142
100	500	1	4,84	0,333333333	7,9694187	4,9531064	0,11	2%	0,988142
100	500	1,5	4,52	0,333333333	7,4422049	4,4394266	-0,08	-2%	0,988142
100	500	2	4,27	0,333333333	7,0332495	4,1397794	-0,13	-3%	0,988142
100	500	2,5	4,03	0,333333333	6,6357176	3,9375896	-0,09	-2%	0,988142
100	500	3	3,82	0,333333333	6,2975117	3,7892654	-0,03	-1%	0,988142
100	500	3,5	3,66	0,333333333	6,0237234	3,6743681	0,02	0%	0,988142
100	500	4	3,52	0,333333333	5,8050064	3,5818905	0,06	2%	0,988142
100	500	5	3,30	0,333333333	5,4362167	3,4405089	0,14	4%	0,988142
500	500	0,5	6,58	1	3,9499728	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	1	6,58	1	3,95013	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	1,5	6,58	1	3,9499608	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	2	6,58	1	3,9500076	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	2,5	6,58	1	3,9502368	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	3	6,58	1	3,9498204	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	3,5	6,58	1	3,9507654	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	4	6,58	1	3,9501414	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
500	500	5	6,58	1	3,9490134	6,5466667	-0,04	-1%	0,996016
1000	500	0,5	6,72	1,333333333	2,9676281	6,5842971	-0,14	-2%	0,997009
1000	500	1	7,52	1,333333333	3,3188357	7,2253556	-0,29	-4%	0,997009
1000	500	1,5	7,70	1,333333333	3,4007044	7,5899117	-0,11	-1%	0,997009
1000	500	2	7,85	1,333333333	3,4670699	7,8674578	0,01	0%	0,997009
1000	500	2,5	8,06	1,333333333	3,5573706	8,1123519	0,05	1%	0,997009
1000	500	3	8,34	1,333333333	3,6806882	8,34892	0,01	0%	0,997009
1000	500	3,5	8,58	1,333333333	3,7872915	8,5914967	0,01	0%	0,997009
1000	500	4	8,75	1,333333333	3,8630584	8,8505067	0,10	1%	0,997009
1000	500	5	9,08	1,333333333	4,0094068	9,4531339	0,37	4%	0,997009
5000	500	0,5	6,89	1,818181818	1,9506195	7,132886	0,25	4%	0,997805
5000	500	1	10,16	1,818181818	2,8768684	9,0936125	-1,06	-10%	0,997805
5000	500	1,5	10,66	1,818181818	3,0204258	10,464924	-0,20	-2%	0,997805
5000	500	2	11,13	1,818181818	3,1518234	11,810905	0,68	6%	0,997805
5000	500	2,5	12,09	1,818181818	3,4256963	13,381044	1,29	11%	0,997805
5000	500	3	16,07	1,818181818	4,5506882	15,389806	-0,68	-4%	0,997805
5000	500	3,5	17,68	1,818181818	5,0079145	18,087934	0,41	2%	0,997805
5000	500	4	19,29	1,818181818	5,4626737	21,804918	2,52	13%	0,997805
5000	500	5	23,36	1,818181818	6,6175112	34,277558	10,91	47%	0,997805
10000	500	0,5	6,95	1,904761905	1,7693391	7,4799216	0,53	8%	0,997904
10000	500	1	11,10	1,904761905	2,8265691	9,8237826	-1,27	-11%	0,997904
10000	500	1,5	11,63	1,904761905	2,9612122	11,529873	-0,10	-1%	0,997904
10000	500	2	12,16	1,904761905	3,09624	13,284216	1,13	9%	0,997904
10000	500	2,5	13,45	1,904761905	3,4249783	15,427669	1,98	15%	0,997904
10000	500	3	21,05	1,904761905	5,362282	18,288751	-2,76	-13%	0,997904

10000	500	3,5	23,84	1,904761905	6,0733851	22,281406	-1,56	-7%	0,997904
10000	500	4	26,86	1,904761905	6,8416731	27,976817	1,12	4%	0,997904
10000	500	5	36,15	1,904761905	9,2089031	48,078412	11,93	33%	0,997904
100	1000	0,5	10,85	0,181818182	15,364386	11,253112	0,40	4%	0,98912
100	1000	1	8,14	0,181818182	11,529973	8,2180033	0,08	1%	0,98912
100	1000	1,5	7,33	0,181818182	10,379637	7,0290222	-0,30	-4%	0,98912
100	1000	2	6,71	0,181818182	9,5025073	6,3594153	-0,35	-5%	0,98912
100	1000	2,5	6,17	0,181818182	8,7364627	5,9175281	-0,25	-4%	0,98912
100	1000	3	5,74	0,181818182	8,1356224	5,5984788	-0,15	-3%	0,98912
100	1000	3,5	5,42	0,181818182	7,678685	5,3543511	-0,07	-1%	0,98912
100	1000	4	5,15	0,181818182	7,2901825	5,1598136	0,01	0%	0,98912
100	1000	5	4,70	0,181818182	6,6571811	4,8658584	0,17	4%	0,98912
500	1000	0,5	12,64	0,666666667	5,5793011	13,018262	0,38	3%	0,997009
500	1000	1	11,58	0,666666667	5,1102468	11,829312	0,25	2%	0,997009
500	1000	1,5	11,27	0,666666667	4,9729029	11,280073	0,01	0%	0,997009
500	1000	2	11,02	0,666666667	4,8637173	10,942626	-0,08	-1%	0,997009
500	1000	2,5	10,75	0,666666667	4,7466038	10,707318	-0,05	0%	0,997009
500	1000	3	10,49	0,666666667	4,6295654	10,530916	0,04	0%	0,997009
500	1000	3,5	10,30	0,666666667	4,5467194	10,39228	0,09	1%	0,997009
500	1000	4	10,13	0,666666667	4,471126	10,279616	0,15	1%	0,997009
500	1000	5	9,83	0,666666667	4,3377598	10,105924	0,28	3%	0,997009
1000	1000	0,5	13,17	1	3,950277	13,093333	-0,07	-1%	0,998004
1000	1000	1	13,17	1	3,950436	13,093333	-0,07	-1%	0,998004
1000	1000	1,5	13,17	1	3,950265	13,093333	-0,07	-1%	0,998004
1000	1000	2	13,17	1	3,950313	13,093333	-0,07	-1%	0,998004
1000	1000	2,5	13,17	1	3,950541	13,093333	-0,08	-1%	0,998004
1000	1000	3	13,17	1	3,950124	13,093333	-0,07	-1%	0,998004
1000	1000	3,5	13,17	1	3,951072	13,093333	-0,08	-1%	0,998004
1000	1000	4	13,17	1	3,950445	13,093333	-0,07	-1%	0,998004
1000	1000	5	13,16	1	3,949317	13,093333	-0,07	-1%	0,998004
5000	1000	0,5	13,75	1,666666667	2,2644015	13,646011	-0,10	-1%	0,998801
5000	1000	1	18,02	1,666666667	2,9681735	16,554356	-1,47	-8%	0,998801
5000	1000	1,5	18,85	1,666666667	3,1042383	18,454077	-0,39	-2%	0,998801
5000	1000	2	19,55	1,666666667	3,2200621	20,171754	0,62	3%	0,998801
5000	1000	2,5	20,76	1,666666667	3,4193519	22,011696	1,25	6%	0,998801
5000	1000	3	24,06	1,666666667	3,9631119	24,182809	0,12	1%	0,998801
5000	1000	3,5	25,60	1,666666667	4,2172407	26,890658	1,29	5%	0,998801
5000	1000	4	27,05	1,666666667	4,4556831	30,376056	3,33	12%	0,998801
5000	1000	5	30,21	1,666666667	4,9759242	40,98663	10,78	36%	0,998801
10000	1000	0,5	13,77	1,818181818	1,9507603	14,265772	0,49	4%	0,998901
10000	1000	1	20,31	1,818181818	2,8768968	18,187225	-2,13	-10%	0,998901
10000	1000	1,5	21,33	1,818181818	3,0204484	20,929849	-0,40	-2%	0,998901
10000	1000	2	22,26	1,818181818	3,1518461	23,62181	1,37	6%	0,998901
10000	1000	2,5	24,19	1,818181818	3,4257204	26,762088	2,57	11%	0,998901
10000	1000	3	32,13	1,818181818	4,5507349	30,779612	-1,35	-4%	0,998901
10000	1000	3,5	35,36	1,818181818	5,0079697	36,175868	0,81	2%	0,998901



10000	1000	4	38,57	1,818181818	5,4627361	43,609836	5,04	13%	0,998901
10000	1000	5	46,73	1,818181818	6,6175933	68,555115	21,83	47%	0,998901
100	5000	0,5	38,90	0,039215686	45,173762	38,568582	-0,33	-1%	0,989903
100	5000	1	22,03	0,039215686	25,585195	22,596215	0,57	3%	0,989903
100	5000	1,5	18,04	0,039215686	20,95376	17,358098	-0,68	-4%	0,989903
100	5000	2	15,48	0,039215686	17,979674	14,663888	-0,82	-5%	0,989903
100	5000	2,5	13,50	0,039215686	15,676087	12,987836	-0,51	-4%	0,989903
100	5000	3	12,10	0,039215686	14,049737	11,828483	-0,27	-2%	0,989903
100	5000	3,5	11,05	0,039215686	12,829316	10,970318	-0,08	-1%	0,989903
100	5000	4	10,18	0,039215686	11,825941	10,304521	0,12	1%	0,989903
100	5000	5	8,88	0,039215686	10,318683	9,3289708	0,44	5%	0,989903
500	5000	0,5	54,25	0,181818182	15,3647	56,265561	2,02	4%	0,997805
500	5000	1	40,71	0,181818182	11,530142	41,090017	0,38	1%	0,997805
500	5000	1,5	36,65	0,181818182	10,37974	35,145111	-1,50	-4%	0,997805
500	5000	2	33,55	0,181818182	9,5025597	31,797077	-1,75	-5%	0,997805
500	5000	2,5	30,84	0,181818182	8,736491	29,58764	-1,26	-4%	0,997805
500	5000	3	28,72	0,181818182	8,1356365	27,992394	-0,73	-3%	0,997805
500	5000	3,5	27,11	0,181818182	7,6786821	26,771755	-0,34	-1%	0,997805
500	5000	4	25,74	0,181818182	7,2901684	25,799068	0,06	0%	0,997805
500	5000	5	23,50	0,181818182	6,6571457	24,329292	0,83	4%	0,997805
1000	5000	0,5	58,99	0,333333333	9,7171831	61,753521	2,76	5%	0,998801
1000	5000	1	48,38	0,333333333	7,9694187	49,531064	1,15	2%	0,998801
1000	5000	1,5	45,18	0,333333333	7,4422049	44,394266	-0,79	-2%	0,998801
1000	5000	2	42,70	0,333333333	7,0332495	41,397794	-1,30	-3%	0,998801
1000	5000	2,5	40,28	0,333333333	6,6357176	39,375896	-0,91	-2%	0,998801
1000	5000	3	38,23	0,333333333	6,2975117	37,892654	-0,34	-1%	0,998801
1000	5000	3,5	36,57	0,333333333	6,0237234	36,743681	0,17	0%	0,998801
1000	5000	4	35,24	0,333333333	5,8050064	35,818905	0,58	2%	0,998801
1000	5000	5	33,00	0,333333333	5,4362167	34,405089	1,40	4%	0,998801
5000	5000	0,5	65,83	1	3,9499728	65,466667	-0,37	-1%	0,9996
5000	5000	1	65,84	1	3,95013	65,466667	-0,37	-1%	0,9996
5000	5000	1,5	65,83	1	3,9499608	65,466667	-0,37	-1%	0,9996
5000	5000	2	65,83	1	3,9500076	65,466667	-0,37	-1%	0,9996
5000	5000	2,5	65,84	1	3,9502368	65,466667	-0,37	-1%	0,9996
5000	5000	3	65,83	1	3,9498204	65,466667	-0,36	-1%	0,9996
5000	5000	3,5	65,85	1	3,9507654	65,466667	-0,38	-1%	0,9996
5000	5000	4	65,84	1	3,9501414	65,466667	-0,37	-1%	0,9996
5000	5000	5	65,82	1	3,9490134	65,466667	-0,35	-1%	0,9996
10000	5000	0,5	67,23	1,333333333	2,9676281	65,842971	-1,39	-2%	0,9997
10000	5000	1	75,19	1,333333333	3,3188357	72,253556	-2,93	-4%	0,9997
10000	5000	1,5	77,04	1,333333333	3,4007044	75,899117	-1,14	-1%	0,9997
10000	5000	2	78,54	1,333333333	3,4670699	78,674578	0,13	0%	0,9997
10000	5000	2,5	80,59	1,333333333	3,5573706	81,123519	0,53	1%	0,9997
10000	5000	3	83,38	1,333333333	3,6806882	83,4892	0,11	0%	0,9997
10000	5000	3,5	85,80	1,333333333	3,7872915	85,914967	0,12	0%	0,9997
10000	5000	4	87,51	1,333333333	3,8630584	88,505067	0,99	1%	0,9997

10000	5000	5	90,83	1,333333333	4,0094068	94,531339	3,70	4%	0,9997
100	10000	0,5	63,05	0,01980198	69,989651	62,425589	-0,63	-1%	0,990001
100	10000	1	30,47	0,01980198	33,821367	33,19548	2,73	9%	0,990001
100	10000	1,5	24,11	0,01980198	26,760357	24,35025	0,24	1%	0,990001
100	10000	2	20,23	0,01980198	22,450061	19,982769	-0,24	-1%	0,990001
100	10000	2,5	17,37	0,01980198	19,283098	17,336886	-0,04	0%	0,990001
100	10000	3	15,37	0,01980198	17,059646	15,541504	0,17	1%	0,990001
100	10000	3,5	13,89	0,01980198	15,419299	14,232105	0,34	2%	0,990001
100	10000	4	12,70	0,01980198	14,100053	13,228282	0,53	4%	0,990001
100	10000	5	10,92	0,01980198	12,122532	11,777457	0,86	8%	0,990001
500	10000	0,5	96,60	0,095238095	24,605225	97,970277	1,37	1%	0,997904
500	10000	1	65,03	0,095238095	16,56464	65,11316	0,08	0%	0,997904
500	10000	1,5	56,23	0,095238095	14,324121	53,165181	-3,07	-5%	0,997904
500	10000	2	50,11	0,095238095	12,763257	46,686999	-3,42	-7%	0,997904
500	10000	2,5	44,84	0,095238095	11,422253	42,516226	-2,33	-5%	0,997904
500	10000	3	41,00	0,095238095	10,44407	39,558493	-1,44	-4%	0,997904
500	10000	3,5	38,10	0,095238095	9,7052481	37,326622	-0,77	-2%	0,997904
500	10000	4	35,69	0,095238095	9,0909264	35,568011	-0,12	0%	0,997904
500	10000	5	31,89	0,095238095	8,1225929	32,944921	1,06	3%	0,997904
1000	10000	0,5	108,49	0,181818182	15,364386	112,53112	4,04	4%	0,998901
1000	10000	1	81,41	0,181818182	11,529973	82,180033	0,77	1%	0,998901
1000	10000	1,5	73,29	0,181818182	10,379637	70,290222	-3,00	-4%	0,998901
1000	10000	2	67,10	0,181818182	9,5025073	63,594153	-3,50	-5%	0,998901
1000	10000	2,5	61,69	0,181818182	8,7364627	59,175281	-2,51	-4%	0,998901
1000	10000	3	57,45	0,181818182	8,1356224	55,984788	-1,46	-3%	0,998901
1000	10000	3,5	54,22	0,181818182	7,678685	53,543511	-0,68	-1%	0,998901
1000	10000	4	51,48	0,181818182	7,2901825	51,598136	0,12	0%	0,998901
1000	10000	5	47,01	0,181818182	6,6571811	48,658584	1,65	4%	0,998901
5000	10000	0,5	126,39	0,666666667	5,5793011	130,18262	3,79	3%	0,9997
5000	10000	1	115,77	0,666666667	5,1102468	118,29312	2,53	2%	0,9997
5000	10000	1,5	112,66	0,666666667	4,9729029	112,80073	0,14	0%	0,9997
5000	10000	2	110,18	0,666666667	4,8637173	109,42626	-0,76	-1%	0,9997
5000	10000	2,5	107,53	0,666666667	4,7466038	107,07318	-0,46	0%	0,9997
5000	10000	3	104,88	0,666666667	4,6295654	105,30916	0,43	0%	0,9997
5000	10000	3,5	103,00	0,666666667	4,5467194	103,9228	0,92	1%	0,9997
5000	10000	4	101,29	0,666666667	4,471126	102,79616	1,51	1%	0,9997
5000	10000	5	98,27	0,666666667	4,3377598	101,05924	2,79	3%	0,9997
10000	10000	0,5	131,66	1	3,949893	130,93333	-0,73	-1%	0,9998
10000	10000	1	131,67	1	3,950052	130,93333	-0,74	-1%	0,9998
10000	10000	1,5	131,66	1	3,949881	130,93333	-0,73	-1%	0,9998
10000	10000	2	131,66	1	3,949929	130,93333	-0,73	-1%	0,9998
10000	10000	2,5	131,67	1	3,950157	130,93333	-0,74	-1%	0,9998
10000	10000	3	131,66	1	3,949743	130,93333	-0,72	-1%	0,9998
10000	10000	3,5	131,69	1	3,950688	130,93333	-0,76	-1%	0,9998
10000	10000	4	131,67	1	3,950061	130,93333	-0,74	-1%	0,9998
10000	10000	5	131,63	1	3,948933	130,93333	-0,70	-1%	0,9998

## 5.5 Διστρωματικό έδαφος: Προσαρμογή στην εξίσωση της γείωσης τύπου Γ

A) Προσαρμογή με το απλό εκθετικό μοντέλο

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο

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

όπου

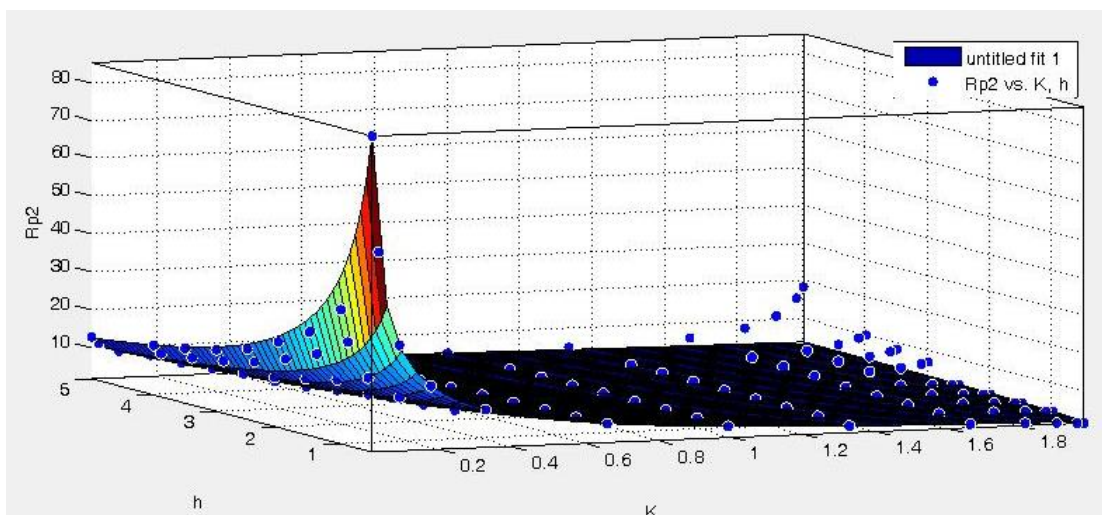
$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

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

στις μετρήσεις για τη γείωση τύπου Γ (πίνακας 4-3).

Η προσαρμογή της επιφάνειας στα δεδομένα φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.5: Προσαρμογή της επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b * K^{c*h^d+e}$  στα πειραματικά δεδομένα για τη γείωση τύπου Γ

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$a = -2,141$$

$$b = 6,953$$

$$c = -1,566$$

$$d = -0,1328$$

$$e = 1,072$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$SSE = 68,56$$

$$R^2 = 0,9952$$

$$Adjusted R^2 = 0,9952$$

$$RMSE = 0,5582$$

Αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν:

$$a = 0,9480$$

$$b = 4,000$$

$$c = 0,0805$$

$$d = -0,100$$

$$e = 0,0728$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο Trust Region Algorithm.

Επίσης έγινε και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου bisquare (μία ειδική περίπτωση των M-εκτιμητών)

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} * \left( -2,141 + 6,953 * \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-1,566 * h^{-0,1328} + 1,072} \right) \quad (5.14)$$

Ο πίνακας δείχνει την ποιότητα της προσαρμογής για κάθε μέτρηση:

Πίνακας 5-5: Σύγκριση της αντίστασης γείωσης του CDEGS με την υπολογιζόμενη από την εξίσωση αντίσταση γείωσης για τη γείωση τύπου Γ στο απλό εκθετικό μοντέλο προσαρμογής

$\rho_1$	$\rho_2$	h	Αντίσταση γείωσης CDEGS	K	RR	Αντίσταση γείωσης εξίσωσης	Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	% Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	Συντελεστής πολ/μου ΣΠ
100	100	0,5	1,61	1	4,816635	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	1	1,61	1	4,817352	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	1,5	1,61	1	4,815972	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	2	1,61	1	4,816182	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	2,5	1,61	1	4,816905	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	3	1,61	1	4,81656	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	3,5	1,61	1	4,816344	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	4	1,61	1	4,815855	1,604	0,00	0%	0,980392
100	100	5	1,61	1	4,815498	1,604	0,00	0%	0,980392
500	100	0,5	1,68	1,666666667	2,7611665	1,7364365	0,06	4%	0,988142
500	100	1	2,08	1,666666667	3,4305233	1,9798908	-0,10	-5%	0,988142

500	100	1,5	2,16	1,666666667	3,56092	2,1203477	-0,04	-2%	0,988142
500	100	2	2,24	1,666666667	3,6858051	2,2189181	-0,02	-1%	0,988142
500	100	2,5	2,39	1,666666667	3,9434639	2,2946826	-0,10	-4%	0,988142
500	100	3	2,88	1,666666667	4,7443062	2,3561047	-0,52	-18%	0,988142
500	100	3,5	3,09	1,666666667	5,0963339	2,4076805	-0,69	-22%	0,988142
500	100	4	3,30	1,666666667	5,4415998	2,4520834	-0,85	-26%	0,988142
500	100	5	3,78	1,666666667	6,2305541	2,525695	-1,26	-33%	0,988142
1000	100	0,5	1,68	1,818181818	2,3799608	1,826918	0,15	9%	0,98912
1000	100	1	2,25	1,818181818	3,1831461	2,1423196	-0,11	-5%	0,98912
1000	100	1,5	2,34	1,818181818	3,3130609	2,3261279	-0,01	-1%	0,98912
1000	100	2	2,43	1,818181818	3,4483971	2,4558949	0,02	1%	0,98912
1000	100	2,5	2,66	1,818181818	3,7739609	2,556061	-0,11	-4%	0,98912
1000	100	3	3,77	1,818181818	5,3428524	2,6375299	-1,14	-30%	0,98912
1000	100	3,5	4,14	1,818181818	5,8623601	2,7061195	-1,43	-35%	0,98912
1000	100	4	4,58	1,818181818	6,4862821	2,7653005	-1,81	-40%	0,98912
1000	100	5	5,78	1,818181818	8,1828635	2,8636738	-2,91	-50%	0,98912
5000	100	0,5	1,70	1,960784314	1,9726231	2,0342067	0,34	20%	0,989903
5000	100	1	2,45	1,960784314	2,8416682	2,4491856	0,00	0%	0,989903
5000	100	1,5	2,54	1,960784314	2,951361	2,693147	0,15	6%	0,989903
5000	100	2	2,66	1,960784314	3,0836085	2,8662769	0,21	8%	0,989903
5000	100	2,5	2,99	1,960784314	3,4688973	3,0004057	0,01	0%	0,989903
5000	100	3	5,88	1,960784314	6,8273667	3,1098064	-2,77	-47%	0,989903
5000	100	3,5	6,81	1,960784314	7,9124199	3,2021227	-3,61	-53%	0,989903
5000	100	4	8,05	1,960784314	9,3496684	3,2819285	-4,77	-59%	0,989903
5000	100	5	13,38	1,960784314	15,536972	3,4148933	-9,96	-74%	0,989903
10000	100	0,5	1,69	1,98019802	1,8715388	2,1027416	0,42	25%	0,990001
10000	100	1	2,48	1,98019802	2,7509452	2,5408384	0,06	3%	0,990001
10000	100	1,5	2,57	1,98019802	2,8548889	2,7986842	0,23	9%	0,990001
10000	100	2	2,69	1,98019802	2,9839886	2,9817911	0,29	11%	0,990001
10000	100	2,5	3,04	1,98019802	3,3716394	3,1237172	0,09	3%	0,990001
10000	100	3	6,52	1,98019802	7,2359402	3,2395204	-3,28	-50%	0,990001
10000	100	3,5	7,59	1,98019802	8,4238644	3,3372686	-4,25	-56%	0,990001
10000	100	4	9,11	1,98019802	10,109682	3,4217912	-5,69	-62%	0,990001
10000	100	5	16,65	1,98019802	18,476039	3,5626574	-13,08	-79%	0,990001
100	500	0,5	7,16	0,333333333	11,798024	7,2738094	0,11	2%	0,988142
100	500	1	5,76	0,333333333	9,4944453	5,963299	0,20	3%	0,988142
100	500	1,5	5,36	0,333333333	8,8298473	5,3369287	-0,02	0%	0,988142
100	500	2	5,05	0,333333333	8,3146878	4,9435208	-0,10	-2%	0,988142
100	500	2,5	4,70	0,333333333	7,7351553	4,6639283	-0,03	-1%	0,988142
100	500	3	4,39	0,333333333	7,2386093	4,4505227	0,06	1%	0,988142
100	500	3,5	4,21	0,333333333	6,9275544	4,2798577	0,07	2%	0,988142
100	500	4	4,04	0,333333333	6,6594062	4,1388063	0,10	2%	0,988142
100	500	5	3,77	0,333333333	6,212952	3,9162248	0,14	4%	0,988142
500	500	0,5	8,03	1	4,8161766	8,02	-0,01	0%	0,996016
500	500	1	8,03	1	4,8168948	8,02	-0,01	0%	0,996016
500	500	1,5	8,03	1	4,8155136	8,02	-0,01	0%	0,996016

500	500	2	8,03	1	4,8157236	8,02	-0,01	0%	0,996016
500	500	2,5	8,03	1	4,8164466	8,02	-0,01	0%	0,996016
500	500	3	8,03	1	4,8161016	8,02	-0,01	0%	0,996016
500	500	3,5	8,03	1	4,8158904	8,02	-0,01	0%	0,996016
500	500	4	8,03	1	4,815399	8,02	-0,01	0%	0,996016
500	500	5	8,03	1	4,8150414	8,02	-0,01	0%	0,996016
1000	500	0,5	8,20	1,333333333	3,620093	8,2335701	0,03	0%	0,997009
1000	500	1	9,06	1,333333333	4,0011125	8,8144291	-0,25	-3%	0,997009
1000	500	1,5	9,27	1,333333333	4,090427	9,140982	-0,13	-1%	0,997009
1000	500	2	9,44	1,333333333	4,1690433	9,3666635	-0,08	-1%	0,997009
1000	500	2,5	9,74	1,333333333	4,2984773	9,5382583	-0,20	-2%	0,997009
1000	500	3	10,27	1,333333333	4,533799	9,676213	-0,59	-6%	0,997009
1000	500	3,5	10,54	1,333333333	4,6545013	9,7912725	-0,75	-7%	0,997009
1000	500	4	10,80	1,333333333	4,7660794	9,8897715	-0,91	-8%	0,997009
1000	500	5	11,29	1,333333333	4,9852274	10,051949	-1,24	-11%	0,997009
5000	500	0,5	8,40	1,818181818	2,379762	9,1345901	0,73	9%	0,997805
5000	500	1	11,24	1,818181818	3,1831249	10,711598	-0,53	-5%	0,997805
5000	500	1,5	11,70	1,818181818	3,3130411	11,630639	-0,07	-1%	0,997805
5000	500	2	12,17	1,818181818	3,4483815	12,279474	0,10	1%	0,997805
5000	500	2,5	13,32	1,818181818	3,7739411	12,780305	-0,54	-4%	0,997805
5000	500	3	18,61	1,818181818	5,2719957	13,18765	-5,43	-29%	0,997805
5000	500	3,5	20,70	1,818181818	5,8623077	13,530597	-7,17	-35%	0,997805
5000	500	4	22,90	1,818181818	6,4862212	13,826502	-9,07	-40%	0,997805
5000	500	5	28,89	1,818181818	8,1827743	14,318369	-14,57	-50%	0,997805
10000	500	0,5	8,47	1,904761905	2,1569476	9,6087951	1,14	13%	0,997904
10000	500	1	11,81	1,904761905	3,0084044	11,449539	-0,36	-3%	0,997904
10000	500	1,5	12,29	1,904761905	3,1293691	12,52807	0,24	2%	0,997904
10000	500	2	12,82	1,904761905	3,2652858	13,291939	0,47	4%	0,997904
10000	500	2,5	14,25	1,904761905	3,6304187	13,882898	-0,37	-3%	0,997904
10000	500	3	23,47	1,904761905	5,9774443	14,364385	-9,10	-39%	0,997904
10000	500	3,5	26,76	1,904761905	6,8154368	14,770324	-11,99	-45%	0,997904
10000	500	4	30,59	1,904761905	7,7930064	15,120994	-15,47	-51%	0,997904
10000	500	5	43,41	1,904761905	11,057179	15,704727	-27,70	-64%	0,997904
100	1000	0,5	13,13	0,181818182	18,595892	13,230629	0,10	1%	0,98912
100	1000	1	9,52	0,181818182	13,489405	9,8849159	0,36	4%	0,98912
100	1000	1,5	8,52	0,181818182	12,073274	8,396559	-0,13	-2%	0,98912
100	1000	2	7,77	0,181818182	11,003424	7,5002023	-0,27	-3%	0,98912
100	1000	2,5	7,01	0,181818182	9,9221937	6,8817424	-0,12	-2%	0,98912
100	1000	3	6,45	0,181818182	9,1376134	6,4203003	-0,03	0%	0,98912
100	1000	3,5	6,07	0,181818182	8,600856	6,0579991	-0,02	0%	0,98912
100	1000	4	5,75	0,181818182	8,147792	5,7631367	0,01	0%	0,98912
100	1000	5	5,24	0,181818182	7,4192108	5,3063804	0,07	1%	0,98912
500	1000	0,5	15,40	0,666666667	6,7979021	15,60933	0,21	1%	0,997009
500	1000	1	14,05	0,666666667	6,2026807	14,394318	0,34	2%	0,997009
500	1000	1,5	13,66	0,666666667	6,0293566	13,764294	0,11	1%	0,997009
500	1000	2	13,34	0,666666667	5,8895673	13,349182	0,01	0%	0,997009

500	1000	2,5	12,95	0,666666667	5,7160667	13,044025	0,09	1%	0,997009
500	1000	3	12,54	0,666666667	5,5352649	12,804978	0,27	2%	0,997009
500	1000	3,5	12,28	0,666666667	5,4226671	12,609746	0,33	3%	0,997009
500	1000	4	12,06	0,666666667	5,322619	12,445527	0,39	3%	0,997009
500	1000	5	11,66	0,666666667	5,1479441	12,180829	0,52	4%	0,997009
1000	1000	0,5	16,06	1	4,816635	16,04	-0,02	0%	0,998004
1000	1000	1	16,06	1	4,817352	16,04	-0,02	0%	0,998004
1000	1000	1,5	16,05	1	4,815972	16,04	-0,01	0%	0,998004
1000	1000	2	16,05	1	4,816182	16,04	-0,01	0%	0,998004
1000	1000	2,5	16,06	1	4,816905	16,04	-0,02	0%	0,998004
1000	1000	3	16,06	1	4,81656	16,04	-0,02	0%	0,998004
1000	1000	3,5	16,05	1	4,816344	16,04	-0,01	0%	0,998004
1000	1000	4	16,05	1	4,815855	16,04	-0,01	0%	0,998004
1000	1000	5	16,05	1	4,815498	16,04	-0,01	0%	0,998004
5000	1000	0,5	16,76	1,666666667	2,7611665	17,364365	0,60	4%	0,998801
5000	1000	1	20,83	1,666666667	3,4305233	19,798908	-1,03	-5%	0,998801
5000	1000	1,5	21,62	1,666666667	3,56092	21,203477	-0,41	-2%	0,998801
5000	1000	2	22,38	1,666666667	3,6858051	22,189181	-0,19	-1%	0,998801
5000	1000	2,5	23,94	1,666666667	3,9434639	22,946826	-0,99	-4%	0,998801
5000	1000	3	28,80	1,666666667	4,7443062	23,561047	-5,24	-18%	0,998801
5000	1000	3,5	30,94	1,666666667	5,0963339	24,076805	-6,86	-22%	0,998801
5000	1000	4	33,04	1,666666667	5,4415998	24,520834	-8,51	-26%	0,998801
5000	1000	5	37,82	1,666666667	6,2305541	25,25695	-12,57	-33%	0,998801
10000	1000	0,5	16,80	1,818181818	2,3799608	18,26918	1,46	9%	0,998901
10000	1000	1	22,48	1,818181818	3,1831461	21,423196	-1,05	-5%	0,998901
10000	1000	1,5	23,39	1,818181818	3,3130609	23,261279	-0,13	-1%	0,998901
10000	1000	2	24,35	1,818181818	3,4483971	24,558949	0,21	1%	0,998901
10000	1000	2,5	26,65	1,818181818	3,7739609	25,56061	-1,09	-4%	0,998901
10000	1000	3	37,73	1,818181818	5,3428524	26,375299	-11,35	-30%	0,998901
10000	1000	3,5	41,39	1,818181818	5,8623601	27,061195	-14,33	-35%	0,998901
10000	1000	4	45,80	1,818181818	6,4862821	27,653005	-18,15	-40%	0,998901
10000	1000	5	57,78	1,818181818	8,1828635	28,636738	-29,14	-50%	0,998901
100	5000	0,5	46,91	0,039215686	54,486933	46,505969	-0,41	-1%	0,989903
100	5000	1	24,65	0,039215686	28,633636	27,805789	3,15	13%	0,989903
100	5000	1,5	20,05	0,039215686	23,290981	20,88382	0,83	4%	0,989903
100	5000	2	17,15	0,039215686	19,914695	17,137261	-0,01	0%	0,989903
100	5000	2,5	14,61	0,039215686	16,968285	14,739206	0,13	1%	0,989903
100	5000	3	12,99	0,039215686	15,08799	13,050175	0,06	0%	0,989903
100	5000	3,5	11,85	0,039215686	13,758859	11,784391	-0,06	-1%	0,989903
100	5000	4	10,91	0,039215686	12,67271	10,793598	-0,12	-1%	0,989903
100	5000	5	9,51	0,039215686	11,046035	9,3289308	-0,18	-2%	0,989903
500	5000	0,5	65,65	0,181818182	18,596167	66,153143	0,50	1%	0,997805
500	5000	1	47,62	0,181818182	13,489309	49,42458	1,80	4%	0,997805
500	5000	1,5	42,62	0,181818182	12,07309	41,982795	-0,64	-2%	0,997805
500	5000	2	38,85	0,181818182	11,003192	37,501012	-1,35	-3%	0,997805
500	5000	2,5	35,03	0,181818182	9,9219898	34,408712	-0,62	-2%	0,997805

500	5000	3	32,26	0,181818182	9,1374251	32,101502	-0,16	0%	0,997805
500	5000	3,5	30,36	0,181818182	8,6006662	30,289995	-0,07	0%	0,997805
500	5000	4	28,77	0,181818182	8,147598	28,815683	0,05	0%	0,997805
500	5000	5	26,19	0,181818182	7,4190196	26,531902	0,34	1%	0,997805
1000	5000	0,5	71,62	0,333333333	11,798024	72,738094	1,11	2%	0,998801
1000	5000	1	57,64	0,333333333	9,4944453	59,63299	1,99	3%	0,998801
1000	5000	1,5	53,60	0,333333333	8,8298473	53,369287	-0,24	0%	0,998801
1000	5000	2	50,48	0,333333333	8,3146878	49,435208	-1,04	-2%	0,998801
1000	5000	2,5	46,96	0,333333333	7,7351553	46,639283	-0,32	-1%	0,998801
1000	5000	3	43,94	0,333333333	7,2386093	44,505227	0,56	1%	0,998801
1000	5000	3,5	42,06	0,333333333	6,9275544	42,798577	0,74	2%	0,998801
1000	5000	4	40,43	0,333333333	6,6594062	41,388063	0,96	2%	0,998801
1000	5000	5	37,72	0,333333333	6,212952	39,162248	1,44	4%	0,998801
5000	5000	0,5	80,27	1	4,8161766	80,2	-0,07	0%	0,9996
5000	5000	1	80,28	1	4,8168948	80,2	-0,08	0%	0,9996
5000	5000	1,5	80,26	1	4,8155136	80,2	-0,06	0%	0,9996
5000	5000	2	80,26	1	4,8157236	80,2	-0,06	0%	0,9996
5000	5000	2,5	80,27	1	4,8164466	80,2	-0,07	0%	0,9996
5000	5000	3	80,27	1	4,8161016	80,2	-0,07	0%	0,9996
5000	5000	3,5	80,26	1	4,8158904	80,2	-0,06	0%	0,9996
5000	5000	4	80,26	1	4,815399	80,2	-0,06	0%	0,9996
5000	5000	5	80,25	1	4,8150414	80,2	-0,05	0%	0,9996
10000	5000	0,5	82,01	1,333333333	3,620093	82,335701	0,33	0%	0,9997
10000	5000	1	90,64	1,333333333	4,0011125	88,144291	-2,50	-3%	0,9997
10000	5000	1,5	92,66	1,333333333	4,090427	91,40982	-1,26	-1%	0,9997
10000	5000	2	94,45	1,333333333	4,1690433	93,666635	-0,78	-1%	0,9997
10000	5000	2,5	97,38	1,333333333	4,2984773	95,382583	-2,00	-2%	0,9997
10000	5000	3	102,71	1,333333333	4,533799	96,76213	-5,95	-6%	0,9997
10000	5000	3,5	105,44	1,333333333	4,6545013	97,912725	-7,53	-7%	0,9997
10000	5000	4	107,97	1,333333333	4,7660794	98,897715	-9,07	-8%	0,9997
10000	5000	5	112,94	1,333333333	4,9852274	100,51949	-12,42	-11%	0,9997
100	10000	0,5	76,70	0,01980198	85,132405	76,678018	-0,02	0%	0,990001
100	10000	1	33,56	0,01980198	37,249846	41,549735	7,99	24%	0,990001
100	10000	1,5	26,37	0,01980198	29,2703	29,581127	3,21	12%	0,990001
100	10000	2	22,04	0,01980198	24,461503	23,405358	1,37	6%	0,990001
100	10000	2,5	18,53	0,01980198	20,568711	19,582775	1,05	6%	0,990001
100	10000	3	16,30	0,01980198	18,095387	16,95874	0,66	4%	0,990001
100	10000	3,5	14,71	0,01980198	16,327478	15,032679	0,32	2%	0,990001
100	10000	4	13,45	0,01980198	14,934639	13,551022	0,10	1%	0,990001
100	10000	5	11,56	0,01980198	12,835352	11,405752	-0,16	-1%	0,990001
500	10000	0,5	116,55	0,095238095	29,688641	115,97941	-0,57	0%	0,997904
500	10000	1	74,68	0,095238095	19,022464	78,806362	4,13	6%	0,997904
500	10000	1,5	64,13	0,095238095	16,335586	63,496978	-0,63	-1%	0,997904
500	10000	2	56,72	0,095238095	14,448735	54,681992	-2,04	-4%	0,997904
500	10000	2,5	49,74	0,095238095	12,670956	48,789185	-0,96	-2%	0,997904
500	10000	3	45,04	0,095238095	11,472184	44,497931	-0,54	-1%	0,997904



500	10000	3,5	41,77	0,095238095	10,638702	41,194142	-0,57	-1%	0,997904
500	10000	4	39,06	0,095238095	9,9497653	38,549124	-0,51	-1%	0,997904
500	10000	5	34,82	0,095238095	8,869329	34,531926	-0,29	-1%	0,997904
1000	10000	0,5	131,31	0,181818182	18,595892	132,30629	1,00	1%	0,998901
1000	10000	1	95,25	0,181818182	13,489405	98,849159	3,60	4%	0,998901
1000	10000	1,5	85,25	0,181818182	12,073274	83,96559	-1,28	-2%	0,998901
1000	10000	2	77,70	0,181818182	11,003424	75,002023	-2,69	-3%	0,998901
1000	10000	2,5	70,06	0,181818182	9,9221937	68,817424	-1,24	-2%	0,998901
1000	10000	3	64,52	0,181818182	9,1376134	64,203003	-0,32	0%	0,998901
1000	10000	3,5	60,73	0,181818182	8,600856	60,579991	-0,15	0%	0,998901
1000	10000	4	57,53	0,181818182	8,147792	57,631367	0,10	0%	0,998901
1000	10000	5	52,39	0,181818182	7,4192108	53,063804	0,68	1%	0,998901
5000	10000	0,5	154,00	0,666666667	6,7979021	156,0933	2,09	1%	0,9997
5000	10000	1	140,52	0,666666667	6,2026807	143,94318	3,43	2%	0,9997
5000	10000	1,5	136,59	0,666666667	6,0293566	137,64294	1,05	1%	0,9997
5000	10000	2	133,42	0,666666667	5,8895673	133,49182	0,07	0%	0,9997
5000	10000	2,5	129,49	0,666666667	5,7160667	130,44025	0,95	1%	0,9997
5000	10000	3	125,40	0,666666667	5,5352649	128,04978	2,65	2%	0,9997
5000	10000	3,5	122,85	0,666666667	5,4226671	126,09746	3,25	3%	0,9997
5000	10000	4	120,58	0,666666667	5,322619	124,45527	3,88	3%	0,9997
5000	10000	5	116,62	0,666666667	5,1479441	121,80829	5,19	4%	0,9997
10000	10000	0,5	160,55	1	4,816635	160,4	-0,15	0%	0,9998
10000	10000	1	160,58	1	4,817352	160,4	-0,18	0%	0,9998
10000	10000	1,5	160,53	1	4,815972	160,4	-0,13	0%	0,9998
10000	10000	2	160,54	1	4,816182	160,4	-0,14	0%	0,9998
10000	10000	2,5	160,56	1	4,816905	160,4	-0,16	0%	0,9998
10000	10000	3	160,55	1	4,81656	160,4	-0,15	0%	0,9998
10000	10000	3,5	160,54	1	4,816344	160,4	-0,14	0%	0,9998
10000	10000	4	160,53	1	4,815855	160,4	-0,13	0%	0,9998
10000	10000	5	160,52	1	4,815498	160,4	-0,12	0%	0,9998

B) Προσαρμογή με το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

Θέλουμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$$RR = M(K, h) = a + b * K^{c*h^d+e} + 0,1 * K^{q*h^n+m}$$

όπου

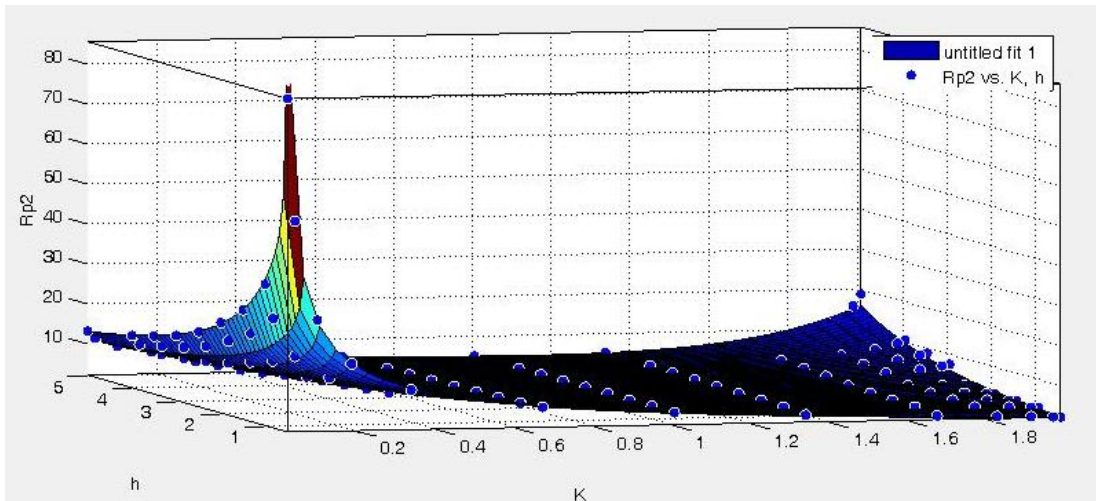
$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$$

και

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

στις μετρήσεις για τη γείωση τύπου Γ (πίνακας 4-3).

Η προσαρμογή της επιφάνειας στα δεδομένα φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.6: Προσαρμογή της επιφάνειας  $RR = M(K, h) = a + b * K^{c*h^{d+e}} + 0,1 * K^q * h^{n+m}$  στα πειραματικά δεδομένα για τη γείωση τύπου Γ

Οι συντελεστές παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$a = -5,383$$

$$b = 10,02$$

$$c = -1,928$$

$$d = -0,07696$$

$$e = 1,552$$

$$q = 13,97$$

$$m = -13,39$$

$$n = 0,235$$

Ποιότητα της προσαρμογής:

$$SSE = 22$$

$$R^2 = 0,9985$$

$$Adjusted R^2 = 0,9984$$

$$RMSE = 0,3184$$

Αρχικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν:

$$a = 0,9480$$

$$b = 0,8122$$

$$c = 0,0805$$

$$d = 0,2835$$

$$e = 0,0728$$

$$q = 0,4261$$

$$m = 0,2216$$

$$n = 0$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν ο Trust Region Algorithm.

Επίσης έγινε και χρήση ανθεκτικής παλινδρόμησης τύπου bisquare (μία ειδική περίπτωση των M-εκτιμητών)

Συνεπώς, η εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης γείωσης θα έχει τη μορφή:

$$R_{\text{γείωσης}} = \frac{1}{100 * \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right)} * \left( -5,383 + 10,02 * \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1 \right)^{-1,928 * h^{-0,07696} + 1,552} + 0,1 * \rho_1 - \rho_2 \rho_1 + \rho_2 + 113,97 * h^0,235 - 13,39 \right) \quad (5.15)$$

Ο πίνακας δείχνει την ποιότητα της προσαρμογής για κάθε μέτρηση:

Πίνακας 5-6: Σύγκριση της αντίστασης γείωσης του CDEGS με την υπολογιζόμενη από την εξίσωση αντίσταση γείωσης για τη γείωση τύπου Γ στο μοντέλο προσαρμογής αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$	$\rho_2$	h	Αντίσταση γείωσης CDEGS	K	RR	Αντίσταση γείωσης εξίσωσης	Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	% Διαφορά αντιστάσεων γείωσης	Συντελεστής πολ/μου ΣΠ
100	100	0,5	1,61	1	4,816635	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	1	1,61	1	4,817352	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	1,5	1,61	1	4,815972	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	2	1,61	1	4,816182	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	2,5	1,61	1	4,816905	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	3	1,61	1	4,81656	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	3,5	1,61	1	4,816344	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	4	1,61	1	4,815855	1,579	-0,03	-2%	0,980392
100	100	5	1,61	1	4,815498	1,579	-0,03	-2%	0,980392
500	100	0,5	1,68	1,666666667	2,7611665	1,5162548	-0,16	-10%	0,988142
500	100	1	2,08	1,666666667	3,4305233	1,8336887	-0,25	-12%	0,988142
500	100	1,5	2,16	1,666666667	3,56092	2,0728925	-0,09	-4%	0,988142
500	100	2	2,24	1,666666667	3,6858051	2,304089	0,07	3%	0,988142
500	100	2,5	2,39	1,666666667	3,9434639	2,5537158	0,16	7%	0,988142
500	100	3	2,88	1,666666667	4,7443062	2,8374155	-0,04	-1%	0,988142
500	100	3,5	3,09	1,666666667	5,0963339	3,1670544	0,07	2%	0,988142

500	100	4	3,30	1,666666667	5,4415998	3,5530032	0,25	8%	0,988142
500	100	5	3,78	1,666666667	6,2305541	4,5329539	0,75	20%	0,988142
1000	100	0,5	1,68	1,818181818	2,3799608	1,5324846	-0,15	-9%	0,98912
1000	100	1	2,25	1,818181818	3,1831461	1,9497463	-0,30	-13%	0,98912
1000	100	1,5	2,34	1,818181818	3,3130609	2,2837426	-0,06	-2%	0,98912
1000	100	2	2,43	1,818181818	3,4483971	2,6361943	0,20	8%	0,98912
1000	100	2,5	2,66	1,818181818	3,7739609	3,0541446	0,39	15%	0,98912
1000	100	3	3,77	1,818181818	5,3428524	3,5725609	-0,20	-5%	0,98912
1000	100	3,5	4,14	1,818181818	5,8623601	4,2235652	0,08	2%	0,98912
1000	100	4	4,58	1,818181818	6,4862821	5,0395399	0,46	10%	0,98912
1000	100	5	5,78	1,818181818	8,1828635	7,3047728	1,53	26%	0,98912
5000	100	0,5	1,70	1,960784314	1,9726231	1,6339075	-0,06	-4%	0,989903
5000	100	1	2,45	1,960784314	2,8416682	2,1900792	-0,26	-10%	0,989903
5000	100	1,5	2,54	1,960784314	2,951361	2,6612305	0,12	5%	0,989903
5000	100	2	2,66	1,960784314	3,0836085	3,2020289	0,55	21%	0,989903
5000	100	2,5	2,99	1,960784314	3,4688973	3,9013126	0,91	31%	0,989903
5000	100	3	5,88	1,960784314	6,8273667	4,8384946	-1,04	-18%	0,989903
5000	100	3,5	6,81	1,960784314	7,9124199	6,0964157	-0,72	-11%	0,989903
5000	100	4	8,05	1,960784314	9,3496684	7,7662003	-0,28	-4%	0,989903
5000	100	5	13,38	1,960784314	15,536972	12,762099	-0,62	-5%	0,989903
10000	100	0,5	1,69	1,98019802	1,8715388	1,67822	-0,01	0%	0,990001
10000	100	1	2,48	1,98019802	2,7509452	2,2663861	-0,21	-9%	0,990001
10000	100	1,5	2,57	1,98019802	2,8548889	2,7684928	0,20	8%	0,990001
10000	100	2	2,69	1,98019802	2,9839886	3,3514752	0,66	25%	0,990001
10000	100	2,5	3,04	1,98019802	3,3716394	4,1140669	1,08	35%	0,990001
10000	100	3	6,52	1,98019802	7,2359402	5,14648	-1,37	-21%	0,990001
10000	100	3,5	7,59	1,98019802	8,4238644	6,5441652	-1,04	-14%	0,990001
10000	100	4	9,11	1,98019802	10,109682	8,4131465	-0,69	-8%	0,990001
10000	100	5	16,65	1,98019802	18,476039	14,058962	-2,59	-16%	0,990001
100	500	0,5	7,16	0,333333333	11,798024	7,3801684	0,22	3%	0,988142
100	500	1	5,76	0,333333333	9,4944453	5,9583888	0,19	3%	0,988142
100	500	1,5	5,36	0,333333333	8,8298473	5,3539496	-0,01	0%	0,988142
100	500	2	5,05	0,333333333	8,3146878	4,9704433	-0,08	-2%	0,988142
100	500	2,5	4,70	0,333333333	7,7351553	4,6922769	0,00	0%	0,988142
100	500	3	4,39	0,333333333	7,2386093	4,4758948	0,08	2%	0,988142
100	500	3,5	4,21	0,333333333	6,9275544	4,2999895	0,09	2%	0,988142
100	500	4	4,04	0,333333333	6,6594062	4,1525407	0,11	3%	0,988142
100	500	5	3,77	0,333333333	6,212952	3,9158077	0,14	4%	0,988142
500	500	0,5	8,03	1	4,8161766	7,895	-0,13	-2%	0,996016
500	500	1	8,03	1	4,8168948	7,895	-0,13	-2%	0,996016
500	500	1,5	8,03	1	4,8155136	7,895	-0,13	-2%	0,996016
500	500	2	8,03	1	4,8157236	7,895	-0,13	-2%	0,996016
500	500	2,5	8,03	1	4,8164466	7,895	-0,13	-2%	0,996016
500	500	3	8,03	1	4,8161016	7,895	-0,13	-2%	0,996016
500	500	3,5	8,03	1	4,8158904	7,895	-0,13	-2%	0,996016
500	500	4	8,03	1	4,815399	7,895	-0,13	-2%	0,996016

500	500	5	8,03	1	4,8150414	7,895	-0,13	-2%	0,996016
1000	500	0,5	8,20	1,333333333	3,620093	7,7139627	-0,49	-6%	0,997009
1000	500	1	9,06	1,333333333	4,0011125	8,4451552	-0,62	-7%	0,997009
1000	500	1,5	9,27	1,333333333	4,090427	8,9276406	-0,34	-4%	0,997009
1000	500	2	9,44	1,333333333	4,1690433	9,3179687	-0,13	-1%	0,997009
1000	500	2,5	9,74	1,333333333	4,2984773	9,6645886	-0,07	-1%	0,997009
1000	500	3	10,27	1,333333333	4,533799	9,9889365	-0,28	-3%	0,997009
1000	500	3,5	10,54	1,333333333	4,6545013	10,30243	-0,24	-2%	0,997009
1000	500	4	10,80	1,333333333	4,7660794	10,61191	-0,19	-2%	0,997009
1000	500	5	11,29	1,333333333	4,9852274	11,2353	-0,06	-1%	0,997009
5000	500	0,5	8,40	1,818181818	2,379762	7,6624232	-0,74	-9%	0,997805
5000	500	1	11,24	1,818181818	3,1831249	9,7487317	-1,49	-13%	0,997805
5000	500	1,5	11,70	1,818181818	3,3130411	11,418713	-0,28	-2%	0,997805
5000	500	2	12,17	1,818181818	3,4483815	13,180971	1,01	8%	0,997805
5000	500	2,5	13,32	1,818181818	3,7739411	15,270723	1,95	15%	0,997805
5000	500	3	18,61	1,818181818	5,2719957	17,862805	-0,75	-4%	0,997805
5000	500	3,5	20,70	1,818181818	5,8623077	21,117826	0,42	2%	0,997805
5000	500	4	22,90	1,818181818	6,4862212	25,197699	2,30	10%	0,997805
5000	500	5	28,89	1,818181818	8,1827743	36,523864	7,63	26%	0,997805
10000	500	0,5	8,47	1,904761905	2,1569476	7,8561565	-0,61	-7%	0,997904
10000	500	1	11,81	1,904761905	3,0084044	10,31083	-1,50	-13%	0,997904
10000	500	1,5	12,29	1,904761905	3,1293691	12,344513	0,06	0%	0,997904
10000	500	2	12,82	1,904761905	3,2652858	14,602812	1,78	14%	0,997904
10000	500	2,5	14,25	1,904761905	3,6304187	17,426199	3,17	22%	0,997904
10000	500	3	23,47	1,904761905	5,9774443	21,099155	-2,37	-10%	0,997904
10000	500	3,5	26,76	1,904761905	6,8154368	25,905459	-0,85	-3%	0,997904
10000	500	4	30,59	1,904761905	7,7930064	32,14787	1,55	5%	0,997904
10000	500	5	43,41	1,904761905	11,057179	50,300686	6,89	16%	0,997904
100	1000	0,5	13,13	0,181818182	18,595892	13,222654	0,09	1%	0,98912
100	1000	1	9,52	0,181818182	13,489405	9,6564091	0,13	1%	0,98912
100	1000	1,5	8,52	0,181818182	12,073274	8,3425505	-0,18	-2%	0,98912
100	1000	2	7,77	0,181818182	11,003424	7,5224384	-0,25	-3%	0,98912
100	1000	2,5	7,01	0,181818182	9,9221937	6,9370532	-0,07	-1%	0,98912
100	1000	3	6,45	0,181818182	9,1376134	6,4883623	0,04	1%	0,98912
100	1000	3,5	6,07	0,181818182	8,600856	6,1283001	0,06	1%	0,98912
100	1000	4	5,75	0,181818182	8,147792	5,82988	0,08	1%	0,98912
100	1000	5	5,24	0,181818182	7,4192108	5,3574394	0,12	2%	0,98912
500	1000	0,5	15,40	0,666666667	6,7979021	15,81965	0,42	3%	0,997009
500	1000	1	14,05	0,666666667	6,2026807	14,422131	0,37	3%	0,997009
500	1000	1,5	13,66	0,666666667	6,0293566	13,717315	0,06	0%	0,997009
500	1000	2	13,34	0,666666667	5,8895673	13,256708	-0,09	-1%	0,997009
500	1000	2,5	12,95	0,666666667	5,7160667	12,918559	-0,03	0%	0,997009
500	1000	3	12,54	0,666666667	5,5352649	12,65324	0,11	1%	0,997009
500	1000	3,5	12,28	0,666666667	5,4226671	12,435905	0,15	1%	0,997009
500	1000	4	12,06	0,666666667	5,322619	12,252429	0,19	2%	0,997009
500	1000	5	11,66	0,666666667	5,1479441	11,954979	0,29	3%	0,997009

1000	1000	0,5	16,06	1	4,816635	15,79	-0,27	-2%	0,998004
1000	1000	1	16,06	1	4,817352	15,79	-0,27	-2%	0,998004
1000	1000	1,5	16,05	1	4,815972	15,79	-0,26	-2%	0,998004
1000	1000	2	16,05	1	4,816182	15,79	-0,26	-2%	0,998004
1000	1000	2,5	16,06	1	4,816905	15,79	-0,27	-2%	0,998004
1000	1000	3	16,06	1	4,81656	15,79	-0,27	-2%	0,998004
1000	1000	3,5	16,05	1	4,816344	15,79	-0,26	-2%	0,998004
1000	1000	4	16,05	1	4,815855	15,79	-0,26	-2%	0,998004
1000	1000	5	16,05	1	4,815498	15,79	-0,26	-2%	0,998004
5000	1000	0,5	16,76	1,666666667	2,7611665	15,162548	-1,60	-10%	0,998801
5000	1000	1	20,83	1,666666667	3,4305233	18,336887	-2,49	-12%	0,998801
5000	1000	1,5	21,62	1,666666667	3,56092	20,728925	-0,89	-4%	0,998801
5000	1000	2	22,38	1,666666667	3,6858051	23,04089	0,66	3%	0,998801
5000	1000	2,5	23,94	1,666666667	3,9434639	25,537158	1,60	7%	0,998801
5000	1000	3	28,80	1,666666667	4,7443062	28,374155	-0,43	-1%	0,998801
5000	1000	3,5	30,94	1,666666667	5,0963339	31,670544	0,73	2%	0,998801
5000	1000	4	33,04	1,666666667	5,4415998	35,530032	2,49	8%	0,998801
5000	1000	5	37,82	1,666666667	6,2305541	45,329539	7,50	20%	0,998801
10000	1000	0,5	16,80	1,818181818	2,3799608	15,324846	-1,48	-9%	0,998901
10000	1000	1	22,48	1,818181818	3,1831461	19,497463	-2,98	-13%	0,998901
10000	1000	1,5	23,39	1,818181818	3,3130609	22,837426	-0,56	-2%	0,998901
10000	1000	2	24,35	1,818181818	3,4483971	26,361943	2,01	8%	0,998901
10000	1000	2,5	26,65	1,818181818	3,7739609	30,541446	3,89	15%	0,998901
10000	1000	3	37,73	1,818181818	5,3428524	35,725609	-2,00	-5%	0,998901
10000	1000	3,5	41,39	1,818181818	5,8623601	42,235652	0,84	2%	0,998901
10000	1000	4	45,80	1,818181818	6,4862821	50,395399	4,60	10%	0,998901
10000	1000	5	57,78	1,818181818	8,1828635	73,047728	15,27	26%	0,998901
100	5000	0,5	46,91	0,039215686	54,486933	48,241597	1,33	3%	0,989903
100	5000	1	24,65	0,039215686	28,633636	24,53493	-0,12	0%	0,989903
100	5000	1,5	20,05	0,039215686	23,290981	19,432349	-0,62	-3%	0,989903
100	5000	2	17,15	0,039215686	19,914695	16,445007	-0,70	-4%	0,989903
100	5000	2,5	14,61	0,039215686	16,968285	14,423859	-0,19	-1%	0,989903
100	5000	3	12,99	0,039215686	15,08799	12,939581	-0,05	0%	0,989903
100	5000	3,5	11,85	0,039215686	13,758859	11,789675	-0,06	0%	0,989903
100	5000	4	10,91	0,039215686	12,67271	10,864579	-0,05	0%	0,989903
100	5000	5	9,51	0,039215686	11,046035	9,4520531	-0,06	-1%	0,989903
500	5000	0,5	65,65	0,181818182	18,596167	66,113271	0,46	1%	0,997805
500	5000	1	47,62	0,181818182	13,489309	48,282046	0,66	1%	0,997805
500	5000	1,5	42,62	0,181818182	12,07309	41,712753	-0,91	-2%	0,997805
500	5000	2	38,85	0,181818182	11,003192	37,612192	-1,23	-3%	0,997805
500	5000	2,5	35,03	0,181818182	9,9219898	34,685266	-0,34	-1%	0,997805
500	5000	3	32,26	0,181818182	9,1374251	32,441812	0,18	1%	0,997805
500	5000	3,5	30,36	0,181818182	8,6006662	30,6415	0,28	1%	0,997805
500	5000	4	28,77	0,181818182	8,147598	29,1494	0,38	1%	0,997805
500	5000	5	26,19	0,181818182	7,4190196	26,787197	0,59	2%	0,997805
1000	5000	0,5	71,62	0,333333333	11,798024	73,801684	2,18	3%	0,998801

1000	5000	1	57,64	0,333333333	9,4944453	59,583888	1,94	3%	0,998801
1000	5000	1,5	53,60	0,333333333	8,8298473	53,539496	-0,07	0%	0,998801
1000	5000	2	50,48	0,333333333	8,3146878	49,704433	-0,77	-2%	0,998801
1000	5000	2,5	46,96	0,333333333	7,7351553	46,922769	-0,04	0%	0,998801
1000	5000	3	43,94	0,333333333	7,2386093	44,758948	0,81	2%	0,998801
1000	5000	3,5	42,06	0,333333333	6,9275544	42,999895	0,94	2%	0,998801
1000	5000	4	40,43	0,333333333	6,6594062	41,525407	1,10	3%	0,998801
1000	5000	5	37,72	0,333333333	6,212952	39,158077	1,44	4%	0,998801
5000	5000	0,5	80,27	1	4,8161766	78,95	-1,32	-2%	0,9996
5000	5000	1	80,28	1	4,8168948	78,95	-1,33	-2%	0,9996
5000	5000	1,5	80,26	1	4,8155136	78,95	-1,31	-2%	0,9996
5000	5000	2	80,26	1	4,8157236	78,95	-1,31	-2%	0,9996
5000	5000	2,5	80,27	1	4,8164466	78,95	-1,32	-2%	0,9996
5000	5000	3	80,27	1	4,8161016	78,95	-1,32	-2%	0,9996
5000	5000	3,5	80,26	1	4,8158904	78,95	-1,31	-2%	0,9996
5000	5000	4	80,26	1	4,815399	78,95	-1,31	-2%	0,9996
5000	5000	5	80,25	1	4,8150414	78,95	-1,30	-2%	0,9996
10000	5000	0,5	82,01	1,333333333	3,620093	77,139627	-4,87	-6%	0,9997
10000	5000	1	90,64	1,333333333	4,0011125	84,451552	-6,19	-7%	0,9997
10000	5000	1,5	92,66	1,333333333	4,090427	89,276406	-3,39	-4%	0,9997
10000	5000	2	94,45	1,333333333	4,1690433	93,179687	-1,27	-1%	0,9997
10000	5000	2,5	97,38	1,333333333	4,2984773	96,645886	-0,73	-1%	0,9997
10000	5000	3	102,71	1,333333333	4,533799	99,889365	-2,82	-3%	0,9997
10000	5000	3,5	105,44	1,333333333	4,6545013	103,0243	-2,42	-2%	0,9997
10000	5000	4	107,97	1,333333333	4,7660794	106,1191	-1,85	-2%	0,9997
10000	5000	5	112,94	1,333333333	4,9852274	112,353	-0,58	-1%	0,9997
100	10000	0,5	76,70	0,01980198	85,132405	89,798051	13,10	17%	0,990001
100	10000	1	33,56	0,01980198	37,249846	34,603836	1,05	3%	0,990001
100	10000	1,5	26,37	0,01980198	29,2703	26,417793	0,05	0%	0,990001
100	10000	2	22,04	0,01980198	24,461503	21,781728	-0,26	-1%	0,990001
100	10000	2,5	18,53	0,01980198	20,568711	18,72169	0,19	1%	0,990001
100	10000	3	16,30	0,01980198	18,095387	16,517331	0,22	1%	0,990001
100	10000	3,5	14,71	0,01980198	16,327478	14,836216	0,13	1%	0,990001
100	10000	4	13,45	0,01980198	14,934639	13,501601	0,05	0%	0,990001
100	10000	5	11,56	0,01980198	12,835352	11,496296	-0,07	-1%	0,990001
500	10000	0,5	116,55	0,095238095	29,688641	114,94556	-1,61	-1%	0,997904
500	10000	1	74,68	0,095238095	19,022464	74,196551	-0,48	-1%	0,997904
500	10000	1,5	64,13	0,095238095	16,335586	61,718659	-2,41	-4%	0,997904
500	10000	2	56,72	0,095238095	14,448735	54,115242	-2,61	-5%	0,997904
500	10000	2,5	49,74	0,095238095	12,670956	48,805063	-0,94	-2%	0,997904
500	10000	3	45,04	0,095238095	11,472184	44,806909	-0,23	-1%	0,997904
500	10000	3,5	41,77	0,095238095	10,638702	41,645576	-0,12	0%	0,997904
500	10000	4	39,06	0,095238095	9,9497653	39,058081	0,00	0%	0,997904
500	10000	5	34,82	0,095238095	8,869329	35,023732	0,20	1%	0,997904
1000	10000	0,5	131,31	0,181818182	18,595892	132,22654	0,92	1%	0,998901
1000	10000	1	95,25	0,181818182	13,489405	96,564091	1,32	1%	0,998901

1000	10000	1,5	85,25	0,181818182	12,073274	83,425505	-1,82	-2%	0,998901
1000	10000	2	77,70	0,181818182	11,003424	75,224384	-2,47	-3%	0,998901
1000	10000	2,5	70,06	0,181818182	9,9221937	69,370532	-0,69	-1%	0,998901
1000	10000	3	64,52	0,181818182	9,1376134	64,883623	0,36	1%	0,998901
1000	10000	3,5	60,73	0,181818182	8,600856	61,283001	0,55	1%	0,998901
1000	10000	4	57,53	0,181818182	8,147792	58,2988	0,77	1%	0,998901
1000	10000	5	52,39	0,181818182	7,4192108	53,574394	1,19	2%	0,998901
5000	10000	0,5	154,00	0,666666667	6,7979021	158,1965	4,20	3%	0,9997
5000	10000	1	140,52	0,666666667	6,2026807	144,22131	3,71	3%	0,9997
5000	10000	1,5	136,59	0,666666667	6,0293566	137,17315	0,58	0%	0,9997
5000	10000	2	133,42	0,666666667	5,8895673	132,56708	-0,86	-1%	0,9997
5000	10000	2,5	129,49	0,666666667	5,7160667	129,18559	-0,31	0%	0,9997
5000	10000	3	125,40	0,666666667	5,5352649	126,5324	1,14	1%	0,9997
5000	10000	3,5	122,85	0,666666667	5,4226671	124,35905	1,51	1%	0,9997
5000	10000	4	120,58	0,666666667	5,322619	122,52429	1,95	2%	0,9997
5000	10000	5	116,62	0,666666667	5,1479441	119,54979	2,93	3%	0,9997
10000	10000	0,5	160,55	1	4,816635	157,9	-2,65	-2%	0,9998
10000	10000	1	160,58	1	4,817352	157,9	-2,68	-2%	0,9998
10000	10000	1,5	160,53	1	4,815972	157,9	-2,63	-2%	0,9998
10000	10000	2	160,54	1	4,816182	157,9	-2,64	-2%	0,9998
10000	10000	2,5	160,56	1	4,816905	157,9	-2,66	-2%	0,9998
10000	10000	3	160,55	1	4,81656	157,9	-2,65	-2%	0,9998
10000	10000	3,5	160,54	1	4,816344	157,9	-2,64	-2%	0,9998
10000	10000	4	160,53	1	4,815855	157,9	-2,63	-2%	0,9998
10000	10000	5	160,52	1	4,815498	157,9	-2,62	-2%	0,9998

## 5.6 Συγκρίσεις

### 5.6.1 Μονοστρωματικό έδαφος

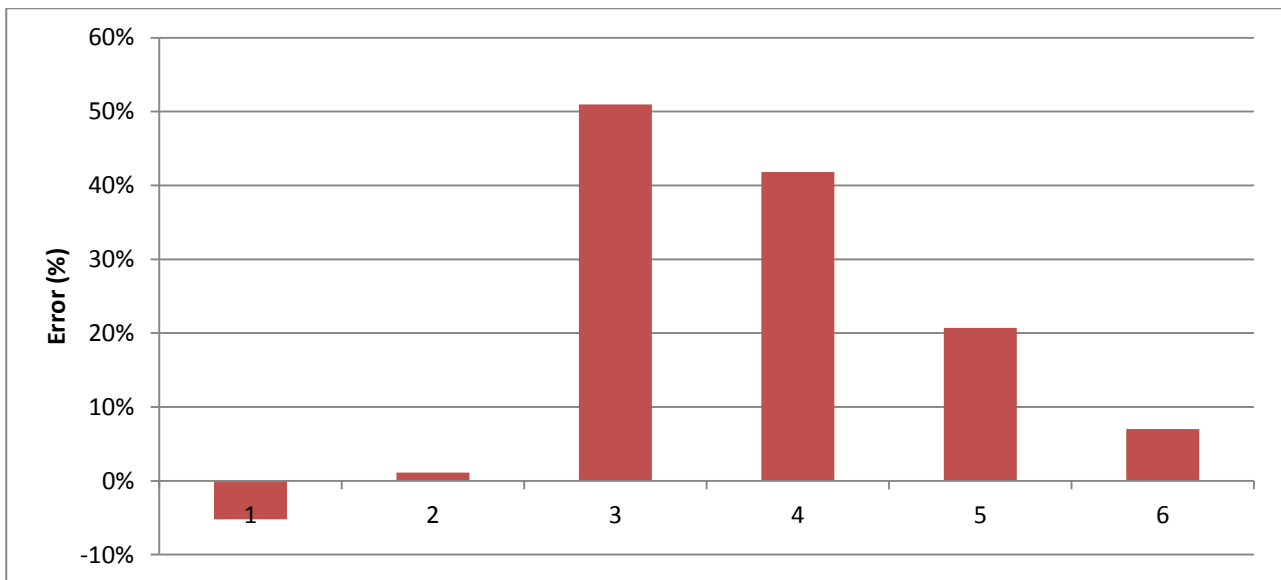
Για την επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την εργασία [81].

#### Γείωση τύπου Α

*Πίνακας 5-7: Επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων με χρήση τιμών από την εργασία [81] για μονοστρωματικό έδαφος, για τη γείωση τύπου Α*

A/A εδάφους	$\rho$	$R_{\gamma}$ από εξίσωση	$R_{\gamma}$ από [81]	Διαφορά
1	1270	30,16	31,82	-5%
2	1589	37,74	37,32	1%
3	700	16,62	11,01	51%
4	791	18,78	13,24	42%
5	625	14,84	12,29	21%
6	1112	26,42	24,69	7%



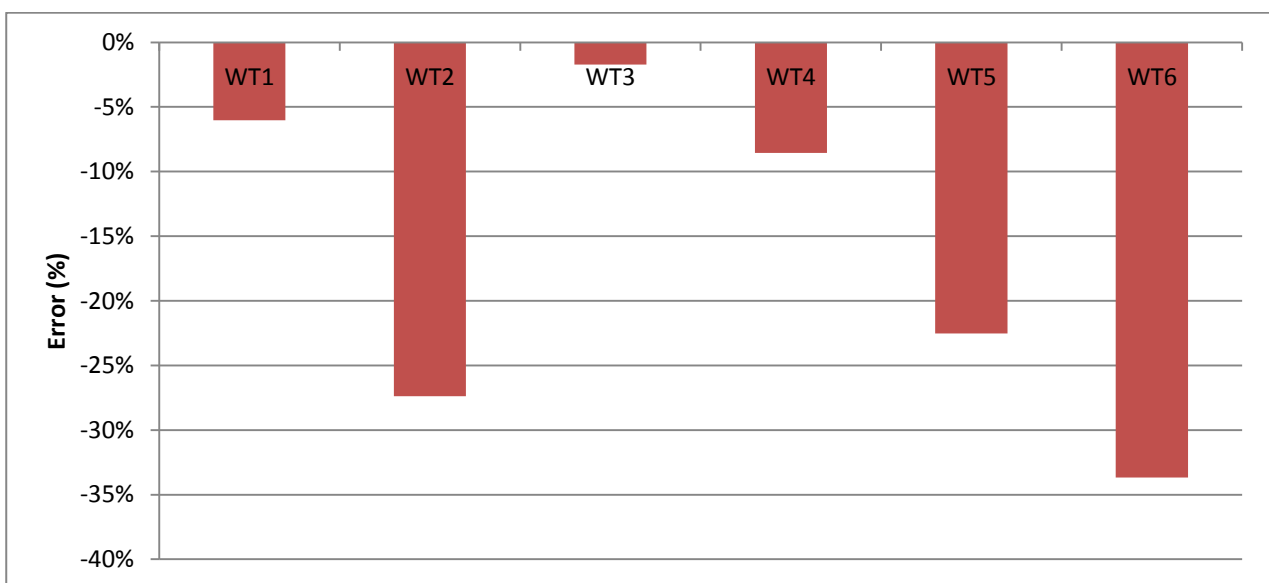


Σχήμα 5.7: Σφάλμα για κάθε περίπτωση εδάφους σε σχέση με τις τιμές της εργασίας [81], για τη γείωση τύπου A σε μονοστρωματική περίπτωση εδάφους

### Γείωση τύπου B

Πίνακας 5-8: Επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων με χρήση τιμών από την εργασία [81] για μονοστρωματικό έδαφος, για τη γείωση τύπου B

A/A εδάφους	$\rho$	$R_{\gamma}$ από εξίσωση	$R_{\gamma}$ από [81]	Διαφορά
1	1270	16,71	17,78	-6%
2	1589	20,91	28,80	-27%
3	700	9,21	9,37	-2%
4	791	10,41	11,38	-9%
5	625	8,22	10,61	-23%
6	1112	14,64	22,07	-34%

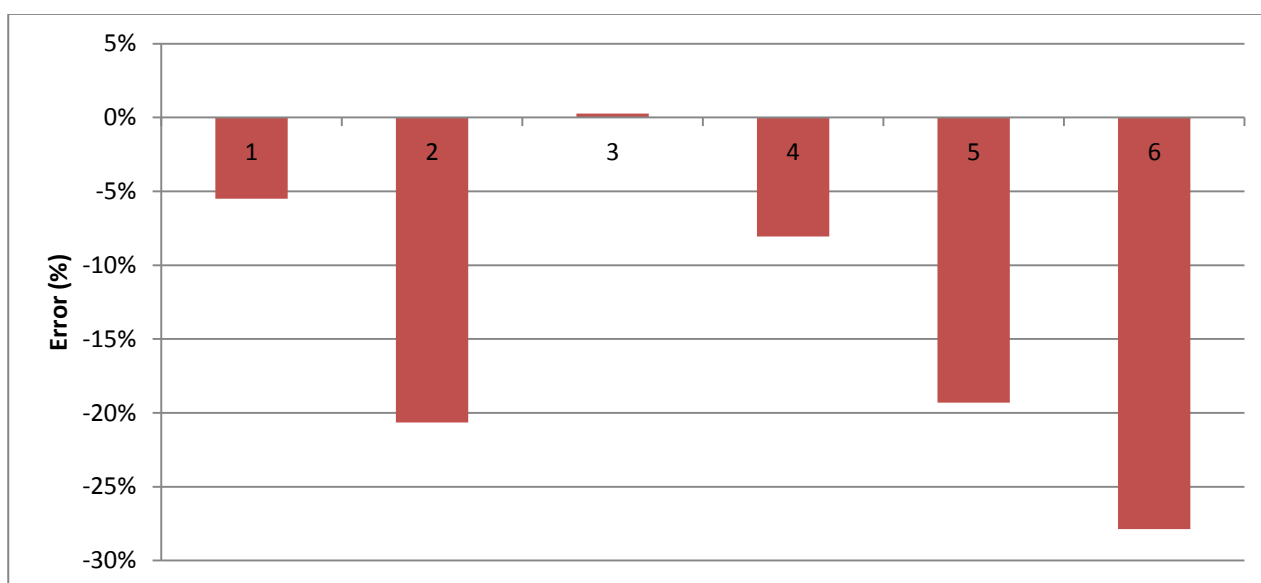


Σχήμα 5.8: Σφάλμα για κάθε περίπτωση εδάφους σε σχέση με τις τιμές της εργασίας [81], για τη γείωση τύπου B σε μονοστρωματική περίπτωση εδάφους

## Γείωση τύπου Γ

Πίνακας 5-9: Επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων με χρήση τιμών από την εργασία [81] για μονοστρωματικό έδαφος, για τη γείωση τύπου Γ

A/A εδάφους	$\rho$	$R_{\gamma}$ από εξίσωση	$R_{\gamma}$ από [81]	Διαφορά
1	1270	20,37	21,56	-6%
2	1589	25,50	32,13	-21%
3	700	11,23	11,20	0%
4	791	12,69	13,80	-8%
5	625	10,02	12,42	-19%
6	1112	17,85	24,74	-28%



Σχήμα 5.9: Σφάλμα για κάθε περίπτωση εδάφους σε σχέση με τις τιμές της εργασίας [81], για τη γείωση τύπου Γ σε μονοστρωματική περίπτωση εδάφους

### 5.6.2 Διστρωματικό έδαφος

Στην υποενότητα αυτή θα γίνει επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις εξισώσεις χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις από το λογισμικό CDEGS που δεν ανήκουν σε εκείνο το σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων καθώς και δεδομένων από την εργασία [81]. Αξίζει βέβαια στο σημείο αυτό να υπενθυμίσουμε πως αναμένουμε ότι η ακρίβεια των εξισώσεων θα είναι πολύ μεγαλύτερη στα εδάφη εκείνα για τα οποία  $\rho_1 = 100 - 10000 \Omega * m$ ,  $\rho_2 = 100 - 10000 \Omega * m$  και  $h = 0,5 - 5 m$  διότι τέτοια εύρη χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των εξισώσεων.

#### Σύστημα γείωσης A

- Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων

Πίνακας 5-10: Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων, για το απλό εκθετικό μοντέλο

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.10)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
222	3456	2,4	30,29	30,91	0,61	2%
3456	234	3,1	11,96	9,53	-2,43	-20%
567	1987	1,7	39,06	37,84	-1,22	-3%
2345	567	1,4	14,36	15,09	0,74	5%
200	1000	3	13,13	13,56	0,42	3%

Πίνακας 5-11: Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων για το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.11)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
222	3456	2,4	30,29	30,64	0,34	1%
3456	234	3,1	11,96	11,48	-0,48	-4%
567	1987	1,7	39,06	37,03	-2,02	-5%
2345	567	1,4	14,36	14,71	0,35	2%
200	1000	3	13,13	13,48	0,34	3%

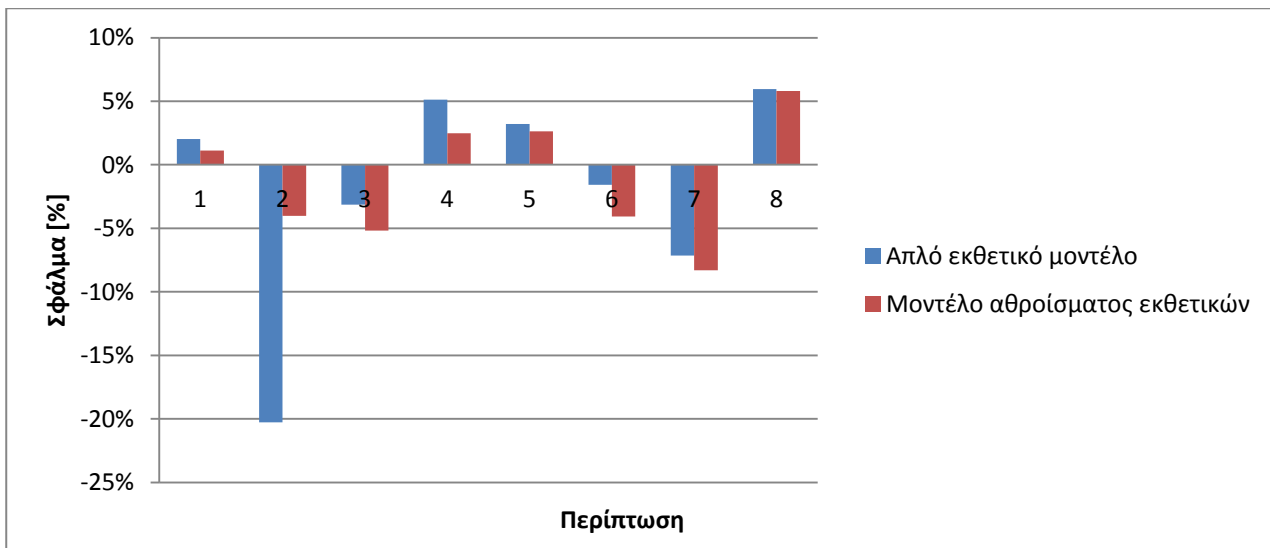
- Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81]

Πίνακας 5-12: Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81] για το απλό εκθετικό μοντέλο

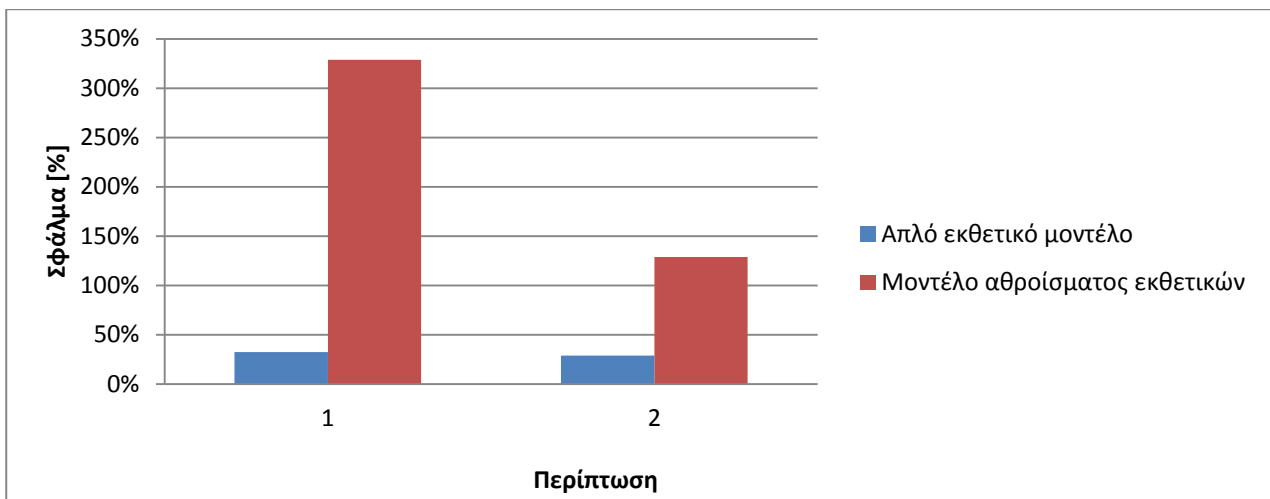
$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.10)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
251,86	965,86	1,46	19,11	18,81	-0,30	-2%
217,32	1384,08	2,23	21,00	19,50	-1,50	-7%
351,47	3893,22	2,75	35,67	37,80	2,13	6%
1784,1	1149,191	0,8	37,32 (27,72)	27,25	-10,07	-27%
59,67	988,14	0,21	20,37	26,26	5,89	29%
77,42	1535,38	0,17	31,82	42,15	10,33	32%

Πίνακας 5-13: Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81] για το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.11)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
251,86	965,86	1,46	19,11	18,33	-0,78	-4%
217,32	1384,08	2,23	21,00	19,25	-1,75	-8%
351,47	3893,22	2,75	35,67	37,74	2,07	6%
1784,1	1149,191	0,8	37,32 (27,72)	26,61	-10,71	-29%
59,67	988,14	0,21	20,37	46,59	26,22	129%
77,42	1535,38	0,17	31,82	136,41	104,59	329%



Σχήμα 5.10: Γραφική παράσταση του σφάλματος ανάλογα με την περίπτωση της δοκιμής επαλήθευσης με δεδομένα εντός των ορίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου, για τη γείωση Α



Σχήμα 5.11: Γραφική παράσταση του σφάλματος ανάλογα με την περίπτωση της δοκιμής επαλήθευσης με δεδομένα εκτός των ορίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου, για τη γείωση Α

### Σύστημα γείωσης Β

- Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων

Πίνακας 5-14: Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων για το απλό εκθετικό μοντέλο

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.12)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
222	3456	2,4	17,85	17,09	-0,76	-4%
3456	234	3,1	9,00	5,47	-3,54	-39%
567	1987	1,7	19,32	19,57	0,25	1%
2345	567	1,4	10,20	9,85	-0,35	-3%
200	1000	3	7,65	7,71	0,07	1%

Πίνακας 5-15: Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων για το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.13)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
222	3456	2,4	17,85	16,89	-0,96	-5%
3456	234	3,1	9,00	8,28	-0,72	-8%
567	1987	1,7	19,32	19,06	-0,26	-1%
2345	567	1,4	10,20	9,89	-0,30	-3%
200	1000	3	7,65	7,58	-0,07	-1%

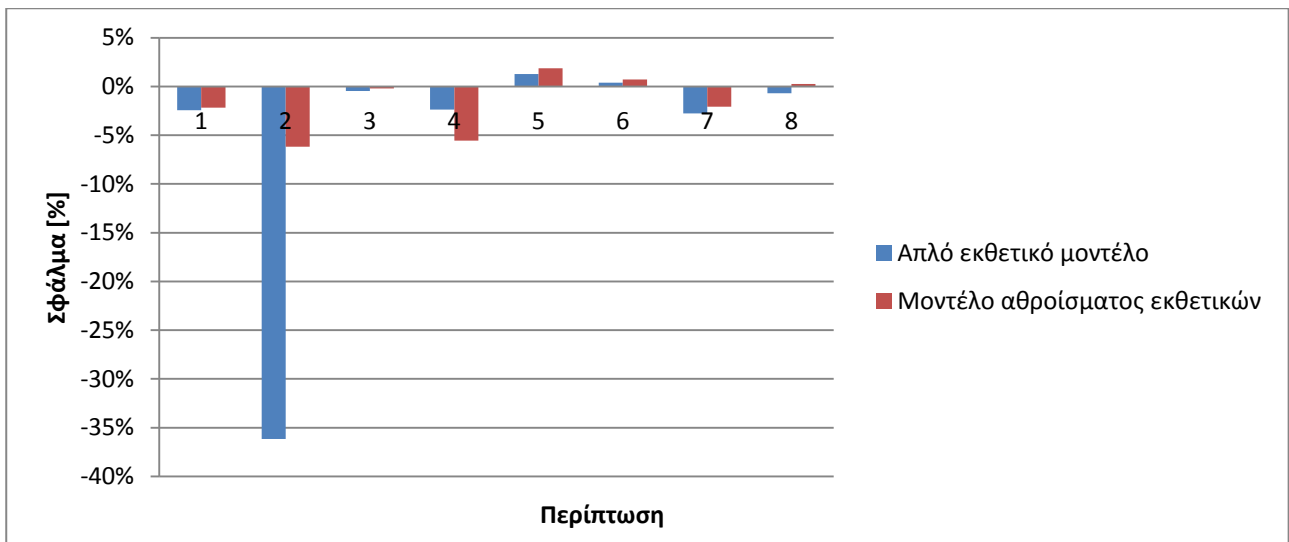
- Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81]

Πίνακας 5-16: Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81] για το απλό εκθετικό μοντέλο

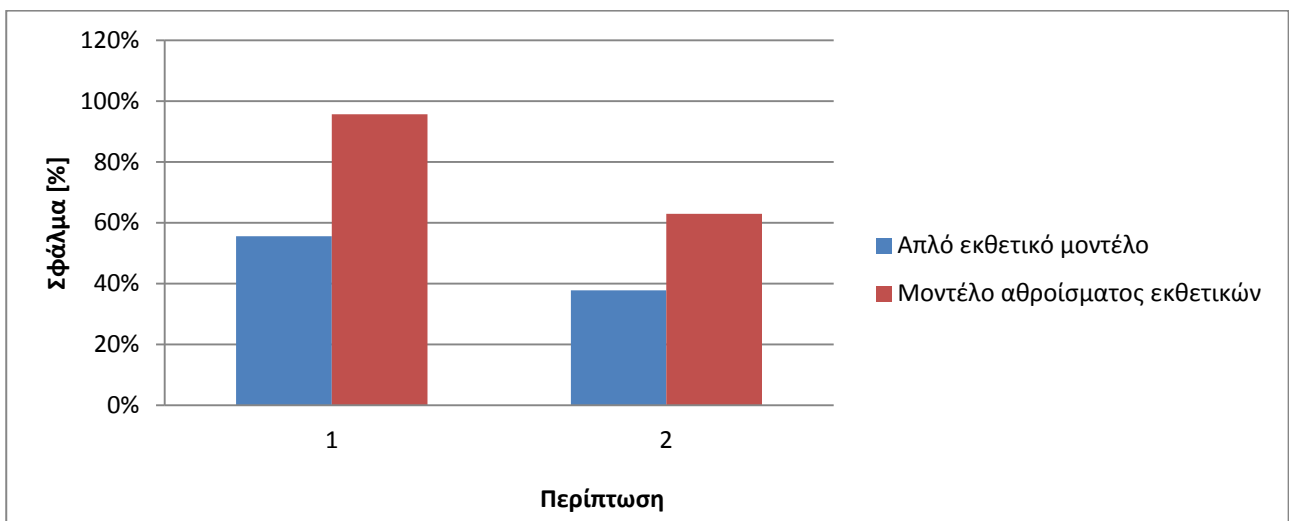
$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.12)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
251,86	965,86	1,46	9,37	9,53	0,16	2%
217,32	1384,08	2,23	10,61	10,40	-0,21	-2%
351,47	3893,22	2,75	22,07	21,52	-0,55	-3%
1784,1	1149,191	0,8	28,80 (16,28)	16,46	-12,34	-43%
59,67	988,14	0,21	11,38	15,68	4,30	38%
77,42	1535,38	0,17	17,78	27,67	9,89	56%

Πίνακας 5-17: Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81] για το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.13)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
251,86	965,86	1,46	9,37	9,31	-0,06	-1%
217,32	1384,08	2,23	10,61	10,21	-0,40	-4%
351,47	3893,22	2,75	22,07	21,34	-0,73	-3%
1784,1	1149,191	0,8	28,80 (16,28)	15,72	-13,08	-45%
59,67	988,14	0,21	11,38	18,55	7,17	63%
77,42	1535,38	0,17	17,78	34,78	17,00	96%



Σχήμα 5.12: Γραφική παράσταση του σφάλματος ανάλογα με την περίπτωση της δοκιμής επαλήθευσης με δεδομένα εντός των ορίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου, για τη γείωση Β



Σχήμα 5.13: Γραφική παράσταση του σφάλματος ανάλογα με την περίπτωση της δοκιμής επαλήθευσης με δεδομένα εκτός των ορίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου, για τη γείωση Β

### Σύστημα γείωσης Γ

- Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων

Πίνακας 5-18: Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων για το απλό εκθετικό μοντέλο

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.14)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
222	3456	2,4	20,03	19,54	-0,49	-2%
3456	234	3,1	10,24	6,53	-3,70	-36%
567	1987	1,7	23,11	23,00	-0,11	0%
2345	567	1,4	11,85	11,56	-0,28	-2%
200	1000	3	8,79	8,90	0,11	1%

Πίνακας 5-19: Επαλήθευση με επιπλέον προσομοιώσεις από το CDEGS που δεν ανήκουν στο σύνολο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων για το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.15)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
222	3456	2,4	20,03	19,59	-0,44	-2%
3456	234	3,1	10,24	9,60	-0,63	-6%
567	1987	1,7	23,11	23,07	-0,04	0%
2345	567	1,4	11,85	11,19	-0,66	-6%
200	1000	3	8,79	8,95	0,16	2%

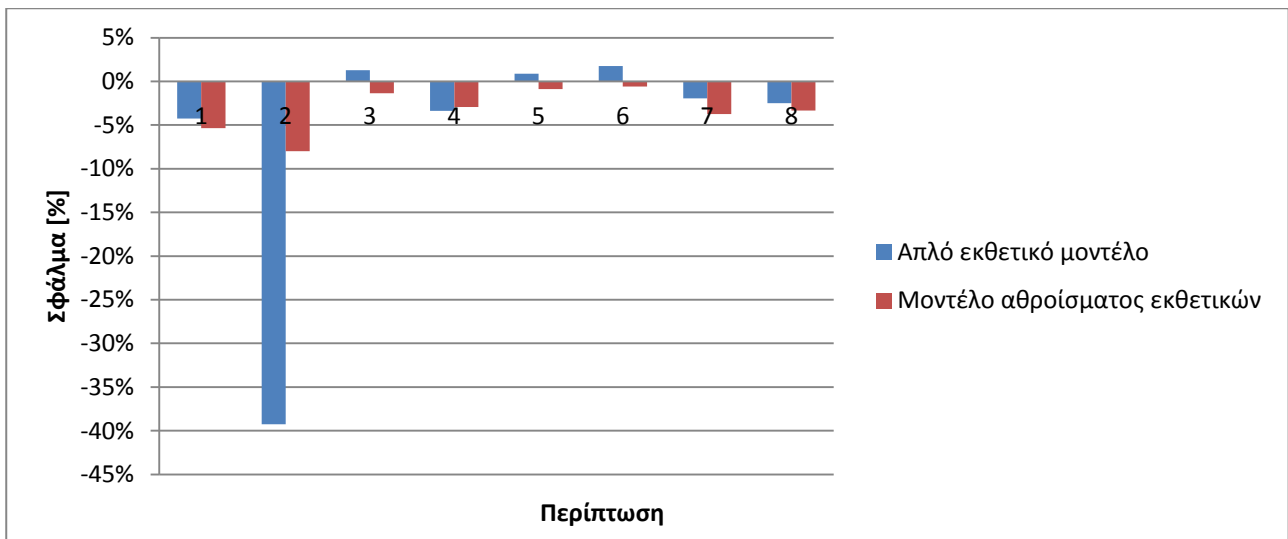
- Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81]

Πίνακας 5-20: Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81] για το απλό εκθετικό μοντέλο

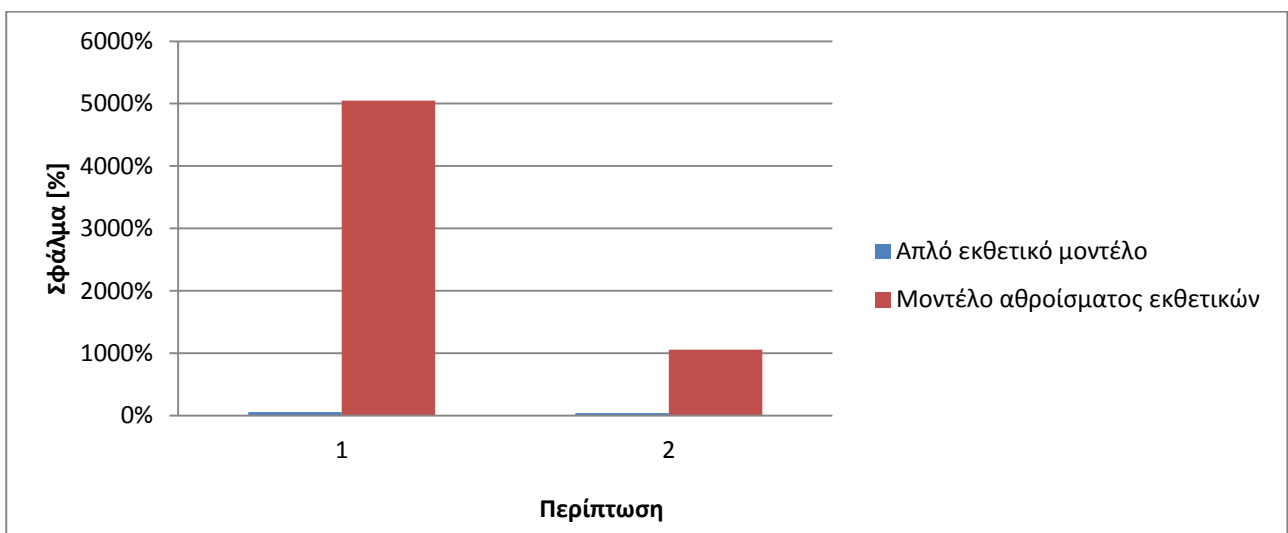
$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.14)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
251,86	965,86	1,46	11,2	11,24	0,04	0%
217,32	1384,08	2,23	12,42	12,08	-0,34	-3%
351,47	3893,22	2,75	24,74	24,57	-0,17	-1%
1784,1	1149,191	0,8	32,13 (19,77)	19,32	-12,81	-40%
59,67	988,14	0,21	13,8	19,36	5,56	40%
77,42	1535,38	0,17	21,56	34,27	12,71	59%

Πίνακας 5-21: Επαλήθευση από δεδομένα που προέκυψαν από την εργασία [81] για το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών

$\rho_1$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot m$ )	h (m)	$R_\gamma$ από CDEGS	$R_\gamma$ από εξίσωση (5.15)	Διαφορά	Ποσοστιαία διαφορά
251,86	965,86	1,46	11,2	11,28	0,08	1%
217,32	1384,08	2,23	12,42	12,16	-0,26	-2%
351,47	3893,22	2,75	24,74	24,80	0,06	0%
1784,1	1149,191	0,8	32,13 (19,77)	18,61	-13,52	-42%
59,67	988,14	0,21	13,8	159,52	145,72	1056%
77,42	1535,38	0,17	21,56	1109,91	1088,35	5048%



Σχήμα 5.14: Γραφική παράσταση του σφάλματος ανάλογα με την περίπτωση της δοκιμής επαλήθευσης με δεδομένα εντός των ορίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου, για τη γείωση Γ



Σχήμα 5.15: Γραφική παράσταση του σφάλματος ανάλογα με την περίπτωση της δοκιμής επαλήθευσης με δεδομένα εκτός των ορίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου, για τη γείωση Γ

#### Συμπεράσματα

Από το σύνολο των συγκρίσεων τόσο με τα επιπλέον δεδομένα από το λογισμικό CDEGS όσο και από τα δεδομένα της εργασίας [81] φαίνεται ότι οι εξισώσεις συμπεριφέρονται πολύ καλύτερα όταν καλούνται να εκτιμήσουν αντιστάσεις γείωσης για εδάφη με αντιστάσεις μέσα στα όρια εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους. Αυτό είναι απολύτως λογικό και αναμενόμενο αφού πρόκειται για εξισώσεις που εξήχθησαν με μεθόδους ελαχίστων τετραγώνων και αριθμητικής παλινδρόμησης και όχι για μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης όπως π.χ. τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι απλή. Αν θέλουμε προβλέψεις π.χ. για ειδικές αντιστάσεις μικρότερες από 100 Ω\*m δεν έχουμε παρά να συμπεριλάβουμε τέτοιες μετρήσεις στο σετ που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των μοντέλων και θα έχουμε τα αποτελέσματα που επιθυμούμε. Εμείς απλώς χρησιμοποιήσαμε ένα ενδεικτικό σετ και απλά αποφασίστηκε για



ενδεικτικούς λόγους να δοκιμάσουμε τη συμπεριφορά των εξισώσεων αυτών και έξω από αυτό το σετ.

Επίσης μπορεί να εξαχθεί μία ακόμη σημαντική παρατήρηση. Για τα δεδομένα επαλήθευσης εντός των ορίων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των εξισώσεων συμπεριφέρονται πολύ καλύτερα τα μοντέλα αθροίσματος εκθετικών σε σχέση με τα απλά εκθετικά μοντέλα. Αυτό είναι απολύτως λογικό και έχει να κάνει με το γεγονός ότι τα μοντέλα αθροίσματος εκθετικών έχουν μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας και συνεπώς προσαρμόζονται καλύτερα στα δεδομένα που τους παρέχονται. Αντίθετα όμως τα μοντέλα απλών εκθετικών συμπεριφέρονται πολύ καλύτερα στις περιπτώσεις δεδομένων εκτός του εύρους που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους. Αυτό είναι απολύτως λογικό αφού τα μοντέλα αθροίσματος εκθετικών λόγω του μεγαλύτερου βαθμού ελευθερίας τους «προσκολλώνται» απόλυτα στα δοθέντα δεδομένα με αποτέλεσμα να μην μπορούν να είναι αξιόπιστα εκτός αυτού του εύρους.

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το τέταρτο κατά σειρά έδαφος της περίπτωσης των δεδομένων της εργασίας [81] προέκυψε από μοντελοποίηση ενός τριστρωματικού στην πραγματικότητα εδάφους με ένα διστρωματικό έδαφος. Το σφάλμα αυτής της μοντελοποίησης, σύμφωνα με το λογισμικό CDEGS, ήταν αρκετά μεγάλο. Οπότε η σύγκριση για την περίπτωση αυτή δεν είναι ακριβής και τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Για να παρακαμφθεί αυτό προσθέσαμε σε παρένθεση και την περίπτωση όπου το συγκεκριμένο έδαφος είναι διστρωματικό και μοντελοποιείται με διστρωματικό μοντέλο. Όπως εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε αυτή η τιμή (σε παρένθεση) είναι σε όλες τις περιπτώσεις πάρα πολύ κοντά στην τιμή της εξίσωσης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 6.1 Μέτρηση του εμβαδού γης των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η μελέτη της επίδρασης της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών πάρκων στην αντίσταση γείωσης των πάρκων. Με άλλα λόγια θα προσπαθήσουμε να μελετήσουμε πως η εγκατεστημένη ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πάρκου επηρεάζει την αντίσταση γείωσής του. Το μοντέλο εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί είναι μονοστρωματικό.

Για λόγους απλούστευσης θα θεωρήσουμε ότι τα φωτοβολταϊκά πάρκα που θα κατασκευαστούν έχουν τετράγωνο σχήμα. Η γείωση των πάρκων θα κατασκευασθεί ως είθισται με πλέγμα γείωσης. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, το πλέγμα γείωσης αλλά και τα πλαίσια πρέπει να απέχουν τουλάχιστον πέντε μέτρα από την εξωτερική περιφραγή της εγκατάστασης.

Κάνοντας ανασκόπηση πολλών εγκατεστημένων και σε λειτουργία φωτοβολταϊκών πάρκων με σκοπό να συγκρίνουμε την εγκατεστημένη ισχύ σε MWp με το εμβαδό που καταλαμβάνουν καταλήξαμε ότι προσεγγιστικά για φωτοβολταϊκό πάρκο 0,5 MWp απαιτούνται 10 στρέμματα γης. Επιπλέον, παρατηρήσαμε ότι η εγκατεστημένη ισχύς και το εμβαδό γης που απαιτείται έχουν γραμμική σχέση.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως θα θεωρήσουμε τετράγωνα φωτοβολταϊκά πάρκα. Άρα γνωρίζοντας το εμβαδό γης του πάρκου μπορούμε εύκολα να βρούμε την πλευρά του τετραγώνου σύμφωνα με τη σχέση  $a = \sqrt{E}$ . Όμως το εμβαδό που εμφανίζεται στην υπόρριξη ποσότητα και αφορά τα στοιχεία του πίνακα 7-1 είναι το εμβαδό που αντιστοιχεί στην περιφραγή του πάρκου. Συνεπώς η πλευρά  $a$  που υπολογίζεται είναι η πλευρά περιφραγής. Εμείς όμως ενδιαφερόμαστε να υπολογίσουμε την πλευρά του πλέγματος. Συνεπώς πρέπει, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, να αφαιρεθούν τα 5 μέτρα του περιθωρίου ασφαλείας. Οπότε:

$$a_{\text{περίφραξης}} = \sqrt{E_{\text{περίφραξης}}}$$

$$a_{\text{πλέγματος}} = \sqrt{E_{\text{περίφραξης}} - 5}$$

$$E_{\text{πλέγματος}} = a_{\text{πλέγματος}}^2$$

όπου όλα τα εμβαδά είναι σε  $m^2$  και οι πλευρές σε m.

Συνεπώς καταλήγουμε στον παρακάτω προσεγγιστικό πίνακα:

Πίνακας 6-1: Εμβαδό πλέγματος πάρκου σε συνάρτηση με την εγκατεστημένη ισχύ

Εγκατεστημένη Ισχύς (MWp)	Εμβαδό (γης) περιφραξής (m <sup>2</sup> )	Πλευρά πλέγματος (m)	Εμβαδό πλέγματος (m <sup>2</sup> )
0,5	10000	95	9025
1	20000	136	18611
1,5	30000	168	28293
2	40000	195	38025
2,5	50000	219	47789
3	60000	240	57576
3,5	70000	260	67379
4	80000	278	77197
4,5	90000	295	87025
5	100000	311	96863

## 6.2 Προσομοίωση αντίστασης γείωσης φωτοβολταϊκών πάρκων

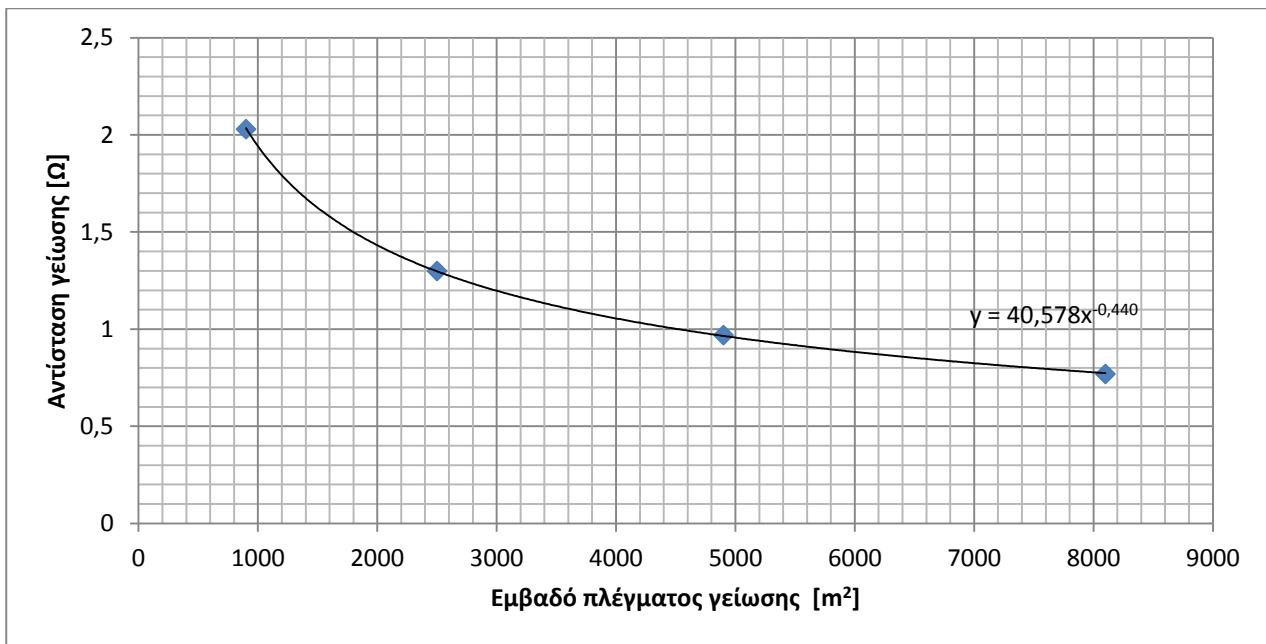
Για να προσδιοριστεί η αντίσταση γείωσης των φωτοβολταϊκών πάρκων σε συνάρτηση με την εγκατεστημένη ισχύ, θα θέλαμε ιδανικά μία σχέση που να συνδέει τα δύο μεγέθη. Στα επόμενα θα προσπαθήσουμε να κατασκευάσουμε μία τέτοια εμπειρική σχέση.

Για το σκοπό αυτό θα θεωρήσουμε τυπικά πλέγματα γείωσης συγκεκριμένων διαστάσεων, με βάθος πλέγματος 0,70 m και θα χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό CDEGS ώστε να προσομοιάσουμε την αντίσταση γείωσης. Η ειδική αντίσταση του εδάφους θεωρείται αρχικά  $\rho = 100 \Omega * m$ . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 6-2.

Πίνακας 6-2: Αντίσταση γείωσης σε συνάρτηση με την πλευρά και το εμβαδό του πλέγματος γείωσης

Διαστάσεις πλέγματος γείωσης (mxm)	Εμβαδό πλέγματος (m <sup>2</sup> )	Αντίσταση γείωσης ( $\Omega$ )
90x90	8100	0,77
70x70	4900	0,97
50x50	2500	1,3
30x30	900	2,03

Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται και στο σχήμα 6.1



Σχήμα 6.1: Αντίσταση γείωσης σε συνάρτηση με το εμβαδό πλέγματος γείωσης

Χρησιμοποιώντας τεχνική ανάλυσης παλινδρόμησης, στη μία μεταβλητή αυτή τη φορά, προκύπτει ότι η αντίσταση γείωσης και το εμβαδό του πλέγματος γείωσης συνδέονται με τη σχέση:

$$R = 40,578 * E_{\pi\lambda}^{-0,44}$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η επαλήθευση μεταξύ των τιμών της εξίσωσης και των τιμών που προέκυψαν από την προσομοίωση καθώς και το σφάλμα:

Πίνακας 6-3: Σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και εξίσωσης προσαρμογής

Διαστάσεις πλέγματος γείωσης (mxm)	Εμβαδό πλέγματος (m <sup>2</sup> )	Αντίσταση γείωσης με λογισμικό CDEGS (Ω)	Αντίσταση γείωσης με εξίσωση προσαρμογής (Ω)	Σφάλμα (%)
90x90	8100	0,77	0,773673	0,5%
70x70	4900	0,97	0,965171	-0,5%
50x50	2500	1,3	1,297768	-0,2%
30x30	900	2,03	2,034342	0,2%

Η εξαιρετική ακρίβεια της προσαρμογής φαίνεται και από το γεγονός ότι  $R^2 = 0,9999$ .

Οπότε γενικεύοντας, για ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho$  ισχύει:

$$R = \rho * 0,40578 * E_{\pi\lambda}^{-0,44}$$

Όπως είδαμε και πριν ισχύει:

$$E_{\pi\lambda} = \left( \sqrt{E_{\pi\epsilon\rho}} - 5 \right)^2$$

Από τον πίνακα 6-2 εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι:

$$E_{περ} = 20000 * P$$

όπου  $E_{περ}$  το εμβαδό περιφραξης σε  $m^2$  και  $P$  η εγκατεστημένη ισχύς σε MWp.

Οπότε μπορούμε να γράψουμε:

$$E_{πλ} = (\sqrt{20000} * \sqrt{P} - 5)^2$$

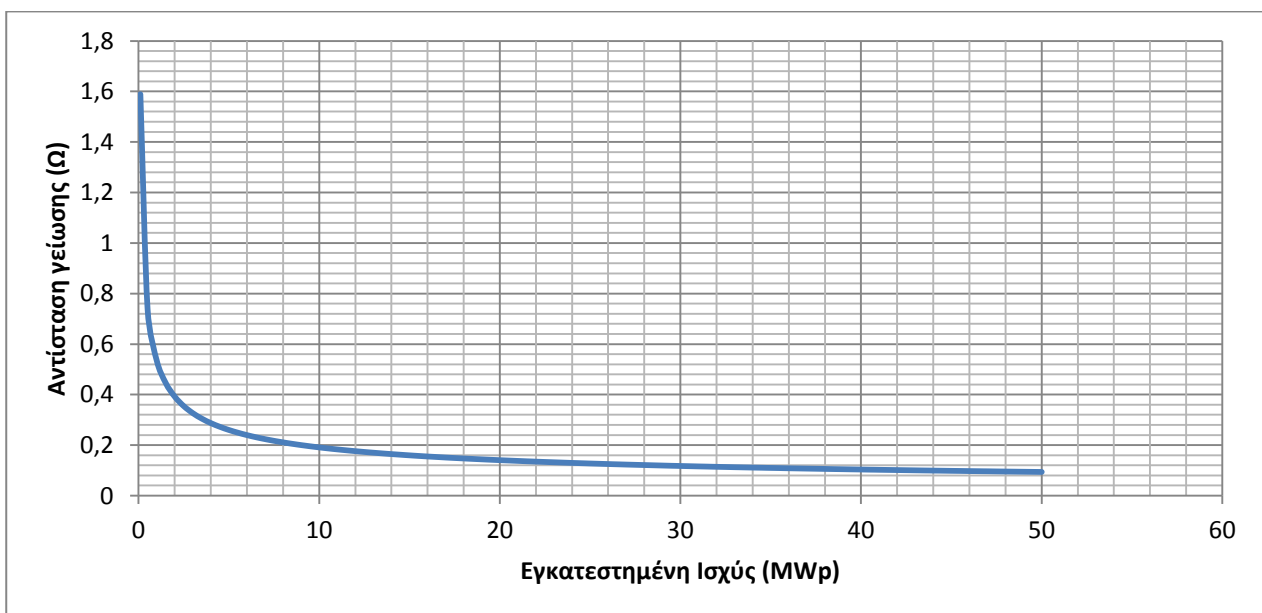
Δηλαδή

$$R = \rho * 0,40578 * [(\sqrt{20000} * \sqrt{P} - 5)^2]^{-0,44}$$

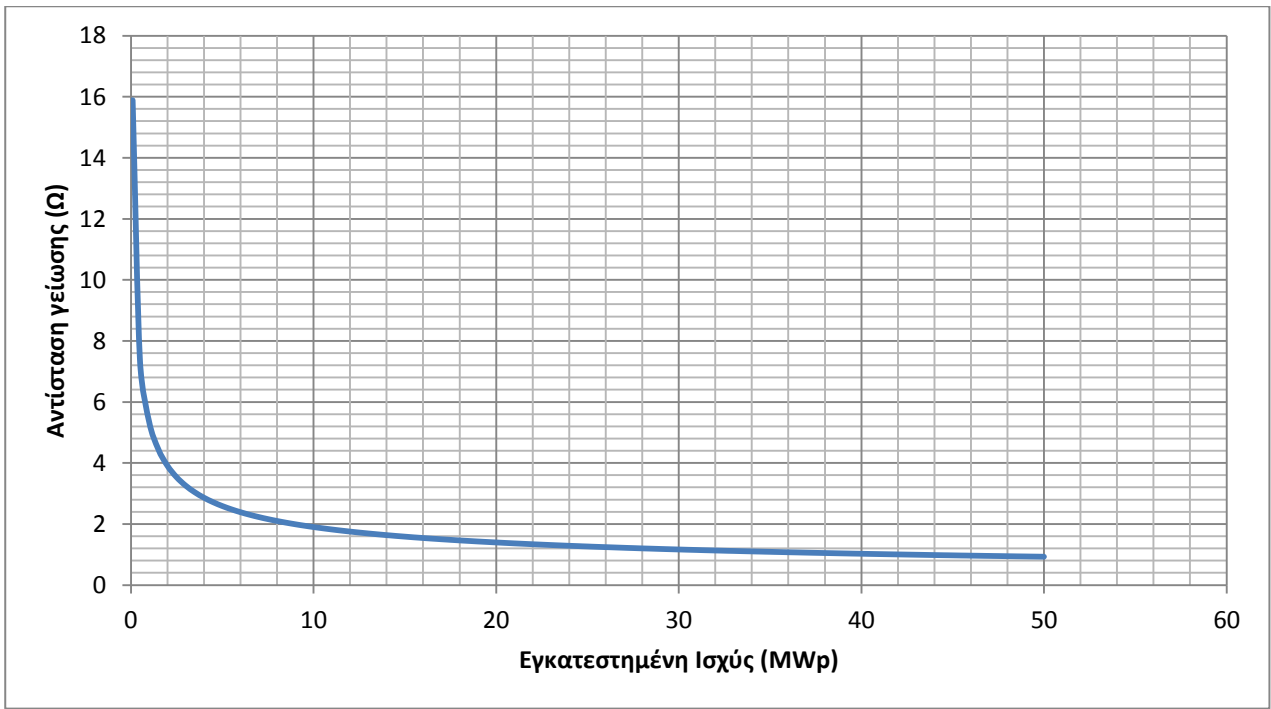
Τελικά:

$$R = \rho * 0,40578 * (\sqrt{20000} * \sqrt{P} - 5)^{-0,88}$$

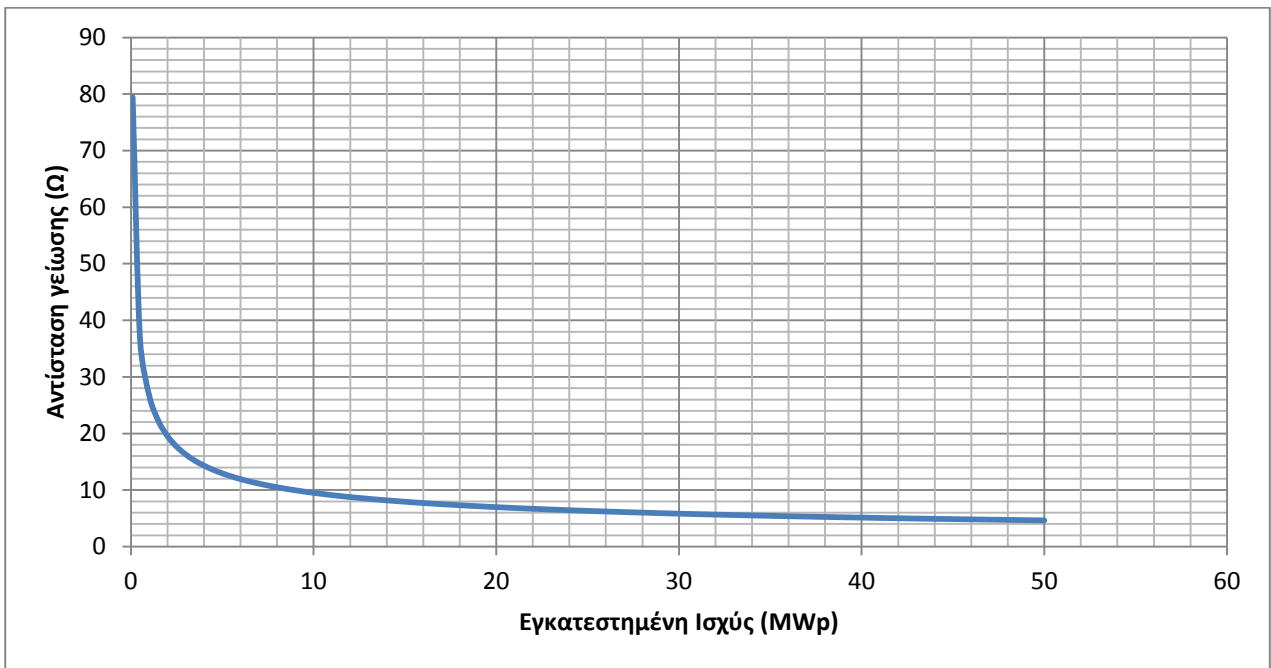
Η σχέση αυτή συνδέει την αντίσταση γείωσης με την εγκατεστημένη ισχύ του φωτοβολταϊκού πάρκου και είναι ακριβώς εκείνη η τελική σχέση στην οποία θέλαμε να καταλήξουμε. Εφαρμόζοντας τη σχέση αυτή για διάφορες τιμές του  $\rho$  λαμβάνουμε τον παρακάτω πίνακα ο οποίος μας δίνει την αντίσταση γείωσης συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού πάρκου. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για διάφορες τιμές του  $\rho$  φαίνεται στα σχήματα 7.2-7.5.



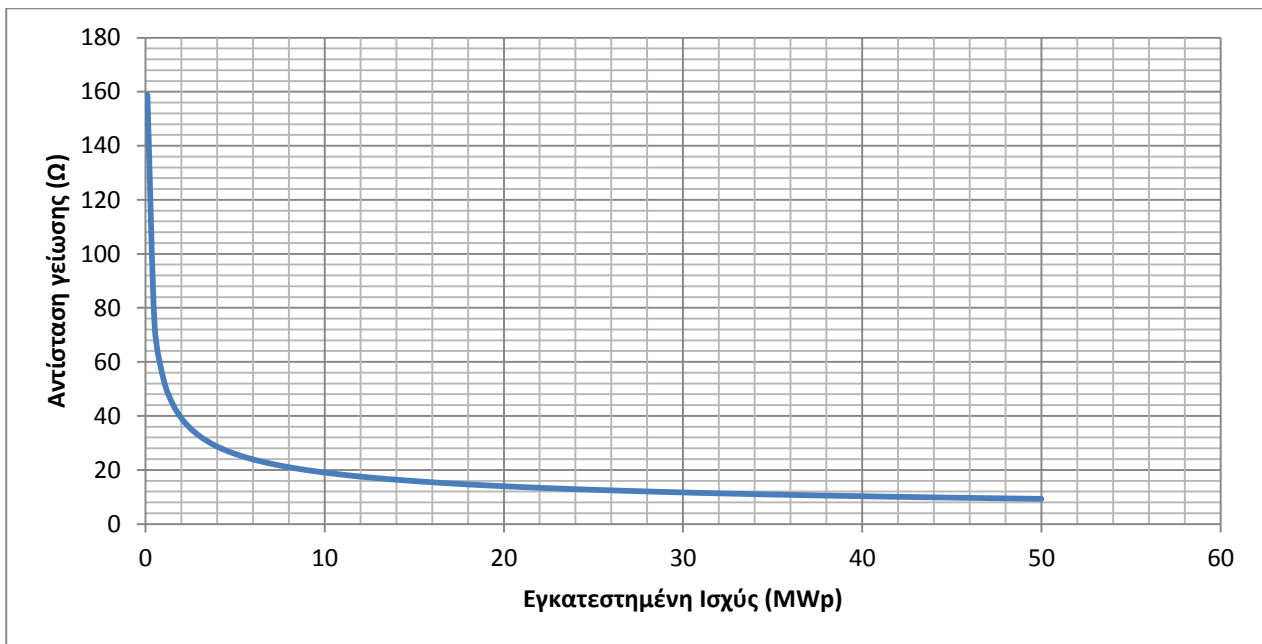
Σχήμα 6.2: Γραφική παράσταση της σχέσης  $R = \rho * 0,40578 * (\sqrt{20000} * \sqrt{P} - 5)^{-0,88}$  για  $\rho = 100 \Omega * m$



Σχήμα 6.3: Γραφική παράσταση της σχέσης  $R = \rho * 0,40578 * (\sqrt{20000} * \sqrt{P} - 5)^{-0,88}$  για  $\rho=1000 \Omega*m$



Σχήμα 6.4: Γραφική παράσταση της σχέσης  $R = \rho * 0,40578 * (\sqrt{20000} * \sqrt{P} - 5)^{-0,88}$  για  $\rho=5000 \Omega*m$



Σχήμα 6.5: Γραφική παράσταση της σχέσης  $R = \rho * 0,40578 * (\sqrt{20000} * \sqrt{P} - 5)^{-0,88}$  για  $\rho=10000 \Omega*m$

Πίνακας 6-4: Αντίσταση γείωσης του φωτοβολταϊκού πάρκου σε συνάρτηση με την εγκατεστημένη ισχύ για διάφορους τύπους εδαφών

Εγκατεστημένη Ισχύς (MWp)	Αντίσταση γείωσης (Ω) για $\rho=100 \Omega*m$ (καλλιεργήσιμο έδαφος)	Αντίσταση γείωσης (Ω) για $\rho=1000 \Omega*m$ (ημιβραχώδες έδαφος)	Αντίσταση γείωσης (Ω) για $\rho=5000 \Omega*m$ (βραχώδες έδαφος)
0,5	0,74	7,38	36,89
1	0,54	5,37	26,83
1,5	0,45	4,46	22,31
2	0,39	3,92	19,59
2,5	0,35	3,54	17,72
3	0,33	3,26	16,32
3,5	0,30	3,05	15,23
4	0,29	2,87	14,35
4,5	0,27	2,72	13,61
5	0,26	2,60	12,98



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

# ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 7.1 Ανακεφαλαίωση

Στα δύο πρώτα κεφάλαια της εργασίας έγινε μία σύντομη εισαγωγή στα συστήματα γείωσης, στην ορολογία τους, στο σχεδιασμό τους καθώς και στο ρόλο τους. Επίσης αναπτύχθηκαν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των εδαφών και δόθηκαν εισαγωγικές έννοιες για τη μοντελοποίηση τους σε μονοστρωματικά, διστρωματικά ή πολυστρωματικά μοντέλα. Επιπλέον παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα συστήματα γειώσεων ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία και δόθηκαν ορισμένα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά τα οποία βοήθησαν στη σύλληψη και τη σχεδίαση των γειώσεων αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε μία μικρή μαθηματική εισαγωγή στη μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο διότι, όπως είδαμε, βασικό στοιχείο της εργασίας ήταν η μοντελοποίηση της ποσότητας της αντίστασης γείωσης σε ένα μοντέλο, ίδιο για όλους τους τύπους γειώσεων ανεμογεννητριών, στο οποίο θα αλλάζουν μόνο οι σταθεροί συντελεστές κατά περίπτωση. Επιπλέον το μοντέλο αυτό θα έπρεπε σε όλες τις περιπτώσεις να προβλέπει σε όλες τις περιπτώσεις ικανοποιητικά την αντίσταση γείωσης για το σκοπό αυτό ποσοτικοποιήθηκε η καταλληλότητα του μοντέλου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξηγήθηκε η λειτουργία του λογισμικού CDEGS που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις καθώς και η διαδικασία λήψης των αποτελεσμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξηγήθηκε αναλυτικά το σκεπτικό και η διαδικασία για την εύρεση του γενικού μοντέλου, δηλαδή μιας εξίσωσης με σταθερές ως παραμέτρους, που να μπορεί να περιγράψει την αντίσταση γείωσης για όλους τους τύπους των γειώσεων. Στη συνέχεια έγινε η προσαρμογή των δεδομένων σε επιφάνειες προς υπολογισμό των σταθερών παραμέτρων ώστε να εξαχθούν οι εξισώσεις που υπολογίζουν την αντίσταση γείωσης για κάθε τύπο γείωσης.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο μελετήθηκε η γείωση των φωτοβολταϊκών πάρκων και εξήχθησαν κι εκεί εξισώσεις που συνδέουν την αντίσταση γείωσης με την εγκατεστημένη ισχύ του πάρκου.

### 7.2 Συμπεράσματα για την αντίσταση γείωσης των ανεμογεννητριών

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να μπορέσουμε να εξάγουμε ένα μαθηματικό μοντέλο, δηλαδή μία μαθηματική συνάρτηση, η οποία 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 έξοδο την αντίσταση γείωσης της ανεμογεννήτριας. Βασική 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 αρκετές δοκιμές καταλήξαμε σε δύο πιθανά μοντέλα: το απλό εκθετικό μοντέλο και το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών και

χρησιμοποιώντας την παλινδρομική ανάλυση προσαρμόσαμε τα μοντέλα αυτά στις μετρήσεις που είχαμε.

Ο αναγνώστης μπορεί εύκολα να καταλάβει τόσο από τα στατιστικά μέτρα

- Άθροισμα των τετραγώνων λόγω του σφάλματος (SSE-Sum of squares due to error)
- $R^2$
- Προσαρμοσμένο  $R^2$  (Adjusted R-square)
- Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE-Root mean square error)

όσο και από τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν ότι και στα δύο μοντέλα η ποιότητα της προσαρμογής είναι εξαιρετική. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η προσαρμογή είναι εξαιρετική ανεξάρτητα από τον τύπο γείωσης. Με άλλα λόγια, όπως 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. Βέβαια, μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι η ποιότητα της προσαρμογής είναι καλύτερη στο μοντέλο αθροίσματος εκθετικών αλλά το μοντέλο αυτό είναι πιο πολύπλοκο σε σχέση με το απλό μοντέλο και είναι πολύ πιο δύσκολο να γίνει η προσαρμογή του στα δεδομένα καθώς έχει πολύ πιο πολλές σταθερές και άρα πολύ περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Έτσι, είναι πολύ πιο πιθανό η βελτιστοποίηση να «κολλήσει» σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και όχι στο ολικό ελάχιστο.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε το εξής: Εμείς μελετήσαμε το έδαφος για αντιστάσεις γείωσης μέχρι  $10000 \Omega \cdot m$  και για τα δύο στρώματα και για βάθος πρώτου στρώματος μέχρι 5 m. Στα γραφήματα του κεφαλαίου 5 μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι υπάρχουν δύο απότομα σημεία ανόδου της επιφάνειας, ένα στα νοτιοδυτικά και ένα στα βορειοανατολικά. Όσο ανεβαίνει η μέγιστη ειδική αντίσταση που μελετάμε π.χ. στα  $50000 \Omega \cdot m$  μεγαλώνει η βορειοανατολική άνοδος (η νοτιοδυτική είναι πάντοτε σταθερή και ίδια) και άρα τόσο πιο αποτελεσματικό γίνεται το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών σε σχέση με το απλό μοντέλο.

Πάντως, η μεγάλη συνεισφορά αυτής της εργασίας είναι η εύρεση ενός μοντέλου που μπορεί να περιγράψει την αντίσταση γείωσης μιας ανεμογεννήτριας ανεξάρτητα από τον τύπο της καθώς και η μεθοδολογία για την προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις. Έτσι, ο αναγνώστης, μπορεί για όποιο τύπο ανεμογεννήτριας θέλει να προσαρμόσει τις μετρήσεις του στο μοντέλο και να πάρει τη δική του εξίσωση (τις δικές του σταθερές).

Στο σημείο αυτό ας αναπτύξουμε τη μεθοδολογία με την οποία ο χρήστης μπορεί, για το δικό του τύπο γείωσης μιας ανεμογεννήτριας, να προσαρμόσει τις μετρήσεις στην εξίσωση:

1. Σχεδιασμός του συστήματος γείωσης της ανεμογεννήτριας στο πακέτο SESCAD του λογισμικού CDEGS και εκτέλεση των προσομοιώσεων. Εναλλακτικά χρήση πραγματικών μετρήσεων από τον αγρό. 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. Υπολογισμός στο Excel της παραμέτρου  $K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} + 1$  και της μεταβλητής RR για κάθε τιμή και εισαγωγή στο λογισμικό Matlab των δεδομένων για τις μεταβλητές K, h, RR.

3. Εκκίνηση του πακέτου `sftool` του Matlab ή του πακέτου `cfstool` 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. Μετά ζητούμε από το Matlab τον υπολογισμό των τιμών. Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα στο στάδιο αυτό να μην είναι σωστή η προσαρμογή. Δεν ανησυχούμε καθόλου όμως διότι αυτό οφείλεται στη λανθασμένη επιλογή αρχικών τιμών, οι οποίες όπως έχουμε αναφέρει είναι πολύ σημαντικές ώστε η βελτιστοποίηση να βρει το ολικό ελάχιστο και να μην κολλήσει σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.
6. Στο βήμα αυτό πρέπει να κάνουμε σωστή επιλογή των αρχικών τιμών. Αυτό δεν είναι καθόλου εύκολο και δεν υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία για αυτό. Πάντως είμαστε σίγουροι πως υπάρχει κάποιος συνδυασμός αρχικών τιμών ο οποίος θα κάνει πολύ καλή την προσαρμογή. Μία καλή ιδέα είναι να χρησιμοποιήσουμε τις αρχικές τιμές που έχουν ήδη δοθεί εδώ, ειδικά αν τα δεδομένα έχουν τιμές τις ίδιας τάξης μεγέθους. Το πιο πιθανό είναι η προσαρμογή να κριθεί πολύ καλή.
7. Ένα πολύ καλό κριτήριο με το οποίο αποφασίζουμε ότι η προσαρμογή που έχουμε κάνει είναι αρκετά καλή 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. Για να εξάγουμε το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών συνεχίζουμε ακριβώς εκεί που είχαμε μείνει γράφοντας την υπόλοιπη εξίσωση και ξανακάνουμε fit. Πιθανότατα και τώρα δεν θα είναι αμέσως σωστή η προσαρμογή γιατί θα πρέπει να παίζουμε με τις αρχικές τιμές. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με πριν. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην αρχική τιμή της μεταβλητής  $n$ .

Σημείωση: Δεν πρέπει να μπούμε στον «πειρασμό» να προσθέσουμε άλλη μία μεταβλητή στο σύστημα π.χ. να κάνουμε την σταθερά 0,1 μεταβλητή σταθερά. Αυτό διότι το μοντέλο αθροίσματος εκθετικών έχει ήδη πολλούς βαθμούς ελευθερίας (είναι αρκετά «πιεσμένο») 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  $R = R(\rho_1, \rho_2, h)$  που αναζητούσαμε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της αντίστασης γείωσης για κάθε διστρωματικό έδαφος.

Εκτός από όλα τα υπόλοιπα δεν θα πρέπει να λησμονήσουμε πως η εργασία αυτή αφήνει μία παρακαταθήκη για την εύρεση μαθηματικών μοντέλων με τη χρήση μη γραμμικής παλινδρομικής ανάλυσης σε δύο ανεξάρτητες μεταβλητές. Το πεδίο αυτό είναι αρκετά σύνθετο και δύσκολο και δεν υπάρχει αξιοσημείωτη μεθοδολογία για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων. Στην εργασία αυτή δόθηκαν ιδέες για τα πιο δύσκολα σημεία του εγχειρήματος αυτού: την εύρεση του γενικού τύπου της εξίσωσης και την εύρεση των αρχικών τιμών.

### 7.3 Συμπεράσματα για τη γείωση των φωτοβολταϊκών

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού ήταν να βρούμε μία σχέση μεταξύ της εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού πάρκου και της αντίστασης γείωσης. Κάνοντας προσομοίωση συγκεκριμένων τετράγωνων γείωσης με τη βοήθεια του λογισμικού CDEGS μπορέσαμε να εξάγουμε μία εμπειρική αλλά ακριβή σχέση που μας δίνει την αντίσταση γείωσης σε συνάρτηση με την εγκατεστημένη ισχύ του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Η βασική παρατήρηση που μπορεί να εξαχθεί από τη μελέτη αυτή είναι η φθίνουσα σχέση μεταξύ της εγκατεστημένης ισχύος και της αντίστασης γείωσης. Με άλλα λόγια, όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς τόσο μειώνεται η αντίσταση γείωσης. Η σχέση όμως αυτή είναι κάθε άλλο παρά γραμμική. Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε πως για «μικρές» εγκατεστημένες ισχείς η πτώση της αντίστασης γείωσης είναι μεγάλη καθώς αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς, ενώ αντίθετα για μεγαλύτερες εγκατεστημένες ισχείς παρατηρείται κορεσμός, δηλαδή καθώς αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς, δεν μειώνεται πολύ η αντίσταση γείωσης. Υπάρχει δηλαδή, όπως φαίνεται και στο σχήματα 6.2-6.4 ένας κορεσμός της αντίστασης γείωσης μετά την εγκατεστημένη ισχύ των 10 MW. Συνεπώς μπορούμε να πούμε πως θα πρέπει να αποφεύγεται, ως προς το κριτήριο της γείωσης, η κατασκευή πολύ μικρών πάρκων, διότι αν μεγαλώσει λίγο το πάρκο, η αντίσταση γείωσής του θα μειωθεί πολύ.

Επιπλέον, αν βάλουμε ως κριτήριο ότι η αντίσταση γείωσης θα πρέπει να είναι κάτω από 10Ω, τότε παρατηρούμε ότι μόνο αν έχουμε το πάρκο εγκατεστημένο σε οικόπεδο με καλλιεργήσιμο έδαφος είναι δυνατόν να πετύχουμε τέτοια αντίσταση χωρίς επιπρόσθετες παρεμβάσεις.

### 7.4 Μελλοντικές προοπτικές-Περεταίρω μελέτη

Μία ενδιαφέρουσα και χρήσιμη περίπτωση επέκτασης της παρούσας μελέτης είναι η επέκταση των προσομοιώσεων για τους τρεις τύπους γειώσεων και για εδάφη με ειδική αντίσταση γείωσης μεγαλύτερη από 10000 Ω\*m ή μικρότερη από 100 Ω\*m ή για βάθος του πρώτου στρώματος μεγαλύτερο από 5 m. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αυτό κατέστη αδύνατο διότι ήδη είχαμε 225 προσομοιώσεις ανά τύπο γείωσης δηλαδή 675 προσομοιώσεις. Με τον τρόπο αυτό θα επιτευχθεί καλύτερη δυνατότητα πρόβλεψης της αντίστασης γείωσης στο μοντέλο για εδάφη με ειδική αντίσταση γείωσης μεγαλύτερη από 10000 Ω\*m, με αντίσταση γείωσης μικρότερη από 100 Ω\*m ή με βάθος πρώτου στρώματος μεγαλύτερο από 5 m. Επίσης θα βοηθούσε την ακρίβεια των εξισώσεων που εξάγονται αν το βήμα που χρησιμοποιήθηκε για το ύψος από 0,5 m μειωθεί σε 0,1 m.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα προοπτική θα ήταν η εξαγωγή μαθηματικών μοντέλων για τους ίδιους τύπους συστημάτων γείωσης αλλά αυτή τη φορά για πολυστρωματικά εδάφη και η σύγκρισή τους με τη διστρωματική περίπτωση. Το λογισμικό CDEGS δίνει τη δυνατότητα για προσομοιώσεις σε μία μεγάλη γκάμα τύπων εδαφών.

Έπειτα, θα ήταν πάρα πολύ χρήσιμο να μπει και η παράμετρος της ισχύος της ανεμογεννήτριας ως παράμετρος του μοντέλου. Πιο αναλυτικά, οι τύποι γείωσης ανεμογεννητριών που μελετήσαμε έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις, οπότε αφορούν βάσεις ανεμογεννητριών συγκεκριμένων διαστάσεων και άρα συγκεκριμένου εύρους ονομαστικών ισχύων. Θα ήταν χρήσιμο, λοιπόν, να

μελετηθούν οι γειώσεις σε ισχύς πολύ μικρότερες ή πολύ μεγαλύτερες από την ανεμογεννήτρια που μελετήσαμε εμείς και παράλληλα να γίνει προσπάθεια να εισέλθει η ισχύς ως μεταβλητή στο μοντέλο. Με άλλα λόγια, όσο η ισχύς της ανεμογεννήτριας μεγαλώνει, αυξάνεται το μέγεθος της ανεμογεννήτριας, οπότε αυξάνεται η διάμετρος των πτερυγίων της με αποτέλεσμα να αυξάνεται το εμβαδό της βάσης που οδηγεί βέβαια σε μείωση της αντίστασης γείωσης. Βέβαια κάτι τέτοιο θα απαιτούσε ανάλυση παλινδρόμησης με τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές όπου πλέον δεν υπάρχει ούτε γραφική απεικόνιση πράγμα που εμφανίζει πολύ μεγάλες δυσκολίες και ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα ήταν χρήσιμο να μελετηθεί ένα μοντέλο το οποίο δεν θα υποθέτει τετράγωνο πάρκο αλλά θα μελετά την γενική περίπτωση ενός ορθογωνίου ή γενικά πολυγωνικού πάρκου προκειμένου να υπολογισθεί η αντίσταση γείωσής του.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. IEEE Std 80-2013, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Power and Energy Society
2. Armstrong, H. R., “Grounding electrode characteristics from model tests,” *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1301–1306, Dec. 1953
3. IEEE Std 142™-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book).
4. Towne, H. M., “Lightning arrester grounds—Parts I, II, and III,” *General Electric Review*, vol. 35, pp. 173–280, Mar.–May 1932.
5. Rüdénberg, R., “Distribution of short-circuit currents in ground,” *Electrotechnische Zeitschrift*, vol. 31, 1921.
6. Sunde, E. D., *Earth conduction effects in transmission systems*, New York: McMillan, 1968.
7. 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.
8. Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980.
9. *Manual on ground resistance testing*, Publication no. 25-J, James G. Biddle Co., 1970.
10. IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Power and Energy Society
11. Palmer, L. S., “Examples of geotechnical surveys,” *Proceedings of the IEE*, Paper 2791-M, vol. 106, pp. 231–244, June 1959.
12. 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
13. 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
14. 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.
15. EPRI EL-3982, *Soil resistivity tests using modeling techniques*, Ohio State University, May 1985

16. 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
17. 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
18. EPRI TR-100863, *Seasonal variations of grounding parameters by field tests*, SEI/Georgia Power Research Center, July 1992.
19. 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
20. 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
21. EPRI EL-2699, *Transmission line grounding*, Chapter 4, (Resistivity) and Chapter 9 (Field Measurement Techniques), Safe Engineering Services, Oct. 1982
22. EPRI TR-100622, *Substation grounding programs*, vols. 1–5, May 1992
23. 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
24. 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
25. 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.
26. Moore, R., "An empirical method of interpretation of earth resistivity measurements," *American Institute of Mining Engineering*, Column 164, pp. 197–231, 1945
27. 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.
28. Roman, I., "Some interpretations of earth resistivity data," *American Institute of Mining and Metallurgical Engineering*, vol. 110, pp. 183–200, 1934.
29. Tagg, G. F., *Earth resistances*, New York: Pitman, 1964
30. 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



31. IEEE Tutorial Course 86 EH0253-5-PWR, "Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety, Chapter 2, (Soil Resistivity Analysis)."
32. Β.Θ. Κονταργύρη, Ι.Φ. Γκόνοϋ, Ι.Α. Σταθόπουλοϋ, ϋϋϋτήματα Γείωϋηϋ Ανεμογεννητριών, Ελληνική CIGRE
33. 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
34. 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
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. Sunde, E. D., *Earth conduction effects in transmission systems*, New York: McMillan, 1968
39. Dalziel, C. F., "Dangerous electric currents," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 65, pp. 579–585, 1123–1124, 1946.
40. 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.
41. Ferris, L. P., King, B. G., Spence, P. W., and Williams, H., "Effect of electric shock on the heart," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 55, pp. 498–515 and 1263, May 1936.
42. Biegelmeier, U. G., "Die Bedeutung der Z-Schwelle des Herzkammerfilim-merns fur die Festlegung von Berührungϋspannungs greuzeu bei den Schutzma Bradhmer gegen elektrische Unfate," *E&M*, vol. 93, no. 1, pp. 1–8, 1976.
43. Biegelmeier, U. G., and Rotter, K., "Elektrische Widerstrande 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. 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.

46. Dalziel, C. F., "Electric shock hazard," *IEEE Spectrum*, pp. 41–50, Feb. 1972.
47. 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.
48. Gieiges, K. S., "Electric shock hazard analysis," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 75, part III, pp. 1329–1331, 1956.
49. Kiselev, "Research into electric shock," *Electrical Review*, vol. 31, Dec. 1965.
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 Sécurité des Personnes et la Question des Mises a la Terre dans les Postes de Distribution," *Bulletin de la Société Française 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 Zeitschrift*, 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 Société Française 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. Esmailian, 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 (ICFPPEE)*, 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. Γκόνος, Β. Θ. Κονταργύρη, Γ. Π. Φώτης, Ι. Α. Σταθόπουλος, Γ. Α Μάνος, «Σχεδίαση, ανάλυση και μέτρηση συστημάτων γείωσης σε αιολικά πάρκα», Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 15-16 Δεκεμβρίου 2005, Ενότητα Δ: Ηλεκτρικές Μονώσεις και Γειώσεις: Δ5, σελ. 201-208.
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 “Lightning 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 “Large 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. Stathopoulos, "Study on Wind Farm Grounding System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 4969-4977, Nov.-Dec. 2015
82. Μάρκου Γεώργιος, Αρχές Σχεδιασμού Φωτοβολταϊκών Εγκαταστάσεων, Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2009
83. Διαδικτυακός τόπος: [https://en.wikipedia.org/wiki/Regression\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis)
84. Norman R. Draper, Harry Smith, Applied Regression Analysis Third Edition, John Wiley and Sons, 1998
85. Matlab Documentation, <http://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>
86. Διαδικτυακός τόπος: <http://www.sestech.com/products/softpackages/cdegs.htm>
87. Διαδικτυακός τόπος: <http://www.sestech.com/products/SoftModule/Malz.htm>