



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Μοντέλο γενετικού προγραμματισμού για τη μελέτη συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αναστασίου-Ευαγγέλου Α. Φορούλη

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Αθήνα, Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

200

Μοντέλο γενετικού προγραμματισμού για τη μελέτη συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αναστασίου-Ευαγγέλου Α. Φορούλη

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Μαρτίου 2018.

.....
Ι. Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φ. Β. Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Φ. Γκόνος
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αναστάσιος-Ευάγγελος Α. Φορούλης

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

Copyright © Αναστάσιος-Ευάγγελος Α. Φορούλης, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους οι οποίοι συνέβαλαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Με την αγάπη και το ενδιαφέρον του αποτέλεσε στήριγμα και οδηγό σε όλη τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Είναι τιμή μου που μοιράστηκα μαζί του σκέψεις και προβληματισμούς κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και πάντα θα αναζητώ τη συμβουλή του στη συνέχεια της ζωής μου. Τον ευχαριστώ θερμά.

Τον κ. Γεώργιο Δούνια, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου, για την εποικοδομητική συνεργασία μας και τις γνώσεις που μου προσέφερε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, επίκουρο καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τις ιδέες και τις κατευθύνσεις που μου έδωσε κατά την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Τον κ. Βασίλειο Π. Ανδροβιτσανέα, διδάκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεχή παρακολούθηση της πορείας της διπλωματικής μου και τη συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνησή της.

Τον κ. Κωνσταντίνο Μπουλά, υποψήφιο διδάκτορα της σχολής Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου, για την καθοριστικής σημασίας βοήθεια, τις γνώσεις του και τις συμβουλές που μου παρείχε στην πορεία της διπλωματικής μου. Η συνεισφορά του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας ήταν πολύτιμη.

Τον κ. Αριστείδη Γιάννακα, μέλος του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την υποστήριξη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος, καθώς και όλα τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου.

Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους και τους δικούς μου ανθρώπους, για όλες τις στιγμές που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αγαπημένα μου αδέρφια που πάντα με στηρίζουν και στους οποίους οφείλω ό,τι έχω πετύχει στη μέχρι τώρα πορεία μου.

Περίληψη

Κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση απαιτεί ένα σύστημα γείωσης που να παρέχει ύψιστη ασφάλεια. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συμβολή στη μελέτη συστημάτων γείωσης με τη χρήση βελτιωτικών υλικών. Προς αυτή την κατεύθυνση, μετρήθηκε πειραματικά η ειδική αντίσταση εδάφους και η αντίσταση γείωσης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε επιλεγμένα βελτιωτικά υλικά για χρονικό διάστημα επτά μηνών. Παράλληλα, χρησιμοποιώντας δεδομένα παλαιότερων ερευνών, έγινε εφαρμογή γενετικού προγραμματισμού για τη μοντελοποίηση της αντίστασης γείωσης συναρτήσει της βροχόπτωσης, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Αξιοποιώντας τα συμπεράσματα της εργασίας είναι δυνατή η εκτίμηση-πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης και γενικότερα της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος γείωσης συναρτήσει των καιρικών συνθηκών.

Λέξεις κλειδιά

συστήματα γείωσης, αντίσταση γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, γενετικός προγραμματισμός, μηχανική μάθηση

Abstract

Every electrical installation demands a grounding system that provides maximum safety. The purpose of this diploma thesis is a contribution to the study of grounding systems using enhancing compounds. In this direction, field measurements of soil resistivity and ground resistance of grounding rods encased in selected enhancing compounds were taken for seven consecutive months. In parallel, using data from older experimental measurements, genetic programming was utilized for the modeling of ground resistance as a function of rainfall, wind speed and wind direction. The results of this thesis can be used to estimate-predict the ground resistance and generally the efficiency of a grounding system based on weather data.

Key words

Grounding systems, ground resistance, soil resistivity, ground enhancing compounds, genetic programming, machine learning

Πρόλογος

Το **Κεφάλαιο 1** της παρούσας εργασίας αφορά τα συστήματα γείωσης, παραθέτοντας την αντίστοιχη ορολογία και τις βασικές αρχές αυτών των συστημάτων. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα είδη και οι διατάξεις των ηλεκτροδίων γείωσης. Τέλος, ορίζεται η ειδική αντίσταση εδάφους, οι τρόποι μέτρησής της καθώς και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Το **Κεφάλαιο 2** αναφέρεται στην αντίσταση γείωσης και στα βελτιωτικά υλικά γείωσης. Δίνονται οι αντίστοιχοι ορισμοί και παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της αντίστασης γείωσης. Ακολούθως, καταγράφονται οι προδιαγραφές των βελτιωτικών υλικών και οι δοκιμές στις οποίες υπόκεινται για την αξιολόγησή τους με βάση διεθνείς κανονισμούς ενώ πραγματοποιείται και μια βιβλιογραφική αναφορά σε σχετικές ερευνητικές εργασίες.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Περιγράφεται η μέθοδος, η πειραματική διάταξη και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανάλυση του εδάφους και περιγραφή της τοποθεσίας καθώς και της κατανομής των ηλεκτροδίων στο χώρο του πειράματος. Παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές.

Το **Κεφάλαιο 4** εισάγει την έννοια του γενετικού προγραμματισμού και των γενετικών αλγορίθμων. Γίνεται σύντομη περιγραφή του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε και θεμελίωση της συγκεκριμένης διαμόρφωσης της εκτέλεσης του γενετικού προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα – μαθηματικές εξισώσεις της διαδικασίας παρουσιάζονται και με τη βοήθεια γραφημάτων.

Στο **Κεφάλαιο 5**, τελευταίο της εργασίας, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία καθώς και τη χρήση γενετικού προγραμματισμού. Τέλος, παρουσιάζονται πιθανές προτάσεις περαιτέρω έρευνας, ως συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	ix
Περίληψη.....	xi
Abstract	xii
Πρόλογος.....	xiii
Εικόνες.....	xvii
Σχήματα	xviii
Κεφάλαιο 1	21
Γείωση και ειδική αντίσταση.....	21
1.1 Ο ρόλος της γείωσης	21
1.2 Ορισμοί.....	22
1.3 Είδη γείωσης	25
1.3.1 Η γείωση λειτουργίας.....	25
1.3.2 Η γείωση προστασίας.....	26
1.3.3 Η γείωση ασφαλείας	26
1.4 Μέθοδοι γείωσης.....	27
1.5 Ειδική αντίσταση εδάφους	29
1.5.1 Ορισμός	29
1.5.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους.....	30
1.5.3 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους.....	33
1.5.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	37
Κεφάλαιο 2	43
Αντίσταση γείωσης και βελτιωτικά υλικά.....	43
2.1 Η αντίσταση γείωσης	43
2.2 Μέτρηση της αντίστασης γείωσης.....	45
2.3 Βελτιωτικά υλικά γειώσεων	49
2.3.1 Προδιαγραφές των βελτιωτικών υλικών γειώσεων	50
2.3.2 Ηλεκτρόδια σε βελτιωτικά υλικά στη μόνιμη κατάσταση– Βιβλιογραφική ανασκόπηση	52

Κεφάλαιο 3	63
Πειραματικές μετρήσεις.....	63
3.1 Πειραματική διαδικασία	63
3.2 Μετρήσεις και αποτελέσματα	67
Κεφάλαιο 4	77
Γενετικός προγραμματισμός - Αποτελέσματα	77
4. 1 Εξελικτικοί αλγόριθμοι.....	77
4.1.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	77
4.1.2 Γενετικός Προγραμματισμός.....	79
4.1.3 Ιστορικά	83
4.2 Το λογισμικό HeuristicLab	85
4.3 Διαμόρφωση του πειράματος του γενετικού προγραμματισμού	89
4.3.1 Δεδομένα.....	89
4.4 Αποτελέσματα	93
Κεφάλαιο 5	119
Συμπεράσματα	119
5.1 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	119
5.2 Η επόμενη μέρα	121
Παράρτημα.....	123
Βιβλιογραφία	127

Εικόνες

Εικόνα 1. Χώρος διεξαγωγής του πειράματος.	64
Εικόνα 2. Το γειωσόμετρο Megger Det2/2.	66
Εικόνα 3. Αρχική σελίδα του προγράμματος HeuristicLab.	86
Εικόνα 4. Εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος και επιλογή των ποσοστών εκπαίδευσης και δοκιμής του αλγορίθμου.	87
Εικόνα 5. Επιλογή τιμών για τις παραμέτρους του προβλήματος.....	88
Εικόνα 6 .Παρουσίαση αποτελεσμάτων ενός τρεξίματος.	88

Σχήματα

Σχήμα 1. Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης [7].....	27
Σχήμα 2. Σύστημα προστασίας με άμεση γείωση [8].	27
Σχήμα 3. Σύστημα προστασίας με ουδετέρωση [8].....	28
Σχήμα 4. Σύστημα προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης, σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης [3].....	29
Σχήμα 5. Ειδική αντίσταση εδάφους [8].	30
Σχήμα 6. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας [8].	33
Σχήμα 7. Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης [8].	34
Σχήμα 8. Διατάξεις μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους [8].	35
Σχήμα 9. Διάταξη Wenner [8].....	36
Σχήμα 10. Διάταξη Wenner με εφαρμογή του προσεγγιστικού τύπου [3].	37
Σχήμα 11. Ομοαξονικό κυλινδρικό ηλεκτρόδιο για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης [8].	39
Σχήμα 12. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ηλεκτροτομογραφίας [27].....	41
Σχήμα 13. Χοάνη δυναμικού [8].....	44
Σχήμα 14. Μείωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτινών και ειδικών αντιστάσεων [33].	49
Σχήμα 15. α. Ράβδος γείωσης, πλήρως καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε ομοιογενές έδαφος β. Ράβδος γείωσης, μερικώς καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε ομοιογενές έδαφος γ. Ράβδος γείωσης, μερικώς καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε διστρωματικό έδαφος [8].	57
Σχήμα 16. Η επίδραση του πλάτους και της ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού υλικού στο GPR, στην περίπτωση διστρωματικού μοντέλου εδάφους [62].	59
Σχήμα 17. Ράβδος γείωσης εγκιβωτισμένη σε βελτιωτικό υλικό [3].....	65
Σχήμα 18. Διάταξη ηλεκτροδίων στο χώρο διεξαγωγής του πειράματος [8].	67
Σχήμα 19. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 1 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.	69
Σχήμα 20. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 2 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.	69
Σχήμα 21. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 3 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.	70
Σχήμα 22. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 4 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.	70
Σχήμα 23. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 5 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.	71
Σχήμα 24. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=2m$	72
Σχήμα 25. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=4m$	73
Σχήμα 26. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=8m$	73
Σχήμα 27. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=12m$	74
Σχήμα 28. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=16m$	74

Σχήμα 29. Το βασικό διάγραμμα ελέγχου του γενετικού προγραμματισμού, όπου η επιβίωση του καταλληλότερου χρησιμοποιείται για βρεθεί λύση [72].	81
Σχήμα 30. Συντακτικό δέντρο γενετικού προγραμματισμού που αναπαριστά το $\max(x+x, x+3*y)$ [72].	82
Σχήμα 31. Η καλύτερη δυνατή παραμετροποιημένη τοπολογία βαθυπερατού φίλτρου με μεταβλητή συχνότητα αποκοπής [73].	83
Σχήμα 32. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 1 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].	90
Σχήμα 33. Μεταβολή αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίου 2 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].	90
Σχήμα 34. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 3 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].	91
Σχήμα 35. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 4 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].	91
Σχήμα 36. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 5 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].	92
Σχήμα 37. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης όλων των μελετώμενων ηλεκτροδίων συναρτήσει του χρόνου και της ημερήσιας βροχόπτωσης (δεδομένα αρχείου) [8].	92
Σχήμα 38. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών για την R1.	94
Σχήμα 39. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης και δοκιμής του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 1, rd).	95
Σχήμα 40. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 1).	98
Σχήμα 41. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης και δοκιμής του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 1).	98
Σχήμα 42. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R1.	99
Σχήμα 43. Μοντέλο συμβολικής παλινδρόμησης R1.	99
Σχήμα 44. Error Characteristics curve (ηλεκτρόδιο 2).	103
Σχήμα 45. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R2.	104
Σχήμα 46. Απλοποιημένο μοντέλο συμβολικής παλινδρόμησης R2.	104
Σχήμα 47. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 3).	109
Σχήμα 48. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R3.	110
Σχήμα 49. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R4.	113
Σχήμα 50. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 4).	114
Σχήμα 51. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 5).	117
Σχήμα 52. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R5.	118
Σχήμα 53. Μοντέλο συμβολικής παλινδρόμησης R5.	118

Κεφάλαιο 1

Γείωση και ειδική αντίσταση

1.1 Ο ρόλος της γείωσης

Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο δυναμικό. Βασικός στόχος ενός συστήματος γείωσης είναι να εγγυηθεί πως η ροή του ρεύματος προς το σημείο χαμηλότερου δυναμικού θα γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας τόσο την αξιοπιστία του συστήματος όσο και την ελάχιστη πτώση δυναμικού. Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη, μειώνοντας παράλληλα τις πιθανότητες ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς [1].

Για να είναι ένα σύστημα γείωσης ασφαλές, πρέπει να εξασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και τη συνέχεια της λειτουργίας του σε περίπτωση εμφάνισης οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη, καθώς και να προστατεύει από ηλεκτροπληξία άτομα που είτε δουλεύουν είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο. Για να καταστεί αυτό εφικτό πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος να είναι αρκετά χαμηλή (θεωρητικά να είναι ίση με το μηδέν), ώστε το ρεύμα να οδεύει στη γη μέσω της γείωσης, διατηρώντας τις διαφορές δυναμικού, όπως η βηματική τάση και η τάση επαφής που αναπτύσσονται, κάτω από συγκεκριμένα όρια [2].

Συνεπώς, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης συνοψίζεται στα ακόλουθα [1]:

- Προστασία του ανθρώπου από τις βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής που ενδεχομένως αναπτύσσονται.
- Προστασία τόσο της κατασκευής όσο και του εξοπλισμού από κεραυνοπληξίες ή ρεύματα σφαλμάτων.
- Μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και περιορισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2013 [2], όλα τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη μιας εγκατάστασης θα πρέπει να συνδέονται προς τη γη μέσω ειδικών αγωγών

προστασίας και κάτω από κατάλληλες συνθήκες, όπως αυτές επιβάλλονται από το σύστημα σύνδεσης των γειώσεων του δικτύου τροφοδοσίας.

1.2 Ορισμοί

Γείωση είναι η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιο, που να μπορεί να θεωρηθεί γη. Κατά σύμβαση, το δυναμικό της γης θεωρείται μηδέν και έτσι η γείωση καθορίζει ένα δυναμικό αναφοράς [2].

Διάταξη-Σύστημα γείωσης (Grounding System): Το σύστημα που περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής. Το ηλεκτρόδιο γείωσης, ο αγωγός γείωσης και ο κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης αποτελούν τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης γείωσης.

Ηλεκτρόδιο γείωσης (Ground electrode) ή γειωτής είναι ένα αγώγιμο σώμα ή σύνολο αγώγιμων σωμάτων συνδεδεμένων μεταξύ τους, σε διάταξη οποιουδήποτε σχήματος, σε άμεση επαφή με τη γη. Κατασκευάζεται συνήθως από χαλκό, από χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο, από χάλυβα ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένο ή από ανοξείδωτο χάλυβα.

Αγωγός γείωσης είναι ο αγωγός που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με έναν ακροδέκτη ή ζυγό γείωσης.

Κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης είναι ένας ακροδέκτης ή ζυγός στον οποίο συνδέονται οι αγωγοί γείωσης, οι αγωγοί προστασίας, οι αγωγοί ισοδυναμικής σύνδεσης και οι αγωγοί γείωσης λειτουργίας, αν υπάρχουν [2].

Άπειρη γη είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε «άπειρη απόσταση» από το γειωτή. Λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών και θεωρούμε ότι το δυναμικό της άπειρης γης είναι μηδέν [3].

Αντίσταση γείωσης: Για μια συγκεκριμένη εκφόρτιση ρεύματος η αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και της άπειρης γης προς της εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή $R=U/I$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι, επομένως, μια ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [4].

Η αντίσταση γείωσης εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το έδαφος που το περιβάλλει. Προκύπτει άμεσα

πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος.

Ρεύμα γης (Ground current) ορίζεται το ρεύμα που ρέει από και προς τη γη, ή το ισοδύναμο γης.

Ανύψωση δυναμικού γης (Ground Potential Rise) είναι το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που μπορεί να λάβει ένα ηλεκτρόδιο γείωσης σε σχέση με ένα απομακρυσμένο σημείο γείωσης, το οποίο υποτίθεται ότι έχει το δυναμικό της απομακρυσμένης γης. Αυτή η τάση, GPR, είναι ίση με το γινόμενο του μέγιστου ρεύματος που διαρρέει το πλέγμα και της αντίστασης γείωσης:

$$GPR = Z \cdot I \quad (1.1)$$

Ως Z ορίζεται η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γείωσης, όπως αυτή φαίνεται από τον αγωγό που διοχετεύει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Η σύνθετη αντίσταση Z συνίσταται από τις αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις των αγωγών που αποτελούν τη γείωση και την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περικλείει το δίκτυο γείωσης. Σε χαμηλές συχνότητες και για δίκτυα γείωσης που είναι σχετικά μικρού μεγέθους, η αντίσταση του όγκου του εδάφους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αγωγών του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση των αγωγών μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό του Z [2].

Αγωγός προστασίας (PE): Χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μέτρων προστασίας και προορίζεται για την ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών που περιλαμβάνονται σε μια εγκατάσταση με σημεία όπως τον κύριο ακροδέκτη γείωσης, ξένα αγωγίμα στοιχεία, το ηλεκτρόδιο γείωσης, το γειωμένο σημείο της πηγής τροφοδοσίας ή ένα γειωμένο τεχνητό ουδέτερο κόμβο.

Ουδέτερος αγωγός (N) είναι ο αγωγός που συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο ενός συστήματος τροφοδότησης (π.χ. μετασχηματιστή ή γεννήτριας) και συμμετέχει στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Ισοδυναμική σύνδεση είναι η ηλεκτρική σύνδεση που διατηρεί στο ίδιο ή περίπου στο ίδιο δυναμικό τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη και τα ξένα αγωγίμα στοιχεία. Μια ισοδυναμική σύνδεση μπορεί να θεωρείται κύρια ισοδυναμική ή συμπληρωματική σύνδεση.

Αγωγός ισοδυναμικής σύνδεσης είναι ο αγωγός που συνδέει τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη και τα ξένα αγωγίμα στοιχεία, ώστε να εξασφαλίζει την ισοδυναμική τους σύνδεση.

Τάση πλέγματος (Mesh voltage): Η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης.

Τάση επαφής (Touch voltage): Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφάνειας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή. Το υψηλότερο δυναμικό προκύπτει όταν υπάρχει μια μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού δυναμικού και το άτομο στέκεται σε απόσταση ενός μέτρου, ακουμπώντας σε αυτή τη δομή. Ο κίνδυνος από αυτόν τον τύπο της επαφής είναι μεγαλύτερος από τον κίνδυνο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, διότι η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος του σώματος και δύναται να επηρεάσει τους μύς της καρδιάς [2].

Βηματική τάση (Step voltage): Η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος ενός μέτρου και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Η διαφορά δυναμικού U_s που «βλέπει» το σώμα περιορίζεται από την τομή ανάμεσα στα δύο σημεία της γης, που απέχουν μεταξύ τους ένα μέτρο. Εφόσον το δυναμικό στη γη είναι μεγαλύτερο στην περιοχή που γειτνιάζει με το ηλεκτρόδιο, συνεπάγεται ότι το μέγιστο βηματικό δυναμικό, υπό συνθήκες σφάλματος προς γη, θα προκύπτει όταν το άτομο έχει το ένα πόδι στην περιοχή της μέγιστης δυναμικής ανύψωσης και το άλλο πόδι ένα βήμα πιο μακριά από το μέγιστο δυναμικό [6].

Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal to metal touch voltage): Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που περικλείονται στην τοποθεσία του υποσταθμού που μπορεί να γεφυρωθεί με άμεση επαφή χέρι με χέρι ή χέρι με πόδι. Η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο πλέγμα γείωσης θεωρείται ότι είναι αμελητέα σε συμβατικούς υποσταθμούς. Ωστόσο, η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο μεταλλικό πλέγμα και σε μεταλλικά αντικείμενα που υπάρχουν στην τοποθεσία του υποσταθμού, όπως ένας μονωμένος φράκτης, αλλά μη συνδεδεμένα στο πλέγμα γείωσης, μπορεί να είναι ουσιαστική. Σ'έναν τυπικό υποσταθμό, η χειρότερη τάση επαφής συνήθως είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε ένα χέρι και τα πόδια ενός ατόμου, όταν αυτά απέχουν τη μέγιστη δυνατή απόσταση [2].

Λόγος X/R (X/R ratio) είναι ο λόγος της αντίδρασης του συστήματος προς την αντίσταση. Είναι ενδεικτικός του ρυθμού της ελάττωσης της dc αρχικής συνιστώσας. Ένας μεγάλος λόγος X/R αντιστοιχεί σε μια μεγάλη σταθερά χρόνου και ένα χαμηλό ρυθμό ελάττωσης.

Υλικό επιφανείας (surface material) είναι το υλικό που τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους και αποτελείται από, αλλά όχι αποκλειστικά, πέτρα ή χαλίκι, άσφαλτο ή τεχνητά υλικά. Το υλικό επιφανείας ανάλογα με την ειδική αντίστασή του μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα για την τάση επαφής και τη βηματική τάση που αφορούν τα πόδια του ανθρώπου.

Ενεργό μήκος (effective length) είναι το μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή του δε συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η τιμή του ενεργού μήκους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού, μειώνεται δε τόσο περισσότερο, όσο μικρότερο είναι το μέτωπο της κυματομορφής. Το ενεργό μήκος ενός αγωγού δίνεται από τη σχέση (1.2) [5]:

$$I_e = 1,4\sqrt{\rho T} \quad (1.2)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm
και T ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής σε μsec

Το ενεργό μήκος ενός αγωγού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης, όταν αυτό θα χρησιμοποιηθεί και για αντικεραυνική προστασία, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος γείωσης μιας ανεμογεννήτριας.

1.3 Είδη γείωσης

Διακρίνονται τρία βασικά είδη γείωσης, ανάλογα με την εκάστοτε λειτουργία για την οποία χρησιμοποιούνται:

1. Γείωση λειτουργίας
2. Γείωση προστασίας
3. Γείωση ασφαλείας

1.3.1 Η γείωση λειτουργίας

Γείωση λειτουργίας είναι η γείωση ενός τμήματος εγκατάστασης που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας, όπως είναι ο ουδέτερος κόμβος γεννητριών, μετασχηματιστών ή άλλων στοιχείων του δικτύου συνδεδεμένων σε αστέρα. Η γείωση λειτουργίας εκτός της αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης μπορεί να περιλαμβάνει και πρόσθετες ωμικές, επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις,

(π.χ. αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά την εμφάνιση σφαλμάτων με επαφή γης) [6].

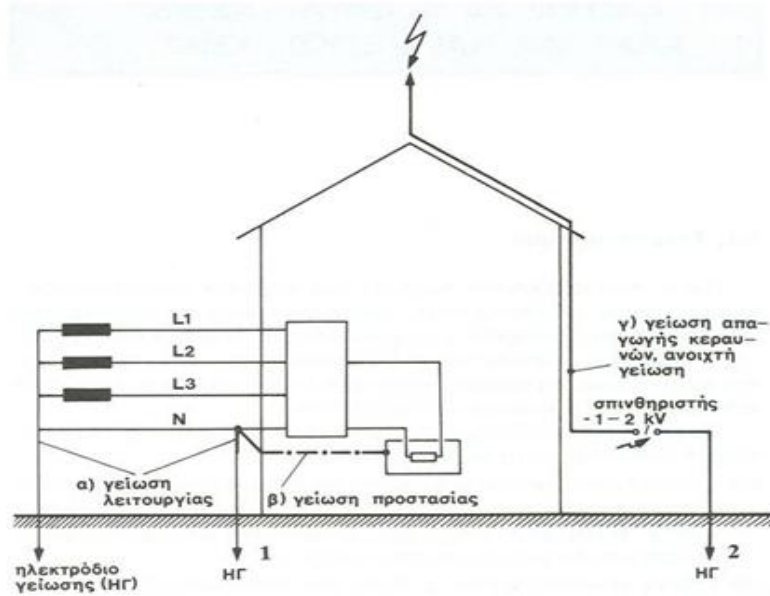
Η γείωση λειτουργίας διακρίνεται ακόμα σε άμεση, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης, και έμμεση, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

1.3.2 Η γείωση προστασίας

Γείωση προστασίας είναι η γείωση ενός αγώγιμου τμήματος της εγκατάστασης που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας, για την προστασία ανθρώπων έναντι επικίνδυνων τάσεων επαφής. Το ρεύμα αυξάνεται μέχρι να προκύψει τήξη της ασφάλειας και να διακοπεί η τροφοδοσία της συσκευής. Εώς τότε, το ρεύμα περνά, κυρίως, από τον αγωγό γείωσης και από το ανθρώπινο σώμα. Για τον αγωγό γείωσης επιδιώκεται η κατά το δυνατόν μικρότερη αντίσταση ώστε να περάσει το περισσότερο ρεύμα. Για το ανθρώπινο σώμα επιδιώκεται η τάση να είναι μικρότερη των 50V. Τα υλικά κατασκευής της γείωσης προστασίας επιβάλλεται να εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια συνεχή λειτουργία της, τη διέλευση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ή διαρροών προς τη γη καθώς και την αντοχή της σε φαινόμενα διάβρωσης και σε μηχανικές καταπονήσεις.

1.3.3 Η γείωση ασφαλείας

Γείωση ασφαλείας ονομάζεται κάθε γείωση μιας εγκατάστασης που χρησιμεύει για να διοχετεύονται προς τη γη ρεύματα σφάλματος από εξωτερικά ατμοσφαιρικά αίτια όπως οι κεραυνοί και επιδιώκει την ασφάλεια των παρευρισκομένων στον προστατευόμενο χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικεραυνών, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοικτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη.

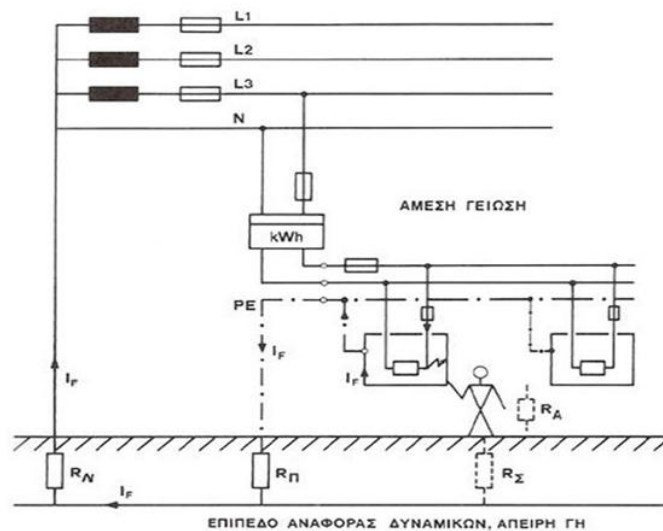


Σχήμα 1. Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης [7].

1.4 Μέθοδοι γείωσης

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι ακόλουθες:

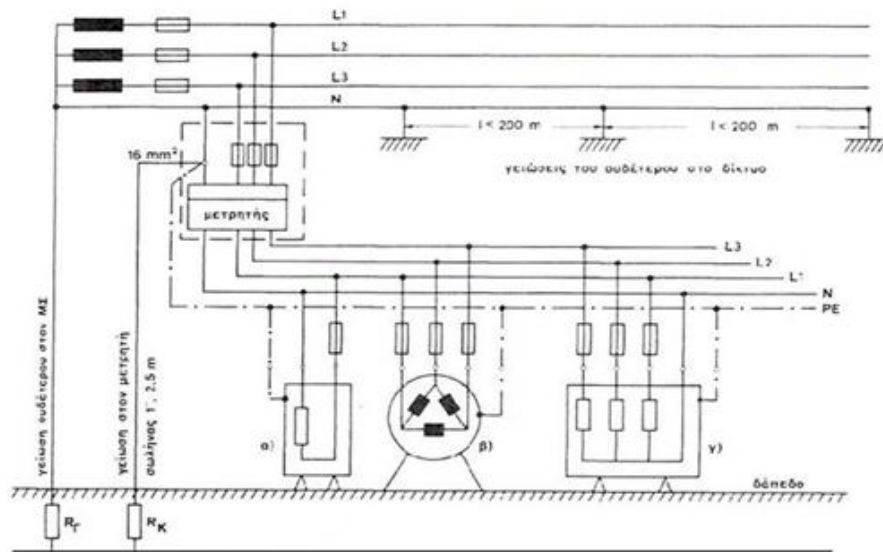
A. Η **άμεση γείωση**, δηλαδή η απευθείας αγωγή σύνδεση με το σύστημα γείωσης του αγωγού προστασίας (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο κλπ.), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Σύστημα προστασίας με άμεση γείωση [8].

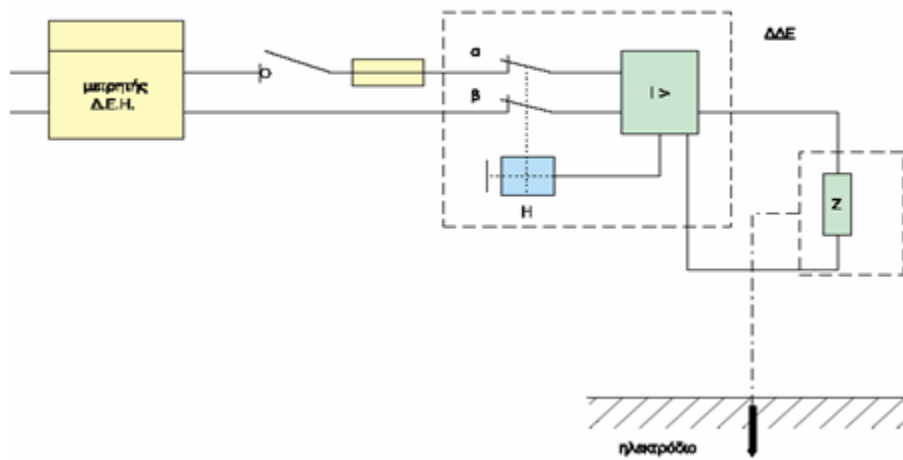
Β. Η **ουδετέρωση**, δηλαδή η σύνδεση των μεταλλικών μερών των συσκευών του συστήματος με αγωγό προστασίας που συνδέεται με τον ουδέτερο στον πίνακα παροχής (Σχήμα 3). Ο ουδέτερος αγωγός συνδέεται και με το ηλεκτρόδιο γείωσης στο σημείο παροχέτευσης πριν από το μετρητή.

Η μέθοδος αυτή είναι εξίσου αποτελεσματική με την άμεση γείωση, αλλά απαιτεί μικρότερη αντίσταση γείωσης και γι'αυτό χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές.



Σχήμα 3. Σύστημα προστασίας με ουδετέρωση [8].

Γ. Μέσω διακόπτη διαφυγής έντασης για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης.



Σχήμα 4. Σύστημα προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης, σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης [3].

Και στις τρεις αυτές περιπτώσεις θα πρέπει να επιτυγχάνεται η απόζευξη της εγκατάστασης το πολύ σε 5sec, αν η τάση κάποιου τμήματος αυτής σε σχέση με τη γη εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη των 50V.

1.5 Ειδική αντίσταση εδάφους

1.5.1 Ορισμός

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού αποτελεί ένα μέτρο του πόσο ισχυρά αντιστέκεται το υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικό με υψηλή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δυσκολεύει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος οπότε το υλικό χαρακτηρίζεται ως κακός αγωγός. Μονάδα μέτρησης στο S.I. είναι το ohm-meter [$\Omega \cdot m$]

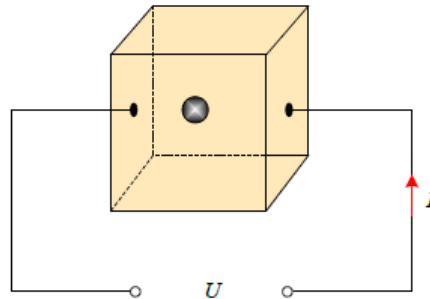
Για αγωγό σταθερής διατομής η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = R * \frac{A}{l} \quad (1.3)$$

Όπου R η αντίσταση του αγωγού (Ω), A η επιφάνεια διατομής του αγωγού (m^2) και l το μήκος του αγωγού (m).

Στην περίπτωση του εδάφους, που θεωρείται ημιαγωγός, η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) ορίζεται ως η αντίσταση από το υλικό του εδάφους που έχει ένας

μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{m}^3$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Ειδική αντίσταση εδάφους [8].

1.5.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και, συνεπώς, ποικιλία ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων ή αγωγιμοτήτων. Η ειδική αντίσταση του εδάφους, μετρούμενη συνήθως σε $\Omega \cdot \text{m}$, αυξάνεται ανάλογα με το πόσο ξηρό και πετρώδες είναι το έδαφος. Ένας ακόμη παράγοντας μεταβολής της ειδικής αντίστασης εδάφους είναι η ποσότητα νερού που κατακρατεί το έδαφος αλλά και η ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [9].

Πιο συγκεκριμένα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Ενδεικτικά, σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας η ειδική αντίσταση είναι 30 φορές μεγαλύτερη από ότι στο ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Ωστόσο, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Οι εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν επίσης σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός.

Συνοψίζοντας, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι οι εξής:

i. Ο τύπος του εδάφους: Ο τύπος του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ωστόσο, ο προσδιορισμός του τύπου του εδάφους παραμένει σχετικός και όχι αυστηρά ορισμένος. Για παράδειγμα, με τη λέξη αργιλώδες, μπορεί να περιγραφεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Επιπλέον, ακόμα και για τον ίδιο γενικό τύπο εδάφους η τιμή της ειδικής αντίστασης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι προσεγγιστικές τιμές της ειδικής αντίστασης για διάφορους τύπους εδαφών, όπως έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις.

Πίνακας 1 Προσεγγιστικές τιμές ειδικής αντίστασης διάφορων τύπων εδαφών [10]

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

ii. Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία: Η υγρασία του εδάφους έχει καθοριστική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Η αγωγιμότητα του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, κάτι που σημαίνει ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων σε αυτό αλάτων, παίζουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Η περιεκτικότητα σε νερό μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Με εξαίρεση την άμμο της ερήμου όπου το έδαφος θεωρείται, προσεγγιστικά, ότι παρουσιάζει μεγάλο βαθμό ξηρότητας, σπάνια παρουσιάζεται έδαφος πολύ ξηρό. Τέλος, δεν εμφανίζονται συχνά εδάφη με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη του 40%.

iii. Επίδραση του μεγέθους των κόκκων εδάφους: Το μέγεθος των κόκκων διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης τους εδάφους. Η ειδική αντίσταση, μάλιστα, αυξάνεται αναλογικά με το μέγεθος των κόκκων. Κάτι που πρέπει επίσης να επισημανθεί είναι πως το μέγεθος των κόκκων, αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος, επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία, αφού στην περίπτωση κόκκων μεγάλου μεγέθους η υγρασία κατακρατείται λόγω της επιφανειακής τάσης. Όταν δημιουργούνται κενά λόγω παρουσίας διαφορετικών μεγεθών κόκκων, η ειδική αντίσταση μειώνεται μιας

και αυτά τα κενά καλύπτονται από τους μικρότερους κόκκους.

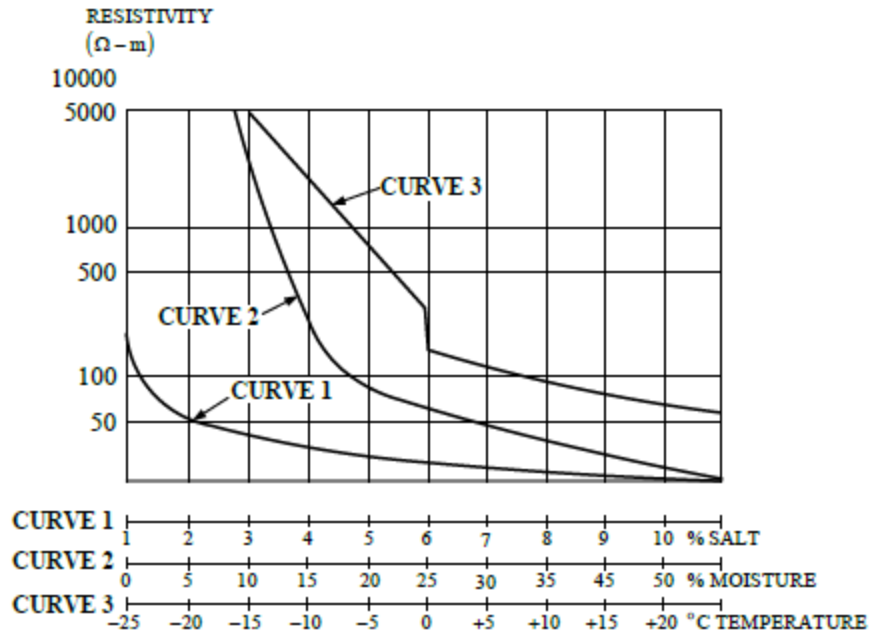
iv. Επίδραση των διαλυμένων αλάτων στο νερό: Το νερό περιέχει διαλυμένα άλατα, τα οποία είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την ειδική αντίστασή του. Συνεπώς, επηρεάζεται και η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα στην ειδική αντίσταση. Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση σε σχέση με την τιμή που αυτή έχει όταν το νερό είναι απιονισμένο. Διαφορετικά είδη αλάτων επιδρούν με διαφορετικό τρόπο και, ίσως, αυτό εξηγεί γιατί η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών από διαφορετικές περιοχές παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.

v. Θερμοκρασία και πίεση: Η ειδική αντίσταση του εδάφους αυξάνεται καθώς η θερμοκρασία μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί η ειδική αντίσταση του εδάφους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία του νερού και η ειδική αντίσταση του νερού έχει μεγάλο θερμοκρασιακό συντελεστή. Σε θερμοκρασία κάτω από τους 0°C η ειδική αντίσταση εδάφους αυξάνεται κατακόρυφα.

vi. Ένταση του πεδίου (voltage gradient): Η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζεται από την ένταση του πεδίου, εκτός εάν εκείνη υπερβαίνει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, συνήθως, όμως, είναι της τάξης των kV/cm. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, δημιουργούνται τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, τα οποία οδηγούν κατ'επέκταση σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα τόξα εκδηλώνονται οπουδήποτε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά την κρίσιμη τιμή, ενώ σε όλο τον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης παραμένει αμετάβλητη [2].

vii. Επίδραση της μορφής της τάσης: Σε κρουστικές τάσεις, αλλά και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της ειδικής αντίστασης. Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο τάσης.

Στο Σχήμα 6 φαίνεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας με βάση στοιχεία του Προτύπου ANSI/IEEE Std 80-2013 [2].



Σχήμα 6. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας [8].

1.5.3 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους

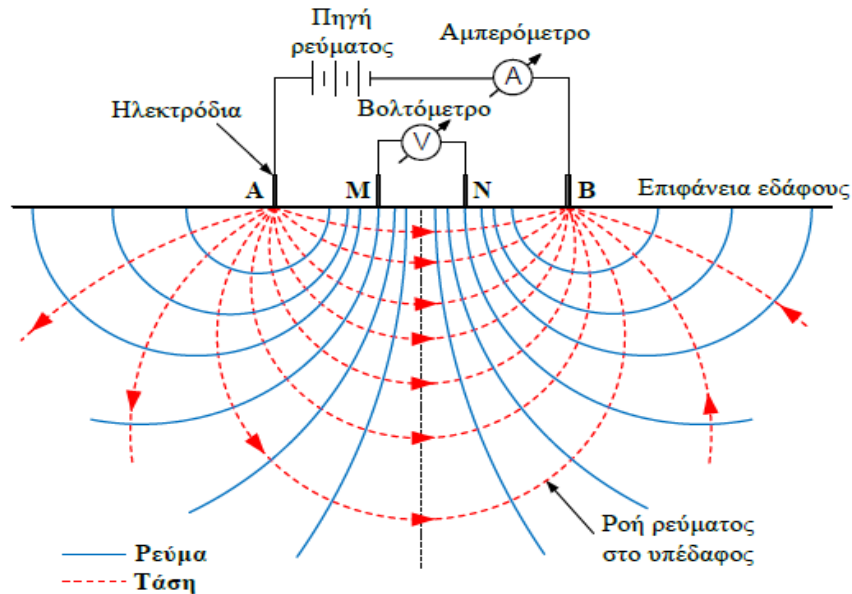
Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους τοποθετούνται ηλεκτρόδια μέσα στη γη, τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύμα. Η διάταξη μέτρησης φαίνεται στο Σχήμα 7. Ηλεκτρικό πεδίο, εξαρτώμενο από τη δομή του εδάφους, αναπτύσσεται όταν από το ηλεκτρόδιο A εισέρχεται στο υπέδαφος ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο και εξέρχεται από το ηλεκτρόδιο B (ηλεκτρόδια ρεύματος). Χρησιμοποιώντας δυο βοηθητικά ηλεκτρόδια M και N (ηλεκτρόδια δυναμικού) υπολογίζεται η διαφορά δυναμικού U_{MN} , που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [9]:

$$U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (1.4)$$

όπου U_M και U_N είναι το δυναμικό στα σημεία M και N αντίστοιχα, AM, BM, AN, BN είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων A και M, B και M, A και N, B και N, αντίστοιχα. Η τάση σε κάθε σημείο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (1.5)$$

Όπου r_A και r_B είναι η απόσταση του υπ' όψιν σημείου από τα A και B.



Σχήμα 7. Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης [8].

Από τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού υπολογίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η οποία εξαρτάται όχι μόνο από την ειδική αντίσταση των πετρωμάτων, αλλά και από τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Ακολουθώντας, η επεξεργασία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δίνει την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, δηλαδή την γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.

Όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται με το βάθος, η μέτρηση σε μία μόνο κατεύθυνση πιθανώς να μην αρκεί, οπότε απαιτείται για μεγαλύτερη επάρκεια μέτρηση σε διαφορετικές κατευθύνσεις (άξονες) ή μεταβολή των αποστάσεων μεταβολή των αποστάσεων των ηλεκτροδίων ράβδων από το σημείο M, προκειμένου να ερευνηθεί η μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε οριζόντια επίπεδα.

Οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους, οι οποίες προτείνονται από τα διεθνή πρότυπα, είναι [2]:

α. Μέθοδος των 4 σημείων (Four point method).

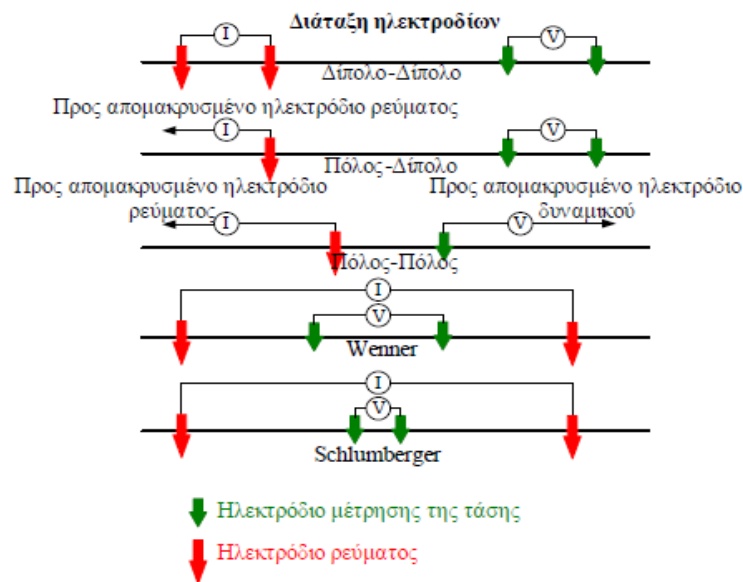
β. Μέθοδος των 3 σημείων (Three point method ή Variation of Depth Method).

γ. Μέθοδος των 2 σημείων (Two Point Method).

Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι αυτή «των τεσσάρων σημείων», η οποία εφαρμόζεται με αρκετές παραλλαγές ως προς τη διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων μέτρησης της ειδικής αντίστασης. Οι βασικές παραλλαγές αυτής της μεθόδου είναι οι εξής [9], [11]:

- i. Μέθοδος Wenner.
- ii. Μέθοδος Schlumberger-Palmer.
- iii. Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου.
- iv. Μέθοδος Lee.
- v. Μέθοδος διπόλου -διπόλου.
- vi. Τετραγωνική διάταξη.

Μια σχηματική αναπαράσταση των σπουδαιότερων από αυτές τις διατάξεις μέτρησης δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:

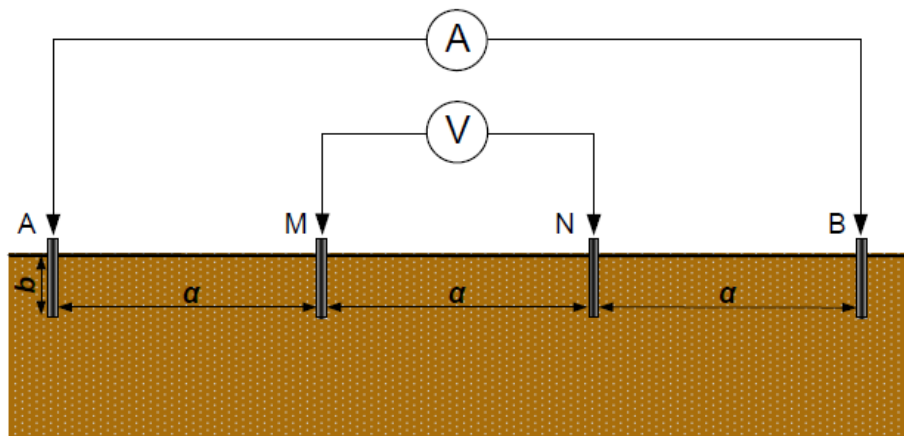


Σχήμα 8. Διατάξεις μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους [8].

Ακολουθεί η περιγραφή της μεθόδου Wenner, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε το 1916 από τον F. Wenner [12] και επιλέγεται κατά πλειοψηφία από

ερευνητές και μηχανικούς, αφού η εφαρμογή της είναι απλή και δεν απαιτεί εξειδίκευση σε ανθρώπινο δυναμικό και σε εξοπλισμό.

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται τέσσερα μικρού μήκους ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντια απόσταση a μεταξύ τους και σε βάθος b (έως $0,05a$), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9. Η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια $C_1(A)$ και $C_2(B)$, ενώ η τάση μετριέται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια $P_1(M)$ και $P_2(N)$.



Σχήμα 9. Διάταξη Wenner [8].

Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς την ένταση του ρεύματος ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση. Εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται από τη σχέση (1.6) [9], [11]:

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

Όπου R είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου μέτρησης) και το n εξαρτάται από τον λόγο b/a και λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 και 2.

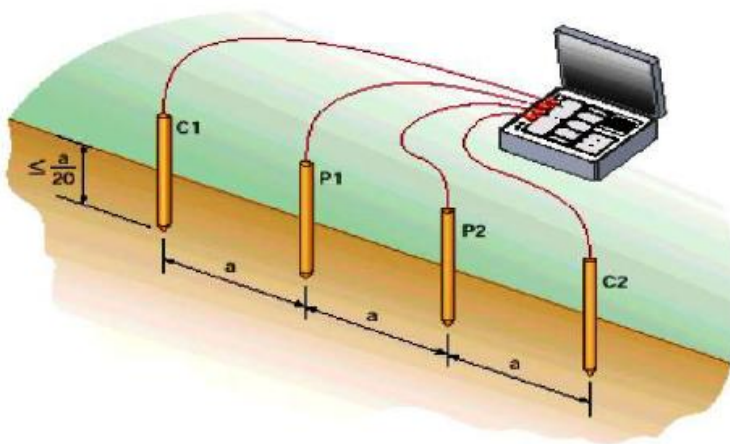
Για $a \ll b$ έχουμε:

$$\rho = 4\pi\alpha R \quad (1.7)$$

ενώ για $b \ll a$ τότε η εξίσωση γίνεται:

$$\rho = 2\pi aR \quad (1.8)$$

η οποία δίνει τη φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους σε βάθος a . Ενδείκνυται το βάθος b να μην ξεπερνά το $1/20$ της απόστασης a για να εφαρμοστεί ο προσεγγιστικός τύπος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10. Διάταξη Wenner με εφαρμογή του προσεγγιστικού τύπου [3].

Εγχέοντας ρεύμα σταθερής έντασης I , η τάση U πρέπει να μειώνεται με την αύξηση της απόστασης a , ακόμη και στην περίπτωση που το μοντέλο γης είναι ομοιογενές. Όταν το έδαφος είναι ομοιογενές, η ειδική αντίσταση που υπολογίζεται από τη σχέση (1.1) είναι σταθερή και ανεξάρτητη, τόσο από την απόσταση των ηλεκτροδίων, όσο και από την τοποθεσία της επιφάνειας. Ανομοιογένεια στο έδαφος μπορεί να προκαλέσει μεταβολές της ειδικής αντίστασης ανάλογες της σχετικής θέσης των ηλεκτροδίων. Σε αυτή την περίπτωση, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση, είναι γνωστή ως φαινόμενη ειδική αντίσταση. Η γνώση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης καθιστά δυνατή την ποιοτική εκτίμηση των ηλεκτρικών παραμέτρων του μέσου.

1.5.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πολλοί μελετητές έχουν ασχοληθεί με τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, την ανάλυση και ερμηνεία των αντίστοιχων μετρήσεων όπως, επίσης, και με τον

σχεδιασμό και την εξέλιξη προσεγγιστικών μοντέλων για την προσομοίωση της δομής του εδάφους.

Οι Dawalibi-Blattner [13] επιδίωξαν να αναπτύξουν τεχνικές ερμηνείας των αποτελεσμάτων μέτρησης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, βασιζόμενοι κυρίως σε εμπειρικές και αναλυτικές ερμηνείες. Πιο αναλυτικά, παρουσίασαν μια μέθοδο με την οποία συνέκριναν τις γραφικές παραστάσεις των πειραματικών τιμών με αντίστοιχες λογαριθμικές που είχαν θεωρητικώς υπολογίσει και με βάση το ποσοστό σύγκλισης αυτών των καμπυλών, διατύπωσαν συμπεράσματα για το διστρωματικό μοντέλο εδάφους που μελετούσαν. Μια ακόμα σημαντική μέθοδος που παρουσίασαν χρησιμοποιούσε προγραμματισμό έχοντας ως βάση τον αλγόριθμο *steepest-descent*. Με αυτή τη μέθοδο υπολόγιζαν την τιμή της ειδικής αντίστασης σε διάφορα βάθη, συνέκριναν αυτές τις τιμές με τις αντίστοιχες πειραματικές και υπολόγιζαν το προτεινόμενο διστρωματικό μοντέλο.

Την ίδια κεντρική ιδέα ακολούθησαν και ανέπτυξαν περαιτέρω οι Μελιόπουλος-Παπαλεξόπουλος [14] και οι Seeder-Arora [15], οι οποίοι εξέλιξαν μέθοδο και πρόγραμμα υπολογιστή για τον υπολογισμό των παραμέτρων του διστρωματικού μοντέλου. Σύμφωνα με τη μέθοδο των πρώτων, γίνεται μια στατιστική εκτίμηση των παραμέτρων εδάφους από μετρήσεις με τη μέθοδο τριών ή τεσσάρων ηλεκτροδίων με τη βοήθεια του προγράμματος SOMIP (Soil Measurements Interpretation Program). Με βάση την ανάλυση που ακολουθεί, προκύπτει η βέλτιστη εκτίμηση των παραμέτρων εδάφους, καθορίζονται τα σφάλματα στις τιμές των παραμέτρων ως προς τα διαστήματα εμπιστοσύνης (αβεβαιότητα) και αναγνωρίζονται οι εσφαλμένες μετρήσεις. Με τη μέθοδο των Seeder-Arora, αναπτύσσονται πεπερασμένες εκφράσεις για τον υπολογισμό του δυναμικού, ενώ οι συντελεστές των εν λόγω εκφράσεων βελτιστοποιούνται με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου SPEF (Soil Parameters Estimation using Finite Expressions).

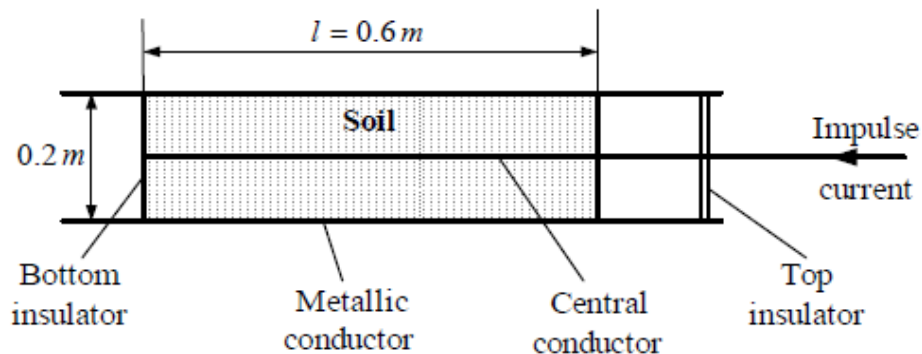
Έπειτα, ο Uribe et. al. [16] βασίστηκαν στη θεωρία των άπειρων ολοκληρωμάτων των Takahashi-Kawase και πρότειναν το δικό τους ηλεκτρικό μοντέλο για την εκτίμηση της ειδικής αγωγιμότητας, της ηλεκτρικής επιτρεπτότητας, καθώς και του πάχους του κάθε στρώματος του εδάφους. Η μεθοδολογία τους στηρίχτηκε στην επίλυση των άπειρων ολοκληρωμάτων του Takahashi για τον υπολογισμό των δυναμικών στην επιφάνεια του εδάφους. Μάλιστα, για την περικοπή των ολοκληρωμάτων πρότειναν ένα νέο κριτήριο περικοπής, που βασισμένο στην εκθετική συνάρτηση. Ακόμα, εφάρμοσαν δύο τεχνικές βελτιστοποίησης: μία που βασίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους και μία που βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, με στόχο την ακριβέστερη προσαρμογή των καμπυλών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που λαμβάνονται από μετρήσεις και από τα ολοκληρώματα του Takahashi, καθώς και

την αξιολόγηση της ακρίβειας. Τέλος, τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συγκρίνονται με μετρήσεις, με εφαρμογή της μεθόδου Wenner, της ειδικής αντίστασης.

Αργότερα, οι Γκόνος και Σταθόπουλος [17] έδειξαν πως η χρήση γενετικών αλγορίθμων ανάγει το ζήτημα προσδιορισμού των παραμέτρων του διστρωματικού μοντέλου σε ζήτημα βελτιστοποίησης, με σημαντική σύγκλιση αποτελεσμάτων προς τις πειραματικές πραγματικές τιμές. Στην ίδια λογική κινήθηκε και ο Galixto [18] ο οποίος προσδιόρισε και το βέλτιστο πλήθος στρωμάτων. Τέλος, οι Lagace και Vuong [19] πρότειναν ένα γραφικό περιβάλλον για την ερμηνεία και επαλήθευση των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης, μέσω του υπολογισμού της γεωφυσικής αντιστροφής, ελαχιστοποιώντας το τετράγωνο της λογαριθμικής απόστασης μεταξύ τη θεωρητικής καμπύλης της μεταβλητής ρ και των πραγματικών πειραματικών τιμών.

Στις προαναφερθείσες μελέτες οι πειραματικές μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης προέκυψαν κατά μεγάλη πλειοψηφία με εφαρμογή της μεθόδου Wenner στην ύπαιθρο. Ωστόσο, σε περίπτωση διενέργειας πειραμάτων με δείγματα χώματος στο εργαστήριο, απαιτείται ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης των αντίστοιχων δειγμάτων, αφού δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων.

Οι Loboda-Scuka [20], Γκόνος και Σταθόπουλος [21] και Chen-Chowdhuri [22] χρησιμοποίησαν δύο κυλινδρικά ομοαξονικά ηλεκτρόδια και στο μεταξύ τους διάκενο τοποθέτησαν το δείγμα του υπό εξέταση χώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11. Ομοαξονικό κυλινδρικό ηλεκτρόδιο για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης [8].

Γνωρίζοντας την επιβαλλόμενη τάση στο εσωτερικό ηλεκτρόδιο και μετρώντας την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη διάταξη είναι δυνατός ο υπολογισμός της αντίστασης R . Ακολούθως, με τη βοήθεια της σχέσης 1.2 υπολογίζεται η ειδική

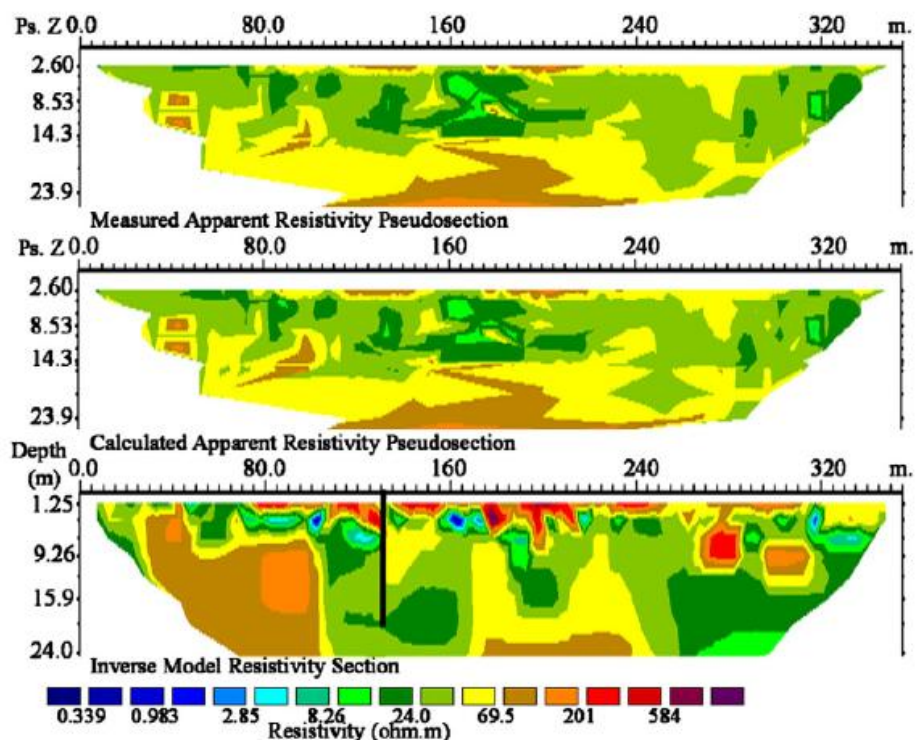
αντίσταση του δείγματος:

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad (1.9)$$

όπου l είναι το μήκος του κυλίνδρου, r_e είναι η ακτίνα του εξωτερικού κυλίνδρου και r_i είναι η ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου.

Η Liu et. al. [23] στις μετρήσεις τους χρησιμοποίησαν ημισφαιρική διάταξη, ενώ η Nor [24] χρησιμοποίησε διάταξη παράλληλων πλακών, που παράγει ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο, σύμφωνα με το Πρότυπο BS 1377 [25]. Επιπρόσθετα, οι Manpa-Chowdhuri [26] χρησιμοποίησαν διάταξη που αποτελείται από έναν κυλινδρικό σωλήνα από PVC, διαμέτρου 10cm και ύψους 5cm και δύο ατσάλινες πλάκες διαμέτρου 13cm , η οποία παράγει ομοιογενές πεδίο. Με τη βοήθεια γέφυρας μετρίεται η ωμική αντίσταση και από αυτή προκύπτει η ειδική αντίσταση του δείγματος.

Τέλος, τα τελευταία χρόνια, εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία η ηλεκτροτομογραφία, μία μέθοδος τελευταίας τεχνολογίας, με πολύ ακριβή αποτελέσματα: με κατάλληλο εξοπλισμό, εκατοντάδες μετρήσεις σαρώνουν κάθε σημείο του έδαφους, προς όλες τις κατευθύνσεις. Το υπέδαφος αποτυπώνεται ως ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο με μπλοκ, εκ των οποίων το καθένα έχει μια ορισμένη τιμή ειδικής αντίστασης. Οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται σε διάφορους άξονες και δίνουν το τελικό γεωηλεκτρικό μοντέλο (Σχήμα 12) το οποίο παρουσιάζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τις τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασής του υπεδάφους, ανά στρωματικό βάθος, και όχι της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, που δίνει μόνο η μέθοδος Wenner [27].



Σχήμα 12. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ηλεκτροτομογραφίας [27].

Τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει, επίσης, παρουσιαστεί ερευνητικό έργο που μελετά την μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει του χρόνου, περιβαλλοντικών συνθηκών και άλλων παραγόντων που την επηρεάζουν.

Οι Ma-Dawalibi σε αντίστοιχες εργασίες τους, μελέτησαν την επίδραση της παρουσίας υπόγειων μεταλλικών κατασκευών στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης, αλλάζοντας τύπους εδάφους, μεταλλικές κατασκευές και μεθόδους μέτρησης [28]. Ακόμα, ερεύνησαν τις πιθανές επιπτώσεις στη μέτρηση της επαγωγικής σύζευξης μεταξύ των αγωγών μέτρησης. Αναφορικά με τα πρώτα, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι η παρουσία μεταλλικών δομών αλλάζει σημαντικά τη μέτρηση, ενώ διαπίστωσαν ακόμα ότι ο βαθμός επιρροής εξαρτάται από τη μέθοδο μέτρησης, από τον τύπο της περιοχής που γίνεται η μέτρηση και από τη δομή του εδάφους. Η δεύτερη μελέτη τους έδειξε ότι η μέθοδος Wenner είναι πιο ευαίσθητη στην εσωτερική επαγωγική σύζευξη των αγωγών απ' ότι η μέθοδος Schlumberger, αλλά σε όρους έντασης του σήματος είναι κυρίαρχη, οπότε και προτιμάται σε πλήθος πρακτικών εφαρμογών.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όπως ο χρόνος, η υγρασία του εδάφους, η βροχόπτωση, η θερμοκρασία, το πορώδες του εδάφους, ακόμα και η εντός πολύ μικρών ορίων

τοπική μορφολογία έχουν γίνει αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια. Η χρονική μεταβολή

της ειδικής αντίστασης, κατά τη διάρκεια του έτους, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυστρωματική δομή του εδάφους και ενδέχεται να είναι σημαντική [29]. Η υγρασία του εδάφους, η εποχική μεταβολή της και ο διαφορετικός βαθμός επίδρασης της υγρασίας στους διάφορους τύπους εδάφους, καθορίζει αποφασιστικά τη συμπεριφορά της ειδικής αντίστασης ανάλογα με τον τύπο του εδάφους [30]. Αξίζει να επισημανθεί πως, σύμφωνα με τον Lim και τους συνεργάτες του [31], οι τιμές της μετρούμενης εντοπισμένης ειδικής αντίστασης (σημείο προς σημείο) πιθανώς να διαφέρουν σημαντικά από τη μέση ειδική αντίσταση όλης της εξεταζόμενης περιοχής. Τέλος, δεν μπορεί να παραληφθεί η επίδραση της περιεκτικότητας και του είδους των αλάτων στο εξεταζόμενο έδαφος. Τα άλατα καθορίζουν την αγωγιμότητα του νερού η οποία επηρεάζει σημαντικά την ειδική αντίσταση. Διαλύματα χρώματος ίδιας συγκέντρωσης, αλλά διαφορετικής ιοντικής σύνθεσης. Αποδεικνύεται ότι μπορεί να εμφανίσουν διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης [32].

Κεφάλαιο 2

Αντίσταση γείωσης και βελτιωτικά υλικά

2.1 Η αντίσταση γείωσης

Ως αντίσταση γείωσης ορίζεται η αντίσταση που εμφανίζεται από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Ως άπειρη γη θεωρείται ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε άπειρη απόσταση από τον γειωτή. Λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών, ενώ το δυναμικό της άπειρης γης θεωρείται μηδέν. Για πρακτικούς λόγους, η «άπειρη απόσταση» θεωρείται 5 έως 10 φορές η μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή .

Σ' αυτήν την απόσταση της άπειρης γης, το δυναμικό αποτελεί το 2% του δυναμικού της ράβδου. Αν ένας γειωτής (π.χ. κατακόρυφη ράβδος μήκους 3m) τεθεί υπό τάση U (=100%) ως προς την άπειρη γη, δημιουργείται ένα πεδίο δυναμικού και ροής γύρω από τον γειωτή. Αυξάνοντας την απόσταση από τον γειωτή, μειώνεται το δυναμικό. Το διάγραμμα απόστασης-δυναμικού ονομάζεται χοάνη δυναμικού του γειωτή (σχήμα 13). Από τη χοάνη δυναμικού μπορεί κανείς να εκτιμήσει τις τάσεις επαφής και τη βηματική τάση. Επίσης, η χοάνη δυναμικού δίνει την περιοχή επίδρασης του γειωτή ή την απόσταση της άπειρης γης [8].

Αξίζει να αναφερθεί πως η χοάνη δυναμικού είναι ανεξάρτητη από την ειδική αντίσταση του εδάφους, θεωρώντας βέβαια το έδαφος ομοιογενές. Η χοάνη δυναμικού χρησιμοποιείται, ακόμα, για να γίνει μια εκτίμηση του σφάλματος κατά τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης. Αν, παραδείγματος χάριν, μετρηθεί η αντίσταση γείωσης του παραπάνω γειωτή, από το ηλεκτρόδιο μέχρι και 25m μακριά, τότε η μετρούμενη αντίσταση θα είναι το 95% της πραγματικής.

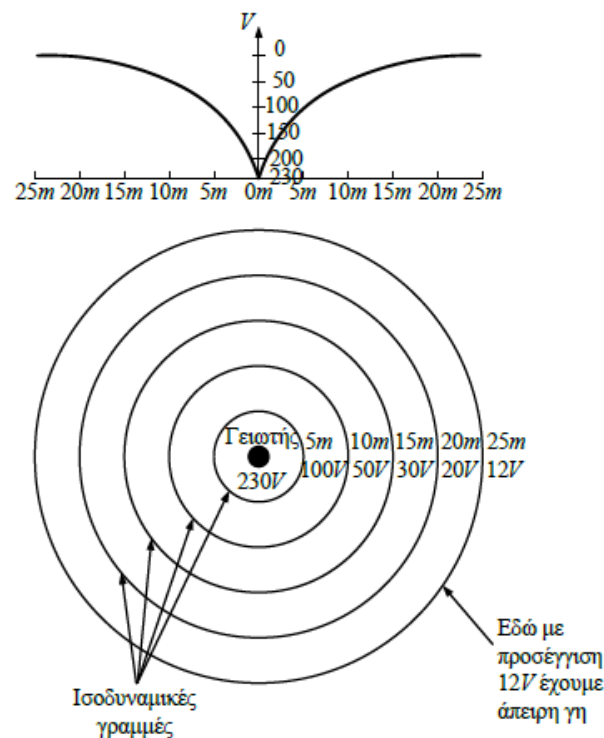
Ένας ορισμός της αντίστασης γείωσης, ως φυσικού μεγέθους, είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την ένταση του ρεύματος, δηλαδή $R=U/I$ [9], [11].

Η αντίσταση γείωσης εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος από το αγωγίμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το έδαφος που το περιβάλλει. Προκύπτει άμεσα πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος.

Μπορεί να θεωρηθεί ως η συνισταμένη των εν σειρά, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως R_{δ} . Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος.

Ως αποτέλεσμα προκύπτει, τελικά, πως η ισοδύναμη αντίσταση γείωσης αποτελείται από τα εξής τρία μέρη:

- Την αντίσταση του αγωγού που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με το υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα.
- Την αντίσταση επαφής μεταξύ της επιφάνειας του ηλεκτροδίου και του εδάφους που το περιβάλλει.
- Την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο γείωσης.



Σχήμα 13. Χοάνη δυναμικού [8].

2.2 Μέτρηση της αντίστασης γείωσης

Ίσως ο πιο συνηθισμένος τύπος συνδέσμου γείωσης είναι αυτός της κατακόρυφης ράβδου γείωσης. Μια κατακόρυφη ράβδος γείωσης είναι ένας μεμονωμένος κύλινδρος και η ροή του ρεύματος απ' αυτήν προς το έδαφος και διαμέσου του εδάφους, υπολογίζεται από τις ίδιες σχέσεις που υπολογίζεται και η ροή ενός ρευστού διηλεκτρικού από ένα μεμονωμένο φορτισμένο κύλινδρο [33]. Επομένως, το πρόβλημα υπολογισμού της αντίστασης γείωσης μιας ράβδου γείωσης ανάγεται, κατά τον Dwight, τελικά στο πρόβλημα της χωρητικότητας ενός μεμονωμένου κυλίνδρου, πολύ μεγάλου μήκους, συγκριτικά με την ακτίνα του. Η παρακάτω εξίσωση περιγράφει την τελευταία περίπτωση:

$$\frac{C}{l} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1,22741}{4\lambda^2} + \frac{2,17353}{8\lambda^3} + \frac{11,0360}{16\lambda^4} \quad (2.1)$$

Όπου:

$$\lambda = \ln(2l/r)$$

2l=το μήκος του μεμονωμένου κυλίνδρου σε cm

r=η ακτίνα του κυλίνδρου σε cm

C=η χωρητικότητα σε Farad

Μια πιο πρακτική σχέση που συγκλίνει πιο γρήγορα σε μικρό όριο προκύπτει αντιστρέφοντας την σειρά της σχέσης 2.2 [33]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{l} \left(\lambda - 0,306852 - \frac{0,17753}{\lambda} - \frac{0,5519}{\lambda^2} - \dots \right) \quad (2.2)$$

Η μέθοδος του μέσου δυναμικού δίνει μία καλύτερη προσέγγιση για τη χωρητικότητα με τη σχέση 2.3 [33]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{l} \left[\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1 + 0,63 \frac{r}{l} - 0,16 \left(\frac{r^2}{l^2}\right) + 0,015 \left(\frac{r^4}{l^4}\right) - \dots \right] \quad (2.3)$$

Για κύλινδρο μεγάλου μήκους, με διαστάσεις ανάλογες των κατακόρυφων ράβδων, ο λόγος r/l και οι δυνάμεις του δεν επηρεάζουν σημαντικά και μπορούν, χωρίς μεγάλο σφάλμα, να αμεληθούν. Έτσι, προκύπτει:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{l} \left[\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Η εξίσωση της χωρητικότητας οδηγεί σε μια εξίσωση για την αντίσταση γείωσης, αν θεωρήσουμε την απλή περίπτωση δύο παραλλήλων πλακών, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή. Το φαινόμενο των άκρων θεωρούμε ότι αγνοείται. Με την παραδοχή ότι η κάθε πλάκα έχει εμβαδό $A \text{ cm}^2$, πυκνότητα φορτίου q/cm^2 η μία και $-q/\text{cm}^2$ η άλλη και ότι βρίσκονται σε απόσταση $S \text{ cm}$ μεταξύ τους, προκύπτει πως το πλήθος των γραμμών της ηλεκτρικής ροής μέσω του αέρα θα είναι ίσο με $4\pi qA$ και θα ισχύει:

$$\frac{1}{C} = \frac{U}{qA} = \frac{4\pi S}{A} \quad (2.5)$$

Ο τύπος που πρότεινε ο Dwight προκύπτει με αντικατάσταση της σχέσης 6 στη σχέση 8 και δίνει την αντίσταση ενός κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου μήκους l και ακτίνας r , για το οποίο θεωρείται $l/r > 10$:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (2.6)$$

Ο Sunde [11], βασίστηκε στην ανύψωση δυναμικού στο μέσο του ηλεκτροδίου και κατέληξε στη σχέση (2.7) για την αντίσταση γείωσης:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left[\frac{2l}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right) \quad (2.7)$$

$$\cong \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right), \text{ όταν } l \gg r$$

Για να βρει το δυναμικό στην επιφάνεια του αγωγού, υπέθεσε ότι η πτώση τάσης κατά μήκος του αγωγού είναι αμελητέα, έτσι ώστε η μεταβολή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού να μπορεί να θεωρηθεί μηδενική. Μάλιστα, διατύπωσε και τον τύπο υπολογισμού της αντίστασης γείωσης για κυκλική διάταξη, διαμέτρου D , n κατακόρυφων ηλεκτροδίων σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, όπου η απόσταση μεταξύ των διπλανών ηλεκτροδίων είναι μεγαλύτερη ή ίση του μήκους τους l :

$$R_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 + \frac{1}{D} \sum_{m=1}^{m=n-1} \frac{1}{\sin(\frac{\pi m}{n})} \right] \quad (2.8)$$

Ο Tagg, από την άλλη, θεώρησε ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο γείωσης, μέσω του οποίου το ρεύμα σφάλματος διαχέεται στο έδαφος σε ομόκεντρους κύκλους. Η αντίσταση γείωσης σε απόσταση r_1 από το ηλεκτρόδιο δίνεται σύμφωνα με τον Tagg [9] από την εξής σχέση:

$$R = \int_r^{r_1} \frac{\rho dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (2.9)$$

Για r_1 που τείνει στο άπειρο η σχέση (2.9) απλοποιείται στην:

$$R_\infty = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2.10)$$

Με βάση την υπόθεση ότι η χωρητικότητα ενός σφαιρικού ηλεκτροδίου που βρίσκεται στον αέρα είναι ανάλογη της ακτίνας του, η αντίσταση του ίδιου ηλεκτροδίου σε ένα άπειρο αγώγιμο μέσο είναι ίση με:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} \quad (2.11)$$

Συνεπώς και η αντίσταση ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου, τοποθετημένου κατά το ήμισυ στο έδαφος, θα είναι διπλάσια από την προηγούμενη:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2.12)$$

Για την κατακόρυφη ράβδο, ο Tagg θεώρησε το ηλεκτρόδιο ως το μισό ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, με τον μεγάλο άξονα πολύ μεγαλύτερο από τον μικρό άξονα. Η χωρητικότητα προκύπτει σε αυτήν την περίπτωση ως $C=l/\ln(2l/r)$ και αντικαθιστώντας στη σχέση (2.12) έχουμε:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{r} \quad (2.13)$$

Ο Dwight απορρίπτει αυτή την προσέγγιση λόγω του μεγάλου σφάλματος που παρουσιάζει.

Παράλληλα, ο Laurent [34], βασιζόμενος στα ευρήματα του Dwight, διατυπώνει μια σχέση για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων, θεωρώντας πως το ηλεκτρόδιο μπορεί να διαιρεθεί σε μικρά τμήματα και ότι το ρεύμα που ρέει προς τη γη κατανέμεται σε αυτά τα τμήματα. Έτσι, το δυναμικό σε κάθε σημείο που εξετάζεται προκύπτει από την επαλληλία των δυναμικών που αναπτύσσονται στο αντίστοιχο σημείο από κάθε τμήμα του ηλεκτροδίου ξεχωριστά. Η σχέση που πρότεινε ο Laurent είναι η ακόλουθη:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{l} \cdot \ln \frac{3l}{d} \quad (2.14)$$

όπου l το μήκος του ηλεκτροδίου και d η διάμετρος του.

Για ηλεκτρόδια εγκιβωτισμένα σε σκυρόδεμα ή γενικότερα σε κάποιο βελτιωτικό υλικό γείωσης θα είναι [35]:

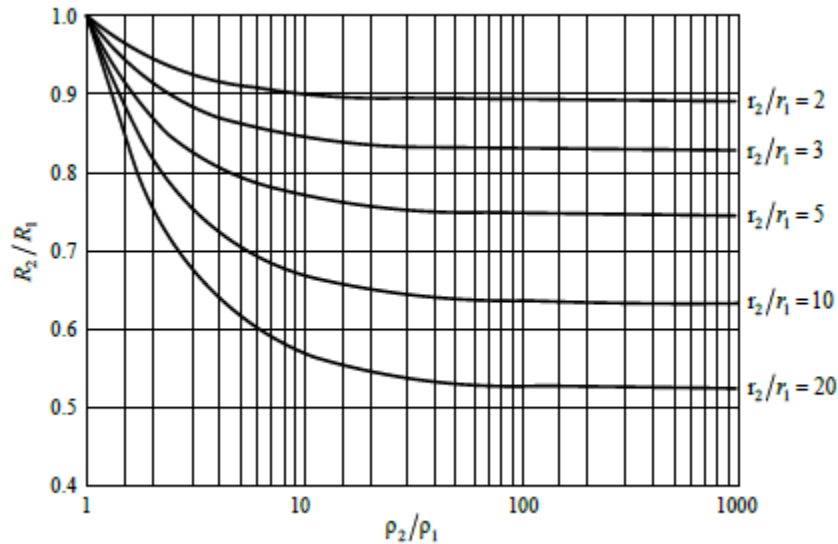
$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_1} - 1 \right) - \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) + \frac{\rho_2}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) \quad (2.15)$$

όπου, r_1 η ακτίνα κατακόρυφης ράβδου γείωσης, r_2 η ακτίνα του κυλινδρικού όγκου του βελτιωτικού υλικού γείωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο, ρ_1 η ειδική αντίσταση του βελτιωτικού υλικού και ρ_2 η ειδική αντίσταση του εδάφους που περιβάλλει τον όγκο του βελτιωτικού υλικού.

Σε πιο σύντομη μορφή η σχέση (2.15) γράφεται με αλγεβρική επίλυση ως:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{\rho_2}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) \quad (2.16)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν οι καμπύλες του ακόλουθου σχήματος, όπου φαίνεται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης συναρτήσει των λόγων r_2/r_1 και ρ_2/ρ_1 . Το σχήμα δίνει και μια γενική εικόνα της επίδρασης των βελτιωτικών υλικών αφού παρατηρείται σημαντική μείωση της αντίστασης με την αύξηση των λόγων r_2/r_1 και ρ_2/ρ_1 .



Σχήμα 14. Μείωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτινών και ειδικών αντιστάσεων [33].

2.3 Βελτιωτικά υλικά γειώσεων

Τα διάφορα βελτιωτικά υλικά γείωσης χρησιμοποιούνται με βασικό τελικό στόχο τη διαμόρφωση του εδάφους γύρω από τα σημεία τοποθέτησης των ηλεκτροδίων γείωσης, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι επιθυμητές κάθε φορά τιμές ειδικής αντίστασης του εδάφους. Όταν η ειδική αντίσταση είναι εξαιρετικά υψηλή και η τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε μεγάλο βάθος είναι αδύνατη απαιτείται ένας εναλλακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Έτσι, με σκοπό τη βελτίωση των φυσικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων του περιβάλλοντος, χρησιμοποιούνται βελτιωτικά υλικά, είτε φυσικά όπως μπεντονίτης ή τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, είτε χημικά παρασκευάσματα, όπως συνθετικές ρητίνες. Αναγκαία συνθήκη για να επιλεγεί κάποιο υλικό ως βελτιωτικό είναι να εμφανίζει πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται τεχνητά η ειδική αντίσταση του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο αυξάνοντας, παράλληλα, τη φαινόμενη διάμετρο του ηλεκτροδίου και τελικά μειώνοντας την αντίσταση γείωσης.

2.3.1 Προδιαγραφές των βελτιωτικών υλικών γειώσεων

Με τον όρο βελτιωτικό υλικό γειώσεων τα Πρότυπα [36] αναφέρονται σε ένα αγώγιμο υλικό που επιφέρει μείωση στην αντίσταση γείωσης ενός συστήματος γείωσης. Κύρια προϋπόθεση που πρέπει να πληροί ένα υλικό, πριν επιλεγεί ως βελτιωτικό, είναι να έχει πολύ υψηλή αγωγιμότητα, δηλαδή να παρουσιάζει όσο το δυνατό μικρότερη τιμή αντίστασης. Ωστόσο, η αγωγιμότητα αποτελεί αναγκαία και όχι επαρκή συνθήκη για να χαρακτηριστεί ένα υλικό ως αποτελεσματικό βελτιωτικό υλικό γειώσεων [8].

Επιγραμματικά αναφέρονται τα κριτήρια, με βάση τα οποία πρέπει να γίνεται η αξιολόγηση και η τελική κρίση ενός υλικού ως προς την αποτελεσματικότητά του.

- Αγωγιμότητα
- Ασφάλεια στη χρήση και φιλικότητα στο περιβάλλον
- Μονιμότητα και διατήρηση των ιδιοτήτων του
- Φυσικό και χημικά αδρανές με το ηλεκτρόδιο γείωσης
- Εύκολο και απλό στην επεξεργασία

Από το 2012 και έπειτα, ένα νέο βελτιωτικό υλικό προκειμένου να συμμορφώνεται με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία [36], θα πρέπει να υποβάλλεται σε καθορισμένους ελέγχους. Βασικό μέλημα αυτών των ελέγχων είναι να αποδειχθεί στην πράξη η ικανοποίηση ή μη των κριτηρίων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή, τελικά, η αποτελεσματική δράση του .

Ο πρώτος απ' αυτούς τους ελέγχους είναι η δοκιμή διαρροής ή απόπλυσης (leaching test) και κρίνεται επιτυχής, εφόσον τα αποτελέσματα ικανοποιούν τους εθνικούς ή διεθνείς κανονισμούς. Δεύτερος έλεγχος είναι ο προσδιορισμός του θείου στο υπό εξέταση υλικό (sulphur determination) κατά ISO 4689-3 [37] ή ISO 14869-1 [38]. Θεωρείται ότι το υλικό περνά επιτυχώς αυτόν τον έλεγχο, όταν όλες οι μετρούμενες τιμές είναι μικρότερες από 2%. Ακολουθεί ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης του υλικού με τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων, όπως αυτή περιγράφεται στο ASTM G57-06 [39]. Η μετρούμενη τιμή θα πρέπει να είναι χαμηλότερη, ή το πολύ ίση, με εκείνη που δίνει ο κατασκευαστής.

Τέλος, το υπό εξέταση βελτιωτικό υλικό υπόκειται σε δοκιμή διάβρωσης. Ο ρυθμός διάβρωσης προσδιορίζεται με τη χρήση ποτενσιοδυναμικών μεθόδων αντίστασης πόλωσης, όπως περιγράφεται στις προδιαγραφές ASTM G59-97 [40] και ASTM G102-89 [41]. Το υλικό, για να περάσει επιτυχώς τον παραπάνω έλεγχο, θα πρέπει, για

ηλεκτρόδια γείωσης από κράμα χαλκού, να εμφανίσει αντίσταση πόλωσης μεγαλύτερη από $4\Omega\text{m}^2$ για μη επιθετικά περιβάλλοντα και από $8\Omega\text{m}^2$ για επιθετικά περιβάλλοντα. Για γαλβανισμένα ηλεκτρόδια γείωσης, οι τιμές της αντίστασης πόλωσης πρέπει να είναι $3\Omega\text{m}^2$ και $7,6\Omega\text{m}^2$, αντίστοιχα.

Το ιδανικό βελτιωτικό υλικό πληροί όλα τα παραπάνω και ταυτόχρονα διατηρεί πολύ χαμηλό κόστος επεξεργασίας, μεταφοράς και εγκατάστασής. Αξίζει να αναφερθεί πως το Πρότυπο IEC/EN 62561-7:2012 [36] δεν προτείνει τη χρήση συγκεκριμένων βελτιωτικών υλικών γειώσεων, αλλά αναφέρει ότι η επιλογή του υλικού εξαρτάται από την ικανότητά του να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Η σπουδαιότητα των ανωτέρω κανόνων και διαδικασιών αξιολόγησης έγινε φανερή μέσα από ερευνητικές εργασίες που διεξήχθησαν τις τελευταίες δεκαετίες αλλά και από πρακτικές εφαρμογές σε συστήματα γείωσης όπου είχαν χρησιμοποιηθεί βελτιωτικά υλικά κατά τον σχεδιασμό τους. Για παράδειγμα, γνωρίζουμε πως η αγωγιμότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υγρασία και τα άλατα που βρίσκονται στο έδαφος. Με βάση αυτή την παρατήρηση γρήγορα αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε η ιδέα της χρήσης διαφόρων τύπων αλάτων ως βελτιωτικών υλικών, είτε μόνο ως άλατα, είτε σε συνδυασμό με νερό και αναμεμειγμένα στο χώμα, περιμετρικά του ηλεκτροδίου γείωσης. Βραχυπρόθεσμα, λόγω της χαμηλής ειδικής αντίστασης του μείγματος αναμένεται μεγάλη μείωση της αντίστασης γείωσης.

Ωστόσο, οι περισσότερες χημικές ουσίες διαλύονται στο νερό. Έτσι, με την πάροδο του χρόνου λόγω των βροχών και της φυσικής απορροής του εδάφους, οι ουσίες αυτές, όπως και το αλάτι, διαλύονται ή παρασύρονται από το νερό οπότε και οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους επιστρέφουν στις αρχικές τους τιμές. Συχνά επιλέγεται το άλας (NaCl) ως βελτιωτικό υλικό, όμως εκτός του κριτηρίου της μονιμότητας, που δεν καλύπτει, παρουσιάζει και την ιδιότητα διάβρωσης των μετάλλων με τα οποία έρχεται σε επαφή. Μακροπρόθεσμα, η χρήση ενός τέτοιου υλικού θα επιφέρει εντελώς αντίθετα αποτελέσματα απ' αυτά που επιδιώκονται και το σύστημα γείωσης θα πάψει να είναι αποτελεσματικό.

Όπως αναφέρεται και στο Πρότυπο IEEE Std 142-2007 [42], όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν άλατα και γενικότερα χημικά για την τροποποίηση του εδάφους, η απευθείας επαφή με τα ηλεκτρόδια κρίνεται απαγορευτική. Αντιθέτως, μία ορθή επιλογή αποτελεί η διάνοιξη αύλακα περιμετρικά των ηλεκτροδίων σε κάποια απόσταση απ' αυτά και η τοποθέτηση των αλάτων εκεί. Και σε αυτήν την περίπτωση, όμως, δεν αποφεύγεται η σταδιακή διάχυση των αλάτων και η πιθανή μεταγενέστερη επαφή τους με τα ηλεκτρόδια. Σε κάθε περίπτωση, σε αυτό τον τύπο

βελτιωτικών υλικών απαιτείται επανέγχυση (refill) μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα.

2.3.2 Ηλεκτρόδια σε βελτιωτικά υλικά στη μόνιμη κατάσταση– Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η χρήση βελτιωτικών υλικών με σκοπό την τεχνητή μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους ξεκίνησε να ενδιαφέρει την επιστημονική κοινότητα, σε ερευνητικό επίπεδο, από τη δεκαετία του 1940. Η μέθοδος που κυριάρχησε αρχικά στα τεχνικά εγχειρίδια της βιομηχανίας ως τεχνική μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους ήταν η χρήση του άλατος (NaCl). Τα μειονεκτήματα του άλατος ως βελτιωτικού υλικού, αρχικά, επισημάνθηκαν από τους Clark και Watkins σε εργασία τους το 1960 [43]. Αντί του κοινού άλατος, εκείνοι δοκίμασαν διάφορες χημικές ουσίες όπως ακρυλαμίδη, γέλη πυριτικών αλάτων νατρίου, γέλη φερροκυανιδίου χαλκού και μείγμα ένυδρου γραφίτη. Κοινό χαρακτηριστικό των γελών (gels) είναι ότι άπαξ και σχηματισθούν, με την προσθήκη κατάλληλων καταλυτών, δε διαλύονται στο νερό, συρρικνώνονται με την έλλειψη υγρασίας, αλλά αποκτούν ξανά τον αρχικό τους όγκο όταν έρθουν σε επαφή με την υγρασία. Οι Clark και Watkins διεξήγαγαν εργαστηριακά και υπαίθρια πειράματα με κατακόρυφες ράβδους γείωσης, στις οποίες έκαναν έγχυση, υπό πίεση, των βελτιωτικών υλικών. Μελέτησαν την αντίσταση επαφής, τη μείωση της αντίστασης γείωσης και την αντοχή των υλικών στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντίσταση γείωσης μειώθηκε σημαντικά και η αντίσταση επαφής είχε άμεση εξάρτηση από τον τύπο του εδάφους και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Επίσης, τα ηλεκτρόδια διαβρώθηκαν σε σημαντικό βαθμό, αλλά οι χημικές γέλες αποτέλεσαν μια σαφώς πιο μόνιμη λύση από το κοινό άλας, καθώς δεν ξεπλύθηκαν τόσο γρήγορα από το χώμα και τη βροχή και σταθεροποίησαν την αντίσταση γείωσης ως προς τις εποχικές μεταβολές της. Το κάθε υλικό παρουσίασε διαφορετική συμπεριφορά σε κάθε εξεταζόμενο έδαφος, με το φερροκυανίδιο του χαλκού να παρουσιάζει τα λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι Fagan και Lee [44] ήταν από τους πρώτους μελετητές που πρότειναν ένα είδος θεμελιακής γείωσης, με την ηλεκτρική σύνδεση του ασφάλινου σκελετού του κτιρίου με τον οπλισμό των θεμελίων της κάθε κολόνας. Οι μετρήσεις τους έδειξαν πως τα ηλεκτρόδια γείωσης που προέκυπταν μ' αυτόν τον τρόπο, τα οποία ήταν εγκιβωτισμένα μέσα στο σκυρόδεμα, παρείχαν επαρκώς χαμηλότερες τιμές αντίστασης γείωσης από τις μέχρι τότε συμβατικές μεθόδους γείωσης. Το μπετόν μέσα στο έδαφος έχει την ιδιότητα να απορροφά την υγρασία από το περιβάλλον χώμα και

να κρατά υψηλή την περιεκτικότητά του σε υγρασία, άρα τελικά χαμηλή την ειδική αντίστασή του.

Παράλληλα, οι Kutter- Lange [45], Mc Gowan [46], Jones [47] και Veledar et. al. [48] μελέτησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του μπεντονίτη και εξέτασαν την πιθανότητα χρήσης του ως βελτιωτικό υλικό γειώσεων για τη μείωση της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ράβδων.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν κάποια βασικά στοιχεία για τον μπεντονίτη, αφού χρησιμοποιείται ευρύτατα στην εποχή μας στα συστήματα γείωσης είτε αυτούσιος, είτε ως βάση παραγωγής άλλων βελτιωτικών υλικών.

Ο μπεντονίτης είναι ένα είδος αργίλου που το κύριο συστατικό του είναι ο μοντμοριλλονίτης. Ο μοντμοριλλονίτης είναι ορυκτό πυριτικό άλας (ένυδρο πυριτικό αργίλιο) σε κρυσταλλική μορφή. Τα πυριτικά ορυκτά είναι ορυκτά βραχώδους μορφής, παραγόμενα από ενώσεις του πυριτίου και του οξυγόνου, τα οποία έχουν σχηματιστεί από ηφαιστειακή δραστηριότητα και αποτελούν το 90% περίπου του φλοιού της γης.

Χημικά, ο μοντμοριλλονίτης μπορεί να προσδιορισθεί ως ένυδρο πυριτιούχο υδροξείδιο του νατρίου, του ασβεστίου, του αλουμινίου και του μαγνησίου. Η περιεκτικότητά του σε νερό είναι μεταβλητή ενώ διογκώνεται αρκετά όταν απορροφά υγρασία. Σ' αυτήν την ουσία ο μπεντονίτης οφείλει την έντονη υγροσκοπική φύση του. Έτσι, δρα ως παράγοντας αφύγρανσης του περιβάλλοντος εδάφους, απορροφώντας όλη τη διαθέσιμη, κοντά του, υγρασία και εγκλωβίζοντάς τη στην εσωτερική του δομή. Με την έλλειψη υγρασίας ο μπεντονίτης συρρικνώνεται, αλλά όσο υπάρχει διαθέσιμη υγρασία γύρω του, διατηρεί την πυκνότητά του. Αν εκτεθεί στην ηλιακή ακτινοβολία τότε αρχίζει να ξηραίνεται, αλλά τείνει να στεγανοποιηθεί, εμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ξηρασία να διεισδύσει στο εσωτερικό του. Προσθέτοντας νερό στον μπεντονίτη, συντελείται μια ισχυρή ηλεκτρολυτική διαδικασία μεταξύ του νερού, του Na_2O (σόδα), του K_2O (ποτάσα), του CaO (ασβεστόλιθος) και άλλων μεταλλικών αλάτων που περιέχονται στον μπεντονίτη και που είναι ιονισμένα, σχηματίζοντας έναν ισχυρό ηλεκτρολύτη ($\text{pH}=8$ έως 10) με πολύ χαμηλή ειδική αντίσταση.

Ο Jones [47] εγκατέστησε ράβδους γείωσης εγκιβωτισμένες σε μπεντονίτη σε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες με σύσταση εδάφους: πυκνή και σκληρή λάσπη στην πρώτη, αργιλώδες χώμα με κροκάλες και χαλίκι στη δεύτερη και μείγμα χώματος αποτελούμενο από άμμο, ένα στρώμα λάσπης κάτω από την άμμο και ψαμμόλιθο στην τρίτη. Σε κάθε τοποθεσία εγκατέστησε τρεις ράβδους με μπεντονίτη και τα

αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι σημειώθηκε σημαντική μείωση της αντίστασης έως 36%, σε σύγκριση με την αντίστοιχη των ράβδων γείωσης στο φυσικό έδαφος. Το αποτέλεσμα ήταν σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Αντίστοιχα πειράματα διεξήχθησαν και στην Ιαπωνία από ερευνητές και μηχανικούς της εταιρίας ηλεκτρικών σιδηροδρόμων, οι οποίοι δοκίμασαν μπεντονίτη και άλλα χημικά υλικά σε ημισφαιρικά ηλεκτρόδια και πλέγματα. Πιο συγκεκριμένα, ο Sato και οι συνεργάτες [49] εφάρμοσαν ένα μείγμα μπεντονίτη, νερού και NaCl σε ηλεκτρόδια τα οποία αρχικά παρουσίαζαν αντίσταση γείωσης 20Ω έως 500Ω και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της αντίστασης γείωσης έως και 60%. Επισημάνθηκε, όμως, ότι η παρουσία του άλατος (NaCl) στο μείγμα προκαλούσε τη διάλυση του μπεντονίτη γύρω από το ηλεκτρόδιο λόγω απόπλυσης με την πάροδο του χρόνου και αυτό έθετε σε κίνδυνο την ποιότητα των υδάτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Ακόμα, σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, το μείγμα μπεντονίτη έχανε τις εξαιρετικές ιδιότητες διόγκωσης και αγωγιμότητάς του. Ο Takeuchi και οι συνεργάτες του [50], από την άλλη, μελέτησαν μείγμα σκυροδέματος από τσιμέντο και ίνες άνθρακα, σε ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο και σε διάφορες διατάξεις οριζόντιων ηλεκτροδίων π.χ. δύο σε ορθή γωνία, τρία, τέσσερα σε μορφή τετραγώνου, τετράγωνο με μια διαγώνιο ή και πλήρες πλέγμα, σε εδάφη ειδικής αντίστασης από 500Ωm έως 3000Ωm. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν μείωση της αντίστασης γείωσης με χρήση βελτιωτικών υλικών από 30% έως 50%, με τα υψηλότερα ποσοστά να σημειώνονται στα εδάφη υψηλής ειδικής αντίστασης.

Σε μια πρωτότυπη εργασία τους το 1993 ο Yamane και οι συνεργάτες [51] πρότειναν τη χρήση υδροαπορροφητικών πολυμερών για τη μείωση της αντίστασης γείωσης, υλικά τα οποία έκαναν για πρώτη φορά την εμφάνισή τους στις έρευνες για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους. Στηριζόμενοι στις υδρόφιλες ιδιότητές τους, στις ιδιότητες διόγκωσης και στην εκπληκτική κατακράτηση νερού που εμφανίζουν, επέλεξαν τα πολυμερή και είχαν αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Αποδείχθηκε ότι τα συνθετικά πολυμερή επηρεάζονται ελάχιστα έως καθόλου από μικροοργανισμούς και ότι απ' αυτήν την κατηγορία πολυμερών, τα τύπου άνυδρο-μαλεϊκό οξύ παρουσιάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά θερμοκρασίας. Η βελτίωση της αντίστασης γείωσης με τη χρήση του νέου υλικού ήταν της τάξης του 20%, ενώ, με ανάμειξη του υλικού αυτού με το χώμα του εδάφους η μείωση έφτανε το 40%, όση δηλαδή εμφάνιζε και το μείγμα μπεντονίτη που χρησιμοποιήθηκε σε άλλες εργασίες (μπεντονίτης, νερό, τσιμέντο και αλάτι). Επίσης, υπολογίστηκε ότι η απαιτούμενη ποσότητα πολυμερών έφτανε το 1/160 της αντίστοιχης των μειγμάτων μπεντονίτη,

ενώ και η διάβρωση που προκαλούσαν στα ηλεκτρόδια γείωσης ήταν στο 1/10 αυτής που προκαλούσε το μείγμα μπεντονίτη.

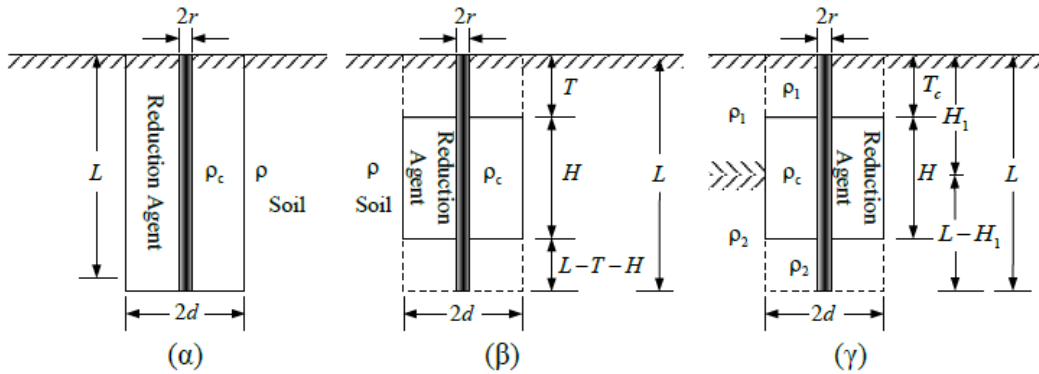
Το 1999 ο Kostic και οι συνεργάτες [52] παρουσίασαν τα αποτελέσματα της βελτίωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων βρόχων γείωσης, χρησιμοποιώντας μπεντονίτη και ίλυ γεώτρησης πετρελαίου ως βελτιωτικά εδάφους. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε δύο διαφορετικές περιοχές της Σερβίας, με αμμώδες έδαφος η μία και σε πρώην λατομείο η άλλη, ειδικής αντίστασης έως και $675\Omega m$. Τοποθετήθηκαν βρόχοι γείωσης, οι οποίοι καλύφθηκαν με εναιώρημα μπεντονίτη, πούδρα μπεντονίτη και ίλυ γεώτρησης πετρελαίου, ενώ ως μέτρο σύγκρισης υπήρχε και σκέτος βρόχος γείωσης μέσα στο φυσικό έδαφος. Μετρήσεις της αντίστασης γείωσης λαμβάνονταν περιοδικά για περίοδο περίπου τριών ετών. Τα πειράματά τους έδειξαν ότι και οι τρεις τύποι βελτιωτικού υλικού παρουσίασαν σημαντική μείωση της αντίστασης γείωσης, ιδιαίτερα στις ξηρές και άνυδρες περιόδους. Ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα της έρευνας είναι ότι η πούδρα μπεντονίτη μετά από μόλις τέσσερις μήνες εμφάνισε ιδιότητες αγωγιμότητας αντίστοιχες με αυτές του εναιωρήματος μπεντονίτη. Μάλιστα, σχετικά με τις τάσεις επαφής έδειξε καλύτερα αποτελέσματα. Μια πιθανή εξήγηση είναι ότι η συνεχής επαφή της πούδρας μπεντονίτη με την υγρασία του περιβάλλοντος οδηγεί στην απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων νερού, γεγονός που συντελεί και στη διόγκωσή της. Σε κάθε περίπτωση, ο μπεντονίτης παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την ίλυ γεώτρησης πετρελαίου και ταυτόχρονα αποδείχτηκε ότι είναι ιδιαίτερα ανενεργό ως διαβρωτικό υλικό

Σε συνέχεια της παραπάνω έρευνας, οι Radaković και Kostic το 2001, μελέτησαν τις συνέπειες της έκθεσης βρόχων γείωσης από ταινία επιψευδαργυρωμένου χάλυβα, εγκιβωτισμένων σε μπεντονίτη, σε ίλυ γεώτρησης πετρελαίου και απευθείας στο φυσικό έδαφος, σε συνθήκες πραγματικών μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων προς γη εναέριας γραμμής μεταφοράς 35kV. Στη βιβλιογραφία είχε αναφερθεί ότι η ειδική αντίσταση του μπεντονίτη δε μεταβαλλόταν, όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια επαφής του με το ηλεκτρόδιο γείωσης άγγιζε τους 80°C [53]. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, μετρήθηκαν οι τιμές της αντίστασης των βρόχων γείωσης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το βραχυκύκλωμα. Το συμπέρασμα ήταν ότι κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος οι τιμές της αντίστασης γείωσης όλων των βρόχων σημείωσαν αύξηση, όμως 25 λεπτά μετά το βραχυκύκλωμα είχαν επανέλθει στις τιμές που είχαν πριν απ' αυτό. Σταθερότερη συμπεριφορά επέδειξε ο βρόχος με την ίλυ γεώτρησης πετρελαίου, αλλά σε κάθε περίπτωση, οι βρόχοι με τα βελτιωτικά υλικά είχαν καλύτερη συμπεριφορά από τους αντίστοιχους καλυμμένους με φυσικό έδαφος.

Η μελέτη των διαφόρων συνθετικών βελτιωτικών υλικών, εκτός του μπεντονίτη, συνεχίστηκε και σε χώρες της Λατινικής Αμερικής, όπως η Χιλή. Ο Martinez και οι

συνεργάτες του [54] μελέτησαν τη συμπεριφορά μειγμάτων από ανόργανα άλατα, ορισμένα από τα οποία προέρχονταν από τη βιομηχανική επεξεργασία ορυκτών στη Χιλή. Το βελτιωτικό υλικό που παρασκεύασαν προέκυψε από την ανάμειξη τριών μειγμάτων από διάφορα ανόργανα άλατα, όπως για παράδειγμα NaCl, στηβενσίτης, ανκερίτης και άλλες χημικές ενώσεις σε μικρότερες αναλογίες. Τοποθέτησαν ηλεκτρόδια σε διάφορες περιοχές της Χιλής καλύπτοντας με αυτό τον τρόπο μεγάλο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης, από καλλιεργήσιμα εδάφη έως ξηρά και σκληρά εδάφη. Μετρήσεις της αντίστασης γείωσης λαμβάνονταν για διάστημα μεγαλύτερο του ενός έτους. Έτσι, συγκρίθηκε η απόδοση του εν λόγω παρασκευάσματος με άλλο εμπορικό υλικό, καθώς και με το έδαφος. Τα συμπεράσματα έδειξαν ότι το νέο αυτό υλικό είναι αρκετά αποτελεσματικό για τη μείωση της αντίστασης γείωσης σε όλους τους τύπους εδαφών, καθώς διατηρούσε περίπου σταθερή την αντίσταση γείωσης χωρίς την τεχνητή προσθήκη νερού και χωρίς να είναι ιδιαιτέρως διαβρωτικό.

Την ίδια περίπου χρονική περίοδο στην Κίνα, ο L.-H. Chen [55] και ο S. D. Chen [56] παρουσίασαν στις δικές τους εργασίες τα αποτελέσματα πειραμάτων τους με κοκκώδη σκωρία υψικαμίνου. Αργότερα, σε νέα εργασία του ο L.-H. Chen [57] έκανε μια θεωρητική ανάλυση για τη βέλτιστη ποσότητα βελτιωτικού που πρέπει να χρησιμοποιείται και τον ρυθμό μείωσης της αντίστασης γείωσης που επιτυγχάνεται. Στις δύο πρώτες εργασίες τους οι Chen και οι συνεργάτες τους παρασκεύασαν βελτιωτικό υλικό με βάση την κοκκώδη σκωρία υψικαμίνου, αναμειγμένη με νερό, τσιμέντο και αλάτι, σε αναλογία που προσδιορίστηκε πειραματικά με κριτήριο τη βέλτιστη ειδική αντίσταση. Το μείγμα που επιλέχτηκε τοποθετήθηκε ως βελτιωτικό υλικό σε τρία κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης (μερικώς ή ολικώς καλυμμένα), ενώ άλλα δύο ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν απευθείας στο φυσικό έδαφος. Περιοδικές μετρήσεις της αντίστασης γείωσης έδειξαν ότι η αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων με το βελτιωτικό υλικό ήταν πολύ χαμηλότερη σε σχέση με αυτών χωρίς βελτιωτικό και μάλιστα η μέση μείωση της αντίστασης γείωσης ήταν 40%.



Σχήμα 15. α. Ράβδος γείωσης, πλήρως καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε ομοιογενές έδαφος
 β. Ράβδος γείωσης, μερικώς καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε ομοιογενές έδαφος
 γ. Ράβδος γείωσης, μερικώς καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε διστρωματικό έδαφος [8].

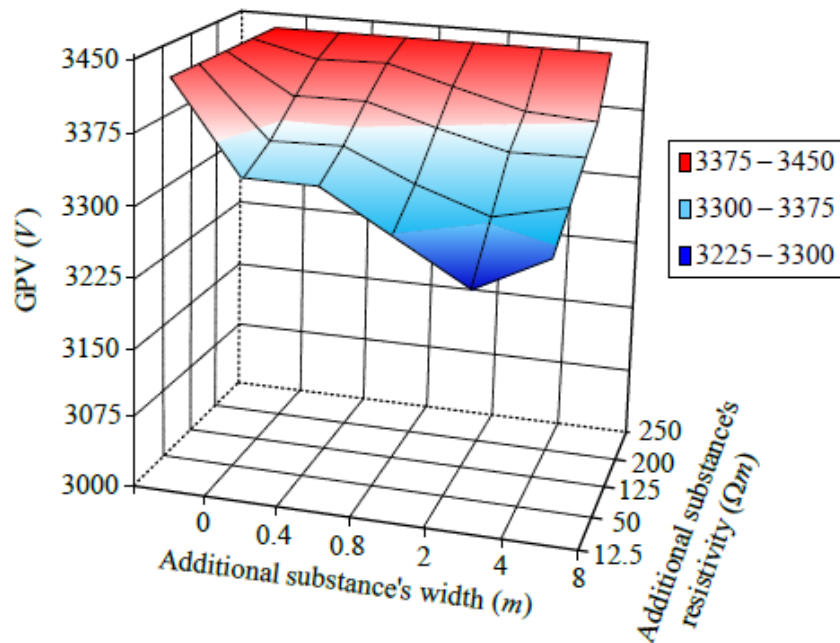
Στην κοινή εργασία τους [58] οι Chen χρησιμοποίησαν μείγμα ιπτάμενης τέφρας, ένα υποπροϊόν των θερμικών σταθμών παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα, αφού αυτή χρησιμοποιείται ως συστατικό παρασκευής του τσιμέντου, το οποίο εμφανίζει σχετικά χαμηλή ειδική αντίσταση. Πρώτα επιλέχθηκε, ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία, η καλύτερη δυνατή αναλογία ιπτάμενης τέφρας, τσιμέντου, νερού και αλατιού. Η τελική σύσταση προέκυψε λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η ειδική αντίσταση είναι ανάλογη της ποσότητας του τσιμέντου στο μείγμα και αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας αλατιού. Όπως και προηγουμένως, τοποθετήθηκαν ηλεκτρόδια με και χωρίς βελτιωτικό υλικό και τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενός έτους έδειξαν ότι αυτά που περιβάλλονταν από βελτιωτικό υλικό εμφάνισαν μείωση στην αντίσταση γείωσης μεγαλύτερη από 35% σε σύγκριση με τα ηλεκτρόδια αναφοράς.

Οι Judson-D'Alessandro [59] πραγματοποίησαν εργαστηριακές μετρήσεις σε δείγματα εμπορικών βελτιωτικών υλικών, για τη μέτρηση των ηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών όπως η ειδική αντίσταση, η αντοχή σε θλίψη και η αντοχή σε κάμψη. Αναφέρουν ότι οι σημαντικότερες παράμετροι που καθορίζουν την τιμή των ηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων αυτών υλικών είναι ο χρόνος αποκατάστασης, η αναλογία του μείγματος (αρχικό περιεχόμενο σε νερό), η θερμοκρασία και το επίπεδο της υγρασίας στο μείγμα. Οι μετρήσεις έγιναν με τοποθέτηση των υλικών σε κατάλληλα δοχεία που υποδεικνύονται από τα διεθνή Πρότυπα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κάποια υλικά εμφάνιζαν ρωγμές και συρρίκνωση κατά τη διαδικασία αποκατάστασης, σταθεροποίησης και ξήρανσης, διαδικασία που θα μπορούσε να επιδεινώσει την έκθεση σε παράγοντες διάβρωσης και να αυξήσει, τελικά, την ειδική αντίσταση. Η διαδικασία ομαλής αποκατάστασης και ξήρανσης εξαρτάται από την παρουσία ή απουσία τσιμέντου από το μείγμα του

βελτιωτικού. Επίσης, η ειδική αντίσταση και η αντοχή σε θλίψη και κάμψη των υλικών παρουσίασαν μεγάλη διακύμανση, κάτι που σημαίνει ότι θα πρέπει να μετρηθούν μετά την πλήρη αποκατάσταση του υλικού.

Ο Torres και οι συνεργάτες του [60] πειραματίστηκαν με ένα νέο τύπο ηλεκτροδίου γείωσης, το οποίο ονόμασαν στην εργασία τους χημικό ηλεκτρόδιο. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο είναι μία ράβδος γείωσης με αρκετά μεγαλύτερη διάμετρο από τις κοινές ράβδους η οποία στο εσωτερικό της είναι κούφια και γεμίζει με βελτιωτικό υλικό, που παρέχεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή αυτών των ράβδων. Το βελτιωτικό υλικό διαχέεται στο περιβάλλον έδαφος αργά, μετά την εγκατάσταση της ράβδου. Οι ερευνητές τοποθέτησαν εννέα συνολικά ηλεκτρόδια σε μία τοποθεσία του Μεξικού, εκ των οποίων πέντε ήταν χημικά, τρία ήταν συμβατικά που τοποθετήθηκαν με βελτιωτικό υλικό πέριξ αυτών και ένα σε άμεση επαφή με το φυσικό έδαφος. Τα βελτιωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο μπεντονίτης και κάποια εμπορικά διαθέσιμα και γνωστά υλικά στην αγορά του Μεξικού. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έδειξαν πως όλα τα ηλεκτρόδια με βελτιωτικά υλικά είχαν καλή επίδοση στην τιμή της αντίστασης γείωσης για όσο χρονικό διάστημα υπήρχε αρκετή υγρασία στο έδαφος λόγω των βροχοπτώσεων. Επίσης, ενώ ο μπεντονίτης δεν προτιμάται γενικά για χρήση ως βελτιωτικό υλικό, παρουσίασε στο συγκεκριμένο πείραμα τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με όλα τα εμπορικά χημικά βελτιωτικά. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, προτείνεται η χρήση απλών ηλεκτροδίων με τοποθέτηση βελτιωτικών υλικών περιμετρικά, παρά η αγορά χημικών ηλεκτροδίων, τα οποία έχουν υπολογίσιμο υψηλότερο κόστος.

Παράλληλα με την πειραματική μελέτη των βελτιωτικών υλικών στο εργαστήριο και στο φυσικό περιβάλλον η επίδραση αυτών των υλικών ερευνήθηκε και με προσομοιώσεις μέσω εμπορικών πακέτων λογισμικού. Ο Habjanič και οι συνεργάτες του παρουσίασαν το 2007 μία εργασία [61] στην οποία, εφαρμόζοντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), υπολόγισαν την ανύψωση δυναμικού γης, τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται στον χώρο γύρω από πλέγμα γείωσης, εγκιβωτισμένο σε βελτιωτικό υλικό. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η παρουσία τέτοιων υλικών γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης προσφέρει μεγαλύτερη προστασία στους ανθρώπους και στον εξοπλισμό έναντι επικίνδυνων υπερτάσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μείωση των τάσεων επαφής που φθάνει έως και το 80%. Βέβαια, οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η κατανομή δυναμικών κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον όγκο και την ειδική αντίσταση του βελτιωτικού γύρω από το πλέγμα γείωσης, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 16.



Σχήμα 16. Η επίδραση του πλάτους και της ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού υλικού στο GPR, στην περίπτωση διστρωματικού μοντέλου εδάφους [62].

Εκτός από τα βελτιωτικά υλικά που προαναφέρθηκαν, τα οποία ήταν μείγματα ορυκτών αλάτων και μετάλλων ή προϊόντα ανάμειξης χημικών στοιχείων και ενώσεων, δοκιμάστηκαν και υλικά από επεξεργασία φυτικών προϊόντων, κυρίως σε χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας, της Αφρικής και της Λατινικής Αμερικής.

Ενδεικτικά, το 2008 ο Kumarasinghe από το τμήμα Μετεωρολογίας της Σρι Λάνκα, παρουσίασε ένα χαμηλού κόστους σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χωριό στη δυτική επαρχία της χώρας του [62]. Διεξήγαγε ένα πείραμα στο οποίο χρησιμοποίησε ως βελτιωτικά υλικά εδάφους φυτικά υλικά, όπως τύρφη καρύδας από κοκοφοίνικα (coco peat) και πούδρα ρυζιού. Αυτή η τύρφη είναι υποπροϊόν που παράγεται κατά την αφαίρεση ινών από τον φλοιό της καρύδας. Μπορεί να κρατήσει 8–9 φορές το βάρος της σε νερό και αποσυντίθεται πολύ αργά. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα από τη χρήση μπεντονίτη και έδειξαν ότι αυτά τα φυτικά βελτιωτικά εδάφους ήταν εξίσου καλά με τον μπεντονίτη για τη βελτίωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Με φυτικά προϊόντα ως βελτιωτικά υλικά, πειραματίστηκε και ο Eduful με τους συνεργάτες του από την εταιρία ηλεκτρισμού της Γκάνα, οι οποίοι παρουσίασαν τα αποτελέσματα της έρευνάς τους το 2009. Μελέτησαν την απόδοση τεσσάρων τοπικών προϊόντων της Γκάνα, όπως μια πάστα από πυρηνέλαιο φοίνικα, πούδρα από τον φλοιό του κακάο, στάχτη από ελαστικά και στάχτη από ξύλο δένδρου. Τα υλικά αυτά, αρχικά, αναλύθηκαν σε εργαστήριο για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασής τους, των χημικών ιδιοτήτων τους και του pH τους [63].

Ευρύτατη μελέτη σε εμπορικά βελτιωτικά υλικά, με εργαστηριακά αλλά και πραγματικής κλίμακας πειράματα, έκανε ο Galván και οι συνεργάτες του. Σε δύο εργασίες τους [64] [65], που δημοσίευσαν σε διαδοχικά συνέδρια τα έτη 2009 και 2010, παρουσίασαν τα αποτελέσματα αρκετών βελτιωτικών υλικών. Τοποθέτησαν κατακόρυφες ράβδους γείωσης εντός σκυροδέματος, μπεντονίτη, βιολογικού χώματος, φυσικού εδάφους της περιοχής τοποθέτησης και πέντε χημικών βελτιωτικών, τα οποία είναι διαθέσιμα στο εμπόριο σε μορφή πούδρας (σκόνης). Το πείραμα έλαβε χώρα σε δύο τοποθεσίες του Μεξικού κάτω από πύργους του συστήματος μεταφοράς, με βραχώδες ασβεστολιθικό έδαφος η μία και βραχώδες ηφαιστειογενές έδαφος η άλλη. Με ειδικά διαμορφωμένα ηλεκτρόδια (resistivity pilots), τοποθετημένα μόνιμα μέσα στον όγκο του κάθε βελτιωτικού, μετρήθηκε η ειδική αντίσταση των υλικών και η ειδική αντίσταση του εδάφους σε βάθη από 0,25m έως 1,75m και σε απόσταση 0,75m από το κάθε εξεταζόμενο ηλεκτρόδιο. Οι συγγραφείς προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν τη σχέση αντίστασης γείωσης-ειδικής αντίστασης εδάφους με εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης από τα ζεύγη πειραματικών τιμών που είχαν στη διάθεσή τους για κάθε ηλεκτρόδιο, εξάγοντας τις ανάλογες γραμμικές αλγεβρικές σχέσεις. Επίσης, η μελέτη έδειξε ότι τα σκληρότερα σε μορφή και υφή υλικά παρουσίασαν μια αξιοσημείωτη σταθερότητα της ειδικής αντίστασής τους ως προς τον χρόνο. Τα δε μαλακότερα υλικά εμφάνιζαν κατά καιρούς μεγάλες διακυμάνσεις και μάλιστα πολύ υψηλές αυξήσεις της ειδικής αντίστασής τους. Η συμπεριφορά αυτών των βελτιωτικών υλικών παρατηρήθηκε ότι ήταν σε άμεση εξάρτηση από τον τύπο του εδάφους, στο οποίο αυτά τοποθετούνταν, η δε εξάρτηση ήταν ισχυρότερη σε εδάφη με υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης (άνω των 1500Ωm). Διαπιστώθηκε πως πολύ καλή συμπεριφορά σ' όλες τις περιπτώσεις παρουσίαζε το σκυρόδεμα, ακόμα καλύτερη μάλιστα από εκείνη ορισμένων χημικών παρασκευασμάτων σε μορφή σκόνης. Αξιοσημείωτο είναι πως μετά την διερεύνηση της χρονικής μεταβολής της αντίστασης γείωσης του κάθε ηλεκτροδίου και της χρονικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης κάθε υλικού, όπως μετρήθηκε από τα resistivity pilots, ο Galván και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη σκοπιμότητα χρήσης αυτών των υλικών, καθώς και την ωφέλεια από τη χρήση τους σε διάφορους τύπους

εδαφών. Τελικά, η έρευνα έδειξε ότι σε ασβεστολιθικά εδάφη το όφελος χρήσης βελτιωτικών σε έδαφος με ρ έως τα $200\Omega m$ είναι πολύ μικρό, σε έδαφος με ρ $200\Omega m-500\Omega m$ παρουσιάζεται μια μέση μείωση της αντίστασης γείωσης της τάξης του 30% και σε έδαφος με ρ $500\Omega m-1000\Omega m$ μια μέση μείωση της τάξης του 50%. Ακόμα, σε βραχώδη εδάφη όπως τα ηφαιστειογενή με ρ έως τα $500\Omega m$, το όφελος είναι μια μέση μείωση της τάξης του 25%, με ρ $500\Omega m-1000\Omega m$ μείωση της τάξης του 40% και με ρ πάνω από $1000\Omega m$ μείωση της τάξης του 65%.

Κεφάλαιο 3

Πειραματικές μετρήσεις

3.1 Πειραματική διαδικασία

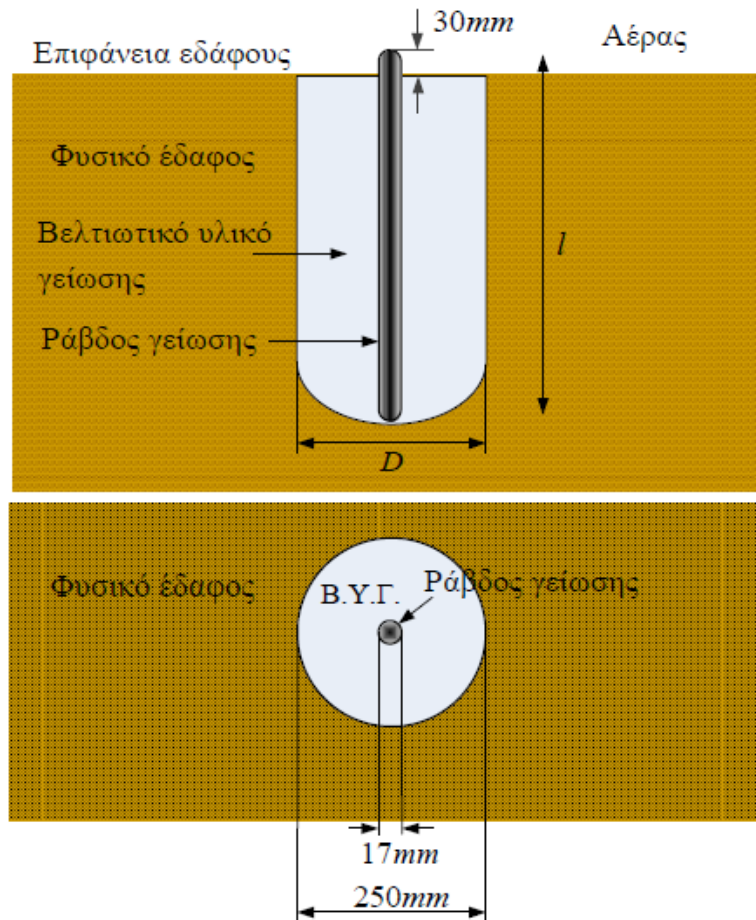
Η πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικό χώρο εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου (Εικόνα 1), πλησίον του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων. Στον συγκεκριμένο χώρο υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα πολλών ηλεκτροδίων γείωσης [3], γεγονός που συνέβαλε στην ακρίβεια και ορθότητα των μετρήσεων. Στο έδαφος δεν υπάρχει καμία τεχνική παρέμβαση, ενώ η σύστασή του αποτελείται από χονδρόκοκκη άμμο με χαλίκια και κροκάλες. Σχετική δειγματοληψία χώματος [66] έδωσε τα εξής αποτελέσματα σύστασης του εδάφους: 54.78% χαλίκι και κροκάλες, 39,47% άμμος, 5,74% άργιλος. Επίσης, η συγκεκριμένη περιοχή χαρακτηρίζεται ως υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, δηλαδή το νερό αποστραγγίζεται γρήγορα από το έδαφος. Το σύστημα κατηγοριοποίησης του εδάφους που εφαρμόστηκε ήταν εκείνο της American Association of State Highway and Transportation Officials [67].

Στο χώρο του πειράματος υπήρχαν εγκατεστημένα πέντε κύρια ηλεκτρόδια ράβδου St/e-Cu τύπου A, διαστάσεων $17 \times 1500 \text{ mm}$, με πάχος επιχάλκωσης $254 \mu\text{m}$, σε απόσταση 10 m μεταξύ τους, εκ των οποίων τα τέσσερα μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης και το ένα απευθείας στο φυσικό έδαφος. Τα βελτιωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι εμπορικά διαθέσιμα και ευρύτατα διαδεδομένα στις εγκαταστάσεις συστημάτων γείωσης [3].



Εικόνα 1. Χώρος διεξαγωγής του πειράματος.

- Ηλεκτρόδιο G_1 : Φυσικό έδαφος
- Ηλεκτρόδιο G_2 : Σκυρόδεμα
- Ηλεκτρόδιο G_3 : Μπετονίτης
- Ηλεκτρόδιο G_4 : Συνθετικό υλικό A
- Ηλεκτρόδιο G_5 : Συνθετικό υλικό B



Σχήμα 17. Ράβδος γείωσης εγκιβωτισμένη σε βελτιωτικό υλικό [3].

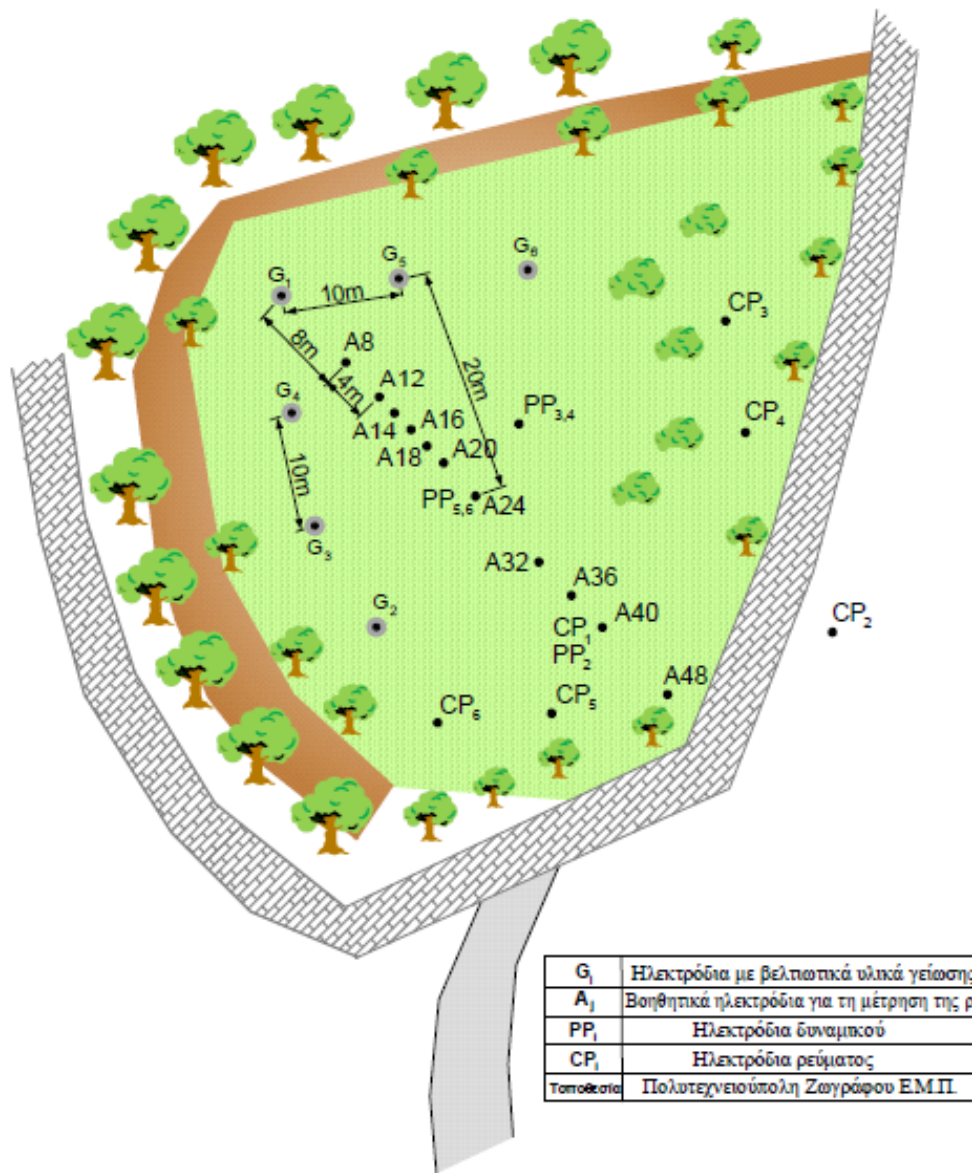
Για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων έγινε διάνοιξη ορυγμάτων διαμέτρου $D=0,25m$ και βάθους $1,6m-1,65m$ με εκσκαφέα βαρέως τύπου (Σχήμα 17). Ακολούθως, έγινε πλήρωση των ορυγμάτων με τα βελτιωτικά υλικά και, τέλος, τοποθετήθηκαν εντός αυτών τα ηλεκτρόδια [8]. Σημειώνεται ότι κατόπιν υποδείξεων των παρασκευαστών των υλικών Α και Β, το υλικό Α αναμίχθηκε με ποσότητα χώματος από το μέρος όπου θα γινόταν η έγχυσή του σε συγκεκριμένη αναλογία, ενώ το υλικό Β εγχύθηκε απευθείας στα σκάμματα όπου τοποθετήθηκαν άμεσα και τα ηλεκτρόδια. Ακόμα, τοποθετήθηκαν μόνιμα στο έδαφος σε διάφορες θέσεις δεκαεπτά βοηθητικά ηλεκτρόδια μήκους $0,5m$ και ίδιου τύπου με τα αρχικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης ρ και της αντίστασης γείωσης R (Σχήμα 18). Στο ίδιο σχήμα, με G_i σημειώνονται τα υπό εξέταση ηλεκτρόδια με τα βελτιωτικά υλικά, με A_j τα βοηθητικά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης κατά Wenner σε διάφορα βάθη, με PP_i και CP_i τα

ηλεκτρόδια δυναμικού (potential probes) και ρεύματος (current probes), αντίστοιχα, για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης καθενός από τα ηλεκτρόδια G_i με τη μέθοδο πτώσης δυναμικού.

Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των εξεταζόμενων ηλεκτροδίων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι το MEGGER DET2/2 Auto Earth Tester (Εικόνα 2) το οποίο διακριβώνεται κάθε χρόνο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων του εξωτερικού. Οι τιμές του ύψους βροχόπτωσης ελήφθησαν από το όργανο καταγραφής ARG-100 της Campbell Scientific Inc. του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, ο οποίος λειτουργεί υπό την εποπτεία του εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθήνας (HOA).



Εικόνα 2. Το γεωσόμετρο Megger Det2/2.



Σχήμα 18. Διάταξη ηλεκτροδίων στο χώρο διεξαγωγής του πειράματος [8].

3.2 Μετρήσεις και αποτελέσματα

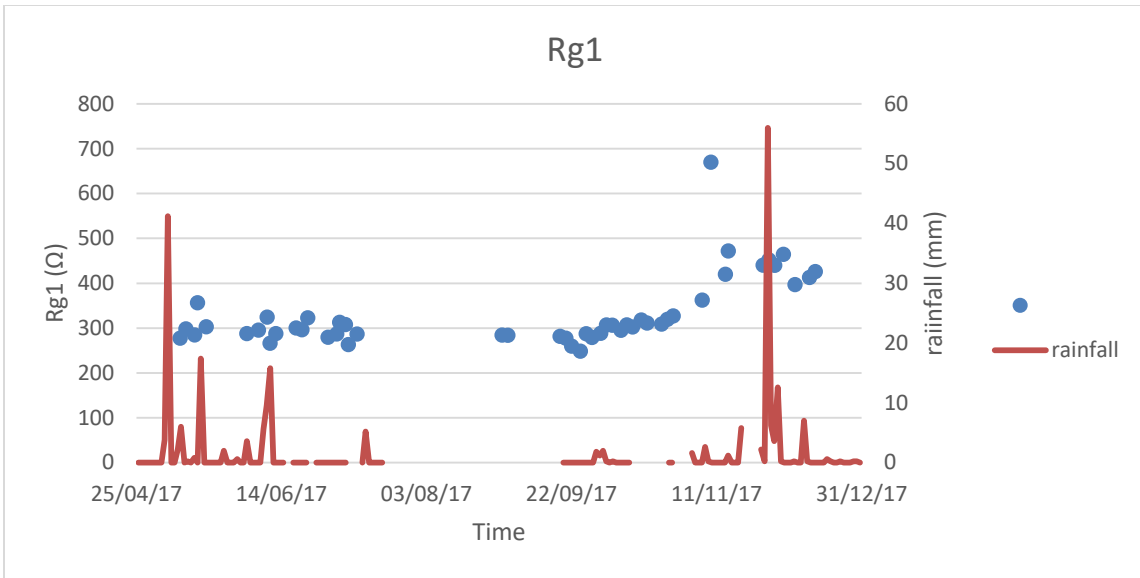
Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους εφαρμόσθηκε η μέθοδος Wenner. Χρησιμοποιήθηκαν δέκα ηλεκτρόδια, εννέα βοηθητικά και το κύριο ηλεκτρόδιο G_1 , διατεταγμένα όλα σε έναν άξονα (Σχήμα 18). Με αυτήν τη διάταξη των ηλεκτροδίων ελήφθησαν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για διάφορες τιμές της απόστασης α και πιο συγκεκριμένα για $\alpha=2m$, $\alpha=4m$, $\alpha=8m$, $\alpha=12m$ και $\alpha=16m$. Έτσι, λαμβάνονται τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους για βάθος ίσο με $\alpha/2$, οπότε με αυτές τις

αποστάσεις, μπορεί να μετρηθεί η ρ σε βάθος έως και 8m. Για τον υπολογισμό της ρ του εδάφους, από τις ενδείξεις του γειωσόμετρου χρησιμοποιήθηκε η σχέση (1.8), ενώ για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης γύρω από ηλεκτρόδιο τοποθετημένο σε βελτιωτικό υλικό, χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.6), η οποία επιλυόμενη ως προς ρ δίνει την τιμή μιας σύνθετης ειδικής αντίστασης του χώματος και του βελτιωτικού υλικού μαζί, τα οποία περιβάλλουν το ηλεκτρόδιο. Η μεταβλητή R είναι η μετρούμενη αντίσταση γείωσης του εκάστοτε ηλεκτροδίου.

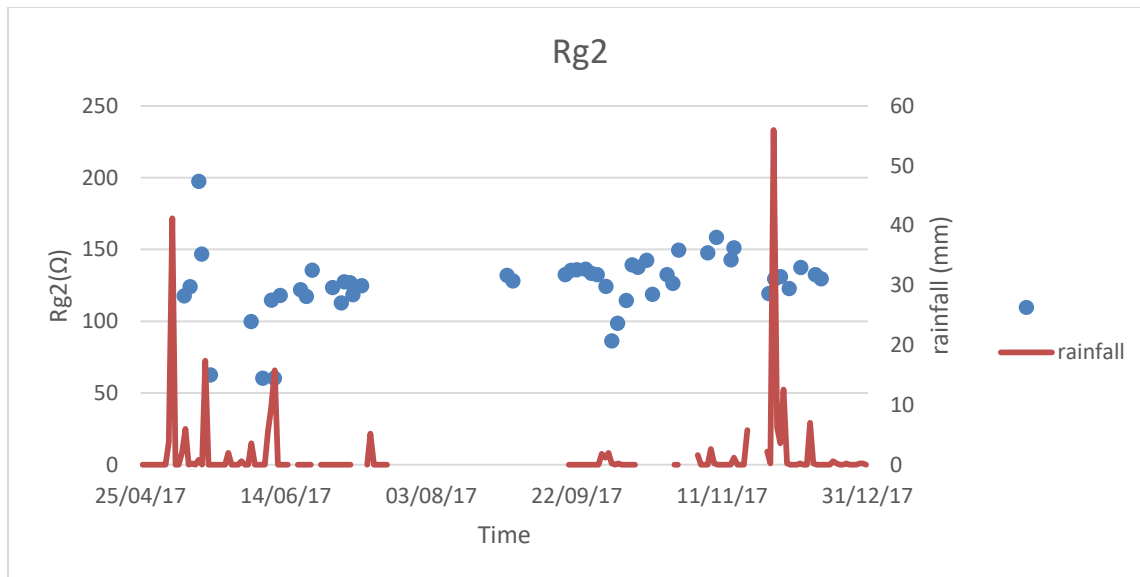
Οι μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων G_i έγιναν με τη μέθοδο πτώσης δυναμικού χρησιμοποιώντας το ίδιο όργανο μέτρησης, όπως προηγουμένως, την ίδια μέρα με την μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους. Οι αποστάσεις που τηρήθηκαν για το ηλεκτρόδιο δυναμικού και το ηλεκτρόδιο ρεύματος ήταν 20m και 40m, αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο, αποκλείστηκε κάθε περίπτωση επικάλυψης (overlapping) των πεδίων ροής των βοηθητικών ηλεκτροδίων. Η συχνότητα λειτουργίας του γειωσόμετρου ρυθμίστηκε στα 128Hz.

Οι μετρήσεις έγιναν το χρονικό διάστημα από 10/05/2017 έως και 15/12/2017, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, δύο με τρεις φορές την εβδομάδα. Καλύφθηκαν, έτσι, διαφορετικές εποχές του έτους και άρα σχετικά μεγάλο εύρος μεταβολής των καιρικών συνθηκών. Η μέτρηση διαρκούσε περίπου μία ώρα, καθώς το πείραμα έγινε από έναν μόνο χειριστή, τον συγγραφέα της παρούσας εργασίας.

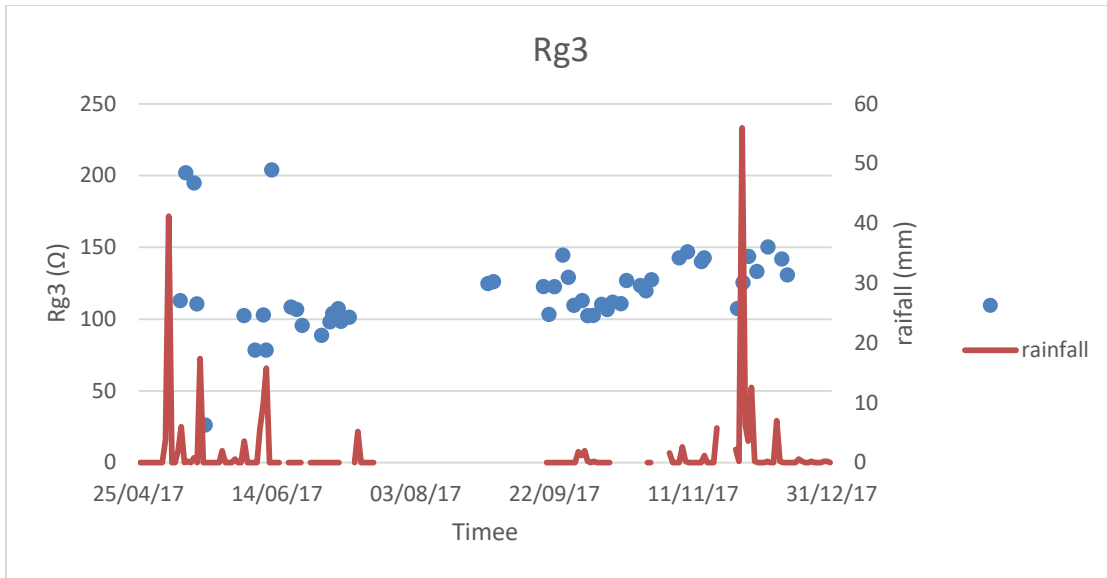
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων, σε συνάρτηση με το χρόνο και τη βροχόπτωση, προεκτιμένου να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά στη διαχρονική συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών, λαμβανομένης, πάντοτε, υπ' όψιν και της βροχόπτωσης.



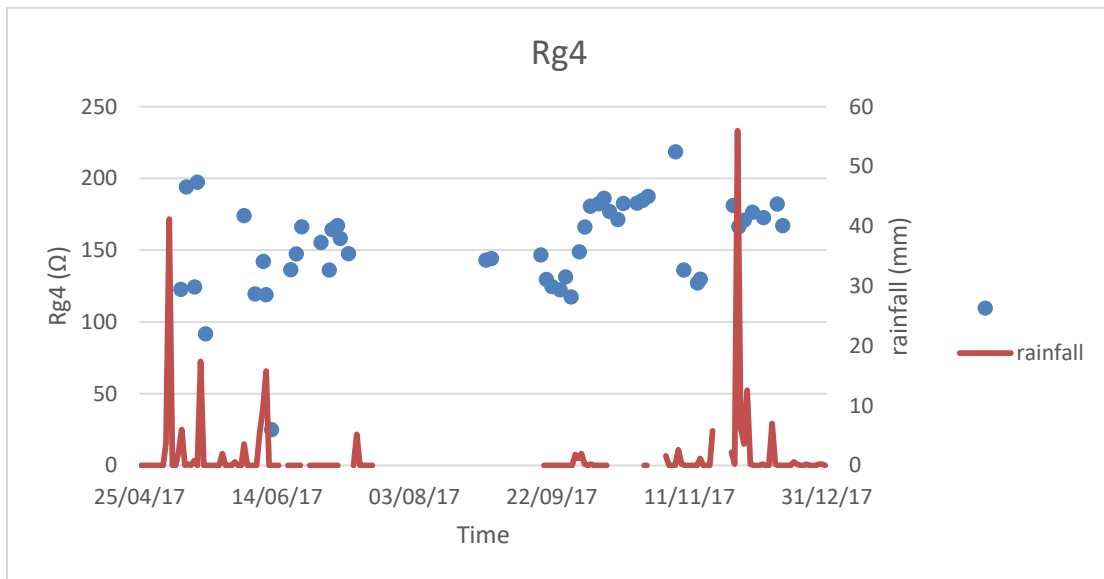
Σχήμα 19. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 1 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.



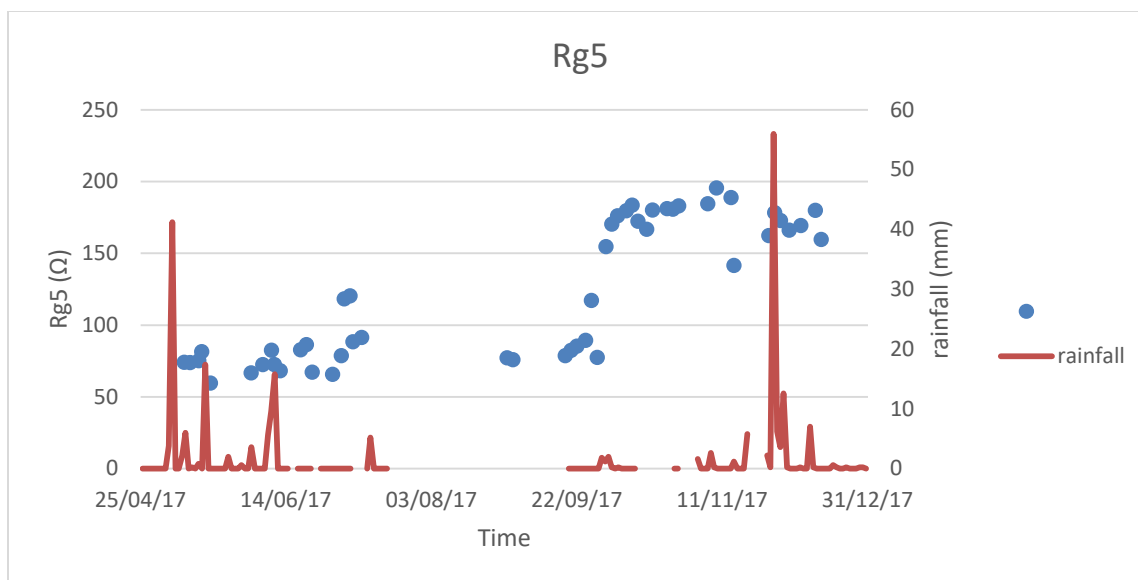
Σχήμα 20. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 2 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.



Σχήμα 21. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 3 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.



Σχήμα 22. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 4 με το χρόνο και τη βροχόπτωση.



Σχήμα 23. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 5 με το χρόνο και τη βροχοπτώση.

Από τα Σχήματα 19 έως 23 προκύπτει μια εικόνα για την αξιολογική κατάταξη και τη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών, με το πέρασμα του χρόνου και τη βροχοπτώση, κάτι το οποίο, λαμβανομένης υπ' όψιν της ποιότητας του μικροεδάφους στη θέση εγκατάστασης ενός ηλεκτροδίου προσγειώσεως, συναρτάται με την κατακράτηση υγρασίας από το έδαφος, τοπικά, γύρω από το μελετώμενο ηλεκτρόδιο. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτει ότι, ένα σημαντικό ποσοστό, της τάξεως του 80% και άνω, των μετρήσεων, για κάθε Rgi, βρίσκεται εντός των κατωτέρω αναφερομένων περιοχών τιμών (σε Ω):

Rg1: 82% των μετρήσεων (41/50) είναι μεταξύ 275Ω και 425Ω, με μέσο όρο τιμών 321Ω και τυπική απόκλιση 67,8Ω.

Rg2: 84% των μετρήσεων (42/50) είναι μεταξύ 100Ω και 150Ω, με μέσο όρο τιμών 128Ω και τυπική απόκλιση 11,5Ω.

Rg3: 80% των μετρήσεων (40/50) είναι μεταξύ 100Ω και 150Ω, με μέσο όρο τιμών 121Ω και τυπική απόκλιση 15,4Ω.

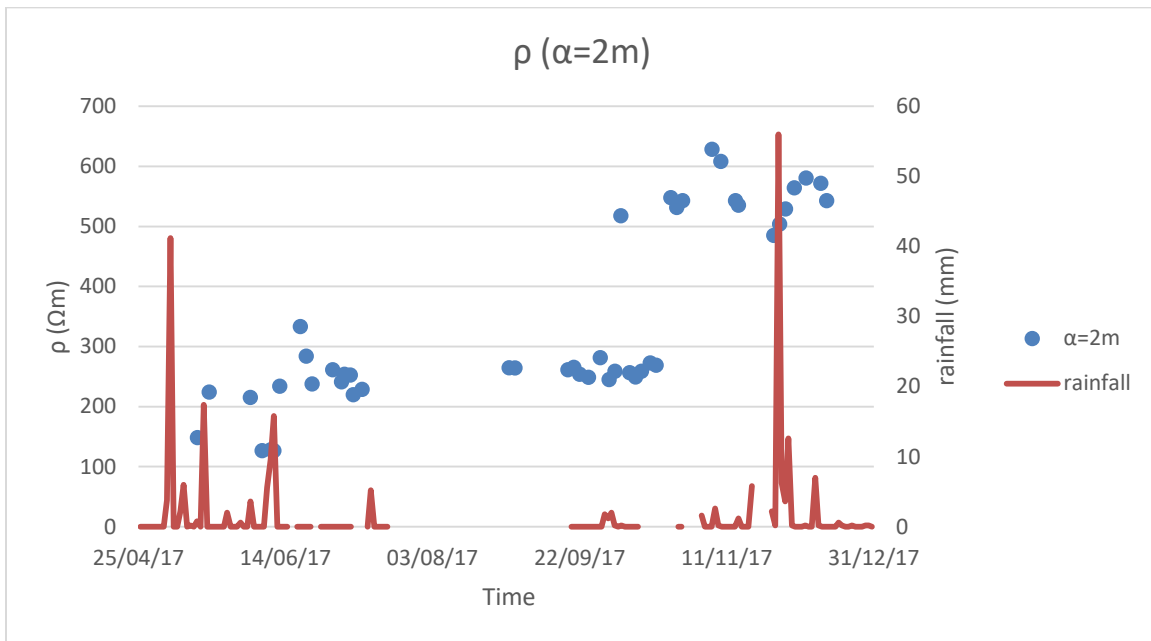
Rg4: 80% των μετρήσεων (40/50) είναι μεταξύ 125Ω και 200Ω, με μέσο όρο τιμών 161Ω και τυπική απόκλιση 20,8Ω.

Rg5: 82% των μετρήσεων (41/50) είναι μεταξύ 75Ω και 200Ω, με μέσο όρο τιμών 135Ω και τυπική απόκλιση 44,6Ω.

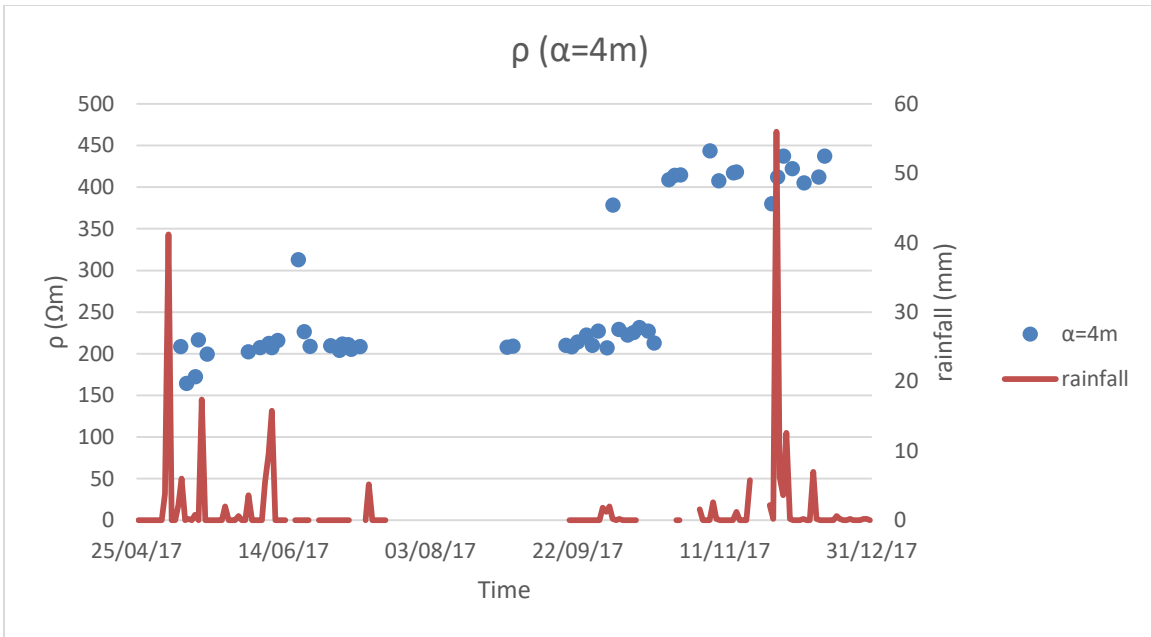
Πέραν αυτών, διαπιστώνεται ότι, προϋούσης της περιόδου ελλείψεως ή ελάχιστων βροχοπτώσεων, οι εξεταζόμενες διατάξεις ηλεκτροδίων Rgi παρουσιάζουν μια αύξηση

της τιμής της αντίστασης γείωσης περί το 50%, εξαιρουμένης της διατάξεως Rg5, η οποία εμφανίζει αύξηση της τιμής της αντίστασης γείωσης πλέον του 100%, κάτι που αποτελεί σοβαρή ένδειξη συνηγορούσα υπέρ της μετατάξεως του αντιστοίχου βελτιωτικού υλικού εδάφους στην κατηγορία των 'βελτιωτικών υλικών εδάφους'.

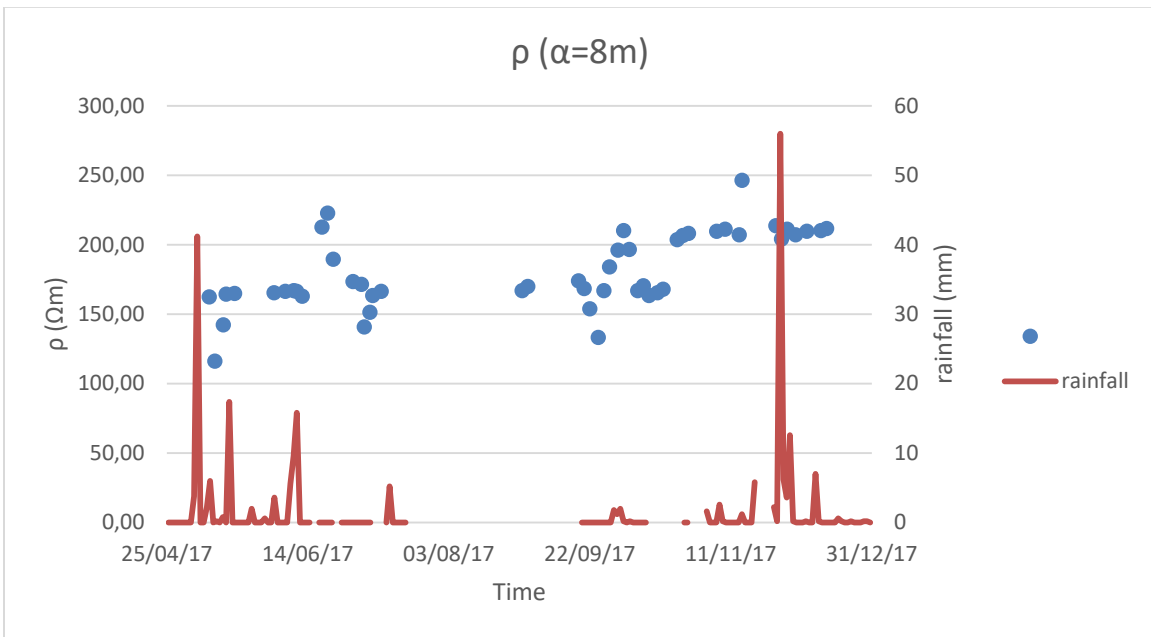
Ακολουθως, παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει του χρόνου και της βροχόπτωσης για τις διαφορετικές αποστάσεις α των βοηθητικών ηλεκτροδίων.



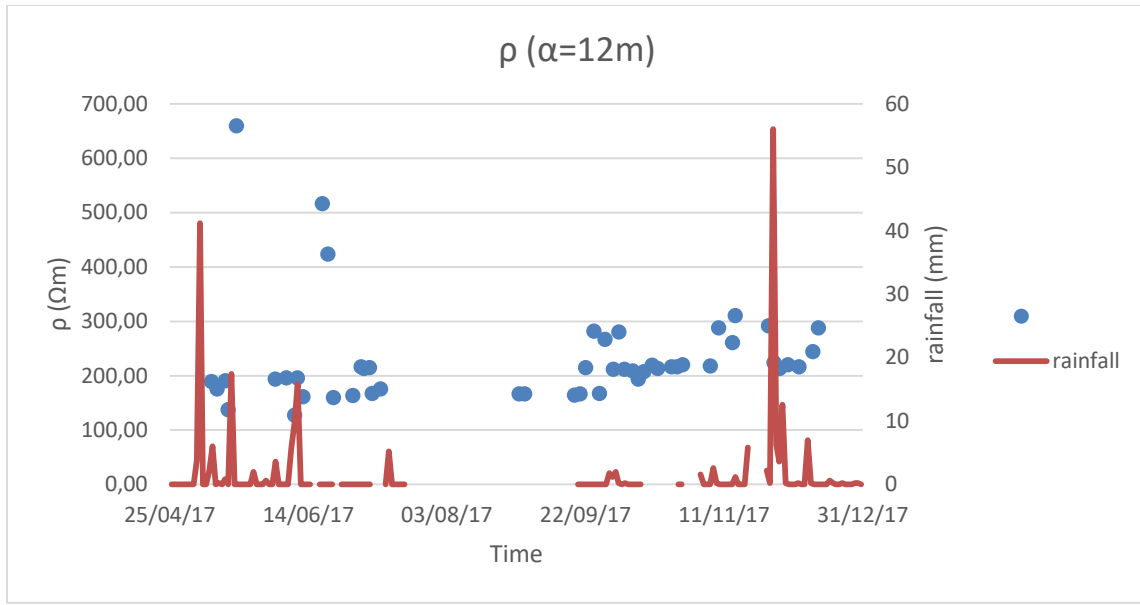
Σχήμα 24. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=2m$.



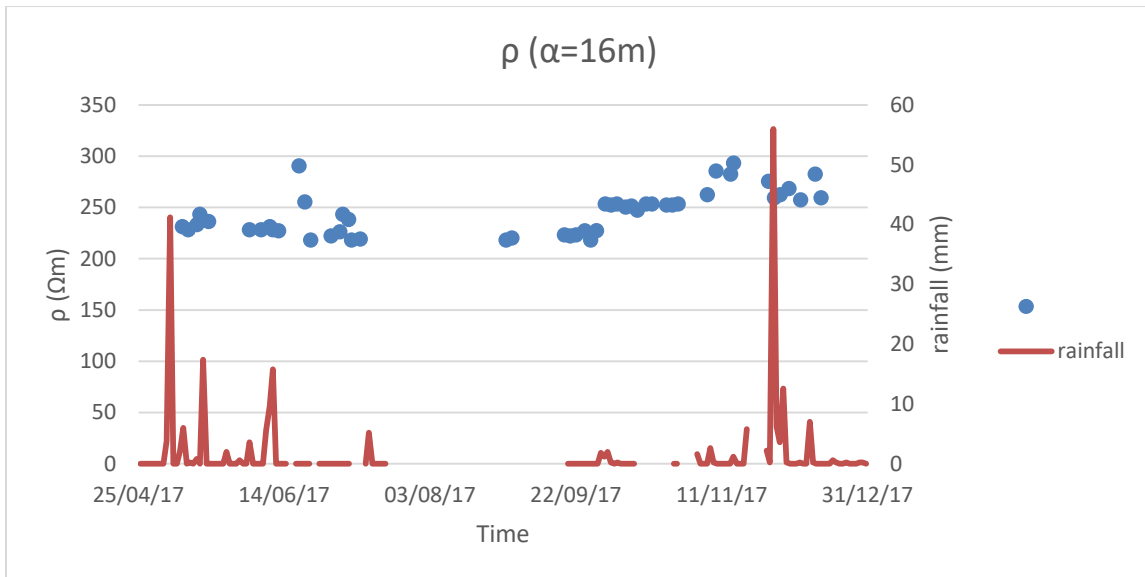
Σχήμα 25. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=4m$.



Σχήμα 26. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για $\alpha=8m$.



Σχήμα 27. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για α=12m.



Σχήμα 28. Μεταβολή της ρ με το χρόνο και τη βροχόπτωση για α=16m.

Τα διαγράμματα μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους με το χρόνο δίνουν συμπεράσματα σχετικά με τη δομή του εδάφους του πειράματος καθώς και με τη συμπεριφορά του εδάφους ως προς την συγκράτηση υγρασίας. Ένα ξεκάθαρο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι, μετά το πέρας της περιόδου ελλείψεως ή

ελαχίστων βροχοπτώσεων, παρατηρείται τάση για σημαντική, κατά το μάλλον ή ήττον, αύξηση της ειδικής αντίστασης εδάφους, η οποία αύξηση αποκλιμακώνεται σταδιακά, καθώς αυξάνεται το βάθος. Για παράδειγμα, όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από τις παρατιθέμενες, στο παράρτημα της παρούσας εργασίας, πειραματικές τιμές, εντός διαστήματος μικροτέρου του διμήνου (π.χ. μεταξύ του τρίτου δεκαημέρου του Σεπτεμβρίου και των μέσων του Νοεμβρίου 2017), η αύξηση της ειδικής αντίστασης για τα βάθη των 1, 2, 4, 6 και 8 μέτρων (για $\alpha=2, 4, 8, 12$ και 16 , αντίστοιχα) είναι της τάξεως του 110, 90, 60, 40 και 30%, αντιστοίχως (στρογγυλοποίηση σε πολλαπλάσια του 10%).

Οι παραπάνω τιμές ελήφθησαν από πειραματικές μετρήσεις κατά τη διάρκεια επτά μηνών και αποτελούν προσθήκη στην ήδη υπάρχουσα βάση δεδομένων μετρήσεων αντίστασης γείωσης και ειδικής αντίστασης εδάφους. Η ύπαρξη μιας τέτοιας μεγάλης βάσης δεδομένων καθιστά ικανή τη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων και συγκεκριμένα γενετικού προγραμματισμού, όπως θα δούμε στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 4

Γενετικός προγραμματισμός - Αποτελέσματα

4.1 Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Τα συστήματα αυτού του είδους λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του προβλήματος που προσπαθούμε να επιλύσουμε, εφαρμόζοντας πάνω σε αυτόν διάφορες διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων εξελίσσοντας τους προηγούμενους πληθυσμούς.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) και ο Γενετικός Προγραμματισμός (Genetic Programming) είναι παραδείγματα τέτοιων συστημάτων που μαζί με τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming.), τις Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolution Strategies) και τα Συστήματα Ταξινόμησης (Classifier Systems) αποτελούν μια κατηγορία συστημάτων επίλυσης προβλημάτων που είναι ευρύτερα γνωστή με τον όρο Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms).

4.1.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγόριθμων έγινε στις αρχές του 1950, όταν επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη, όμως, που οδήγησε στη μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan [68].

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από τον χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γενοτύπους (genotypes) μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Στους γενετικούς αλγορίθμους αναφερόμαστε συνήθως σε άτομα με

ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσοτέρων χαρακτηριστικών. Εκείνα τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου όπως το χρώμα του δέρματος μπορεί να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο από το οποίο εξαρτάται. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να έχει ένα γονίδιο καλούνται alleles (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος).

Κάθε γενότυπος αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το «αποκωδικοποιημένο» περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος ονομάζεται φαινότυπος (phenotype) (για παράδειγμα ένας ζωντανός οργανισμός είναι ο φαινότυπος των χρωμοσωμάτων του). Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε ένα πληθυσμό αντιστοιχεί σε μια εκτενή έρευνα στο χώρο των πιθανών λύσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση μιας παρόμοιας αναζήτησης, αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι, προφανώς, αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων, και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος [69].

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων του προβλήματος που μας ενδιαφέρει πάνω στον οποίο δουλεύουν, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Με αυτόν τον τρόπο, ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά καλύτερες λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά ακατάλληλες απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με τη βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function), η οποία έχει τον ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός [70].

Η δομή ενός απλού γενετικού αλγορίθμου έχει σε γενικές γραμμές ως εξής [70]: Κατά τη διάρκεια της γενιάς t , ο γενετικός αλγόριθμος διατηρεί έναν πληθυσμό $P(t)$ από n πιθανές λύσεις (individuals): $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$. Κάθε πιθανή λύση x_i^t αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς της. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (γενιά $t+1$) που προκύπτει από την επιλογή των καταλληλότερων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Μερικά μέλη από τον καινούργιο αυτό

πληθυσμό υφίστανται αλλαγές με τη βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων δύο γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας κομμάτια από τους γονείς. Παραδείγματος χάριν, έστω ότι δύο γονείς αναπαριστώνται με χρωματοσώματα πέντε γονιδίων $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$ και $(a_2, b_2, c_2, d_2, e_2)$, αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση, οι απόγονοι που θα προκύψουν από διασταύρωση με σημείο διασταύρωσης το σημείο 2 είναι οι $(a_1, b_1, c_2, d_2, e_2)$ και $(a_2, b_2, c_1, d_1, e_1)$. Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων με πιθανότητα ίση με τον ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate). Έτσι, έστω ότι μία λύση αναπαρίσταται με το διάνυσμα πέντε διαστάσεων $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$. Τότε, η λύση (individual) που θα προκύψει με μετάλλαξη στη δεύτερη και στην τέταρτη διάσταση είναι ο $(a_1, b_1^*, c_1, d_1^*, e_1)$. Μπορεί να θεωρηθεί πως η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό [69].

Τελικά, η διαμόρφωση ενός γενετικού αλγορίθμου για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η ακόλουθη:

- Μια γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
- Ένας τρόπος δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού από πιθανές λύσεις (αρχικοποίηση)
- Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης των μελών του πληθυσμού, (που λειτουργεί ως περιβάλλον)
- Γενετικοί τελεστές για τη δημιουργία νέων μελών (λύσεων).
- Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, και λοιπά)

4.1.2 Γενετικός Προγραμματισμός

Ο γενετικός προγραμματισμός είναι ένα σύνολο από εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές που επιτρέπουν στους υπολογιστές να επιλύουν προβλήματα με αυτόματο τρόπο. Από την πρώτη του εμφάνιση ο γενετικός προγραμματισμός έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση μεγάλου εύρους πρακτικών προβλημάτων, παράγοντας σπουδαία αποτελέσματα. Όπως και άλλοι τομείς της επιστήμης των υπολογιστών, ο γενετικός προγραμματισμός εξελίσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, με νέες ιδέες, τεχνικές και εφαρμογές να κάνουν συνεχώς την εμφάνισή τους [71].

Η χρήση υπολογιστών για την αυτόματη επίλυση προβλημάτων αποτελεί την κεντρική ιδέα της τεχνητής νοημοσύνης, της μηχανικής μάθησης και της γενικότερης περιοχής που ο Turing περιέγραψε ως «μηχανική νοημοσύνη». Ο πρωτοπόρος της μηχανικής

μάθησης, Arthur Samuel, στην ομιλία του το 1983 με τίτλο «Τεχνητή νοημοσύνη: Που βρισκόμαστε

και που πηγαίνουμε», επισήμανε πως ο βασικός στόχος αυτών των πεδίων είναι «να κάνουμε τα μηχανήματα να δείξουν συμπεριφορά, η οποία αν παρουσιαστεί από ανθρώπους, θα υποθεθεί ότι περιλαμβάνει τη χρήση νοημοσύνης.»

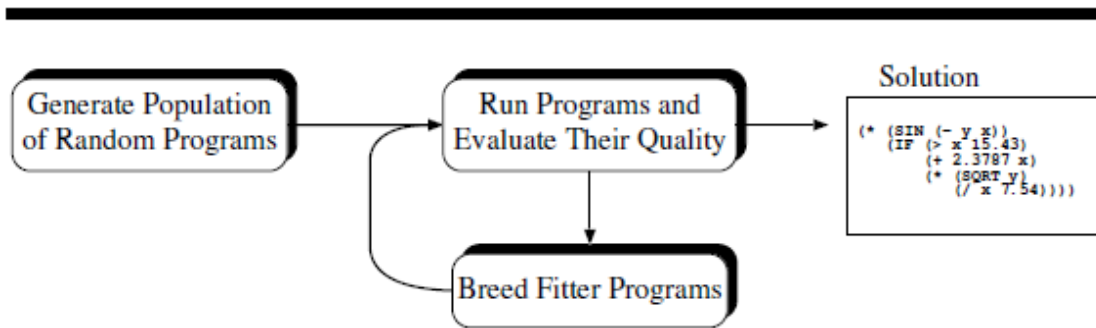
Η γενική ιδέα σε ένα σύστημα γενετικού προγραμματισμού είναι η ακόλουθη: Ο γενετικός προγραμματισμός ανακαλύπτει πόσο καλά δουλεύει ένα πρόγραμμα εκτελώντας το, και συγκρίνοντας, έπειτα, τη συμπεριφορά του έναντι ενός ιδανικού προγράμματος. Μπορεί να ενδιαφέρει κάποιον, για παράδειγμα, πόσο καλά ένα πρόγραμμα προβλέπει μια χρονοσειρά. Αυτή η σύγκριση προσδιορίζει μία μετρήσιμη ποσότητα που καλείται καταλληλότητα (fitness). Εκείνα τα προγράμματα που δίνουν καλά αποτελέσματα επιλέγονται για αναπαραγωγή και παράγουν νέα προγράμματα για την επόμενη γενιά. Οι βασικές γενετικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νέων προγραμμάτων από τα ήδη υπάρχοντα είναι οι εξής [71]:

Crossover (διασταύρωση): Η δημιουργία ενός προγράμματος (απογόνου) συνδυάζοντας τυχαία επιλεγμένα τμήματα από δύο επιλεγμένα προγράμματα (γονέα).

Mutation (μετάλλαξη): Η δημιουργία ενός νέου προγράμματος (απογόνου) τροποποιώντας τυχαία ένα τυχαία επιλεγμένο τμήμα ενός επιλεγμένου προγράμματος (γονέα).

Μία γενιά ολοκληρώνεται όταν για το μέγεθος του εξεταζόμενου πληθυσμού όλες οι διεργασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης έχουν ολοκληρωθεί. Κάθε γενιά δίνει στατιστικά δεδομένα καθώς και την καλύτερη καταλληλότητα (fitness) του πληθυσμού. Αν η φόρμουλα που προκύπτει ικανοποιεί τα κριτήρια ακριβείας που έχουν τεθεί, συνεχίζεται η επεξεργασία της, για παράδειγμα απλοποιείται για να βελτιωθεί η αναγνωσιμότητά της ή να γίνει πιο εύκολα διαχειρίσιμη [73].

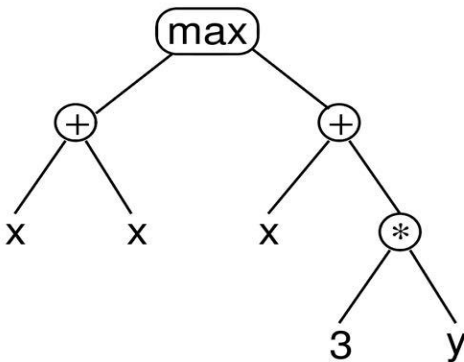
Ο γενετικός προγραμματισμός λύνει προβλήματα χωρίς να απαιτεί από το χρήστη να γνωρίζει ή να προσδιορίσει από πριν τη μορφή ή τη δομή της λύσης. Στο πιο αφηρημένο επίπεδο ο γενετικός προγραμματισμός είναι μια συστηματική, domain-independent μέθοδος που κάνει τους υπολογιστές να προσφέρουν λύσεις αυτόματα, ξεκινώντας από μια αφηρημένη δήλωση του επιθυμητού αποτελέσματος.



Σχήμα 29. Το βασικό διάγραμμα ελέγχου του γενετικού προγραμματισμού, όπου η επιβίωση του καταλληλότερου χρησιμοποιείται για βρεθεί λύση [72].

Στο γενετικό προγραμματισμό αναπτύσσεται ένας πληθυσμός από προγράμματα υπολογιστή. Ο γενετικός προγραμματισμός, από γενιά σε γενιά, στοχαστικά μετατρέπει αυτό τον πληθυσμό σε καινούργιους πληθυσμούς από προγράμματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29. Ο γενετικός προγραμματισμός, όπως και η φύση, είναι μια διαδικασία τυχαία, και δεν μπορεί να εγγυηθεί αποτελέσματα. Ωστόσο, αυτή ακριβώς η απαραίτητη τυχειότητα είναι που του δίνει τη δυνατότητα να αποφεύγει παγίδες από τις οποίες οι ντετερμινιστικές μέθοδοι πιθανώς αδυνατούν να ξεφύγουν. Όπως και η φύση, ο γενετικός προγραμματισμός έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα επιτυχημένος στην ανάπτυξη πρωτόγνωρων και ανέλπιστων τρόπων επίλυσης προβλημάτων.

Στον γενετικό προγραμματισμό, τα προγράμματα συνήθως εκφράζονται ως συντακτικά δέντρα και όχι ως γραμμές κώδικα. Για παράδειγμα το επόμενο σχήμα δείχνει την αναπαράσταση με δέντρο του προγράμματος $\max(x+x, x+3*y)$. Οι μεταβλητές και οι σταθερές του προγράμματος αποτελούν τα φύλλα του δέντρου. Στον γενετικό προγραμματισμό ονομάζονται τερματικά, ενώ οι αριθμητικές διαδικασίες (+, * και max) ονομάζονται συναρτήσεις. Το σύνολο των επιτρεπόμενων συναρτήσεων και τερματικών σχηματίζουν το θεμελιώδες σύνολο ενός συστήματος γενετικού προγραμματισμού. Σε πιο πολύπλοκες μορφές γενετικού προγραμματισμού, τα προγράμματα μπορεί να αποτελούνται από πολλά συστατικά, όπως υπορουτίνες. Σε αυτή την περίπτωση, η αναπαράσταση που χρησιμοποιείται είναι ένα σύνολο δέντρων (ένα για κάθε συστατικό) κάτω από μια κοινή ρίζα. Αυτά τα δέντρα ονομάζονται κλαδιά. Ο αριθμός και ο τύπος των κλαδιών σε ένα πρόγραμμα, μαζί με συγκεκριμένες λειτουργίες της δομής τους, ορίζουν την αρχιτεκτονική του προγράμματος [72].

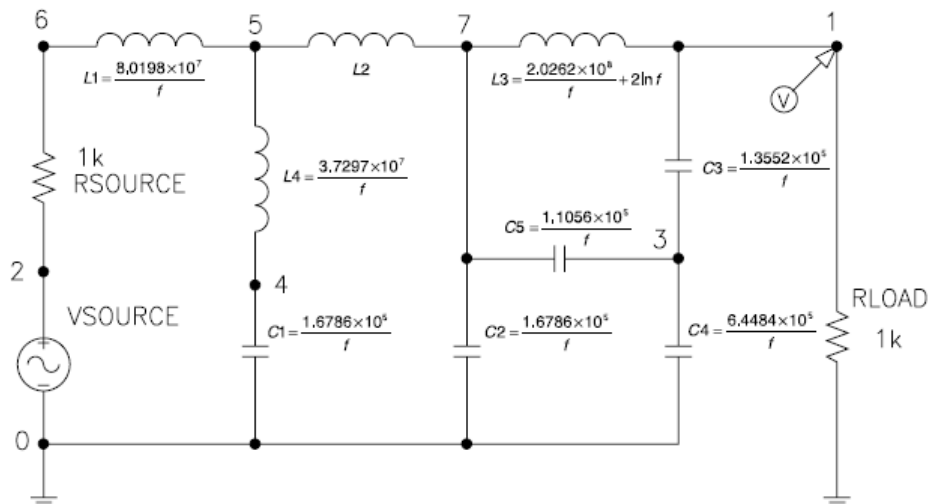


Σχήμα 30. Συντακτικό δέντρο γενετικού προγραμματισμού που αναπαριστά το $\max(x+x, x+3*y)$ [72].

Ένα ακόμα σπουδαίο χαρακτηριστικό του γενετικού προγραμματισμού είναι η δυνατότητά του να δημιουργεί παραμετροποιημένες τοπολογίες. Αυτό σημαίνει πως με μόνο μια εκτέλεση γενετικού προγραμματισμού μπορεί αυτόματα να παραχθεί μια γραφικής μορφής γενική (παραμετροποιημένη) λύση ενός προβλήματος. Οι κόμβοι και οι ακμές του γραφήματος που προκύπτει, αναπαριστούν συστατικά στοιχεία του προβλήματος ενώ οι παράμετροι των συστατικών προσδιορίζονται από μαθηματικές εκφράσεις με τη βοήθεια ελεύθερων μεταβλητών.

Σε μία παραμετροποιημένη τοπολογία, η γραφική δομή που προκύπτει γενετικά αναπαριστά μια πολύπλοκη δομή (π.χ. ηλεκτρικό κύκλωμα, σύστημα ελέγχου, σύνολο από χημικές αντιδράσεις, κεραία, γενετικό δίκτυο). Στην αυτοματοποιημένη διαδικασία που πραγματοποιείται, ο γενετικός προγραμματισμός προσδιορίζει το μέγεθος του γράφου (τον αριθμό των κόμβων) καθώς και τη συνδεσιμότητα του γράφου (δηλώνοντας ακριβώς τις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων). Ταυτόχρονα, ο γενετικός προγραμματισμός αναθέτει τύπους των συστατικών σε κόμβους και ακμές του γράφου. Για παράδειγμα, σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα οι τύποι των συστατικών θα είναι τρανζίστορ, αντιστάσεις, πυκνωτές κλπ. Κατά τη διαδικασία αυτή, ο γενετικός προγραμματισμός παράγει μαθηματικές εκφράσεις που θεμελιώνουν τις παραμέτρους των συστατικών (λόγου χάρη τη χωρητικότητα ενός πυκνωτή, το λόγο μετασχηματισμού ενός αυτομετασχηματιστή και λοιπά). Κάποιες από αυτές τις μαθηματικές εκφράσεις περιέχουν ελεύθερες μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές παρέχουν γενικότητα στην προκύπτουσα λύση, καθιστώντας μια μοναδική γραφική δομή ικανή να περιγράψει μια γενική –παραμετρική– επίλυση ολόκληρης κατηγορίας προβλημάτων. Το αξιοσημείωτο σχετικά με τις παραμετροποιημένες τοπολογίες είναι ότι ο γενετικός προγραμματισμός μπορεί να κάνει όλα τα παραπάνω με αυτόματο τρόπο σε ένα μόλις «τρέξιμο».

Για παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα κύκλωμα που τροφοδοτεί το μεγάφωνο ενός Hi-fi ηχοσυστήματος, θέλουμε, δηλαδή, το ζητούμενο κύκλωμα να επιτρέπει σήματα κάτω από μια συγκεκριμένη συχνότητα διατηρώντας μέγιστη ισχύ και παράλληλα να αποκόπτει όλες τις υψηλότερες συχνότητες. Έστω, ακόμα, πως αναζητούμε μια λύση για κάθε συχνότητα αποκοπής f – όχι μόνο μια λύση που λειτουργεί για π.χ. 1000Hz. Η επίλυση του προβλήματος που δίνει ο γενετικός προγραμματισμός φαίνεται στο επόμενο σχήμα, με τη γενική λύση να περιλαμβάνει την τοπολογία του κυκλώματος καθώς και τον τύπο των στοιχείων που το αποτελούν. Η παραμετροποιημένη αυτή λύση έχει εννέα συστατικά στοιχεία, πέντε πυκνωτές και τέσσερα πηνία. Οι κυκλωματικές συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων παράγονται αυτόματα κατά τη διάρκεια του «τρεξίματος» του γενετικού προγραμματισμού. Η ελεύθερη μεταβλητή f του προβλήματος αποτελεί την είσοδο της προκύπτουσας λύσης, η οποία είναι γενική μιας και οι χωρητικότητες των πυκνωτών και οι αγωγιμότητες των πηνίων δεν είναι σταθερές αλλά συναρτήσεις της εισόδου f . Έτσι η λύση τελικά περιλαμβάνει εννέα διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις, μία για κάθε στοιχείο του κυκλώματος, που περιέχουν την ελεύθερη μεταβλητή [73].



Σχήμα 31. Η καλύτερη δυνατή παραμετροποιημένη τοπολογία βαθυπερατού φίλτρου με μεταβλητή συχνότητα αποκοπής [73].

4.1.3 Ιστορικά

Παρόλο που ο γενετικός προγραμματισμός είναι ένα σχετικά νέο πεδίο στον κόσμο της μηχανικής μάθησης, μερικά στοιχεία από τα πρώτα ερευνητικά βήματα της μηχανικής μάθησης είχαν μια ομοιότητα με τον σημερινό γενετικό προγραμματισμό. Το 1958 και 1959, ο Friedberg προσπάθησε να επιλύσει αρκετά απλά προβλήματα διδάσκοντας

έναν υπολογιστή να γράφει τα προγράμματα για ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Τα προγράμματα του Friedberg αποτελούνταν από 64 οδηγίες και μπορούσαν να χειριστούν ένα διάνυσμα δεδομένων 64-bit. Κάθε εντολή είχε ένα εικονικό "opcode" και δύο τελεστές, οι οποίοι αναφέρονταν είτε στα δεδομένα είτε στις εντολές. Η εντολή θα μπορούσε να μεταβεί σε οποιαδήποτε άλλη εντολή ή θα μπορούσε να χειριστεί κάθε κομμάτι του διανύσματος δεδομένων. Το σύστημα του Friedberg μάθαινε με τη χρήση μιας λειτουργίας που μοιάζει με τον σύγχρονο τελεστή μετάλλαξης: Τυχαία αρχικοποίηση των λύσεων και τυχαίες αλλαγές στις εντολές. Τα αποτελέσματα του Friedberg ήταν περιορισμένα, αλλά όχι και η σκέψη και τα οράματά του. Η μηχανική μάθηση (που σαν πεδίο έδινε έμφαση στην μάθηση) και η τεχνητή νοημοσύνη (που σαν πεδίο έδινε έμφαση στα συστήματα γνώσης) διαχωρίστηκαν και λίγα χρόνια μετά την δουλειά του Friedberg η μηχανική μάθηση παραμερίστηκε και η τεχνητή νοημοσύνη έγινε ο κυρίαρχος εκφραστής της υπολογιστικής νοημοσύνης στις δεκαετίες του 60 και του 70. Το είδος της νοημοσύνης που προέκυπτε από τέτοια έμπειρα συστήματα ήταν αρκετά διαφορετικό από την μηχανική μάθηση, επειδή τα συστήματα αυτά δεν είχαν μάθει εμπειρικά. Σε παράφραση των όρων του Friedberg, τα έμπειρα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης προσπαθούν να μειώσουν την εκτέλεση συγκεκριμένων καθκόντων «σε μια επιστήμη τόσο ακριβή, ώστε να μπορούμε να πούμε σε μια μηχανή ακριβώς πώς να κινηθεί για να εκτελέσει μια λειτουργία.» Η παραπάνω προσέγγιση για τα έμπειρα συστήματα, στη δεκαετία του 1960 και αργότερα, εμφάνισε πολλές επιτυχίες, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι [74]:

- MYCIN – Διάγνωση μεταδοτικών ασθενειών
- MOLE – Διάγνωση ασθενειών
- PROSPECTOR – Σύμβουλος μεταλλευτικών ερευνών
- DESIGN ADVISOR – Σύμβουλος σχεδιασμού ολοκληρωμένων πυριτίου
- R1 – Σύνθεση υπολογιστών

Παρά τις επιτυχίες αυτές, τα έμπειρα συστήματα αποδείχθηκαν εύθραυστα και παρουσίασαν δυσκολία χειρισμού δεδομένων που ήταν καινούργια ή είχαν θόρυβο. Η προσοχή μετατοπίστηκε από το στατικό ζήτημα του πώς να αναπαραστήσει κανείς την γνώση σε ένα σύστημα, στη δυναμική αναζήτηση για το πώς θα την αποκτήσει το σύστημα από μόνο του. Η έρευνα άρχισε ουσιαστικά να αναζητεί έναν τρόπο, για να δείξει σε έναν υπολογιστή ακριβώς πώς να μάθει. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η μηχανική μάθηση αναγνωρίστηκε ως ξεχωριστό επιστημονικό πεδίο. Από τότε, αναπτύχθηκε ραγδαία. Χωρίς αμφιβολία, το ενδιαφέρον και η σημασία της πρόβλεψης έχει αυξηθεί κατακόρυφα τα τελευταία χρόνια. Το ενδιαφέρον αυτό που υπάρχει για την πρόβλεψη προέρχεται τόσο από τον ακαδημαϊκό κόσμο όσο και από τους πρακτικά

απασχολούμενους με αυτή και προκύπτει από την ανάγκη λήψης αποφάσεων αντιμετωπίζοντας την αβεβαιότητα του μέλλοντος. Σήμερα, η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο από οργανισμούς και επιχειρήσεις σε πληθώρα επιστημονικών και ερευνητικών πεδίων, όπως για παράδειγμα στον έλεγχο της βιομηχανικής διαδικασίας, στα χρηματοοικονομικά, στην πρόβλεψη χρονικών σειρών καθώς και σε προβλήματα αναγνώρισης προτύπων.

4.2 Το λογισμικό HeuristicLab

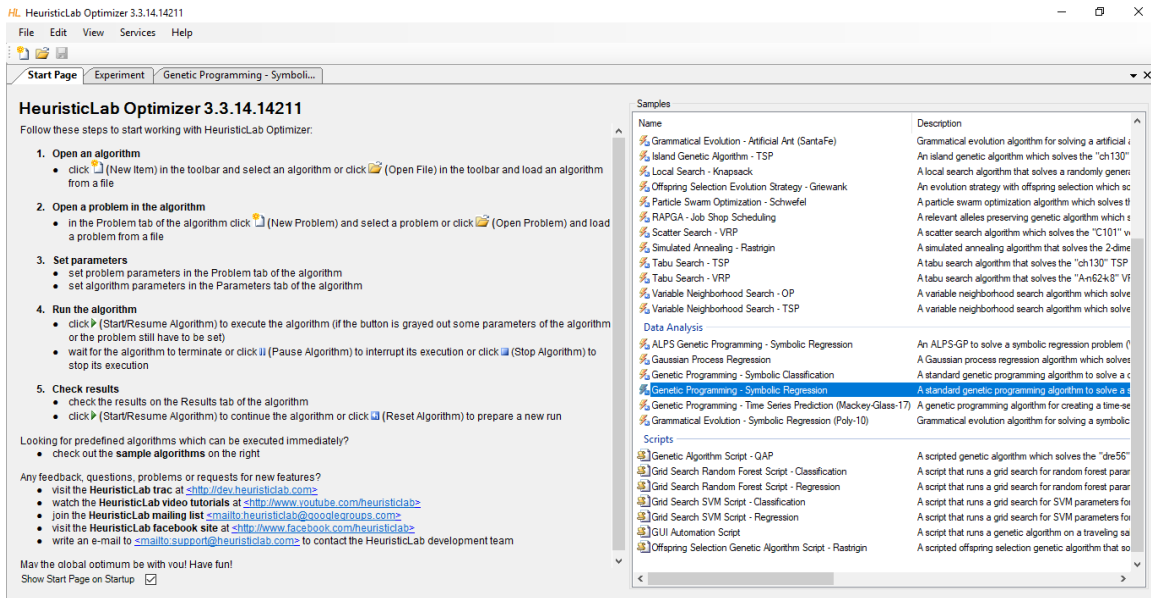
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μεθοδολογίες γενετικού προγραμματισμού για τη μοντελοποίηση και την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης συναρτήσεων μεταβλητών σχετικών με τις καιρικές συνθήκες (βροχόπτωση, ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου). Για τον σκοπό αυτόν, επιλέχθηκε το λογισμικό HeuristicLab.

Το HeuristicLab είναι ένα περιβάλλον λογισμικού για ευρετικούς και εξελικτικούς αλγόριθμους, ανεπτυγμένο από το Heuristic and Evolutionary Algorithm Laboratory (HEAL) του Πανεπιστημίου Εφαρμοσμένων Επιστημών στο Hagenberg της Αυστρίας. Το HeuristicLab έχει ως βασικό στόχο την παροχή ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη τέτοιου ώστε να μην απαιτούνται από το χρήστη ιδιαίτερες γνώσεις προγραμματισμού για να προσαρμόζει και να επεκτείνει τους αλγόριθμους κάθε προβλήματος. Στο περιβάλλον του HeuristicLab οι αλγόριθμοι αναπαριστούνται ως γράφοι και η συντριπτική πλειονότητα των χειρισμών μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την γραφή κώδικα. Οι προγραμματιστές μπορούν, βέβαια, να επεκτείνουν τις δυνατότητες του λογισμικού μέσω ενός μηχανισμού plug-in που τους επιτρέπει να ενσωματώσουν τυπικούς αλγόριθμους, προσομοιώσεις λύσεων ή προβλήματα βελτιστοποίησης [75].

Η ανάπτυξη του HeuristicLab ξεκίνησε το 2002 από τους Stefan Wagner και Michael Affenzeller. Βασικό τους κίνητρο ήταν το χτίσιμο ενός ευέλικτου, εξελίξιμου και άνετου περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας μοντέρνα προγραμματιστικά πρότυπα. Η δομή του Microsoft .NET επιλέχθηκε ως το περιβάλλον ανάπτυξης του λογισμικού, ενώ ο κώδικας γράφτηκε σε γλώσσα C. Η πρώτη επίσημη έκδοση του HeuristicLab 1.0 έγινε διαθέσιμη το 2004 ενώ το καλοκαίρι του 2010 παρουσιάστηκε το HeuristicLab 3.3 ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα πλέον. Από τότε, νέες, βελτιωμένες εκδόσεις παρουσιάζονται κάθε περίπου τρεις με έξι μήνες. Η τελευταία ενημέρωση έγινε στις 11 Ιανουαρίου 2018, με την ονομασία “Berlin”.

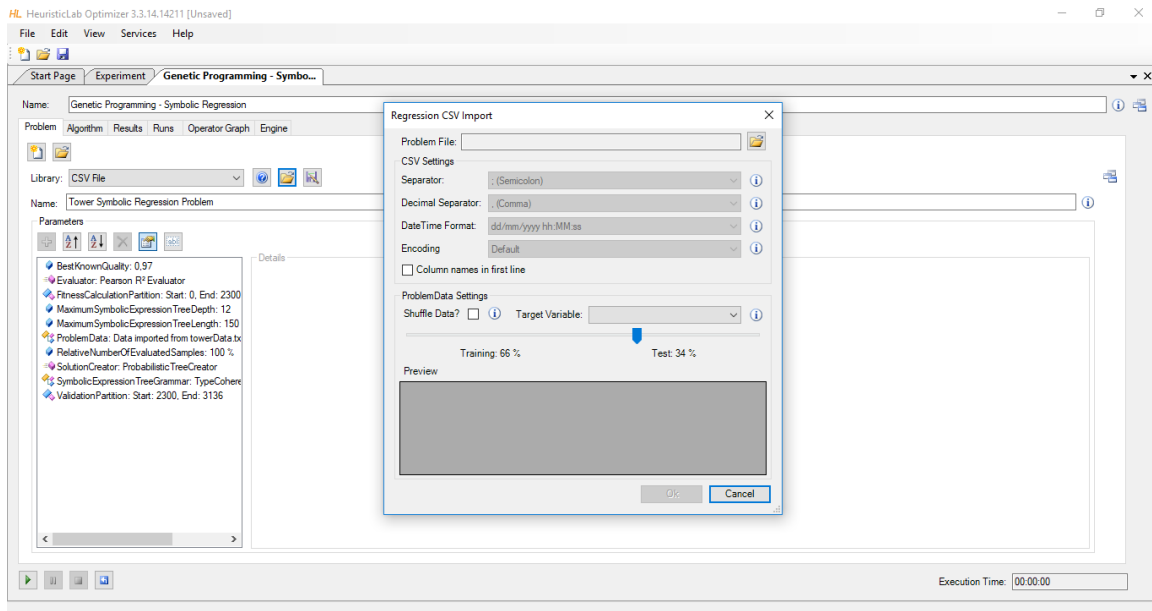
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται βήματα ενός τρεξίματος γενετικού προγραμματισμού στο περιβάλλον του HeuristicLab.

Αρχικά, γίνεται η επιλογή του κατά περίπτωση προβλήματος και του αντίστοιχου αλγορίθμου που ο ερευνητής θέλει να χρησιμοποιήσει, μέσω της αρχικής σελίδας του προγράμματος. Είναι διαθέσιμα πολλά δείγματα προβλημάτων ανάλυσης δεδομένων, τυπικά προβλήματα γενετικού προγραμματισμού και γενετικών αλγορίθμων. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε από τα προβλήματα ανάλυσης δεδομένων ο αλγόριθμος γενετικού προγραμματισμού στο χώρο της συμβολικής παλινδρόμησης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.



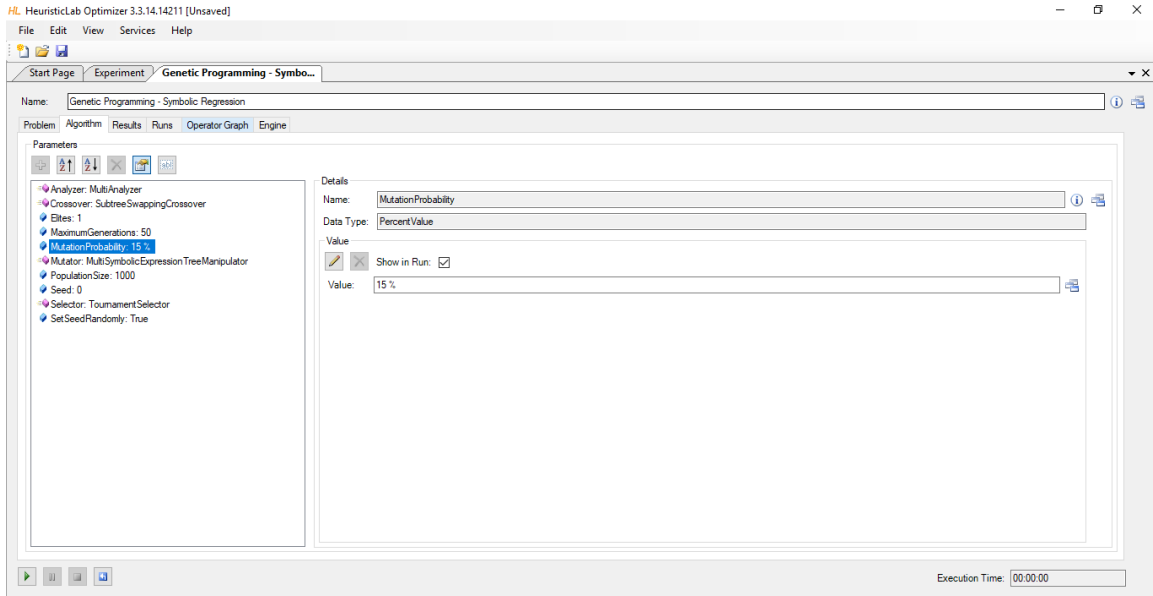
Εικόνα 3. Αρχική σελίδα του προγράμματος HeuristicLab.

Ακολουθεί η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόβλημα, σε μορφή csv αρχείου. Σε αυτό το σημείο, επιλέγεται το ποσοστό των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν ως τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου και το ποσοστό των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν ως τιμές δοκιμής του αλγορίθμου. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, επιλέγεται ο διαχωρισμός με ποσοστά 70% έως 80% για τις τιμές εκπαίδευσης και 30% έως 20% για τις τιμές δοκιμής του αλγορίθμου, αντίστοιχα. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στον αλγόριθμο να εκπαιδευτεί κατάλληλα, ενώ παρέχεται επαρκές δείγμα για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Για το παρόν πρόβλημα η επιλογή των ποσοστών κυμάνθηκε σε αυτά τα πλαίσια, επιλέγοντας, τελικά, τον διαχωρισμό που έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα μετά από δοκιμές. Στην Εικόνα 4, φαίνεται το παράθυρο εισαγωγής των δεδομένων και επιλογής των προαναφερθέντων ποσοστών.



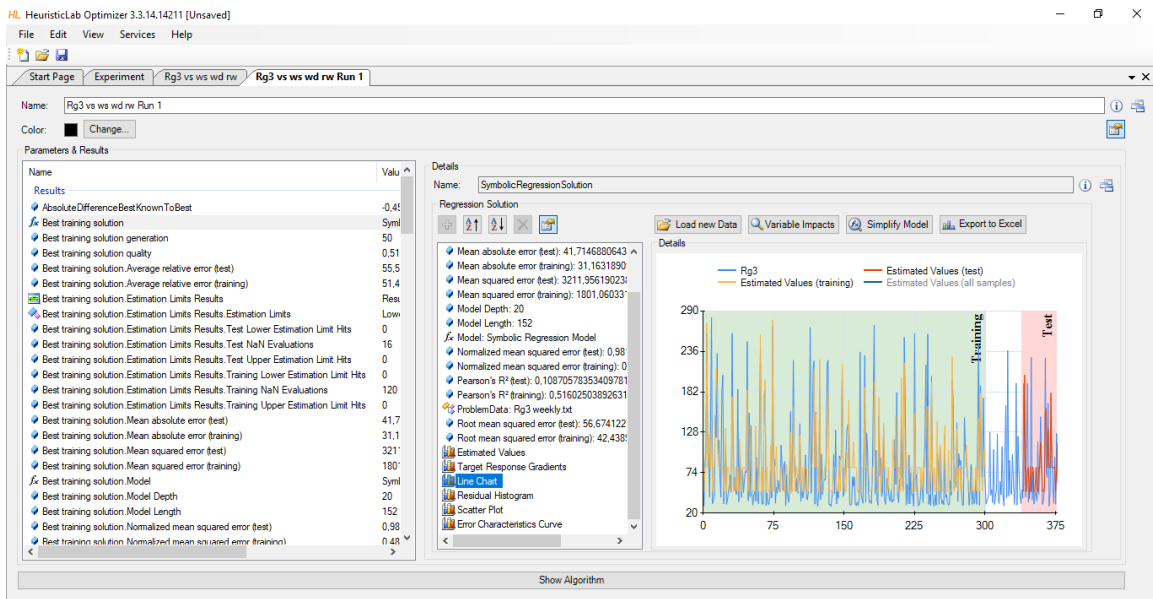
Εικόνα 4. Εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος και επιλογή των ποσοστών εκπαίδευσης και δοκιμής του αλγορίθμου.

Στη συνέχεια, γίνεται η παραμετροποίηση του προβλήματος. Μεταβάλλονται παράμετροι όπως η πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability), το μέγεθος πληθυσμού (population size), το μέγιστο βάθος δένδρου (maximum tree depth) και λοιπά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα παράλληλων «τρεξιμάτων» με τα ίδια δεδομένα και διαφορετικές τιμές των παραμέτρων. Με αυτόν τον τρόπο, έγιναν πειράματα, παραδείγματος χάριν, κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους και μεταβάλλοντας μόνο την πιθανότητα μετάλλαξης κοκ, αναζητώντας τον συνδυασμό παραμέτρων που δίνουν την καταλληλότερη και ακριβέστερη λύση του προβλήματος γενετικού προγραμματισμού.



Εικόνα 5. Επιλογή τιμών για τις παραμέτρους του προβλήματος.

Αφού γίνει η ρύθμιση των παραμέτρων του προβλήματος, ακολουθεί η εκκίνηση του αλγορίθμου. Ο χρόνος εκτέλεσης του προβλήματος κυμαίνεται ανάλογα με την διαθέσιμη υπολογιστική ικανότητα και τον αριθμό των τρεξιμάτων ανά πείραμα που έχουν επιλεγεί από τον χρήστη. Στην παρούσα εργασία, ενδεικτικά, η καλύτερη λύση που δόθηκε για το ηλεκτρόδιο 1 προέκυψε από ένα τρέξιμο σε σύνολο 30 τρεξιμάτων, συνολικής διάρκειας περίπου 48 λεπτών.



Εικόνα 6 .Παρουσίαση αποτελεσμάτων ενός τρεξιματος.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ένα παράθυρο στο πρόγραμμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Δίνονται γραφικές παραστάσεις, όπως το διάγραμμα διασποράς, οι τιμές των παραμέτρων σφάλματος, όπως το Pearson's R^2 και το μέσο σχετικό σφάλμα καθώς και πληθώρα άλλων δεδομένων χρήσιμων για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του προβλήματος. Τα δεδομένα αυτά μπορούν, επίσης, να εξαχθούν στο excel για επεξεργασία και μελέτη εκτός του περιβάλλοντος του HeuristicLab.

4.3 Διαμόρφωση του πειράματος του γενετικού προγραμματισμού

4.3.1 Δεδομένα

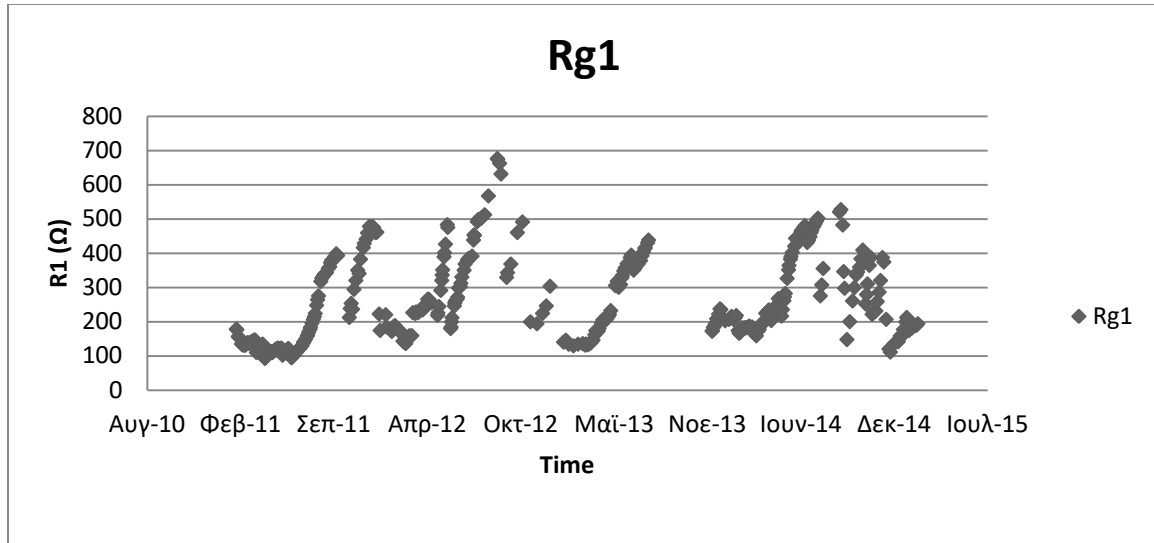
Ο βασικός σκοπός της χρήσης του γενετικού προγραμματισμού ήταν απλός: η παρουσίαση ενός μαθηματικού τύπου που θα δίνει την αντίσταση γείωσης κάθε ηλεκτροδίου, εγκιβωτισμένου σε διαφορετικό βελτιωτικό υλικό, συναρτήσει μεταβλητών σχετικών με τις καιρικές συνθήκες. Με βάση την ακρίβεια των αποτελεσμάτων κάθε μοντέλου, οδηγείται κανείς στην κατάλληλη επιλογή βελτιωτικού υλικού για ένα σύστημα γείωσης, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της εγκατάστασης, εφαρμόζοντας τους προτεινόμενους τύπους.

Για την εφαρμογή του γενετικού προγραμματισμού στο συγκεκριμένο πρόβλημα, χρησιμοποιήθηκαν προηγούμενες μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των ίδιων ηλεκτροδίων με το παρόν πείραμα. Οι μετρήσεις αυτές ελήφθησαν από ερευνητές του εργαστηρίου υψηλών τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο διάστημα 17/2/2011 έως και 16/02/2015, παρέχοντας ένα ικανοποιητικό μέγεθος δεδομένων για τη μοντελοποίηση και την εκτίμηση των τιμών της αντίστασης γείωσης.

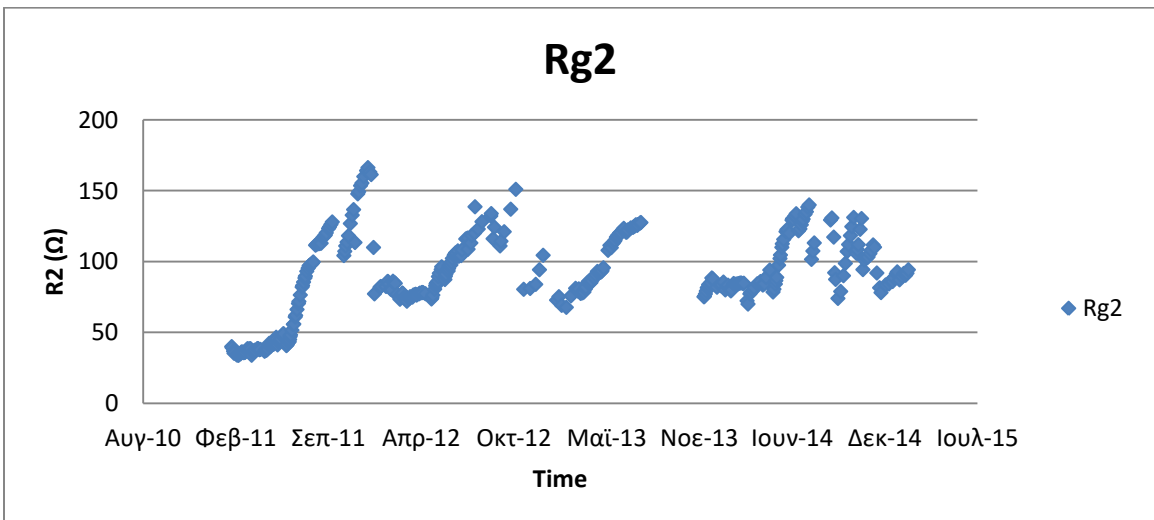
Αρχικά, επιχειρήθηκε η εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας ως μεταβλητή το ύψος της βροχόπτωσης της προηγούμενης από τη μέτρηση ημέρας. Ωστόσο, παλαιότερες αντίστοιχες μελέτες καθώς και δοκιμαστικά πειράματα γενετικών αλγορίθμων οδήγησαν στη χρήση του αθροιστικού ύψους της βροχόπτωσης των προηγούμενων επτά ημερών από τη μέτρηση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν θέτοντας ως μεταβλητή την εβδομαδιαία βροχόπτωση ήταν μεν ακριβέστερα από τα αντίστοιχα της ημερήσιας βροχόπτωσης, αλλά όχι αρκούντως ικανοποιητικά. Έτσι, αναζητήθηκαν πρόσθετες κατάλληλες μεταβλητές που θα επέτρεπαν την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Τελικά, επιλέχθηκε η κατεύθυνση του ανέμου και η ταχύτητα του ανέμου, μιας και αυτοί οι δύο παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την υγρασία του εδάφους τοπικά, γύρω από τα ηλεκτρόδια τα οποία μελετήθηκαν. Τα απαραίτητα δεδομένα αντλήθηκαν από τον ιστότοπο του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, ο οποίος λειτουργεί υπό την εποπτεία του

εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών.

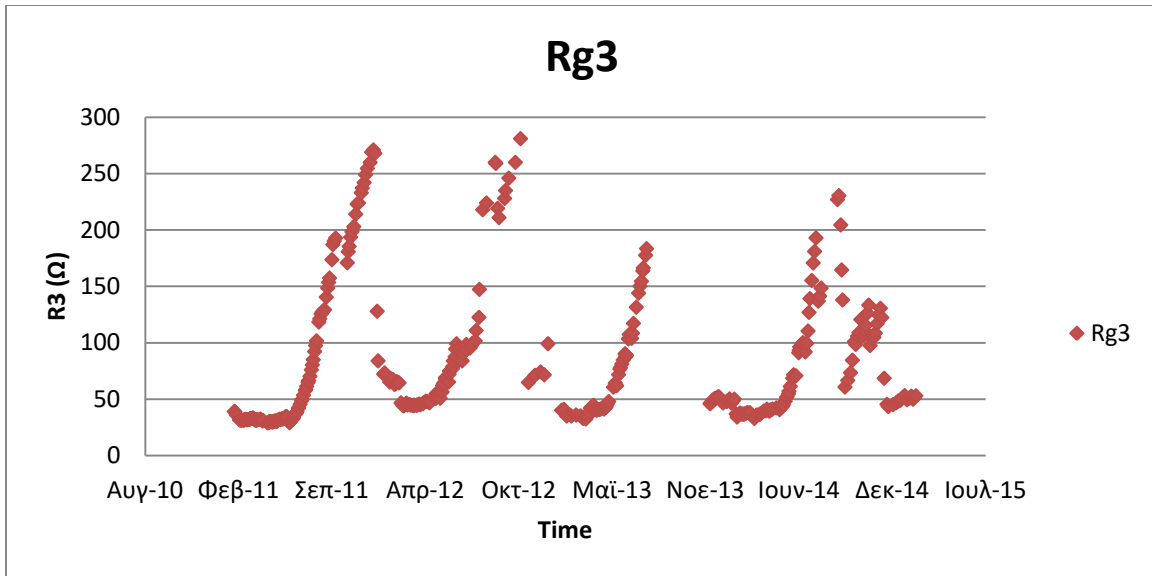
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων της αντίστασης γείωσης, που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα του γενετικού προγραμματισμού.



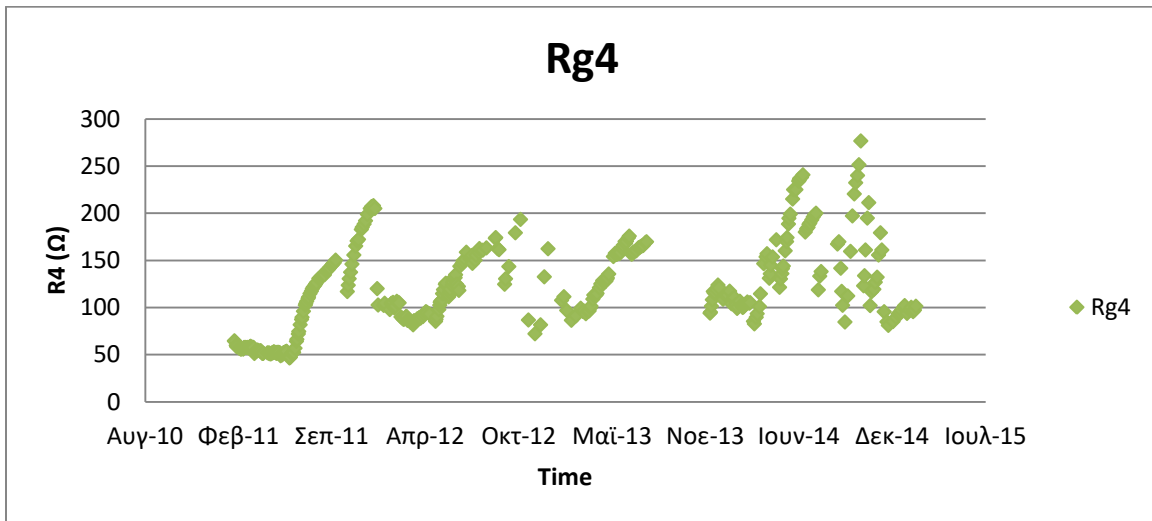
Σχήμα 32. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 1 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].



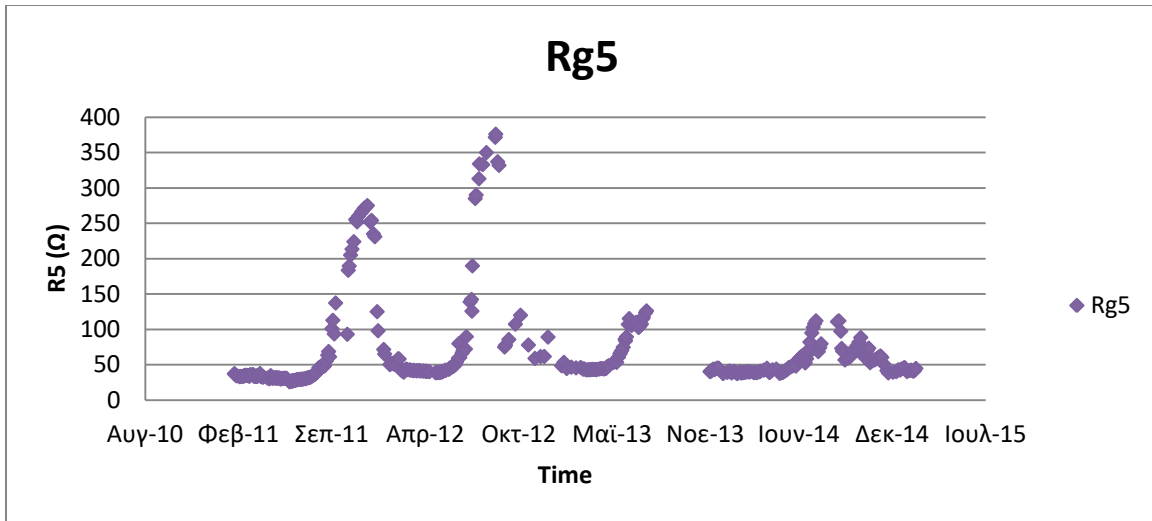
Σχήμα 33. Μεταβολή αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίου 2 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].



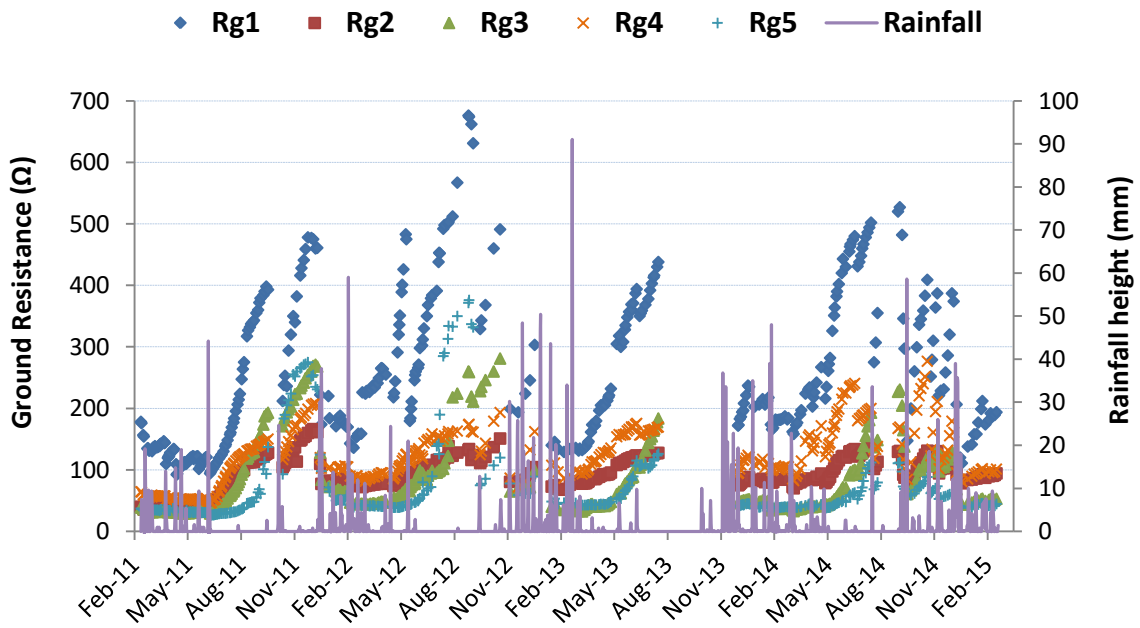
Σχήμα 34. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 3 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].



Σχήμα 35. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 4 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].



Σχήμα 36. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 5 με το χρόνο (δεδομένα αρχείου) [8].



Σχήμα 37. Μεταβολή της αντίστασης γείωσης όλων των μελετώμενων ηλεκτροδίων συναρτήσει του χρόνου και της ημερήσιας βροχόπτωσης (δεδομένα αρχείου) [8].

4.4 Αποτελέσματα

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε ο γενετικός προγραμματισμός στο πλαίσιο της συμβολικής παλινδρόμησης. Κατά τη διάρκεια των «τρεξιμάτων», μεταβλήθηκαν διαφορετικές παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονταν συνεχώς για τις διάφορες τροποποιήσεις του προβλήματος. Οι κύριες παράμετροι που ρυθμίζονταν συνεχώς κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος ήταν οι ακόλουθες: πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability), μέγεθος πληθυσμού (population size), μέγιστο βάθος δένδρου (maximum tree depth), μέγιστο μήκος δένδρου (maximum tree length), μέγιστος αριθμός γενεών. Ως μετάλλαξη (mutation), εννοούμε τη λειτουργία (γενετικός τελεστής) που ενεργεί σε ένα μόνο χρωμόσωμα κάθε φορά. Καθώς αντιγράφονται τα γόνιδια από το γονέα στον απόγονο, επιλέγεται με μικρή πιθανότητα –τη λεγόμενη πιθανότητα μετάλλαξης- ένα αλληλόμορφο και τροποποιείται, λαμβάνοντας μια νέα τιμή που επιλέγεται τυχαία, με περιορισμό την εγκυρότητα της καινούργιας λύσης. Έτσι, λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η επιλογή ή η διασταύρωση οδηγήσουν σε απώλεια γενετικών πληροφοριών. Βασικό κριτήριο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων αποτέλεσε ο συντελεστής Pearson. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r αποτελεί τον καταλληλότερο παραμετρικό στατιστικό δείκτη, ώστε να αξιολογηθεί η συσχέτιση δυο μεταβλητών. Ως παραμετρικό, εννοούμε έναν δείκτη που ικανοποιεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Αν αυτές δεν ικανοποιούνται, χρησιμοποιούνται μη-παραμετρικοί στατιστικοί δείκτες. Για το συντελεστή Pearson οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται είναι οι εξής:

- A. οι μεταβλητές να είναι συνεχείς σε κλίμακα ίσων διαστημάτων και να έχουν κανονική κατανομή
- B. οι δύο μεταβλητές να έχουν γραμμική σχέση.

Απαραίτητη, για την ανίχνευση των σχέσεων, είναι η αναλογική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών για όλα τα επίπεδά τους. Οι συνθήκες που περιγράφονται, απεικονίζονται με κατάλληλο τρόπο στα διαγράμματα διασποράς που ακολουθούν. Φαίνεται το είδος και το μέγεθος, κατά προσέγγιση, της σχέσης των δύο εξεταζόμενων μεταβλητών.

Έπειτα από συνεχείς εναλλαγές στις τιμές των παραπάνω παραμέτρων, συγκρίσεις αποτελεσμάτων και διαδοχικές εκτελέσεις πειραμάτων στο HeuristicLab, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για τη μοντελοποίηση της τιμής της αντιστάσης γείωσης των εξεταζόμενων ηλεκτροδίων. Εκτός των μαθηματικών τύπων στους οποίους η συγκεκριμένη μελέτη κατέληξε, παρουσιάζονται γραφήματα που απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ των εξεταζόμενων δεδομένων.

Στα επόμενα ισχύουν τα εξής:

rw: rainfall weekly

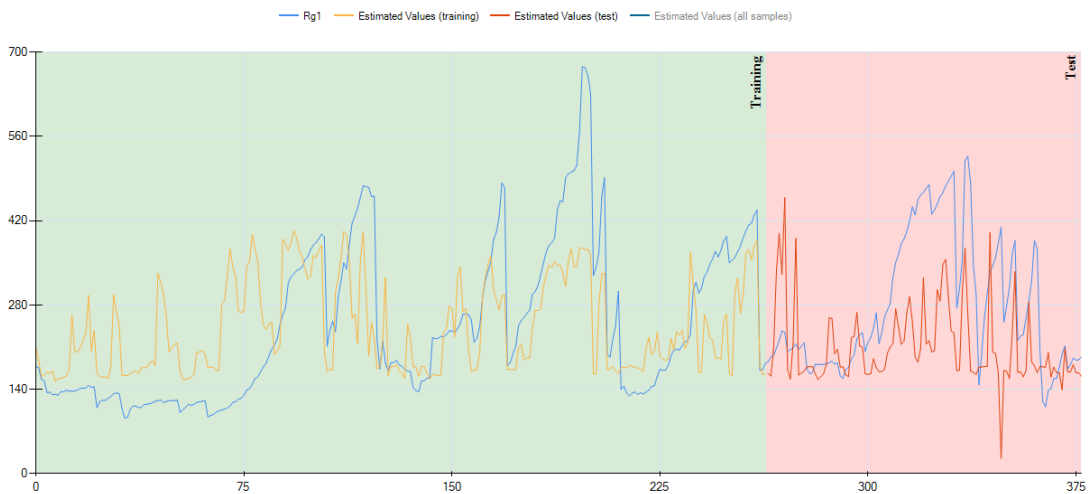
ws: wind speed

wd: wind direction

rd: rainfaill daily

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επιχειρήθηκε η εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή το ύψος της βροχόπτωσης της προηγούμενης από τη μέτρηση ημέρας, σε συνδυασμό με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τρεξιμάτων του γενετικού προγραμματισμού λαμβάνοντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές την ημερήσια βροχόπτωση, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, για το πρώτο ηλεκτρόδιο ενδεικτικά. Τα αποτελέσματα δεν ήταν αρκετά ικανοποιητικά, γι' αυτό και ακολούθησε η χρήση της αθροιστικής εβδομαδιαίας βροχόπτωσης ως μεταβλητής του προβλήματος.

Ηλεκτρόδιο 1 – Ημερήσια βροχόπτωση



Σχήμα 38. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών για την R1.



Σχήμα 39. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης και δοκιμής του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 1, rd).

Στα προηγούμενα, ο συντελεστής Pearson R^2 είναι για τις τιμές δοκιμής ίσος με 0,1323 και για τις τιμές εκπαίδευσης ίσος με 0,3581. Επίσης, το μέσο σχετικό σφάλμα (average relative error) είναι ίσο με 29,859% για τις τιμές δοκιμής και ίσο με 39,01% για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των τρεξιμάτων του γενετικού προγραμματισμού λαμβάνοντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές την αθροιστική εβδομαδιαία βροχόπτωση, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου.

Ηλεκτρόδιο 1

Για το πρώτο ηλεκτρόδιο και για τις εξής τιμές των παραμέτρων διαμόρφωσης του γενετικού προγραμματισμού έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πιθανότητα μετάλλαξης = 15%

Μέγεθος πληθυσμού=1000

Μέγιστο βάθος δένδρου=12

Μέγιστο μήκος δένδρου=150

Μέγιστος αριθμός γενεών=50

Μαθηματικός τύπος για την αντίσταση γείωσης R1:

$$R1 = \left(A * \frac{\left(\frac{(B + C)}{\log(c_{28})} + c_{29} \right)}{\frac{(rd * c_{30} + ws * c_{30})}{wd * c_{32}} * c_{34} + c_{35}} \right)$$

Όπου,

A=

$$\left(\frac{c_0 \cdot rd}{\exp((((c_1 \cdot rd + c_2 \cdot ws) + c_3 \cdot rd) + (c_4 \cdot rd + ((c_5 \cdot rd + c_6 \cdot ws) + c_7 \cdot rd) + c_8 \cdot ws))))} + \exp(c_9 \cdot rd) \right)$$

B=

$$\left(\frac{\frac{c_{10} \cdot ws}{(c_{11} \cdot rd + c_{12} \cdot ws)}}{(c_{13} + c_{14} \cdot ws)} + ((c_{15} \cdot rd + (c_{16} \cdot rd + c_{17} \cdot ws)) + \exp(c_{18} \cdot rd)) \right)$$

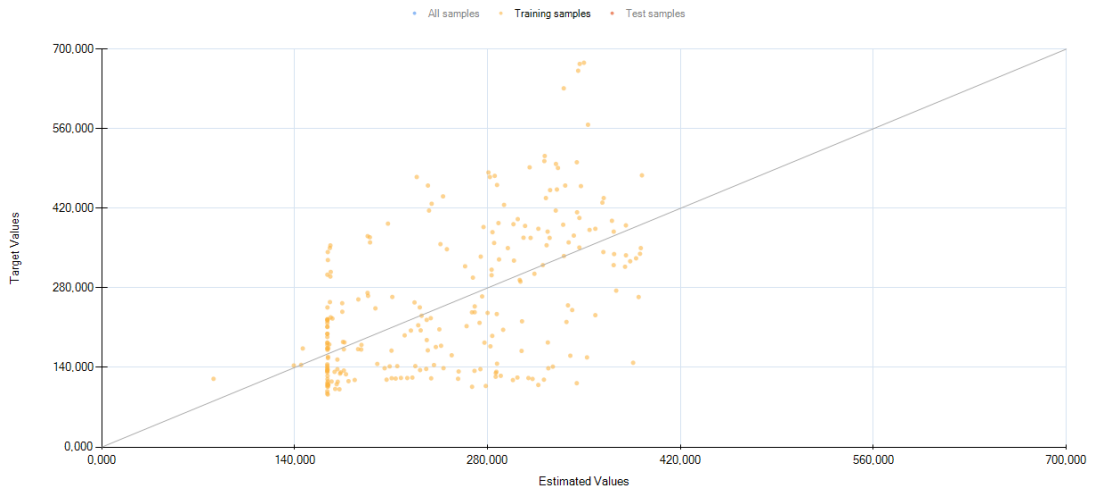
C=

$$\left(\frac{\frac{c_{19} \cdot ws}{c_{20} \cdot wd \cdot c_{21} \cdot wd}}{\exp(c_{22})} + (c_{23} \cdot rd + c_{24}) \cdot c_{25} \cdot (c_{26} \cdot rd + c_{27} \cdot ws) \right)$$

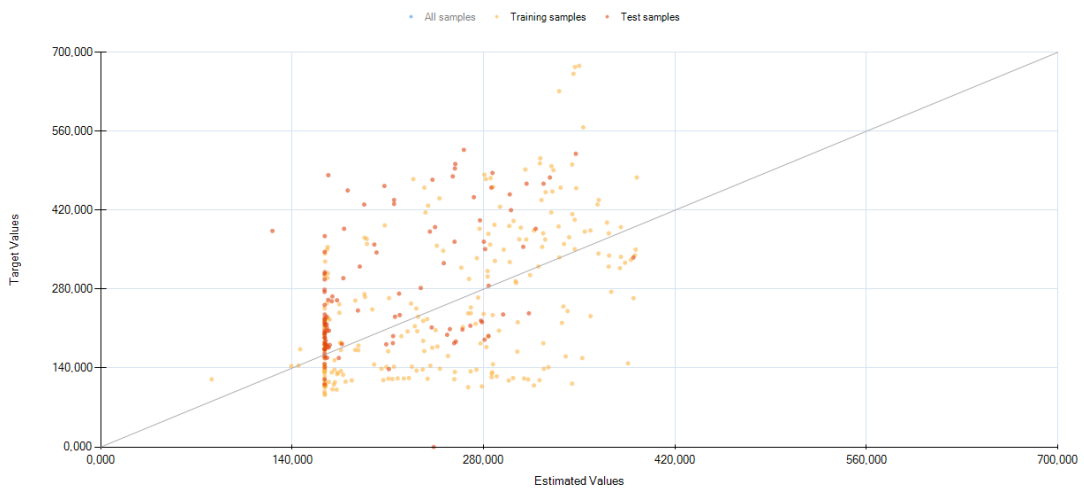
Όπου,

$c_0 = -0.34002$
 $c_1 = -0.67373$
 $c_2 = -0.8387$
 $c_3 = 2.9187$
 $c_4 = 2.9187$
 $c_5 = 2.9187$
 $c_6 = -0.8387$
 $c_7 = 2.9187$
 $c_8 = -0.8387$
 $c_9 = -0.34002$
 $c_{10} = 2.0139$
 $c_{11} = -0.67373$
 $c_{12} = -0.85781$
 $c_{13} = 11.453$
 $c_{14} = -0.79046$
 $c_{15} = -0.34002$
 $c_{16} = -0.67373$
 $c_{17} = -0.8387$

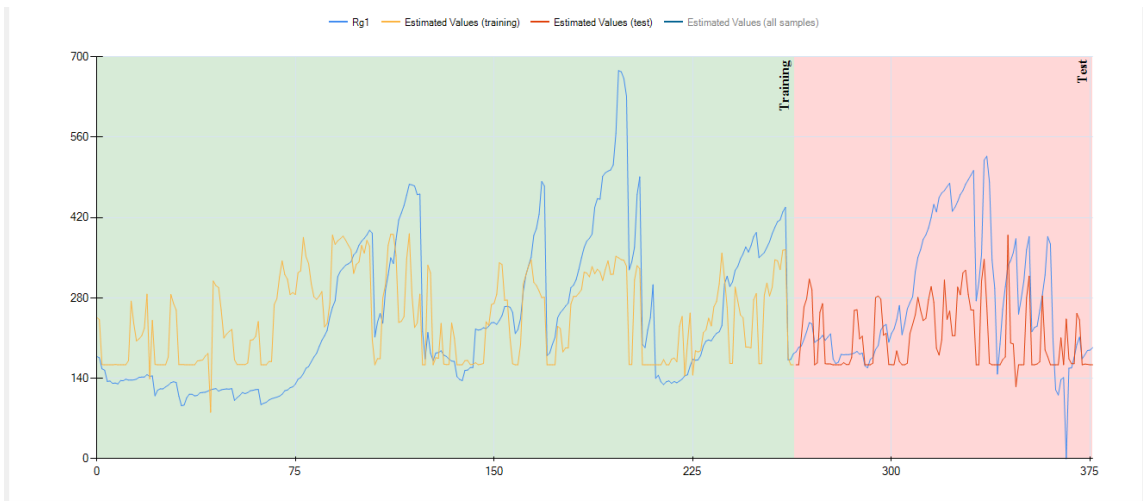
 $c_{18} = -0.34002$
 $c_{19} = 2.0139$
 $c_{20} = -0.12692$
 $c_{21} = 1.2975$
 $c_{22} = -7.1423$
 $c_{23} = -0.34002$
 $c_{24} = -7.8694$
 $c_{25} = 2.1419$
 $c_{26} = -0.67373$
 $c_{27} = -0.8387$
 $c_{28} = 19.709$
 $c_{29} = 7.1568$
 $c_{30} = -0.67373$
 $c_{31} = -0.8387$
 $c_{32} = 1.6478$
 $c_{33} = 17.149$
 $c_{34} = -151.11$
 $c_{35} = 163.62$



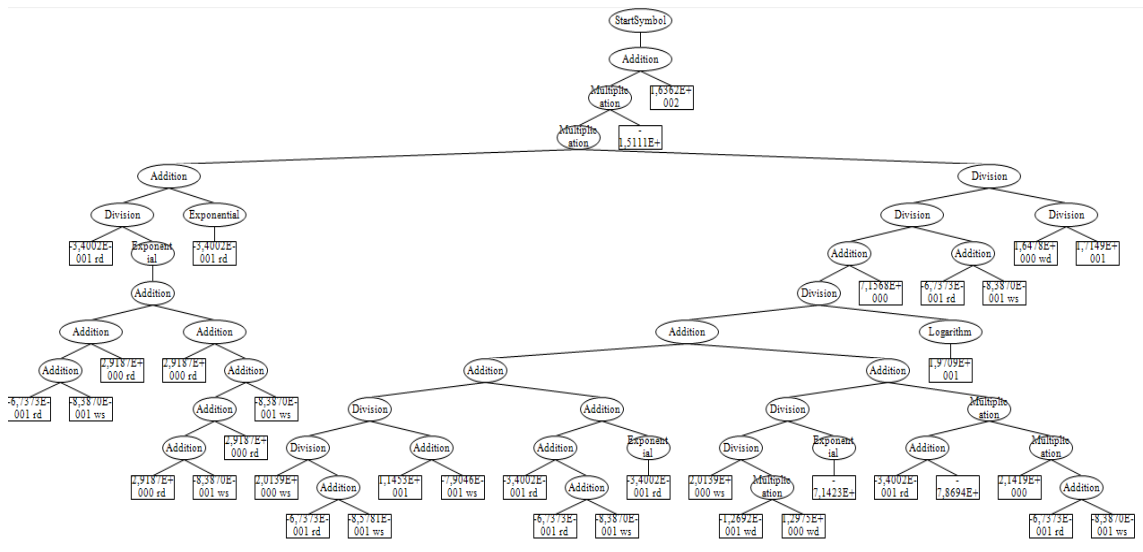
Σχήμα 40. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 1).



Σχήμα 41. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης και δοκιμής του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 1).



Σχήμα 42. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R1.



Σχήμα 43. Μοντέλο συμβολικής παλινδρόμησης R1.

Ηλεκτρόδιο 2

Για το δεύτερο ηλεκτρόδιο και για τις εξής τιμές των παραμέτρων διαμόρφωσης του γενετικού προγραμματισμού έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πιθανότητα μετάλλαξης = 15%

Μέγεθος πληθυσμού=3000

Μέγιστο βάθος δένδρου=20

Μέγιστο μήκος δένδρου=150

Μέγιστος αριθμός γενεών=150

Μαθηματικός τύπος για την αντίσταση γείωσης R2

$$R2 = (A((rw * c_6 + \tan \left(\sqrt{\frac{\log \left(\frac{1}{2} (B + (C + (c_{29} * ws)^{\text{round}(c_{30})}) \right)}{\exp(\sin(c_{31}))} \right)} \right) + c_{32} \\ * wd \left(\cos \left(c_{33} * rw - \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{D}{(E + F)}} + c_{53} \right) \right) \right) * c_{54} + c_{55})$$

Όπου,

A=

$$\left(\cos(\sin((c_0 - c_1 \cdot rw))) + \tan \left(\tan \left(\sqrt{\tan \left(\sqrt{\log \left(\frac{1}{2} \left((c_2 \cdot ws)^{\frac{1}{\text{round}(c_3)}} + (c_4 \cdot rw)^{\frac{1}{\text{round}(c_5)}} \right)} \right)} \right)} \right) \right) \right)$$

B=

$$\left(c_7 + \tan \left(\sqrt{\left((c_8 - c_9) + \tan \left(\left(c_{10} + \left((c_{11} \cdot ws)^{\text{round}(c_{12})} - \sqrt{c_{13} \cdot rw} \right) \right) \right) \right) \right)$$

C=

$$- \left(\left(\left(\frac{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\cos(\cos(c_{14} \cdot \text{ws})) + \cos\left(\frac{1}{2}(c_{15} \cdot \text{wd} + c_{16})\right)\right)}}{c_{17} \cdot \text{ws}} + c_{18} \right)}{\frac{(c_{19} \cdot \text{rw} + (c_{20})^2) \cdot \sqrt{(c_{21} \cdot \text{rw})^{\text{round}(c_{22})} \cdot (c_{23} \cdot \text{rw})^2}}{c_{24}}} - \sqrt{\frac{1}{2}(\sin((c_{25} - c_{26})) + \cos((c_{27} \cdot \text{ws} + c_{28} \cdot \text{wd}))} \right) \right) \right)$$

D=

$$\left(\exp(\cos(c_{34} \cdot \text{ws})) - (\log((c_{35} \cdot \text{rw} + c_{36} \cdot \text{rw})) \right)^2$$

E=

$$\left(\left(\left(c_{37} \cdot \text{rw} + \cos\left(\left((c_{38} \cdot \text{ws})^{\text{round}(c_{39})} + c_{40} \cdot \text{wd} \right)\right) \right) + \frac{1}{2} \left((c_{41} + c_{42} \cdot \text{rw}) + (\log(c_{43} \cdot \text{rw}))^2 \right) \right) \cdot \sqrt{(c_{44} \cdot \text{rw})^{\text{round}(c_{45})} \cdot (c_{46} \cdot \text{rw})^2 - \sqrt{c_{47} \cdot \text{ws}}} \right)$$

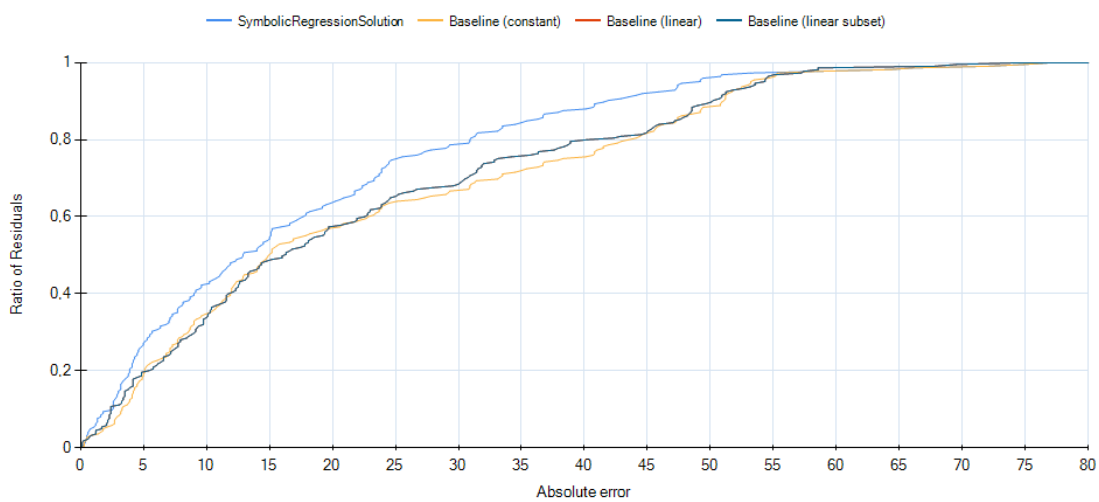
F=

$$\frac{(c_{48} \cdot \text{ws})^{\text{round}(c_{49})}}{\sqrt{(c_{50} \cdot \text{rw})^{\text{round}(c_{51})} \cdot (c_{52} \cdot \text{rw})^2}}$$

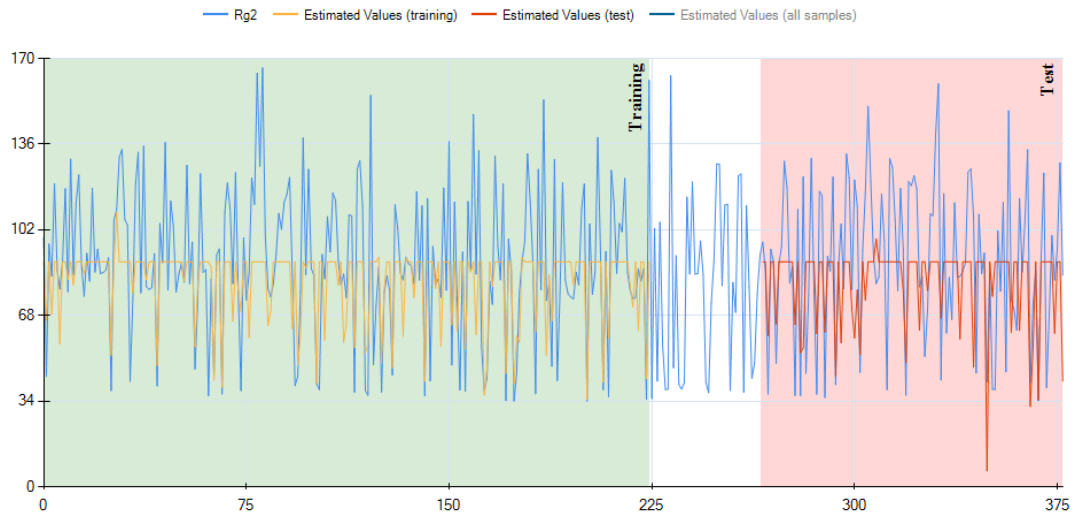
Όπου,

$c_0 =$	3.3413
$c_1 =$	1.3437
$c_2 =$	1.1877
$c_3 =$	- 15.617
$c_4 =$	0.92682
$c_5 =$	15.469
$c_6 =$	0.92682
$c_7 =$	- 24.17
$c_8 =$	3.3413
$c_9 =$	- 16.575
$c_{10} =$	11.075
$c_{11} =$	0.45276
$c_{12} =$	0.8132
$c_{13} =$	1.3169
$c_{14} =$	1.1877
$c_{15} =$	1.712
$c_{16} =$	- 5.8404
$c_{17} =$	- 1.6999
$c_{18} =$	11.014
$c_{19} =$	- 0.59506
$c_{20} =$	3.4262
$c_{21} =$	0.92682
$c_{22} =$	- 5.9048
$c_{23} =$	1.5589
$c_{24} =$	0.8132
$c_{25} =$	3.3413
$c_{26} =$	- 16.575
$c_{27} =$	- 1.6116
$c_{28} =$	1.1028
$c_{29} =$	1.8009
$c_{30} =$	8.7152
$c_{31} =$	16.894
$c_{32} =$	0.7438
$c_{33} =$	0.49424
$c_{34} =$	1.0005
$c_{35} =$	1.0484
$c_{36} =$	- 0.59622
$c_{37} =$	1.0484

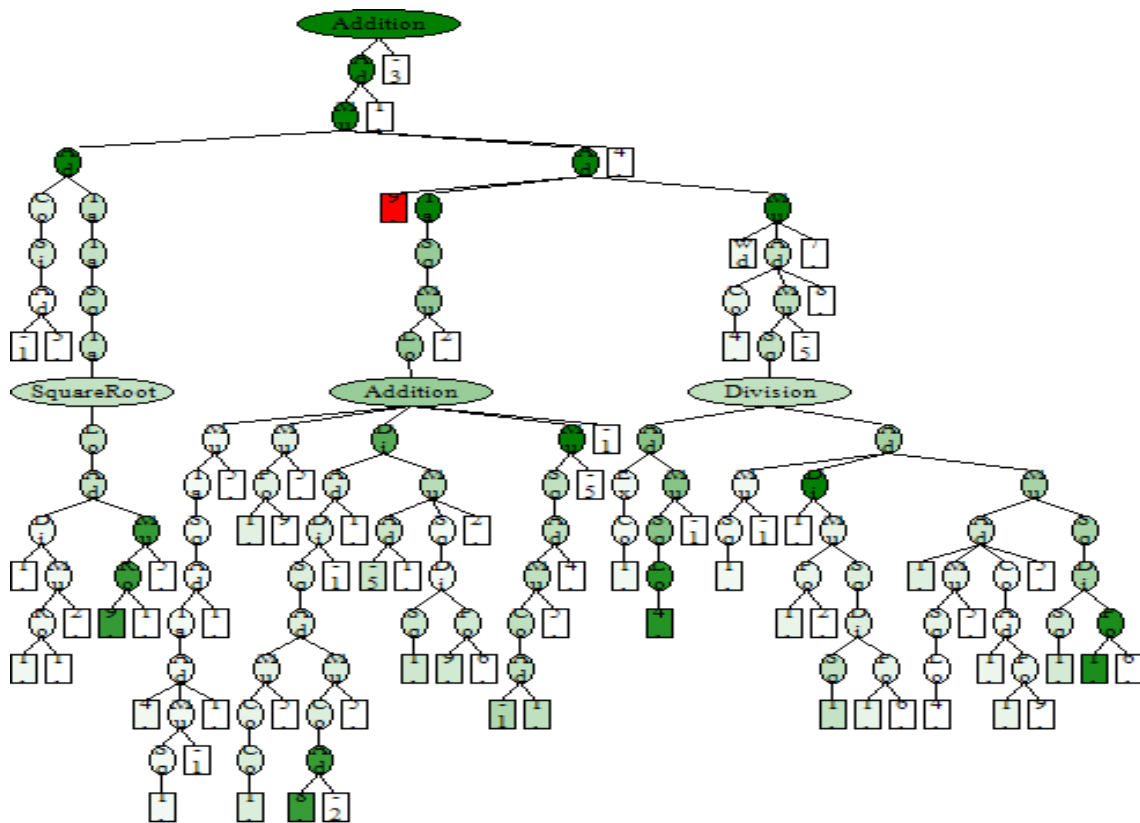
$c_{38} =$	1.8009
$c_{39} =$	8.7152
$c_{40} =$	1.1028
$c_{41} =$	10.938
$c_{42} =$	1.3169
$c_{43} =$	0.49424
$c_{44} =$	1.2073
$c_{45} =$	- 5.9048
$c_{46} =$	1.5589
$c_{47} =$	1.0196
$c_{48} =$	1.145
$c_{49} =$	- 19.945
$c_{50} =$	1.2073
$c_{51} =$	- 5.9048
$c_{52} =$	1.5506
$c_{53} =$	- 16.575
$c_{54} =$	0.045295
$c_{55} =$	19.609



Σχήμα 44. Error Characteristics curve (ηλεκτρόδιο 2).



Σχήμα 45. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R2.



Σχήμα 46. Απλοποιημένο μοντέλο συμβολικής παλινδρόμησης R2.

Ηλεκτρόδιο 3

Για το τρίτο ηλεκτρόδιο και για τις εξής τιμές των παραμέτρων διαμόρφωσης του γενετικού προγραμματισμού έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πιθανότητα μετάλλαξης = 10%

Μέγεθος πληθυσμού=3000

Μέγιστο βάθος δένδρου=20

Μέγιστο μήκος δένδρου=150

Μέγιστος αριθμός γενεών=50

Μαθηματικός τύπος της αντίστασης γείωσης R3

$$R3 = \left(\tan \left(\frac{A + B + C + D + E + F}{\frac{c_5}{c_6}} \right) * c_{57} + c_{58} \right)$$

Όπου,

A=

$$\frac{1}{2} \left(\cos(\cos(c_0 \cdot wd)) + \frac{1}{2} \left((c_1 \cdot rw)^{\frac{1}{\text{round}(c_2)}} + \left((c_3 \cdot rw)^{\frac{1}{\text{round}(c_4)}} + (c_5 \cdot rw \cdot c_6 + \cos(\sqrt{c_7 \cdot wd})) \right) \right) \right)$$

B=

$$\left(\left(\left(\left(\left(\cos \left(\left((c_8 \cdot ws)^{\frac{1}{\text{round}(c_9)}} \cdot \left(\frac{c_{10} \cdot ws \cdot c_{11} \cdot wd}{\sin(c_{12})} \right)^2 - \log \left(\exp \left(\frac{1}{2} (c_{13} \cdot rw + c_{14} \cdot wd) \right) \right) \right) \cdot c_{15} \right) + \log \left(c_{16} \cdot ws \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{c_{17} \cdot wd}{c_{18}} + c_{19} \cdot rw \cdot c_{20} \right) \right) \right) \right) \right)$$

C=

$$\log\left(c_{16} \cdot ws \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{c_{17} \cdot wd}{c_{18}} + c_{19} \cdot rw \cdot c_{20} \right)\right) + \cos\left(\left(\frac{c_{21} \cdot c_{22} \cdot wd}{\sin(c_{23})}\right)^2\right)$$

D=

$$\log\left(\sin\left(c_{24} \cdot ws \cdot \frac{1}{2} \left(\sin(c_{25}) + c_{26} \cdot rw \cdot \left(\frac{1}{2} \left(\frac{c_{27} \cdot wd}{c_{28}} + c_{29} \cdot c_{30} \right) + \exp(c_{31}) \right) - \frac{1}{2} (c_{32} \cdot wd + c_{33}) \right)\right)\right)$$

E=

$$\frac{1}{2} \cos\left(\left(\frac{c_{34} \cdot ws \cdot c_{35}}{\sin(c_{36})}\right)^2\right) + \frac{\exp(c_{37})}{\left(\frac{1}{(c_{38} \cdot wd)^{\text{round}(c_{39})}} - \cos(c_{40} \cdot rw) \cdot c_{41} \cdot ws \cdot \cos\left(\cos\left(\frac{1}{2} \left((c_{42} \cdot ws)^{\text{round}(c_{43})} + c_{44} \cdot wd \right)\right)\right)\right)}$$

F=

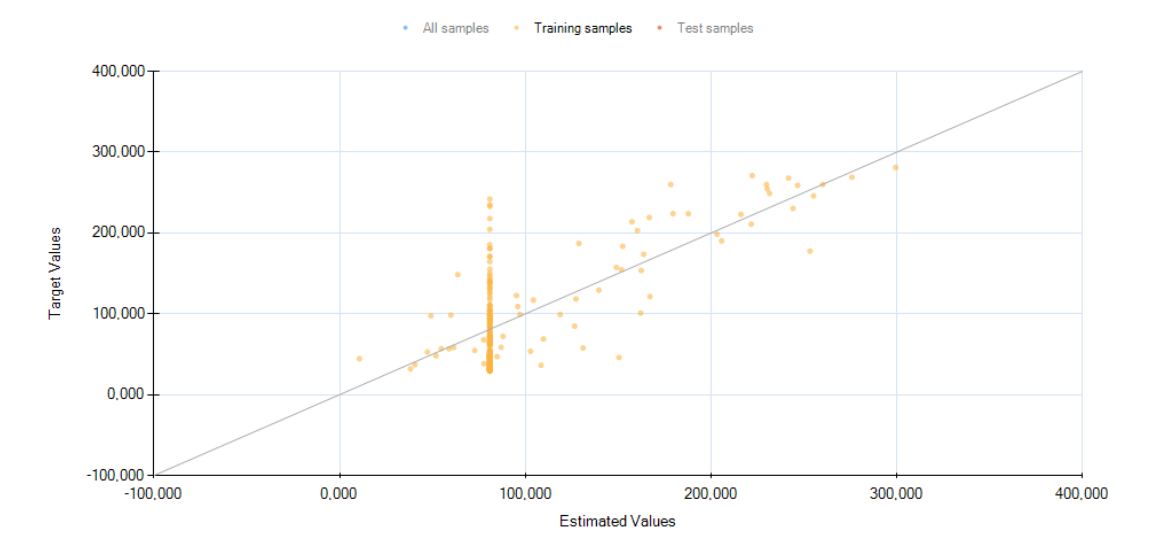
$$\left(\cos(c_{45} \cdot wd) + \cos\left(\sqrt{\frac{1}{(c_{46} \cdot ws)^{\text{round}(c_{47})}} \cdot (c_{48} \cdot wd)^2}\right)\right) + \cos\left(\sqrt{\sin\left(c_{49} \cdot ws \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{c_{50} \cdot wd}{c_{51}} + c_{52} \cdot rw \cdot c_{53} \cdot rw \cdot c_{54} \right)\right)}\right)$$

Όπου:

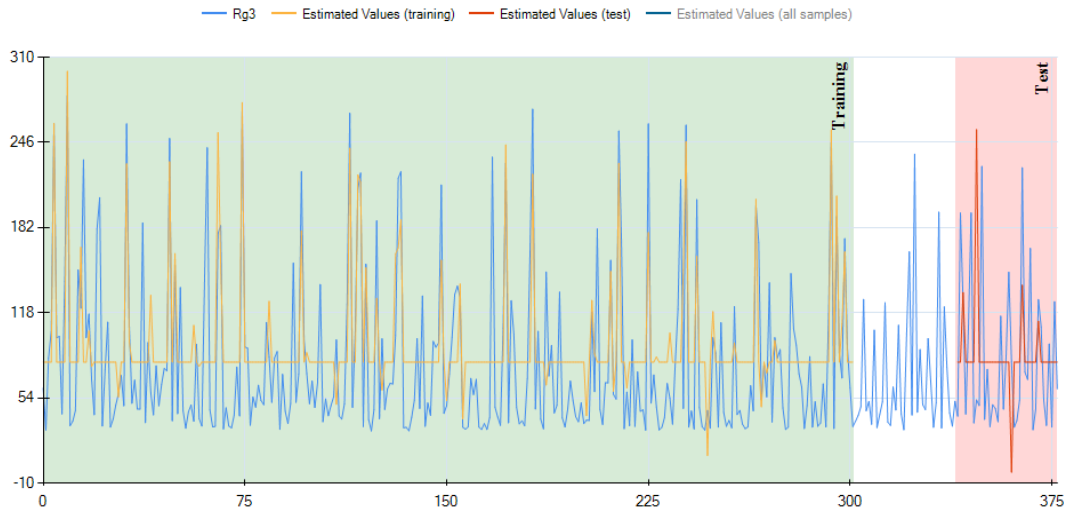
$c_0 =$	0.25446
$c_1 =$	0.019515
$c_2 =$	18.005
$c_3 =$	1.5451
$c_4 =$	15.064
$c_5 =$	0.90124
$c_6 =$	- 3.2617
$c_7 =$	3.3711
$c_8 =$	0.84019
$c_9 =$	5.4014
$c_{10} =$	- 0.48763
$c_{11} =$	3.3711
$c_{12} =$	- 5.2667
$c_{13} =$	1.7085
$c_{14} =$	2.1051
$c_{15} =$	15.064
$c_{16} =$	1.5843
$c_{17} =$	0.35747

$c_{18} =$	13.467
$c_{19} =$	0.90124
$c_{20} =$	- 3.2617
$c_{21} =$	2.5696
$c_{22} =$	0.59947
$c_{23} =$	- 5.2667
$c_{24} =$	1.5849
$c_{25} =$	8.0575
$c_{26} =$	0.90124
$c_{27} =$	0.35747
$c_{28} =$	14.14
$c_{29} =$	- 15.326
$c_{30} =$	- 3.1634
$c_{31} =$	10.061
$c_{32} =$	3.0601
$c_{33} =$	- 18.334
$c_{34} =$	- 0.48763
$c_{35} =$	- 3.1634
$c_{36} =$	- 5.2667
$c_{37} =$	- 1.1796
$c_{38} =$	0.25446
$c_{39} =$	- 18.334
$c_{40} =$	0.019515

c ₄₁ =	1.1846
c ₄₂ =	1.6332
c ₄₃ =	2.5696
c ₄₄ =	0.59947
c ₄₅ =	0.4875
c ₄₆ =	0.84019
c ₄₇ =	5.4014
c ₄₈ =	0.59947
c ₄₉ =	1.5849
c ₅₀ =	0.35747
c ₅₁ =	14.14
c ₅₂ =	0.90124
c ₅₃ =	0.90124
c ₅₄ =	- 3.2617
c ₅₅ =	- 15.783
c ₅₆ =	- 15.783
c ₅₇ =	- 30391.0
c ₅₈ =	216.32



Σχήμα 47. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 3).



Σχήμα 48. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R3.

Ηλεκτρόδιο 4

Για το τέταρτο ηλεκτρόδιο και για τις εξής τιμές των παραμέτρων διαμόρφωσης του γενετικού προγραμματισμού έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πιθανότητα μετάλλαξης = 10%

Μέγεθος πληθυσμού=3000

Μέγιστο βάθος δένδρου=20

Μέγιστο μήκος δένδρου=150

Μέγιστος αριθμός γενεών=50

Μαθηματικός τύπος για την αντίσταση γείωσης R4

$$R4 = \left(\exp \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{A+B}}{\frac{1}{2}((c_{16} * rw)^{round(c_{17})} + \sqrt{C+D})} + E * F \right) \right) \right) c_{47} + c_{48}$$

Όπου,

A=

$$\frac{1}{2} \left(\cos \left(\sqrt{\frac{1}{2} \left(\cos \left(\exp \left(\cos \left(\left(c_0 \cdot wd - \frac{\exp \left(\left((\tan(c_1 \cdot wd))^2 - ((c_2 \cdot rw)^{\text{round}(c_3)} - c_4 \cdot ws) \right)}{(c_5)^2} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) + c_6 \right) \right)$$

B=

$$\frac{1}{2} \left(\cos \left(\exp \left(\cos \left(\left(\left(\frac{1}{2} ((c_7 \cdot ws - c_8 \cdot rw) + c_9) + c_{10} \cdot rw \right) - \frac{c_{11} \cdot wd \cdot c_{12} \cdot rw}{(\exp((c_{13} \cdot ws)^{\text{round}(c_{14})}))^2} \right) \right) \right) \right) + c_{15} \cdot rw \right)$$

C=

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left(\cos \left(\exp \left(\cos \left(\left(\frac{1}{2} \left(\tan \left(\frac{\sqrt{c_{18}}}{c_{19} \cdot ws} \right) + \sqrt{c_{20} \cdot ws} \right) - \frac{c_{21} \cdot wd \cdot c_{22}}{\cos \left((c_{23} \cdot rw - c_{24}) + \exp((c_{25} \cdot ws)^{\text{round}(c_{26})}) \right) \right) \right) \right) \right) \right)$$

D=

$$\cdot \log \left(\left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{\exp(\exp(\tan(c_{27} \cdot rw)))} + \sqrt{c_{28}} \right) - \frac{c_{29} \cdot wd \cdot c_{30}}{(\log((c_{31} \cdot rw)^2))^2} \right) \right)$$

E=

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left(\cos \left(\exp \left(\cos \left(\left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{\exp((c_{32} \cdot rw)^2)} + c_{33} \right) - \frac{c_{34} \cdot wd \cdot c_{35} \cdot c_{36}}{(\log(\tan((c_{37} \cdot rw)^2)))^2} \right) \right) \right) \right) + c_{38} \cdot rw \right)$$

F=

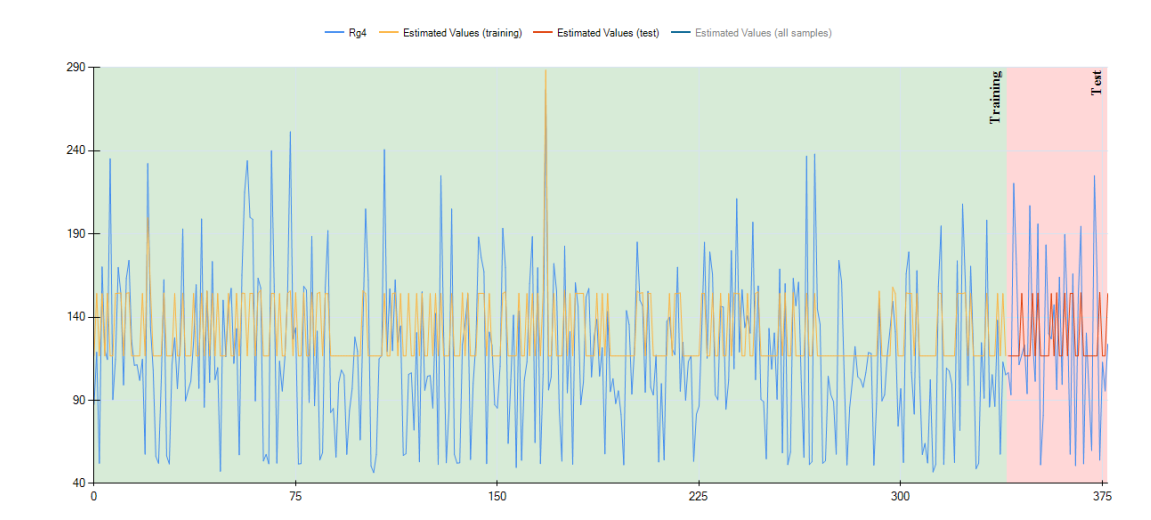
$$\left((c_{39} \cdot rw - c_{40} \cdot ws) + \frac{1}{2} \left(c_{41} + \sqrt{\frac{1}{2} \left(\cos \left(\exp \left(\cos \left(\left(c_{42} \cdot wd - \frac{\tan \left(\frac{\sqrt{c_{43}}}{c_{44} \cdot ws} \right)}{c_{45}} \right) \right) \right) \right) + c_{46} \right) \right) \right)^2$$

Όπου,

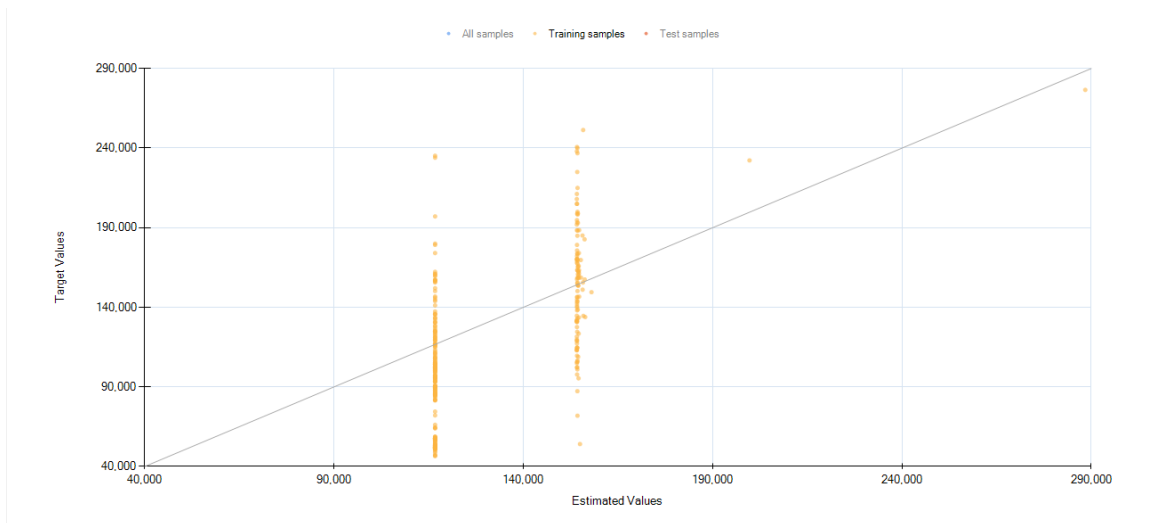
$c_0 = 2.4148$
 $c_1 = 0.75406$
 $c_2 = 1.2256$
 $c_3 = 9.0799$
 $c_4 = 0.7524$
 $c_5 = -4.7606$
 $c_6 = 0.85099$
 $c_7 = -0.049704$
 $c_8 = -0.24245$
 $c_9 = 10.264$
 $c_{10} = 0.066825$
 $c_{11} = 0.75406$
 $c_{12} = 0.19524$
 $c_{13} = 0.8359$
 $c_{14} = -12.579$
 $c_{15} = 0.19524$
 $c_{16} = -0.24245$

 $c_{17} = -2.7321$
 $c_{18} = 13.344$
 $c_{19} = 2.1375$
 $c_{20} = 1.518$
 $c_{21} = 0.75406$
 $c_{22} = -5.1839$
 $c_{23} = 1.7629$
 $c_{24} = -12.579$
 $c_{25} = 0.8359$
 $c_{26} = -15.493$
 $c_{27} = 2.1205$
 $c_{28} = 7.2629$
 $c_{29} = 0.75406$
 $c_{30} = -8.4551$
 $c_{31} = 1.2256$
 $c_{32} = 2.1205$
 $c_{33} = 7.2629$
 $c_{34} = 0.75406$

$c_{34} = 0.75406$
 $c_{35} = 1.2969$
 $c_{36} = 1.2969$
 $c_{37} = 1.3231$
 $c_{38} = 1.2373$
 $c_{39} = 1.2373$
 $c_{40} = 1.4101$
 $c_{41} = -4.9028$
 $c_{42} = 2.4148$
 $c_{43} = 13.344$
 $c_{44} = 2.1375$
 $c_{45} = 13.344$
 $c_{46} = 0.85099$
 $c_{47} = 0.0037629$
 $c_{48} = 154.12$



Σχήμα 49. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R4.



Σχήμα 50. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 4).

Ηλεκτρόδιο 5

Για το πέμπτο ηλεκτρόδιο και για τις εξής τιμές των παραμέτρων διαμόρφωσης του γενετικού προγραμματισμού έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πιθανότητα μετάλλαξης = 10%

Μέγεθος πληθυσμού=3000

Μέγιστο βάθος δένδρου=20

Μέγιστο μήκος δένδρου=150

Μέγιστος αριθμός γενεών=50

Μαθηματικός τύπος για την αντίσταση γείωσης R5

$$R5 = \left(\frac{A}{\left(B * C + \frac{1}{2} (D * E + \sin(c_{44} * ws)) \right)} * c_{45} + c_{46} \right)$$

A=

$$\cos\left(\cos\left(\tan\left(\left(\log\left(\left(\left(\sin\left(\tan\left(\exp\left(\frac{1}{2}(c_0 \cdot wd + c_1 \cdot wd)\right)\right)\right)\right)\right)\right)\right)\right)\right)\right) + \log\left(\cos\left(\tan\left((c_2 \cdot wd)^{\text{round}(c_3)}\right)\right)\right)\right)^2 - \exp(c_4 \cdot wd)\right)\right)\right)$$

B=

$$\log\left(\sin\left(\frac{\frac{1}{2}(c_5 \cdot rw + \frac{1}{2}(c_6 \cdot ws + \left(\log\left(\frac{c_7 \cdot wd}{\cos(c_8)}\right) - \sin(\sqrt{c_9})\right))\right)}{\frac{1}{2}(\sin(c_{10} \cdot ws) + \sin\left(\tan\left(\exp\left(\frac{1}{2}(c_{11} \cdot wd + \cos(c_{12} \cdot ws)\right)\right)\right))\right)}\right)\right) \cdot c_{13} \cdot rw$$

C=

$$\tan\left(\left(\sqrt{\cos(\tan((c_{14} \cdot wd)^{\text{round}(c_{15})})\right)} + \sqrt{\exp\left(\left(\cos(\tan((c_{16} \cdot wd)^{\text{round}(c_{17})})\right) - \tan\left(\exp\left(\frac{1}{2}\left(c_{18} \cdot wd + \frac{(c_{19} - \frac{(c_{20} + c_{21} \cdot wd)}{c_{22} \cdot ws \cdot c_{23}})}{(\tan((c_{24} \cdot wd - \exp(c_{25} \cdot wd))) + c_{26} \cdot rw)\right)\right)\right)\right)\right)\right)\right)$$

D=

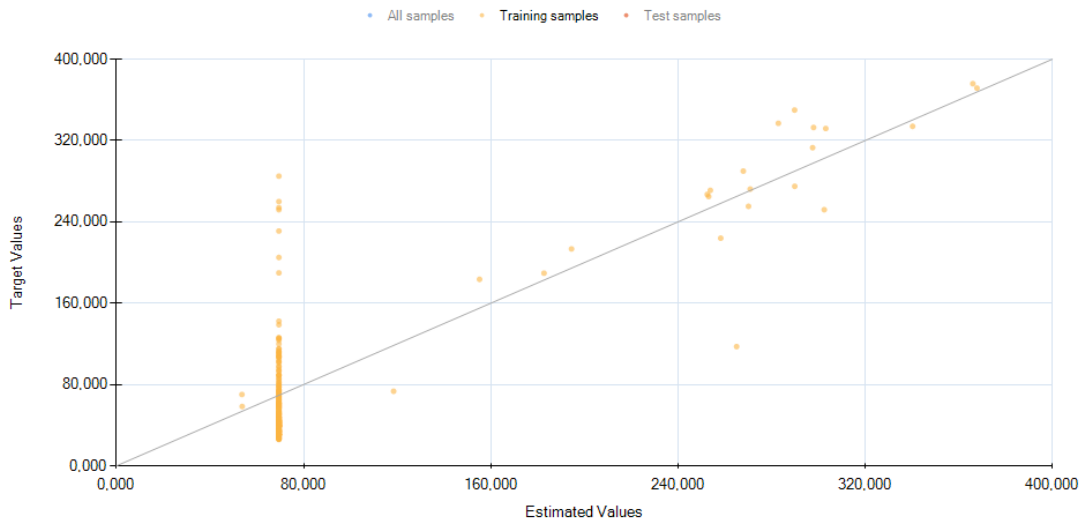
$$\frac{\frac{\frac{c_{27} \cdot rw}{c_{28}}}{(c_{29} \cdot ws + c_{30} \cdot ws)}}{\left(\tan\left(\exp\left(\frac{1}{2}(c_{31} \cdot wd + \cos(c_{32} \cdot ws)\right)\right)\right) + c_{33}}\right) \cdot \exp\left(\left(\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}(c_{34} \cdot wd + \cos(\sqrt{\cos(c_{35} \cdot rw)})\right) + c_{36} \cdot wd\right)} - c_{37}\right)\right)$$

E=

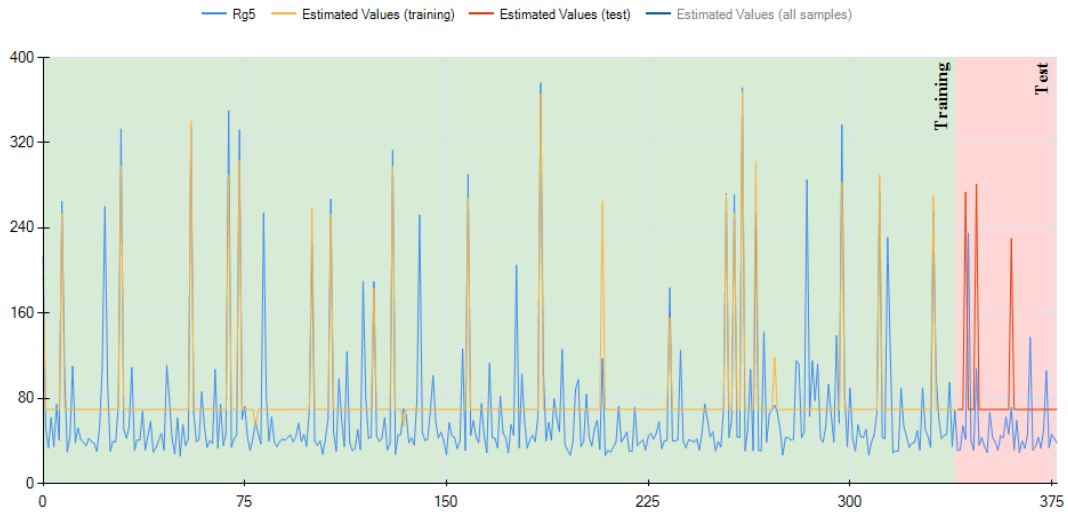
$$\tan\left(\tan\left(\log\left(\sin\left(\sin\left(\sin\left(\frac{1}{2}(c_{38} \cdot rw - \sin(\log((c_{39} \cdot c_{40} \cdot wd - c_{41} \cdot wd))))\right)\right)\right)\right)\right) + \left(\tan\left(\exp\left(\frac{1}{2}(c_{42} \cdot wd + \cos(c_{43} \cdot ws)\right)\right)\right)\right)^2\right)\right)\right)\right)$$

$c_0 =$	0.87417
$c_1 =$	- 0.029063
$c_2 =$	1.2516
$c_3 =$	8.7632
$c_4 =$	0.35087
$c_5 =$	1.0544
$c_6 =$	- 0.53754
$c_7 =$	- 0.029063
$c_8 =$	3.0616
$c_9 =$	12.334
$c_{10} =$	0.37508
$c_{11} =$	0.87417
$c_{12} =$	1.2063
$c_{13} =$	1.3006
$c_{14} =$	1.2516
$c_{15} =$	8.7632
$c_{16} =$	1.2516
$c_{17} =$	8.7632
$c_{18} =$	0.87417
$c_{19} =$	19.378
$c_{20} =$	8.1545
$c_{21} =$	3.869
$c_{22} =$	2.3103
$c_{23} =$	6.1008
$c_{24} =$	1.3939
$c_{25} =$	0.35087
$c_{26} =$	0.4661
$c_{27} =$	0.4661
$c_{28} =$	- 18.474
$c_{29} =$	- 0.53754
$c_{30} =$	1.4047
$c_{31} =$	0.35087
$c_{32} =$	1.2063
$c_{33} =$	8.7632
$c_{34} =$	0.87417
$c_{35} =$	0.6494
$c_{36} =$	0.87417

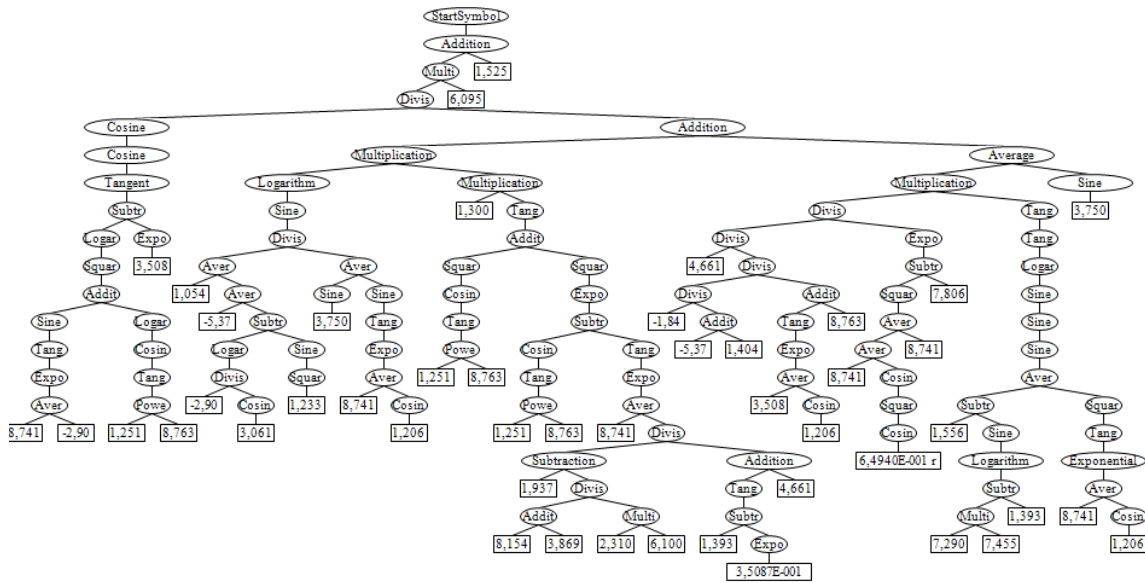
$c_{37} = 7.8065$
 $c_{38} = 1.5564$
 $c_{39} = 7.2909$
 $c_{40} = 0.74558$
 $c_{41} = 1.3939$
 $c_{42} = 0.87417$
 $c_{43} = 1.2063$
 $c_{44} = 0.37508$
 $c_{45} = 60.958$
 $c_{46} = 152.58$



Σχήμα 51. Διάγραμμα διασποράς για τις τιμές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (ηλεκτρόδιο 5).



Σχήμα 52. Πραγματικές τιμές και προβλέψεις τιμών της R5.



Σχήμα 53. Μοντέλο συμβολικής παλινδρόμησης R5.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί συμβολή στη μελέτη συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά εδάφους. Βασικός σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι η διοχέτευση των υψηλών ρευμάτων σφάλματος στη γη με τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια για τους ανθρώπους και τις εγκαταστάσεις. Τα βελτιωτικά υλικά εδάφους χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και τη μείωση της αντίστασης γείωσης. Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο τμήματα: το πρώτο είναι η πειραματική μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους και της αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά εδάφους και το δεύτερο η χρήση γενετικού προγραμματισμού, στο πλαίσιο της συμβολικής παλινδρόμησης, για την πρόβλεψη και εκτίμηση των τιμών της αντίστασης γείωσης συναρτήσει μεταβλητών σχετικών με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της εγκατάστασης.

Σχετικά με το πρώτο σκέλος της παρούσας εργασίας, έγιναν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης εδάφους και της αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά επί επτά μήνες. Καταγράφηκε η μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών με την πάροδο του χρόνου. Οι πειραματικές αυτές μετρήσεις δεν αποτελούν από μόνες τους ασφαλές δείγμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την απόδοση των βελτιωτικών υλικών. Ωστόσο, συμβάλλουν στη δημιουργία μίας μεγάλης και αξιοποιήσιμης βάσης ιστορικών δεδομένων, απαραίτητων για τη διερεύνηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης. Αυτή η διερεύνηση, με τη σειρά της, παρέχει συμπεράσματα για την απόδοση των βελτιωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται και οδηγεί, τελικά, στην κατασκευή ασφαλέστερων και αποδοτικότερων συστημάτων γείωσης, ζωτικής σημασίας για ανθρώπους και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Οι μέχρι τώρα αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία βασίζονται ως επί το πλείστον σε μικρής διάρκειας πειραματικές μετρήσεις, λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης αντίστοιχων μετρήσεων, και συχνά οδηγούν σε αντικρουόμενα συμπεράσματα. Για αυτόν τον λόγο είναι σημαντικό να εμπλουτίζεται συνεχώς η βάση δεδομένων και προς αυτόν τον σκοπό διενεργήθηκε και το πειραματικό κομμάτι της παρούσας εργασίας. Οι μετρήσεις αυτές προστίθενται σε ήδη υπάρχουσες προηγούμενων ερευνητών, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση του προβλήματος του γενετικού προγραμματισμού που ακολούθησε.

Στη συνέχεια, έγινε χρήση γενετικού προγραμματισμού στο πλαίσιο της συμβολικής παλινδρόμησης για τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης συναρτήσει καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή της εγκατάστασης. Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση της βροχόπτωσης στην τιμή της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων με χρονικά «παράθυρα» μίας και επτά ημερών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι (αθροιστικές) εβδομαδιαίες τιμές της βροχόπτωσης έδωσαν τα ακριβέστερα μοντέλα. Καθώς η κατακράτηση υγρασίας γύρω από τα εξεταζόμενα ηλεκτρόδια αποτελεί τον κύριο παράγοντα μεταβολής της απόδοσης των βελτιωτικών υλικών, ήταν φανερό πως η χρήση της αθροιστικής εβδομαδιαίας βροχόπτωσης προσδιορίζει πιο κατάλληλα της μεταβολή αυτή της υγρασίας. Όμως, τα αποτελέσματα κρίθηκε πως χρειάζονταν περαιτέρω βελτίωση. Έτσι, προέκυψαν ακόμα καλύτερες προβλέψεις όταν ακολούθησε η διερεύνηση της μεταβολής της αντίστασης γείωσης συναρτήσει δύο ακόμα μεταβλητών, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Η βροχόπτωση, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου επηρεάζουν σε κρίσιμο βαθμό την υγρασία του εδάφους τοπικά και γύρω από τα ηλεκτρόδια και, επομένως, την απόδοση των βελτιωτικών υλικών γείωσης.

Μεταξύ των αντιστάσεων γείωσης (ηλεκτροδίων) που μελετήθηκαν, κάποιες έδωσαν πιο ικανοποιητικά μοντέλα πρόβλεψης, κάτι που ήταν αναμενόμενο μιας και κάθε ηλεκτρόδιο περιβάλλεται από διαφορετικό βελτιωτικό υλικό και επιδρά διαφορετικά στην τιμή της αντίστασης γείωσης με την πάροδο του χρόνου. Η μηχανική μάθηση και συγκεκριμένα ο γενετικός προγραμματισμός, χρησιμοποιήθηκαν για να προσφέρουν πρωτότυπες λύσεις που τα υπάρχοντα ντετερμινιστικά μοντέλα αδυνατούν να προσδιορίσουν. Έτσι, προέκυψαν ως αποτέλεσμα μαθηματικοί τύποι που δίνουν την αντίσταση γείωσης όταν είναι γνωστές οι καιρικές συνθήκες (βροχόπτωση, ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου) στην περιοχή μιας εγκατάστασης. Κάθε ενδιαφερόμενος μπορεί να στηριχθεί στα επιστημονικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, ώστε να εκτιμήσει την τιμή της αντίστασης γείωσης και να επιλέξει το καταλληλότερο βελτιωτικό υλικό κατά περίπτωση με βάση τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του. Παρατηρείται πως στα ηλεκτρόδια 3, 4 και 5 το μοντέλο δίνει σταθερή τιμή πρόβλεψης για μεγάλα χρονικά διαστήματα, φαινόμενο το οποίο εξηγείται πιθανώς από την μεγάλη και συχνή εναλλαγή των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών ταχύτητας και, κυρίως, κατεύθυνσης του ανέμου. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αφήνει ανοιχτό το πεδίο περαιτέρω μελέτης της συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων με τη χρήση περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών σχετικών με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της εγκατάστασης.

5.2 Η επόμενη μέρα

Για την επέκταση των μεθοδολογιών και συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας προτείνονται οι ακόλουθες εισηγήσεις:

- Πραγματοποίηση παρόμοιας πειραματικής διαδικασίας για περισσότερα και διαφορετικά βελτιωτικά υλικά. Μία εκτενής βάση δεδομένων με μετρήσεις αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε πληθώρα βελτιωτικών υλικών θα δώσει τη δυνατότητα ερευνητικών εργασιών παρόμοιων με την παρούσα, παρέχοντας ευρύτερο φάσμα επιλογών υλικών στον ενδιαφερόμενο μηχανικό, ανάλογα με τις συνθήκες στην περιοχή εγκατάστασης του συστήματος γείωσης.
- Η προσθήκη περισσότερων μεταβλητών σχετικών με τις καιρικές συνθήκες στο μοντέλο του γενετικού προγραμματισμού πιθανώς να οδηγήσει σε καλύτερες προβλέψεις και ακριβέστερα αποτελέσματα. Παράγοντες όπως η ένταση και η διάρκεια της ηλιοφάνειας, η θερμοκρασία του αέρα και η βαρομετρική πίεση αξίζει να εξεταστούν καθώς επηρεάζουν την κατακράτηση υγρασίας από το έδαφος. Το φαινόμενο των σταθερών τιμών πρόβλεψης για μεγάλα χρονικά διαστήματα που παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία πιθανώς να εξαλειφθεί με την προσθήκη περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών.
- Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της μεθόδου γενετικού προγραμματισμού στο χώρο της συμβολικής παλινδρόμησης. Η χρήση γενετικού προγραμματισμού σε διαφορετικό πλαίσιο ή η χρήση άλλων μεθόδων γενετικών αλγορίθμων γενικότερα αξίζει να μελετηθεί.
- Τέλος, μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς θα βοηθούσε ιδιαίτερα τη διενέργεια αντίστοιχων πειραμάτων, καθώς δίνει τη δυνατότητα μεγάλου αριθμού «τρεξιμάτων» και άρα πολλών δοκιμών και αλλαγών σε εξεταζόμενες μεταβλητές, μοντέλα και λοιπά χαρακτηριστικά του γενετικού προγραμματισμού. Επίσης, επιτρέπει την πραγματοποίηση «τρεξιμάτων» παράλληλα, κάτι που συμβάλει σημαντικά στη μείωση της χρονικής διάρκειας του πειράματος. Στην παρούσα εργασία υπήρχαν περιορισμένα υπολογιστικά μέσα διαθέσιμα.

Παράρτημα

Πειραματικές μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους και αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά γείωσης.

Ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

Ημερομηνία	a=2m	a=4m	a=8m	a=12m	a=16m
10/5/2017	249,82	208,60	162,36	189,25	231,22
12/5/2017	93,12	164,37	116,11	175,68	228,21
15/5/2017	148,41	172,41	142,25	190,76	233,23
16/5/2017	256,35	216,64	164,37	137,53	243,28
19/5/2017	224,18	199,55	164,87	659,73	236,25
2/6/2017	215,26	202,32	165,37	193,77	228,21
6/6/2017	126,67	207,35	166,38	196,04	228,21
9/6/2017	128,30	212,37	166,88	127,42	231,22
10/6/2017	126,67	207,35	166,38	196,04	228,21
12/6/2017	233,99	215,89	162,86	161,35	227,20
19/6/2017	333,26	312,90	211,62	516,48	290,53
21/6/2017	284,00	226,45	222,68	423,74	255,35
23/6/2017	237,76	208,85	189,50	159,84	218,15
30/6/2017	261,38	209,61	173,42	163,61	222,17
3/7/2017	241,27	204,08	171,41	216,39	226,19
4/7/2017	253,84	211,62	140,74	213,38	243,28
6/7/2017	252,58	210,86	151,30	214,88	238,26
7/7/2017	219,79	205,33	163,36	167,38	218,15
10/7/2017	228,71	208,60	166,38	175,68	219,16
29/8/2017	264,65	207,85	166,88	166,63	218,15
31/8/2017	264,40	209,10	169,90	166,63	220,16
18/9/2017	261,38	210,11	173,92	164,37	223,18
20/9/2017	265,40	208,35	168,39	166,63	222,17
22/9/2017	253,84	214,13	153,81	214,88	223,18
25/9/2017	248,81	222,42	133,20	281,99	227,20
27/9/2017	253,46	210,11	166,88	167,38	218,15
29/9/2017	281,49	227,20	183,97	266,91	227,20
2/10/2017	245,04	207,09	196,04	211,87	253,34
4/10/2017	258,87	378,50	210,11	280,48	252,33
6/10/2017	517,73	229,21	196,54	211,87	253,34
9/10/2017	256,48	222,42	166,88	208,85	250,32
11/10/2017	249,32	225,44	170,40	193,77	251,33
13/10/2017	258,87	231,47	163,36	207,35	247,31
16/10/2017	272,69	227,20	165,37	219,41	253,34

18/10/2017	268,92	212,87	167,89	213,38	253,34
20/10/2017	555,43	404,89	203,58	216,39	252,33
23/10/2017	547,89	408,91	206,59	216,39	252,33
25/10/2017	531,56	414,19	208,10	220,16	253,34
27/10/2017	542,87	414,69	209,61	217,90	262,39
6/11/2017	628,32	443,59	211,12	288,02	285,51
9/11/2017	608,21	407,65	207,09	260,88	282,49
14/11/2017	542,87	417,20	246,30	310,64	293,55
15/11/2017	535,33	418,21	213,63	291,79	275,45
27/11/2017	485,06	380,01	204,08	223,93	259,37
29/11/2017	503,91	412,18	211,12	213,38	262,39
1/12/2017	529,04	437,31	207,09	220,16	268,42
4/12/2017	564,23	422,23	209,61	216,39	257,36
8/12/2017	580,57	405,14	210,11	244,29	282,49
13/12/2017	571,77	412,18	211,62	223,93	271,43
15/12/2017	542,87	437,31	216,14	288,02	259,37

Αντίσταση γείωσης σε Ω

Ημερομηνία	G1	G2	G3	G4	G5
10/5/2017	277,5	117,6	112,9	122,7	74,1
12/5/2017	298,2	124	202	194,1	73,9
15/5/2017	284,7	197,4	194,9	124,4	75,2
16/5/2017	356,5	146,72	110,6	197,4	81,47
19/5/2017	302,87	62,48	26,2	91,7	59,6
2/6/2017	287,71	99,7	102,48	174,12	66,7
6/6/2017	295,48	60,2	78,4	119,5	72,48
9/6/2017	324,4	114,6	102,9	142,18	82,5
10/6/2017	266,2	60,2	78,4	119	72,48
12/6/2017	287,68	117,9	204	24,9	68,2
19/6/2017	300,2	121,9	108,4	136,4	82,8
21/6/2017	296,3	117,2	106,75	147,4	86,4
23/6/2017	322,9	135,5	95,6	166,3	67,2
30/6/2017	279,6	123,4	88,7	155,4	65,7
3/7/2017	286,88	112,7	98,1	136,2	78,7
4/7/2017	312,8	127,4	103,92	164,4	118,3
6/7/2017	307,9	126,8	107,3	167,2	120,4
7/7/2017	263,2	118,4	98,45	158,21	88,4
10/7/2017	286,7	124,7	101,3	147,6	91,4
29/8/2017	284,4	131,9	124,8	143,1	77,2
31/8/2017	284	128	126,1	144,2	75,9

18/9/2017	281,6	132,4	122,7	146,7	78,7
20/9/2017	277,42	135,4	103,3	129,6	82,4
22/9/2017	259,7	135,8	122,6	124,7	85,35
25/9/2017	248,5	136,2	144,6	122,4	89,4
27/9/2017	287,4	133,3	129,16	131,4	117,2
29/9/2017	279,1	132,4	109,6	117,45	77,5
2/10/2017	288,4	124,17	112,9	148,9	154,7
4/10/2017	307	86,2	102,4	166,2	170,4
6/10/2017	306,4	98,5	102,6	180,66	176,2
9/10/2017	295,1	114,4	110,3	182,4	179,7
11/10/2017	307,1	139,22	106,7	186,2	183,6
13/10/2017	302,48	137,5	111,8	177	172,4
16/10/2017	318	142,4	110,75	171,42	166,8
18/10/2017	311,2	118,7	126,9	182,6	180,2
20/10/2017	308,9	119,8	123,4	182,8	181,2
23/10/2017	319,44	132,4	119,7	184,72	180,9
25/10/2017	327,1	126,3	127,44	187,5	183,1
27/10/2017	362,4	149,5	144,2	210,3	184,6
6/11/2017	410,1	147,6	142,7	218,6	195,6
9/11/2017	670	158,4	146,9	136,2	188,9
14/11/2017	420	142,7	140,1	127,2	141,6
15/11/2017	472	151,1	142,7	129,8	146,2
27/11/2017	440,3	119,2	107,4	181,2	162,4
29/11/2017	452	129,42	125,5	166,3	178,4
1/12/2017	440	131	143,7	171	172,9
4/12/2017	464,5	122,7	133,2	176,5	166,2
8/12/2017	397	137,4	150,3	172,7	169,4
13/12/2017	412,9	132,4	141,9	182,2	180
15/12/2017	426	129,5	130,8	167,1	159,7

Βιβλιογραφία

1. Φ. Ασημακοπούλου, Η Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους. Αθήνα : ΕΜΠ, 2009.
2. IEEE. ANSI/IEEE Std 80-2013, Guide for Safety in AC Substation Grounding. May 2015.
3. Β. Π. Ανδροβιτσάνεας, Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
4. Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής , Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αθήνα , 1997.
5. Ι. Γκόνος, Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης. Αθήνα , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2002.
6. Π. Ντοκόπουλος, Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο πρότυπο ΕΛΟΤ HD384. Αθήνα : Ζήτη, 2005.
7. [Ηλεκτρονικό] <http://faraday.ee.auth.gr/kosmanis/files/grounding.ppt>.
8. Β. Π. Ανδροβιτσάνεας, Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
9. C. F Tagg, Earth resistances, 1st Edition. London, England : George Newnes Ltd., 1964.
10. Γ. Παπασωτηρίου, Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων . Αθήνα : Παπασωτηρίου, 1980.
11. E. Sunde, Earth conduction effects in transmission systems. New York : Dover Publications Inc., 1968.
12. F. Wenner, A method of measuring earth resistivity, Scientific paper no.258. Bulletin of the Bureau of Standards. May 1916, pp. 469-478.
13. F. Dawalibi and C. J. Blattner, Earth resistivity measurement interpretation techniques. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. February 1984, pp. 374-382.
14. A. D. Papalexopoulos and A. P.Meliopoulos, Interpretation of soil resistivity measurements: Experience with the model SOMIP. IEEE Transactions on Power Delivery. October 1986, pp. 142-151.
15. H. R. Seedher and J. K. Arora , Estimation of two layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7. June 1992,pp. 1213-1217.

16. Uribe, Zuniga, and Gomez, Geophysical exploration to estimate conductivity and permittivity model of an excavated soil block. *Revista Mexicana de Fisica*, Vol. 60. January-February 2014, pp. 46-52.
17. I. Gonos and I. A. Stathopoulos, Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20. January 2005, pp. 100-106.
18. W. P. Galixto, et al. Parameter estimation of a horizontal multilayer soil using genetic algorithm. *IEEE Transaction of Power Delivery*, Vol. 25. July 2010, pp. 1250-1257.
19. P. J. Lagace and M. H. Vuong, Graphical user interface for interpreting and validating soil resistivity measurements. *Proceedings of the IEEE ISIE 2006*, Montreal, Canada. July 2006, pp. 1250-1257.
20. Loboda and Scuka, On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes on soil, *Proceedings of the 23rd International Conference on Lightning Protection*, Florence, Italy, September 1996, pp. 539-544.
21. I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, Soil ionization under lightning impulse voltages. *IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*. September 2004, pp. 343-346.
22. Y. Chen and P. Chowdhuri, Correlation between laboratory and field tests on the impulse impedance of the rod-type ground electrodes. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150. July 2003, pp. 420-426.
23. Y. Liu, et al. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results. *Proceedings of the IEEE International Symposium on EMC*, Boston, USA. August 2003, pp. 194-799.
24. N. Nor, Factors affecting soil characteristics under fast transients. *Proceedings of the International Conference on Power System Transients (IPST)*, New Orleans, USA. 2003.
25. BS1377. *Soil for Civil Engineering Purposes: Classification Tests, Part 2*. s.l. : British Standard Code of Practice, 1990.
26. T. K. Manna and P. Chowdhuri, Generalised equation of soil critical electric field E_c based on the impulse tests and measured soil electrical parameters. 2007.
27. K. Sudha, et al. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, Vol.67. January 2009, pp. 74-79.
28. Ma, J. and Dawalibi, F. P. Study of influence of buried metallic structures on soil resistivity measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13. April 1998, pp. 356-365.

29. I. F. Gonos, A. X. Moronis, and I. A. Stathopoulos, Variation of soil resistivity and ground resistance during the year. Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, Japan. 18-22 September 2006, pp. 740-744.
30. V. L. Coelho, et al. The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. Electric Power Systems Research. January 2015, pp. 76-82.
31. S. C. Lim, et al. Significance of localized soil resistivity in designing a grounding system. Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2014). March 2014, pp. 324-329.
32. A. Samuelian, et al. Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil and Tillage Research, Vol. 83. September 2005, pp. 173-193.
33. H. B. Dwight, Calculation of resistances to ground. AIEE Transactions on Electrical Engineering . December 1936, pp. 1319-1328.
34. P. Laurent, Les bases generales de la technique des mises a la terre dans les installations electriques. s.l. : Le bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, 1967.
35. E. J. Fagan, και R. H. Lee, The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes. IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. IGA-6, No.4. July-August 1970, pp. 337-348.
36. IEC/EN, 62561-7:2012, Lightning Protection System Components (LPSC)-Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds. January 2012.
37. ISO, 4689-3:2015, Iron ores - Determination of sulfur content - Part 3: Combustion/infrared method.
38. ISO, 14869-1:2001, Soil quality - Dissolution for the determination of total element content - Part 1: Dissolution with hydrofluoric and perchloric acids.
39. ASTM, G57-06, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Using the Wenner four-electrode Method. 2012.
40. ASTM, G59-97, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.
41. ASTM , 120-89, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, 1999.
42. J. R. Eaton, Grounding electric circuits effectively. Bulletin 25T2. 1941, σσ. 2-19.

43. R. J. Clark and B. O. Watkins, Some chemical treatments to reduce the resistance of ground connections. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 79, No.3. December 1960, pp. 1016-1023.
44. E. J. Fagan and R. Lee, The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes. IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. IGA-6, No.4. July-August 1970, pp. 337-348.
45. H. Kutter and W. Lange, Grounding improvement by using bentonite. Elektrie, Vol. 21, No.11. 1967, pp. 421-424.
46. K. L. Gowan, Use of conductive backfills in reducing transmission tower surge impedance and footing resistance, Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, California, USA, 1975.
47. W. R. Jones, Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4. July 1980, pp. 1343-1346.
48. M. Veledar et al Improvement of grounding properties by using bentonite. Proceedings of CIGRE Paris Conference. 1982.
49. T. Sato, T. Morimoto and Y. Kiyotani, Decrement and ground resistance by the chemical treatment. Electrical Communication Laboratory Technical Journal, Vol.16. 1967, pp. 1211-1215.
50. K. Takeuchi, Application of ground resistance reducing materials to model grounding mesh. The Institute of Electrical Engineers of Japan Technical Report. 1989, pp. 89-148.
51. H. Yamane, T. Ideguchi and M. Tokuda, A new ground resistance-reducing material based on water-absorbent polymer. Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol.77. May 1994, pp. 68-78.
52. M. B. Kostic, et al. Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol.146, No.1. January 1999, pp. 1-6.
53. R. Radakovic and M. B. Kostic, Behavior of grounding loop with bentonite during a ground fault at an overhead line tower. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol.148, No.4. July 2001, pp. 275-278.
54. H. E. Martinez, et al. A new artificial treatment for the reduction of resistance in ground electrode. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19. April 2004, pp. 601-608.
55. L. H. Chen, et al, A study of grounding resistance reduction agent using granulated blast furnace slag. IEEE Transactions on Power Delivery. July 2004, pp. 973-978.

56. S. D. Chen, Granulated blast furnace slag used to reduce ground resistance. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol.151. May 2004, pp. 361-366.
57. L. H. Chen, A research on used quantity of ground resistance reduction agent for ground systems. European Transactions on Electrical Power, Vol.20, No.4. May 2010, pp. 408-421.
58. S. D. Chen, et al. An experimental study on the electrical properties of fly ash in the grounding system. International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol.7, No.2. September 2006, pp. 1-19.
59. Judson, W. και D' Alessandro, F. Electrical and mechanical properties of a selection of ground enhancing compounds. Proceedings of the VIII International Symposium on Lightning Protection, Sao Paulo, Brazil. 21-25 November 2005.
60. C. Romualdo-Torres, R. Velazquez-Sanchez, and J. Loza-Rodriguez, The application of backfills for improving the grounding resistance of power systems. Proceedings of the 2005/06 IEEE PES, Dallas, TX, USA. 21-24 May 2006, pp. 947-950.
61. A. Habjanic, M. Trlep and J. Pihler, The influence of an additional substance in the trenches surrounding the grounding grid's conductors on the grounding grid's performance. IEEE Transactions on Magnetics, Vol.43, No.4. April 2007.
62. N. Kumarasinghe, A low cost lightning protection system and its effectiveness. Proceedings of the 20th International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, USA. 21-23 April 2008.
63. G. Eduful, P. Y. Okyere and E. A. Frimpong, Evaluation of four local materials as backfill to achieve a low earth electrode resistance. Journal of Science and Technology (Ghana), Vol.29, No.2. August 2009, pp. 126-130.
64. A.D. Galvan, E. Gaona and G. G. Pretelin, Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods. Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA), Curitiba, Brazil. November 2009, pp. 335-341.
65. A. D. Galvan, G. Pretelin and E. Gaona, Practical evaluation of ground enhancing compounds for high soil resistivity. Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy. September 2010, p. 1233.
66. G. Fragogiannis, N. Papatheodorou and S. Stamataki, Evaluation of Thermal Performance of Ground-Source Energy Systems, A Geophysics Supported Approach. World Renewable Energy Congress . 2008.
67. Officials, American Association of State Highway and Transportation.
68. J. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, 1992, MIT Press.

69. Ε. Γεωργόπουλος και Σ. Λυκοθανάσης, Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους. Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική Σχολή, 1999.
70. Michalewicz, Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs. s.l. : Springer-Verlag, 1996.
71. McPhee, Poli, Langdon. Field Guide to Genetic Programming . Minnesota : University of Minnesota Morris Digital Well, 2008.
72. K. Boulas et al, Acquisition of Accurate or Approximate Throughput Formulas for Serial Production Lines through Genetic Programming Proceedings of the 4th International Symposium & 26th National Conference on Operational Research, Chania, Greece, 2015, pp. 128-133.
73. J. Koza. et al, Genetic Programming IV. New York : Springer Science+Business Media, 2003.
74. Α. Τσάκωνας, Γ. Δούνιας, Εξελικτικός υπολογισμός και εξόρυξη δεδομένων, Αθήνα: Κλειδάριθμος, 2009.
75. S. Wagner, Heuristic Optimization Software Systems - Modeling of Heuristic Optimization Algorithms in the HeuristicLab Software Environment. s.l. : Johannes Kepler University Linz, 2009.