



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς
συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Αθήνα, Ιούνιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς
συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

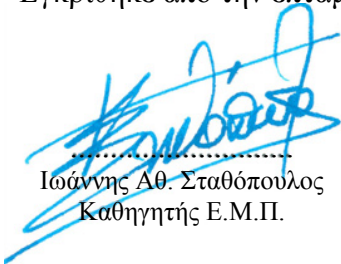
Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

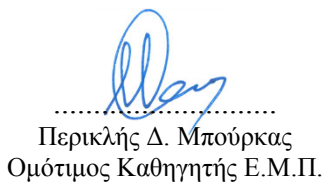
Περικλής Δ. Μπούρκας

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

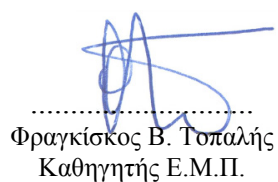
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Ιουνίου 2016.



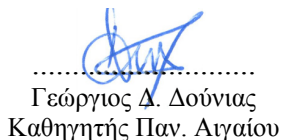
.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



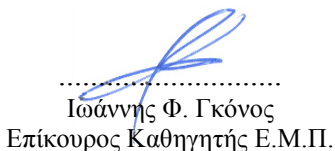
.....
Περικλής Δ. Μπούρκας
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.



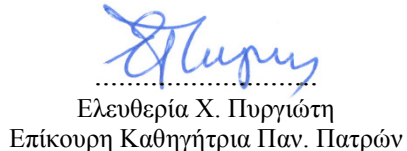
.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



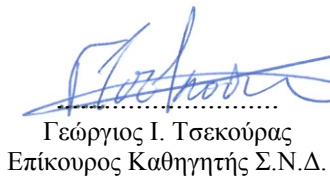
.....
Γεώργιος Δ. Δούνιας
Καθηγητής Παν. Αιγαίου



.....
Ιωάννης Φ. Γκόνοσ
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

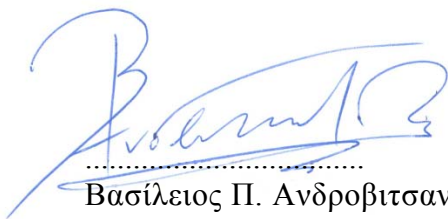


.....
Ελευθερία Χ. Πυργιώτη
Επίκουρη Καθηγήτρια Παν. Πατρών



.....
Γεώργιος Ι. Τσεκούρας
Επίκουρος Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

Αθήνα, Ιούνιος 2016



Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

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

Copyright © Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	I
ΣΧΗΜΑΤΑ.....	III
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	VII
ΠΙΝΑΚΕΣ.....	IX
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	XI
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
KEY WORDS.....	XIII
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	XV
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	XVII
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Γείωση.....	2
1.2.1 Ρόλος και λειτουργία των συστημάτων γείωσης.....	2
1.2.2 Τύποι γείωσης.....	5
1.3 Ειδική αντίσταση εδάφους.....	6
1.3.1 Ορισμός και παράγοντες που την επηρεάζουν.....	6
1.3.2 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.....	9
1.3.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	13
1.4 Αντίσταση γείωσης.....	19
1.4.1 Εισαγωγή.....	19
1.4.2 Υπολογισμός και μέτρηση της αντίστασης γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση).....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	41
ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ.....	41
2.1 Εισαγωγή.....	41
2.2 Μοντέλα κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση).....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	63
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΕΩΝ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	63
3.1 Εισαγωγή.....	63
3.2 Απαιτήσεις και προδιαγραφές για τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων.....	64
3.3 Συμπεριφορά μόνιμης κατάστασης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση).....	67
3.4 Συμπεριφορά μεταβατικής κατάστασης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση).....	86
3.5 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα.....	91
3.6 Πειραματική διερεύνηση της αντίστασης συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά εδάφους στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση.....	94
3.6.1 Πειραματική διάταξη.....	94
3.6.2 Πειραματική μελέτη της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας Μετρήσεις και αποτελέσματα ...	107
3.6.3 Πειραματική μελέτη της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας Μετρήσεις και αποτελέσματα ..	118
3.6.4 Προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ράβδων εντός βελτιωτικών υλικών.....	131
3.6.5 Συμπεράσματα.....	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	153
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ.....	153
4.1 Εισαγωγή.....	153
4.2 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	154
4.2.1 Εισαγωγή.....	154
4.2.2 Ιστορική αναδρομή.....	155
4.2.3 Μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	156

4.2.4	Κατηγοριοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων	162
4.2.5	Εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	163
4.2.6	Εφαρμογή των ΤΝΔ στα συστήματα γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση).....	165
4.2.7	Μεθοδολογία ΤΝΔ στα συστήματα γείωσης με βελτιωτικά υλικά.....	167
4.3	<i>Wavelet</i> νευρωνικά δίκτυα (<i>WNN</i>).....	184
4.3.1	Εισαγωγή.....	184
4.3.2	Από τον μετασχηματισμό Fourier στην ανάλυση Wavelet.....	184
4.3.3	Δομή ενός wavelet δικτύου	187
4.3.4	WN δίκτυο πρόβλεψης τιμών της αντίστασης γείωσης.....	189
4.4	<i>Επαγωγική Μηχανική Μάθηση (IML)</i>	201
4.4.1	Εισαγωγή.....	201
4.4.2	Γενική περιγραφή.....	202
4.4.3	Κατασκευή δένδρων αποφάσεων	204
4.4.4	Προτεινόμενη IML μεθοδολογία ταξινόμησης στα συστήματα γείωσης	206
4.4.5	Συμπεράσματα.....	210
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....		215
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ		215
5.1	<i>Ανακεφαλαίωση</i>	215
5.2	<i>Συμβολή – Πρωτοτυπία</i>	220
5.3	<i>Η επόμενη μέρα</i>	228
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		231
Π.1	<i>Αποτελέσματα μετρήσεων των κρουστικών δοκιμών στα κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης</i> 231	
Π.2	<i>Στοιχεία για τον αλγόριθμο εκπαίδευσης του WNN</i>	235
Π.3	<i>Δένδρο απόφασης και παραγόμενοι κανόνες.....</i>	238

Σχήματα

Σχήμα 1.1: Τάση επαφής και βηματική τάση	3
Σχήμα 1.2: Συνδυασμός συστήματος γείωσης και συστήματος αντικεραυνικής προστασίας.....	6
Σχήμα 1.3:Ειδική αντίσταση εδάφους.....	7
Σχήμα 1.4: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας.....	8
Σχήμα 1.5: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης.....	9
Σχήμα 1.6: Διατάξεις μέτρησης της ειδικής αντίστασης.....	11
Σχήμα 1.7: Διάταξη Wenner.....	11
Σχήμα 1.8: Διάταξη Wenner με εφαρμογή του προσεγγιστικού τύπου.....	12
Σχήμα 1.9: Ομοαξονικό κυλινδρικό ηλεκτρόδιο για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης.....	16
Σχήμα 1.10: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ηλεκτροτομογραφίας.....	17
Σχήμα 1.11: Χοάνη δυναμικού.....	20
Σχήμα 1.12: Μείωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτινών και ειδικών αντιστάσεων.....	26
Σχήμα 1.13: Διανυσματικό διάγραμμα σύνθετης αντίστασης.....	27
Σχήμα 1.14: Διάταξη κατακόρυφων ηλεκτροδίων σε διστρωματικό έδαφος.....	30
Σχήμα 1.15: Απεικόνιση της μεθόδου της πτώσης δυναμικού για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης.....	32
Σχήμα 1.16: Μετακίνηση του ηλεκτροδίου Y κατά μήκος του άξονα XZ.....	33
Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστικές μεταβατικής αντίστασης-χρόνου για μείγμα χώματος και διάφορα μεγέθη ρεύματος.....	44
Σχήμα 2.2: Δυναμικό μοντέλο για τη διαδικασία ιονισμού του εδάφους.....	45
Σχήμα 2.3: Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος για κατακόρυφη ράβδο γείωσης.....	46
Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση ανερχόμενου κεραυνικού οχέτου απευθείας από μια ομοαξονική κατακόρυφη ράβδο κάτω από το έδαφος.....	48
Σχήμα 2.5: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κεραυνικού οχέτου και ηλεκτροδίου γείωσης.....	48
Σχήμα 2.6: Μη γραμμική συμπεριφορά της τάσης ενός συστήματος γείωσης για δύο διαφορετικά κρουστικά ρεύματα.....	49
Σχήμα 2.7: Ισοδύναμο κύκλωμα προσέγγισης ενός αγωγού γείωσης μικρού μήκους.....	51
Σχήμα 2.8: Ωμικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός αγωγού γείωσης μικρού μήκους.....	51
Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα προσομοίωσης των εξισώσεων Loboda-Pochanke.....	56
Σχήμα 3.1: Το κυβικό σύστημα γείωσης.....	72
Σχήμα 3.2: (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.....	74
Σχήμα 3.3: Διατάξεις γείωσης: (α) Κατακόρυφη ράβδος στο φυσικό έδαφος, (β) Κατακόρυφη ράβδος πλήρως καλυμμένη με βελτιωτικό υλικό, (γ) Κατακόρυφη ράβδος σε βελτιωτικό υλικό, εγχέομενο σε κυκλικό σκάμμα στη βάση της ράβδου.....	77
Σχήμα 3.4: Σύγκριση των δύο μεθόδων ως προς την ελάττωση της αντίστασης γείωσης όταν $\rho_c=2\Omega\cdot m$ και $L=2,4m$	77
Σχήμα 3.5: Τρισδιάστατο γράφημα της επίδρασης του πλάτους και της ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού στο GPR, στην περίπτωση διστρωματικού μοντέλου εδάφους.....	79
Σχήμα 3.6: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης ως συνάρτηση της απόστασης από τα ηλεκτρόδια γείωσης.....	80
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα κυκλώματος του πειράματος προσομοίωσης: T_1 ο ρυθμιστής τάσης και T_2 ο M/Σ , 1 το shunt ρεύματος, 2 η ημισφαιρική λεκάνη, 3 το σύστημα συλλογής δεδομένων, 4 ο καταμεριστής τάσης και 5 το ηλεκτρόδιο γείωσης.....	87
Σχήμα 3.8: Μεταβολή του πορώδους και της ειδικής κατακράτησης σε σχέση με τον τύπο του εδάφους.....	96
Σχήμα 3.9: Διάταξη ηλεκτροδίων και ακολουθία μετρήσεων με τη μέθοδο της ηλεκτροτομογραφίας.....	97
Σχήμα 3.10: Διάταξη των μπλοκ και τιμές πραγματικής ειδικής αντίστασης σ' αυτά.....	97
Σχήμα 3.11: Γράφημα ηλεκτροτομογραφίας στον χώρο του πειράματος.....	100
Σχήμα 3.12: Δοχείο εργαστηριακών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης.....	102
Σχήμα 3.13: Κύκλωμα πειραματικής διάταξης μέτρησης της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης.....	102

Σχήμα 3.14: Διάταξη ηλεκτροδίων στο πεδίο δοκιμών.....	105
Σχήμα 3.15: Ράβδος γείωσης εγκιβωτισμένη σε βελτιωτικό υλικό.....	106
Σχήμα 3.16: Διάγραμμα μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους.....	109
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης γείωσης των έξι ηλεκτροδίων.....	109
Σχήμα 3.18: Συντελεστής απόδοσης βελτιωτικών υλικών.....	109
Σχήμα 3.19: Κύκλωμα πειραματικής διάταξης δοκιμών υπό κρουστικό ρεύμα.....	120
Σχήμα 3.20: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_1 για τάση $\pm 10kV$	121
Σχήμα 3.21: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_2 για τάση $\pm 10kV$	121
Σχήμα 3.22: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_3 για τάση $\pm 10kV$	122
Σχήμα 3.23: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_4 για τάση $\pm 10kV$	122
Σχήμα 3.24: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_5 για τάση $\pm 10kV$	123
Σχήμα 3.25: Διάγραμμα διασποράς με γραμμή τάσης για το G_3 (Ιούλιος 2014).....	124
Σχήμα 3.26: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G_1	125
Σχήμα 3.27: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G_2	125
Σχήμα 3.28: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G_3	125
Σχήμα 3.29: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G_4	126
Σχήμα 3.30: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G_5	126
Σχήμα 3.31: Διαγράμματα μεταβολής της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (Z) των κατακόρυφων ράβδων γείωσης.....	127
Σχήμα 3.32: Κυκλωματικό μοντέλο προσομοίωσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου στο έδαφος.....	132
Σχήμα 3.33: Εξίσωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 τον Ιούλιο	134
Σχήμα 3.34: Εξίσωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 τον Νοέμβριο	134
Σχήμα 3.35: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 10kV$	135
Σχήμα 3.36: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 8kV$	136
Σχήμα 3.37: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 6kV$	136
Σχήμα 3.38: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 4kV$	137
Σχήμα 3.39: Κυκλωματικό μοντέλο προσομοίωσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου σε βελτιωτικό υλικό γείωσης.....	138
Σχήμα 3.40: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_2	139
Σχήμα 3.41: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_3	140
Σχήμα 3.42: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_4	141
Σχήμα 3.43: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_5	142
Σχήμα 3.44: Διαγράμματα $Z(t)$ από το μοντέλο προσομοίωσης σε όλα τα ηλεκτρόδια.....	143
Σχήμα 4.1: Μοντέλο νευρώνα McCulloch-Pitts.....	156
Σχήμα 4.2: Βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα.....	157
Σχήμα 4.3: Το βασικό μοντέλο του νευρώνα με το κατώφλι ή την πόλωση συμπεριλαμβανόμενα στο σύνολο των κανονικών εισόδων.....	158
Σχήμα 4.4: Μοντέλο απλού Perceptron με την πόλωση συμπεριλαμβανόμενη στο σύνολο των κανονικών εισόδων.....	160
Σχήμα 4.5: Τοπολογία (α) ADALINE και (β) MADALINE.....	160
Σχήμα 4.6: Πολυεπίπεδο Perceptron με δύο κρυμμένα επίπεδα.....	161
Σχήμα 4.7: Δομή επιβλεπόμενης μάθησης.....	163
Σχήμα 4.8: Σχέση γραμμικής παλινδρόμησης αντίστασης γείωσης-ειδικής αντίστασης εδάφους για τα 5 ηλεκτρόδια γείωσης.....	168
Σχήμα 4.9: Αρχιτεκτονική προτεινόμενου ΤΝΔ.....	170
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας.....	171
Σχήμα 4.11: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης για μεταβλητό πλήθος νευρώνων του κρυφού στρώματος.....	174
Σχήμα 4.12: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης με μεταβολή των παραμέτρων του όρου ορμής a	174
Σχήμα 4.13: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης με μεταβολή των παραμέτρων του ρυθμού μάθησης η	174
Σχήμα 4.14: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης όταν επιλέγεται η συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης και η λογιστική συνάρτηση για το κρυφό στρώμα και το στρώμα εξόδου αντίστοιχα, ως συναρτήσεις ενεργοποίησης.....	175
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα ροής της εκπαίδευσης του ΤΝΔ με διάφορους αλγόριθμους εκπαίδευσης... ..	178
Σχήμα 4.16: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης ως προς το πλήθος των νευρώνων του κρυφού στρώματος.....	179
Σχήμα 4.17: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης για $a_0 \in [0, 1, 0, 9]$ και $\eta_0 \in [0, 1, 0, 9]$	179
Σχήμα 4.18: G_{av} στα σύνολα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου 3 για το πρώτο σενάριο.....	179

Σχήμα 4.19: Πραγματικές και εκτιμώμενες τιμές της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_6 ως συνάρτηση του χρόνου (αλγόριθμος 3-1 ^ο σενάριο, αλγόριθμος 5-1 ^ο σενάριο και αλγόριθμος 5-2 ^ο σενάριο).....	180
Σχήμα 4.20: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή προσδιορισμού (R^2) για κάθε ηλεκτρόδιο γείωσης από όλους του αλγόριθμους εκπαίδευσης (1 ^ο σενάριο).....	181
Σχήμα 4.21: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή προσδιορισμού (R^2) για κάθε ηλεκτρόδιο γείωσης από όλους του αλγόριθμους εκπαίδευσης (2 ^ο σενάριο).....	182
Σχήμα 4.22: Wavelet νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης	189
Σχήμα 4.23: Αρχικοποίηση των παραμέτρων του WN	190
Σχήμα 4.24: Διάγραμμα ροής της εκπαίδευσης του προτεινόμενου WN.....	195
Σχήμα 4.25: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_1	196
Σχήμα 4.26: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_2	197
Σχήμα 4.27: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_3	197
Σχήμα 4.28: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_4	197
Σχήμα 4.29: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_5	198
Σχήμα 4.30: Δένδρο απόφασης για το παιχνίδι τένις	202
Σχήμα 4.31: Δένδρο απόφασης για το ηλεκτρόδιο G_5 (σενάριο κλάσεων c)	209

Εικόνες

Εικόνα 3.1: Δορυφορική απεικόνιση του χώρου του πειράματος	95
Εικόνα 3.2: Χώρος διεξαγωγής του πειράματος.....	95
Εικόνα 3.3: Συσκευή μέτρησης SYSCAL Pro Switch-48 (αριστερά) και βοηθητικά ηλεκτρόδια με τα καλώδια μέτρησης.	97
Εικόνα 3.4: Έδαφος πειραματικού πεδίου σε τομή	99
Εικόνα 3.5: Προετοιμασία υλικών πριν τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης.....	102
Εικόνα 3.6: Βελτιωτικά υλικά γείωσης εντός των δοχείων δοκιμής	102
Εικόνα 3.7: Μέτρηση ειδικής αντίστασης βελτιωτικών υλικών γείωσης.....	103
Εικόνα 3.8: Διάνοιξη ορυγμάτων με εκσκαφέα βαρέως τύπου	105
Εικόνα 3.9: Ράβδος γείωσης πριν και μετά την έγχυση του υλικού	106
Εικόνα 3.10: Διεξαγωγή των μετρήσεων	108
Εικόνα 3.11: Σταδιακή συρρίκνωση και απορρόφηση του συνθετικού υλικού C.....	114
Εικόνα 3.12: Αριστερά: Γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων HILO/TEST:EMC-2004 Δεξιά: Παλμογράφος Tektronix TDS 2014C.....	119
Εικόνα 3.13: Πειραματική διάταξη.	119
Εικόνα 3.14: Κατακόρυφη ράβδος εντός βελτιωτικού υλικού υπό κρουστική καταπόνηση.....	119

Πίνακες

Πίνακας 1.1: Εξισώσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης	25
Πίνακας 3.1: Ποσοστιαία μείωση της αντίστασης γείωσης από κάθε κατηγορία βελτιωτικών υλικών .	92
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα μετρήσεων ειδικής αντίστασης.....	103
Πίνακας 3.3: Ηλεκτρόδια και βελτιωτικά υλικά πειραματικής διάταξης	104
Πίνακας 3.4: Στατιστικά στοιχεία για την απόδοση των βελτιωτικών υλικών γειώσεως.....	114
Πίνακας 3.5: Μέση τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (σε Ω) ανά ηλεκτρόδιο γείωσης και ανά επίπεδο φόρτισης.....	124
Πίνακας 3.6: Χρονικές παράμετροι των διακοπών του κυκλώματος προσομοίωσης.....	133
Πίνακας 3.7: Μέρος από τις πειραματικές τιμές για τα μεγέθη $u(t_{i=j_p})$, \hat{I}_p και Z	133
Πίνακας 3.8: Παράμετροι κυκλώματος προσομοίωσης για το ηλεκτρόδιο G_1	135
Πίνακας 3.9: Παράμετροι κυκλώματος προσομοίωσης για τα ηλεκτρόδια $G_2 - G_5$	138
Πίνακας 4.1: Πραγματικές και εκτιμώμενες τιμές της αντίστασης γείωσης	175
Πίνακας 4.2: Αλγόριθμοι εκπαίδευσης ΤΝΔ.....	177
Πίνακας 4.3: Βελτιστοποιημένες παράμετροι των αλγόριθμων εκπαίδευσης.....	180
Πίνακας 4.4: Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) στο σύνολο ελέγχου για τα έξι ηλεκτρόδια (1 ^ο σενάριο)	181
Πίνακας 4.5: Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) στο σύνολο ελέγχου για τα έξι ηλεκτρόδια (2 ^ο σενάριο)	181
Πίνακας 4.6: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές του συνόλου ελέγχου για τον αλγόριθμο 5 (1 ^ο σενάριο).....	183
Πίνακας 4.7: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές του συνόλου ελέγχου για τον αλγόριθμο 5 (2 ^ο σενάριο).....	183
Πίνακας 4.8: Δείκτες αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του WN από τα δύο σενάρια εκπαίδευσης και για τα τρία ηλεκτρόδια γείωσης	194
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα της απόδοσης των WNs, για τα συστήματα γείωσης, στα in-sample και out-of-sample σύνολα.....	195
Πίνακας 4.10: Τρία σενάρια διακριτοποίησης των κλάσεων και το πλήθος των περιπτώσεων ανά κλάση που προκύπτει από τη μεθοδολογία ταξινόμησης	208
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα της IML μεθοδολογίας για το ηλεκτρόδιο G_5	208

Περίληψη

Η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, ο τύπος και το μέγεθος των συστημάτων γείωσης, αποτελούν τις θεμελιώδεις παραμέτρους που καθορίζουν τη λειτουργία και την εν γένει συμπεριφορά τους. Η συνεχής βελτίωση της σχεδίασης αυτών των συστημάτων και η ανάπτυξη μοντέλων για την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους στον χρόνο, μόνιμης και μεταβατικής, αποτελούν εχέγγυο για τη μέγιστη ασφάλεια των ανθρώπων και των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στην πειραματική μελέτη της επίδρασης του μικροεδάφους, με προσθήκη βελτιωτικών υλικών γείωσης, στα συστήματα γείωσης και, δη, στα κατακόρυφα ηλεκτροδία γείωσης. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, καθώς και της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ράβδων, εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά γείωσης, επί τέσσερα (4) συναπτά έτη. Μελετήθηκε η μεταβολή των τιμών των μεγεθών αυτών σε συνάρτηση με τον χρόνο και το ύψος βροχόπτωσης. Διατυπώθηκαν ασφαλή συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των διαφόρων βελτιωτικών υλικών γείωσης και τη συμβολή τους ή μη στη βελτίωση της τιμής της αντίστασης γείωσης.

Τα πειραματικά δεδομένα αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μοντέλων Υπολογιστικής Νοημοσύνης, με σκοπό την εκτίμηση/πρόβλεψη των τιμών της αντίστασης γείωσης και της, εν γένει, συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, για συγκεκριμένη, επιθυμητή ημέρα, με βάση τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και του ύψους βροχόπτωσης, παρελθούσας χρονικής περιόδου. Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκαν Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, Wavelet Νευρωνικό Δίκτυο, καθώς και Μεθοδολογία Επαγωγικής Μηχανικής Μάθησης, για κατασκευή Δένδρων Αποφάσεων.

Τέλος, μελετήθηκε η μεταβατική συμπεριφορά των, εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά, κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης: πραγματοποιήθηκαν πειράματα κρουστικής καταπόνησης, με έγχυση ρεύματος, από γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων, και μελετήθηκε η μεταβολή της σύνθετης κρουστικής αντίστασης των ηλεκτροδίων, συναρτήσει του τύπου των βελτιωτικών υλικών και του χρόνου. Τα πειραματικά αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν, επίσης, για την κατασκευή κυκλωματικού μοντέλου προσομοίωσης της κρουστικής μεταβατικής συμπεριφοράς των, εγκιβωτισμένων εντός βελτιωτικών υλικών, ράβδων γείωσης.

Λέξεις κλειδιά

Συστήματα γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, αντίσταση γείωσης, κρουστική σύνθετη αντίσταση, βελτιωτικά υλικά γείωσης, υπολογιστική νοημοσύνη, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, wavelet δίκτυα, επαγωγική μηχανική μάθηση.



Abstract

The operation and, in general, the behavior of grounding systems is defined by some fundamental parameters: the rate of soil resistivity, the type and the size of grounding systems. The continuous improvement in designing these systems, together with the development of models that will help predict — in time — their precise behavior (both transient and steady state), guarantee the maximum safety of people and electrical facilities.

This Ph.D thesis focuses on experimentally studying the effect of local soil, with addition of ground enhancing compounds, on grounding systems and, particularly, on vertical grounding rods. For four consecutive years, experimental measurements have been conducted in regard to soil resistivity (at various depths), as well as to ground resistance of vertical grounding rods, encased in ground enhancing compounds. The variation of rates, depending on time and rainfall, has also been studied. Safe conclusions were reached, regarding the behavior of various ground enhancing compounds and their contribution (or not) to the improvement of ground resistance rate.

The experimental results were used for developing models of computational intelligence. The main aim was to estimate / predict the rate of ground resistance and, in general, the behavior of grounding systems on a specific desired day, based on soil resistivity and rainfall rate, of past time periods. As part of the thesis, an Artificial Neural Network, a Wavelet Neural Network, as well as, an Inductive Machine Learning Methodology for constructing decision trees, have been developed.

Finally, the transient behavior of vertical grounding rods, encased in ground enhancing compounds, has been studied. Impulse tests have been performed, by injecting impulse currents from an impulse current generator and the impulse impedance variation was investigated with respect to compounds' type and to time. Moreover, the experimental results were used for the design of a circuit model, simulating the impulse transient behavior of grounding rods encased in ground enhancing compounds.

Key words

Grounding systems, soil resistivity, ground resistance, impulse impedance, ground enhancing compounds, computational intelligence, artificial neural networks, wavelet neural networks, inductive machine learning.

Δημοσιεύσεις

Στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής δημοσιεύθηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

A. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά

1. T. Eleftheriadou, N. Ampazis, **V. P. Androvitsaneas**, I. F. Gonos, G. D. Dounias, and I. A. Stathopoulos, “Ground resistance estimation using feed-forward neural networks, linear regression and feature selection models”, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 8445 LNCS, pp. 418–429, 2014.
2. **V. P. Androvitsaneas**, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Artificial neural network methodology for the estimation of ground enhancing compounds resistance”, *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 552–570, November 2014.
3. **V. P. Androvitsaneas**, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds”, *Electric Power Systems Research*, 2015, DOI: 10.1016/j.epsr.2015.11.032.
4. **V. P. Androvitsaneas**, A. K. Alexandridis, I. F. Gonos, G. D. Dounias, and I. A. Stathopoulos, “Wavelet neural network methodology for ground resistance forecasting”, *Electric Power Systems Research*, 2016, DOI: 10.1016/j.epsr.2016.06.013.

B. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Συνεδρίων με Κρίση στο Πλήρες Κείμενο

1. **V. P. Androvitsaneas**, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Performance of ground enhancing compounds during the year”, *Proceedings of the 31st International Conference of Lightning Protection (ICLP 2012)*, Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, paper 231.
2. **V. P. Androvitsaneas**, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos “Estimation of ground enhancing compound performance using artificial neural network”, *Proceedings of the 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2012)*, Shanghai, China, September 17th–20th, 2012, pp. 145–149.
3. T. Eleftheriadou, N. Ampazis, **V. P. Androvitsaneas**, I. F. Gonos, G. D. Dounias, and I. A. Stathopoulos, “Ground resistance estimation using feed-forward neural networks, linear regression and feature selection models”, *8th Hellenic Conference on Artificial Intelligence: Methods and Applications, (SETN 2014)*, Ioannina, Greece, May 15th–17th, 2014, pp. 418–429.
4. **V. P. Androvitsaneas**, A. K. Alexandridis, I. F. Gonos, G. D. Dounias, and I. A. Stathopoulos, “Wavelet neural network for ground resistance estimation”, *Proceedings of the 4th International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014)*, Poznan, Poland, September 8th–11th, 2014, paper A-7-5.



5. **V. P. Androvitsaneas**, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds”, Proceedings of the 32nd International Conference on Lightning Protection (ICLP 2014), Shanghai, China, October 11th–18th, 2014, pp. 359–363.
6. **V. P. Androvitsaneas**, I. F. Gonos, G. D. Dounias, and I. A. Stathopoulos, “Ground resistance estimation using inductive machine learning”, Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Czech Republic, August 23rd–28th, 2015, paper 517.

Γ. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Συνεδρίων με Κρίση στην Περίληψη

1. **Β. Π. Ανδροβιτσανέας**, Φ. Η. Ασημακοπούλου, Ι. Φ. Γκόνοσ, Ι. Α. Σταθόπουλος, «Χρήση βελτιωτικών υλικών εδάφους σε συστήματα γείωσης», Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 15-16 Δεκεμβρίου 2011, Ενότητα Ε: Εξοπλισμός ΣΗΕ: Ε6.
2. **V. P. Androvitsaneas**, G. J. Tsekouras, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Design of an artificial neural network for ground resistance forecasting”, Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2014), Athens, Greece, November 2nd–5th, 2014, paper 150.
3. **Β. Π. Ανδροβιτσανέας**, Γ. Ι. Τσεκούρας, Ι. Φ. Γκόνοσ, Ι. Α. Σταθόπουλος, «Πρόβλεψη της τιμής αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων σε βελτιωτικά υλικά εδάφους», Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 09-10 Δεκεμβρίου 2015, Ενότητα Ε: Υλικά και συντήρηση ΣΗΕ: Ε4.
4. K. Boulas, **V. Androvitsaneas**, I. Gonos, G. Dounias, and I. Stathopoulos, “Ground resistance estimation using genetic programming”, Proceedings of the 5th International Symposium and 27th National Conference on Operational Research, Athens, Greece, June 9th–11th, 2016, pp. 66–71.

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλου και αφορά στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης εγκαταστάσεων, με προσθήκη βελτιωτικών υλικών εδάφους, τόσο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όσο και κατά την εκδήλωση ισχυρών μεταβατικών φαινομένων, όπως τα κεραυνικά πλήγματα. Η διαμόρφωση ειδικών συνθηκών για την ειδική αντίσταση του εδάφους γύρω από τα ηλεκτρόδια, με προσθήκη βελτιωτικών υλικών γείωσης, δημιουργεί ένα ξεχωριστό περιβάλλον λειτουργίας των ηλεκτροδίων γείωσης, το οποίο είναι ευμετάβλητο σε συνάρτηση με τον χρόνο και τις καιρικές συνθήκες. Η βαθύτερη διερεύνηση των ειδικών αυτών συνθηκών, που διαμορφώνονται γύρω από τα συστήματα γείωσης και η ανάπτυξη μοντέλων για την εκτίμηση και πρόβλεψη αυτής της συμπεριφοράς, αποτελούν αντικείμενο έρευνας της διδακτορικής διατριβής.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια περιληπτική αναφορά στην ορολογία και στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Στη συνέχεια, η βιβλιογραφική ανασκόπηση καλύπτει τις πιο σημαντικές μεθόδους υπολογισμού και μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης μόνιμης κατάστασης, που έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** πραγματεύεται τη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, όταν αυτά υπόκεινται σε κρουστικά κεραυνικά ρεύματα. Γίνεται αναφορά στα σημαντικότερα μοντέλα προσομοίωσης των μεταβατικών φαινομένων, που αναπτύσσονται γύρω από κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης, υπό κρουστική καταπόνηση, καθώς και σε πειραματικές εργασίες με κρουστικά ρεύματα, είτε σε μοντέλα υπό κλίμακα, είτε σε πραγματικές διατάξεις.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στα βελτιωτικά υλικά γείωσης. Καταγράφονται μελέτες και ερευνητικές εργασίες, με θέμα την παρασκευή και χρήση αυτών των υλικών στα συστήματα γείωσης, για την ελάττωση της αντίστασής τους και τη βελτίωση της συμπεριφοράς τους επί σειρά ετών. Επίσης, αναφέρονται περιληπτικά οι προδιαγραφές, που πρέπει να πληρούν όλα τα σύγχρονα βελτιωτικά υλικά, για τη χρήση τους στις γειώσεις, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα. Παρατίθενται οι πειραματικές διατάξεις των εργαστηριακών και υπαίθριων δοκιμών και μετρήσεων, οι οποίες διεξήχθησαν στο πλαίσιο της διατριβής, τα αποτελέσματα αυτών, καθώς και ανάλυσή τους. Τέλος, προτείνεται πρωτότυπο κυκλωματικό μοντέλο προσομοίωσης της μεταβατικής κρουστικής συμπεριφοράς κατακορύφων ηλεκτροδίων γείωσης,



εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά, το οποίο αναπτύχθηκε με βάση τα αποτελέσματα ιδίων πειραματικών κρουστικών δοκιμών.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αξιοποιούνται τα αποτελέσματα των, επί τέσσερα (4) έτη, μετρήσεων της ειδικής αντίστασης εδάφους, της αντίστασης γείωσης των υπό μελέτη κατακόρυφων ηλεκτροδίων και του ύψους βροχόπτωσης, για την κατασκευή μοντέλων εκτίμησης / πρόβλεψης της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων με βελτιωτικά υλικά εδάφους. Παρουσιάζεται η κατασκευή Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, το οποίο εκπαιδεύτηκε με διάφορους αλγόριθμους εκπαίδευσης, καθώς και Wavelet Δικτύου, για την ακριβή εκτίμηση και πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης σε συγκεκριμένη ημέρα ενδιαφέροντος. Τέλος, παρουσιάζεται Μεθοδολογία Επαγωγικής Μηχανικής Μάθησης, για την κατασκευή Δένδρων Αποφάσεων και κανόνων ταξινόμησης, για τη διεύρυνση των γνώσεων περί της συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** καταγράφονται τα συμπεράσματα, που προέκυψαν, αναδεικνύεται η συμβολή της παρούσας διατριβής, στη μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, με προσθήκη βελτιωτικών υλικών εδάφους, και των μεγεθών που επηρεάζουν αυτήν τη συμπεριφορά, όπως της ειδικής αντίστασης των υλικών και του εδάφους, της αντίστασης γείωσης μόνιμης κατάστασης, της κρουστικής σύνθετης αντίστασης κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων, της εποχής και του ύψους βροχόπτωσης.

Σ' αυτό το σημείο νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέποντα μου Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, με την ανάθεση της διατριβής, για την καθοδήγηση, την υλική και ηθική υποστήριξή του στην εκπόνησή της και την εξασφάλιση άριστων συνθηκών εργασίας στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

Τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή και τον Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Περικλή Δ. Μπούρκα, για την αποδοχή συμμετοχής τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή, για την ενθάρρυνση και τις πολύτιμες συμβουλές τους, κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

Τον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, του οποίου η συνεισφορά, η πείρα, η συνεχής και ακούραστη καθοδήγηση, η αμέριστη συμπαράσταση και η εγκάρδια φιλία αποτέλεσαν ανεκτίμητο αρωγό στην εκπόνηση της διατριβής και στο έως τώρα έργο μου. Η αδιάκοπη ενθάρρυνση, που μου παρείχε για την αντιμετώπιση πολλών τεχνικών δυσκολιών, οι οποίες συνεχώς αναφύονταν κατά τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής της διατριβής, υπήρξε κινητήρια δύναμη της προσπάθειάς μου.



Τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Αιγαίου κ. Γεώργιο Δ. Δούνια, την Επίκουρη Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Πατρών κυρία Ελευθερία Χ. Πυργιώτη και τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων κ. Γεώργιο Ι. Τσεκούρα, για την αποδοχή συμμετοχής τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή, καθώς και για την καθοδήγησή τους και την άψογη συνεργασία. Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον κ. Τσεκούρα, για τα εποικοδομητικά σχόλιά του στην ανάπτυξη του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου και για τις, εν γένει, πολύτιμες συμβουλές του, καθώς και τον κ. Δούνια για τη συμβολή και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις του στην κατασκευή των Δένδρων Απόφασης.

Τα στελέχη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. κ.κ. Χρήστο Κ. Ηλία και Αριστείδη Γιάννακα, για την τεχνική υποστήριξη, που μου παρείχαν. Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στην πολύτιμη και συνεχή βοήθεια του κ. Γιάννακα, κατά την υλοποίηση των πειραματικών διατάξεων και, κυρίως, κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων επί 4 συναπτά έτη: η συμμετοχή του στη διεξαγωγή των μετρήσεων ήταν καθοριστικής σημασίας για τη συλλογή των απαραίτητων πειραματικών δεδομένων της διατριβής μου.

Την Κυρία Νικολέτα Χρ. Ηλία, Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π. και Υπεύθυνη του Συστήματος Ποιότητας του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, για την εργαστηριακή βοήθειά της. Τη Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π., υπηρετούσα στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, για τη βοήθεια και καθοδήγησή της, στη χρήση λογισμικών πακέτων. Τη Συνάδελφο Διπλωματούχο Μηχανικό Ε.Μ.Π. και Υποψηφία Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Κυρία Ελένη Π. Νικολοπούλου, για τη βοήθειά της στο λογισμικό πακέτο Electromagnetic Transients Program (EMTP-ATP) και τις εύστοχες παρατηρήσεις της. Την Κυρία Χρύσα Α. Σιγάλα, υπάλληλο Ε.Μ.Π., για τη γραμματειακή υποστήριξη, που μου παρείχε.

Τον Καθηγητή Εφαρμογών του ΤΕΙ Πειραιά κ. Ηρακλή Βυλλιώτη, για την πολύτιμη βοήθεια και τα εποικοδομητικά σχόλιά του, όσον αφορά στην παρουσίαση των σχημάτων της διατριβής μου και τον κ. Γεώργιο Αποστολόπουλο Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., για τον δανεισμό του απαραίτητου εξοπλισμού προς εκτέλεση της ηλεκτροτομογραφίας του εδάφους δοκιμών.

Τις φιλόλογους Κυρίες Κωνσταντίνα Σουρτζή και Νικολέττα Κοκκώνη, για τη γλωσσική επιμέλεια των κειμένων, τόσο της παρούσας διατριβής, όσο και των δημοσιεύσεων μου.

Τέλος, την οικογένειά μου, για την κάθε είδους υποστήριξη που μου παρείχε και παρέχει, καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας
Αθήνα, Ιούνιος 2016



Καυχᾶσθαι δὴ οὐ συμφέρει μοι· ἐλεύσομαι γὰρ εἰς ὀπτασίας
καὶ ἀποκαλύψεις Κυρίου. Οἶδα ἄνθρωπον ἐν Χριστῷ πρὸ ἐτῶν δεκατεσσάρων· εἶτε
ἐν σώματι οὐκ οἶδα εἶτε ἐκτὸς τοῦ σώματος οὐκ οἶδα, ὁ Θεὸς οἶδεν· ἀρπαγέντα τὸν
τοιούτον ἕως τρίτου οὐρανοῦ. καὶ οἶδα τὸν τοιοῦτον
ἄνθρωπον· εἶτε ἐν σώματι εἶτε ἐκτὸς τοῦ σώματος οὐκ οἶδα, ὁ Θεὸς οἶδεν·
ὅτι ἠρπάγη εἰς τὸν παράδεισον καὶ ἤκουσεν ἄρρητα ῥήματα, ἃ οὐκ ἐξὸν ἀνθρώπῳ
λαλήσαι. ὑπὲρ τοῦ τοιούτου καυχῆσομαι, ὑπὲρ δὲ ἑμαυτοῦ οὐ καυχῆσομαι εἰ μὴ ἐν
ταῖς ἀσθενείαις μου. ἐὰν γὰρ θελήσω καυχῆσασθαι,
οὐκ ἔσομαι ἄφρων· ἀλήθειαν γὰρ ἐρῶ· φείδομαι δὲ μὴ τις εἰς ἐμὲ λογισηται ὑπὲρ ὃ
βλέπει με ἢ ἀκούει τι ἐξ ἐμοῦ.

Καὶ τῇ ὑπερβολῇ τῶν ἀποκαλύψεων ἵνα μὴ ὑπεραίρωμαι, ἐδόθη μοι σκόλοψ
τῇ σαρκί, ἄγγελος σατᾶν, ἵνα με κολαφίξῃ ἵνα μὴ ὑπεραίρωμαι. ὑπὲρ τούτου τρὶς
τὸν Κύριον παρεκάλεσα, ἵνα ἀποστῇ ἀπ' ἐμοῦ· καὶ εἰρηκέ μοι·
ἄρκεῖ σοι ἡ χάρις μου· ἡ γὰρ δύναμίς μου ἐν ἀσθενείᾳ τελειοῦται. ἥδιστα οὖν
μᾶλλον καυχῆσομαι ἐν ταῖς ἀσθενείαις μου, ἵνα ἐπισκηνώσῃ ἐπ' ἐμὲ ἡ
δύναμις τοῦ Χριστοῦ. διὸ εὐδοκῶ ἐν ἀσθενείαις, ἐν ὕβρεσιν, ἐν ἀνάγκαις,
ἐν διωγμοῖς, ἐν στενοχωρίαις, ὑπὲρ Χριστοῦ· ὅταν γὰρ ἀσθενῶ, τότε δυνατός εἰμι.

B' Κορ. ιβ' 1-10



Κεφάλαιο 1

Συστήματα γείωσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Τί γάρ ὠφελήσει ἄνθρωπον ἐάν κερδήσῃ τον κόσμον ὅλον, καί ζημιωθῇ την ψυχὴν αὐτοῦ; Ἡ τί δώσει ἄνθρωπος ἀντάλλαγμα τῆς ψυχῆς αὐτοῦ;
Μάρκ. η´ 36-37

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιληπτική αναφορά στην ορολογία και στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Αναφέρονται ο ρόλος των συστημάτων γείωσης, τα βασικά στοιχεία από τα οποία συντίθενται τα εν λόγω συστήματα και τα βασικά μεγέθη, των οποίων, η τιμή καθορίζει την ποιότητα και την απόδοση των αυτών συστημάτων.

1.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Ωστόσο η ροή του ρεύματος προς το σημείο αυτό πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία του συστήματος και σ' όλες τις περιπτώσεις την ελάχιστη πτώση δυναμικού. Τα συστήματα γείωσης χρησιμοποιούνται για την εκτροπή υψηλών ρευμάτων προς τη γη. Σκοπός τους είναι να παρέχουν ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων χαμηλής συχνότητας προς τη γη και να μειώνουν τις πιθανότητες ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς. Τα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος, για παράδειγμα, υπό την επίδραση κεραυνικών ρευμάτων υπόκεινται σε μεταβατικά ρεύματα και υπερτάσεις μεγάλου μεγέθους και πολύ μικρού χρόνου ανόδου, για τα οποία απαιτείται η διάχυσή τους στη γη με απόλυτα ελεγχόμενο τρόπο. Οπότε, σε κάθε περίπτωση απαιτείται ένα ορθά σχεδιασμένο σύστημα γείωσης, το οποίο να πληροί τις προδιαγραφές των διεθνών και εθνικών προτύπων και να είναι ικανό να διαχέει υψηλά ρεύματα στη γη με ασφάλεια ασχέτως του τύπου σφάλματος.

Στην περίπτωση που ένα σύστημα είναι εξ ολοκλήρου απομονωμένο, προκειμένου να βρίσκεται σε πλήρη προστασία, η εφαρμογή συστήματος γείωσης δεν είναι αναγκαία για την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Ωστόσο, στην πράξη τα συστήματα δεν είναι απομονωμένα, αλλά βρίσκονται σε επαφή με εξωτερικούς μηχανισμούς σύζευξης, επομένως στην περίπτωση εμφάνισης κεραυνού παρατηρείται αύξηση του δυναμικού και μεταβατική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ του συστήματος και του εξωτερικού χώρου, προκαλώντας σημαντικές καταστροφές και πιθανόν τραυματισμούς. Για την αποφυγή των φαινομένων που αναφέρθηκαν ανωτέρω, επιβάλλεται η δημιουργία και η εγκατάσταση συστημάτων γείωσης για τη μεταφορά του ρεύματος που φέρει ο κεραυνός στη γη.

1.2 Γείωση

1.2.1 Ρόλος και λειτουργία των συστημάτων γείωσης

Με τον όρο **γείωση** περιγράφεται η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία μιας εγκατάστασης, ενός ηλεκτρικού/ηλεκτρονικού κυκλώματος ή μιας συσκευής με τη γη, ή με αγώγιμο σώμα τέτοιου μεγέθους που να μπορεί να συμπεριφέρεται όπως η γη. Σκοπός της γείωσης είναι ο καθορισμός και η διατήρηση του δυναμικού της γης ή του αγώγιμου σώματος στους αγωγούς που συνδέονται μ' αυτό [1, 2]. Αυτή η αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος, επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του κατάλληλου, ανάλογα πάντα με την περίπτωση, συστήματος γείωσης. **Σύστημα γείωσης** καλείται ο συνδυασμός διαφόρων τύπων ομοειδών ή μη γειωτών, καθώς και το σύνολο των εξαρτημάτων που απαιτούνται για τη σύνδεση και στήριξή τους. Με τον όρο **γειωτές** γίνεται αναφορά σ' έναν ή περισσότερους αγωγούς κάποιου γεωμετρικού σχήματος, ο οποίος ή οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο έδαφος, προκειμένου να εξασφαλίσουν την καλύτερη δυνατή επαφή με τη γη και κατά συνέπεια την αποτελεσματικότερη διάχυση των πιθανών ρευμάτων σφάλματος ή και κεραυνοπληξιών στη γη.

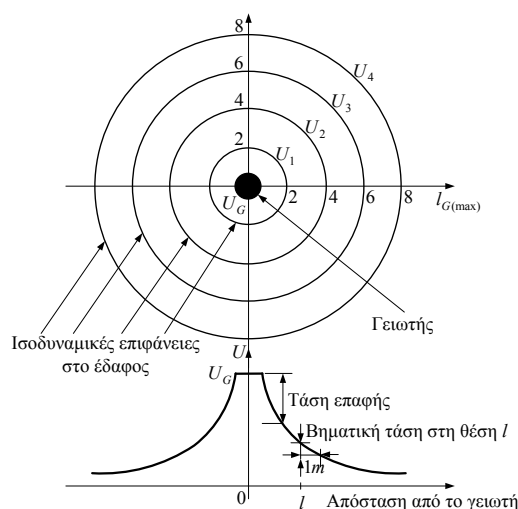
Ισοδύναμα με τον όρο **γειωτές** συναντάται στη βιβλιογραφία και ο όρος **ηλεκτρόδια γείωσης**. Βασική απαίτηση για τα ηλεκτρόδια γείωσης είναι να παρουσιάζουν όσο το δυνατό υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, σε συνδυασμό

με αντοχή και σταθερότητα στον χρόνο, όπως για παράδειγμα σε φαινόμενα διάβρωσης και καταπονήσεων. Για αυτόν τον λόγο, το υλικό κατασκευής τους στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι χαλκός, χάλυβας θερμά επιψευδαργυρωμένος, χάλυβας ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένος ή ανοξείδωτος χάλυβας [2].

Όπως προαναφέρθηκε, το ηλεκτρικό ρεύμα ακολουθεί πάντα τη διαδρομή με τη χαμηλότερη σύνθετη αντίσταση, καθώς κατευθύνεται προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Το δυναμικό της γης κατά σύμβαση θεωρείται μηδενικό (0 Volts) [3] και προσεγγιστικά η αντίσταση της γης θεωρείται επίσης μηδενική. Παρ' όλα αυτά, στην πράξη, όταν κεραυνικά ρεύματα ή ρεύματα σφάλματος βιομηχανικής συχνότητας διαχέονται από την εγκατάσταση στη γη, αναπτύσσεται πτώση τάσης ή αλλιώς διαφορά δυναμικού κατά μήκος της διαδρομής, με άμεσο κίνδυνο ηλεκτροπληξίας των ανθρώπων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, μέσω των λεγόμενων **τάσεων επαφής** και **βηματικών τάσεων**.

Τάση επαφής (touch voltage) είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή.

Βηματική τάση (step voltage) είναι η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος $1m$ και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο [2]. Η μορφή και τα χαρακτηριστικά αυτών των τάσεων φαίνονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Τάση επαφής και βηματική τάση.

Όλα τα εκτεθειμένα αγωγήμα 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. Τα διαφορετικά μεταξύ τους αγωγήμα μέρη, με τα οποία είναι δυνατό να υπάρξει ταυτόχρονη επαφή, θα πρέπει να γειώνονται μέσω του ίδιου ηλεκτροδίου γείωσης. Οι διατάξεις γείωσης μπορούν να χρησιμοποιούνται είτε συγχρόνως για την προστασία και τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης, είτε μόνο για σκοπούς προστασίας ή λειτουργίας της εν λόγω εγκατάστασης. Σε περιπτώσεις που μια διάταξη γείωσης προορίζεται για προστατευτικό και λειτουργικό σκοπό, προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στις απαιτήσεις που αφορούν τη χρήση της για προστασία [1, 2].

Συνοπτικά, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα [4]:

1. Προστασία του ανθρώπου από έκθεση σε διαφορές δυναμικού, όπως για παράδειγμα σε τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις, ικανές να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία.
2. Εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας ενός ηλεκτρικού ή ηλεκτρονικού κυκλώματος, επιτυγχάνοντας τις ακόλουθες λειτουργίες:
 - ✓ Σταθεροποίηση των υπερεντάσεων που οφείλονται σε μονοφασικά σφάλματα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των ενεργών φάσεων και της γείωσης.
 - ✓ Σε περίπτωση σφαλμάτων προς τη γη, παροχή μιας διαδρομής χαμηλής σύνθετης αντίστασης.
 - ✓ Σε περίπτωση ατμοσφαιρικών εκκενώσεων (κεραυνικών ρευμάτων), διάχυση με ασφάλεια των τεράστιων ποσών μεταφερόμενης ενέργειας στο έδαφος προστατεύοντας έτσι την κατασκευή και τον εξοπλισμό.
 - ✓ Καθορισμός του επιπέδου αναφοράς της τάσης για ολόκληρο το σύστημα, το οποίο καλείται να προστατεύσει.
 - ✓ Μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και περιορισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

1.2.2 Τύποι γείωσης

Οι γειώσεις ανάλογα με τον λειτουργικό τους σκοπό σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους, παρ' όλο που στην πράξη δύνανται να συνυπάρχουν σ' ένα σύστημα γείωσης. Οι τύποι αυτοί είναι:

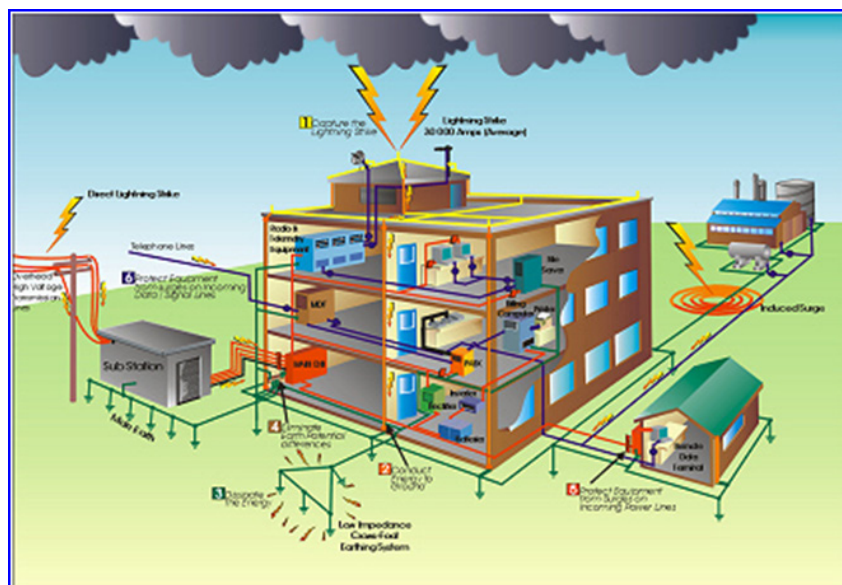
- Γείωση λειτουργίας.
- Γείωση προστασίας.
- Γείωση ασφαλείας.

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 όπως αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως κατά την εκδήλωση σφαλμάτων προς γη [5].

Γείωση προστασίας καλείται η χωρίς παρεμβολή άλλων αντιστάσεων (πλην της αντίστασης γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης) γείωση κάθε αγώγιμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου, που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγώγιμα μέρη μίας εγκατάστασης ή κατασκευής, τα οποία δε συμμετέχουν στη λειτουργία της (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδύων και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ.) και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά [5].

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 χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκομένων ανθρώπων και αντικειμένων στον προστατευόμενο χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι μία διάταξη γείωσης προστασίας ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση αντικεραυνικής προστασίας (Σχήμα 1.2), όταν βέβαια πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 62305-3.



Σχήμα 1.2: Συνδυασμός συστήματος γείωσης και συστήματος αντικεραυνικής προστασίας [6].

1.3 Ειδική αντίσταση εδάφους

1.3.1 Ορισμός και παράγοντες που την επηρεάζουν

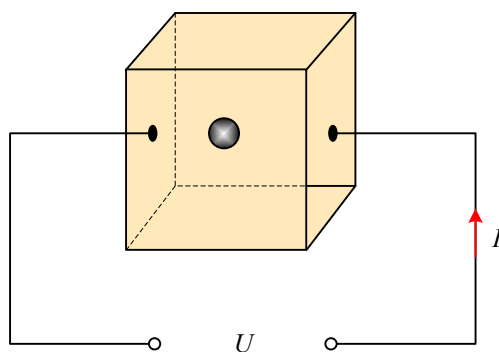
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού είναι ένα μέτρο του πόσο ισχυρά αντιστέκεται το υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικό με χαμηλή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης επιτρέπει την εύκολη διέλευση του ρεύματος, οπότε και το υλικό χαρακτηρίζεται ως καλός αγωγός. Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το ohm-meter [$\Omega \cdot m$].

Σε περίπτωση αγωγού σταθερής διατομής η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ που παρουσιάζει δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (1.1)$$

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

Στην περίπτωση του εδάφους όμως, το οποίο δε θεωρείται αγωγός, αλλά αντίθετα ημιαγωγός, ο ορισμός της ειδικής αντίστασης που αυτό εμφανίζει είναι διαφορετικός. Συγκεκριμένα, 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 1.3). Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης.



Σχήμα 1.3:Ειδική αντίσταση εδάφους.

Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και, συνεπώς, ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων ή αγωγιμοτήτων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του (ρ), η οποία μετριέται συνήθως σε $[\Omega \cdot \text{m}]$. Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από την ποσότητα του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, καθώς και από την ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Με άλλα λόγια, η αγωγιμότητα του εδάφους γίνεται αγωγιμότητα μέσω του νερού που κατακρατείται στο έδαφος και έτσι, η αγωγιμότητα είναι ηλεκτρολυτική. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γείωσης και μη γραμμική [7].

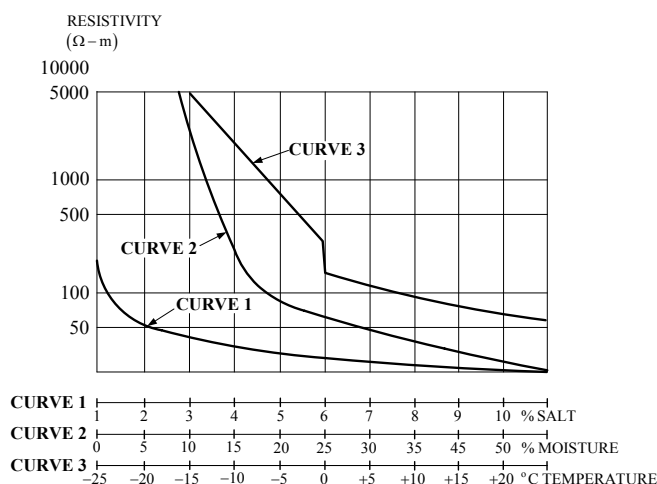
Ειδικότερα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Αναφέρεται ενδεικτικά ότι σ' ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (% κ.β.) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρ' όλα αυτά, η υγρασία

από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο αν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά, για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη, θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2), θειικό χαλκό (CuSO_4) ή θειικό μαγνήσιο (MgSO_4), είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός [7].

Επιγραμματικά οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους είναι [7]:

- i. Ο τύπος του εδάφους.
- ii. Επίδραση του μεγέθους των κόκκων εδάφους.
- iii. Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία.
- iv. Επίδραση των διαλυμένων αλάτων στο νερό.
- v. Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης.
- vi. Επίδραση της έντασης του πεδίου (voltage gradient).
- vii. Επίδραση της μορφής της τάσης.

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας με βάση στοιχεία του προτύπου ANSI/IEEE Std 80-2013 [2].



Σχήμα 1.4: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας [2].

1.3.2 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι απαραίτητη η ροή ρεύματος μέσω αυτού. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο τοποθετώντας ηλεκτρόδια μέσα στη γη τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύμα. Συγκεκριμένα, ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται στο υπέδαφος από το θετικό ηλεκτρόδιο A και εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο B (ηλεκτρόδια ρεύματος), με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί ηλεκτρικό πεδίο εξαρτώμενο από τη δομή του υπεδάφους. Με τη βοήθεια δύο άλλων ηλεκτροδίων M, N (ηλεκτρόδια δυναμικού) μετριέται η διαφορά δυναμικού ΔU .

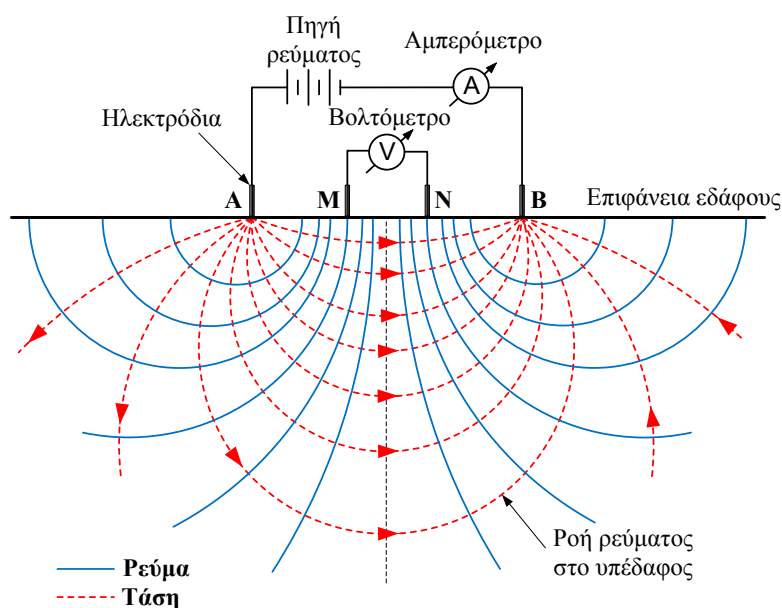
Αναλυτικότερα, η τάση σε οποιοδήποτε σημείο υπολογίζεται βάσει του τύπου [7, 8]:

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (1.2)$$

όπου r_A και r_B είναι η απόσταση του υπ' όψιν σημείου από τα A και B. Τότε η διαφορά δυναμικού U_{MN} δίδεται από τον ακόλουθο τύπο [7, 8]:

$$U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (1.3)$$

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.



Σχήμα 1.5: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης.

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. Από την επεξεργασία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προκύπτει η κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, δηλαδή η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.

Σε θέσεις όπου υπάρχει περίπτωση η ειδική αντίσταση του εδάφους να μεταβάλλεται με το βάθος, οι μετρήσεις πιθανόν να μην είναι επαρκείς σε μία μόνο κατεύθυνση αλλά να απαιτηθεί να γίνουν και σε διαφορετικές κατευθύνσεις (άξονες) ή να απαιτηθεί μεταβολή των αποστάσεων των ηλεκτροδίων ράβδων από το σημείο M, προκειμένου να ερευνηθεί η μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε οριζόντια επίπεδα.

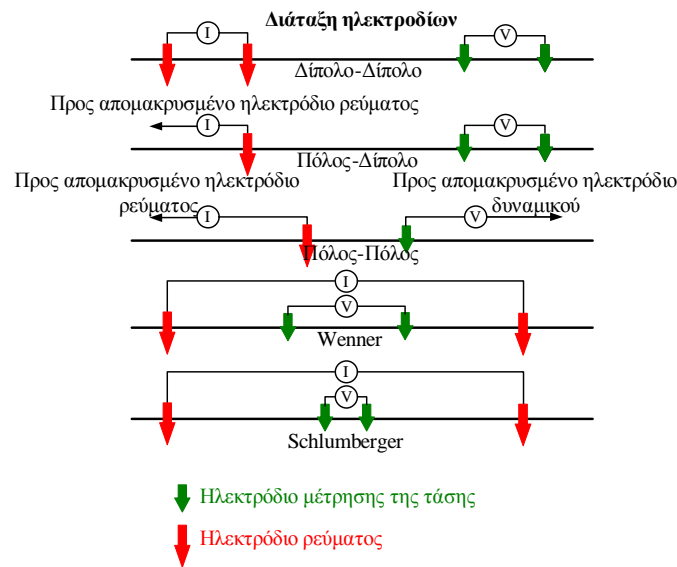
Οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους οι οποίες προτείνονται από τα διεθνή πρότυπα [2, 9] είναι:

- 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 [9] και της οποίας η αρχή λειτουργίας περιγράφεται από το Σχήμα 1.5. Οι βασικές παραλλαγές αυτής της μεθόδου είναι [7, 8]:

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

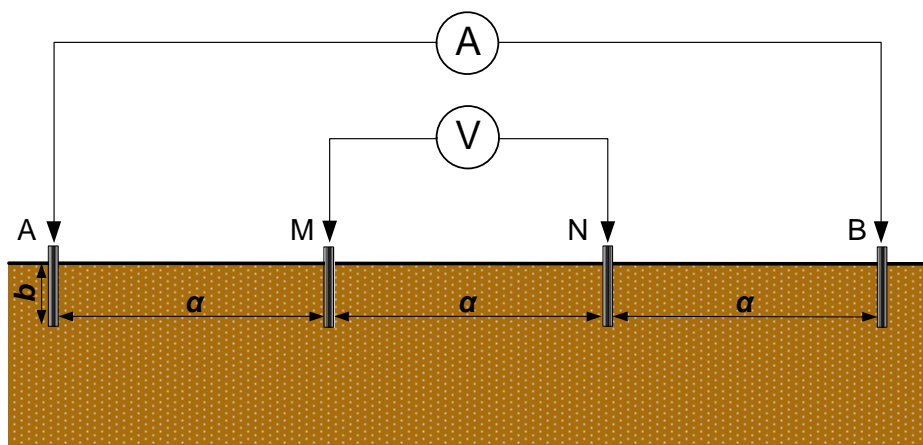
Μια σχηματική αναπαράσταση των σημαντικότερων απ' αυτές τις διατάξεις μέτρησης δίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Διατάξεις μέτρησης της ειδικής αντίστασης.

Η μέθοδος Wenner, που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε το 1916 από τον F. Wenner [10], προτιμάται κατά κόρον από τους ερευνητές και μηχανικούς ανά τον κόσμο, λόγω της εύκολης και τάχιστης εφαρμογής της, αφού δεν απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις και ειδικός εξοπλισμός. Επειδή η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, γίνεται ακολούθως μια σύντομη περιγραφή της εν λόγω διάταξης.

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται τέσσερα μικρού μήκους ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντια απόσταση a μεταξύ τους και σε βάθος b (όχι μεγαλύτερο από $0,05a$), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.7. 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 1.7: Διάταξη Wenner.

Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς την ένταση του ρεύματος ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [7, 8]:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2 + 4b^2)}} - \frac{2a}{\sqrt{(4a^2 + 4b^2)}}} = \frac{4\pi a R}{n} \quad (1.4)$$

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

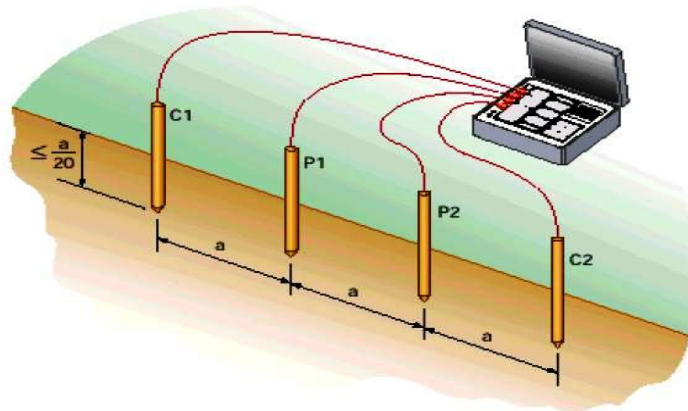
Στην περίπτωση που $a \ll b$ τότε:

$$\rho = 4\pi a R \quad (1.5)$$

ενώ αν $b \ll a$ τότε η εξίσωση (1.4) απλοποιείται στην:

$$\rho = 2\pi a R \quad (1.6)$$

η οποία δίνει τη φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους σε βάθος a . Ενδεικνύεται το βάθος b να μην ξεπερνά το 1/20 της απόστασης a για να εφαρμοσθεί η σχέση (1.6), όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 1.8: Διάταξη Wenner με εφαρμογή του προσεγγιστικού τύπου.

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· για παράδειγμα οι τιμές U/I ποικίλλουν για όποιες αλλαγές του a .

Όταν το έδαφος είναι ομοιογενές, η ειδική αντίσταση που υπολογίζεται από την εξίσωση (1.2) είναι σταθερή και ανεξάρτητη, τόσο από την απόσταση των ηλεκτροδίων, όσο και από την τοποθεσία της επιφάνειας. Η παρουσία, όμως, ανομοιογενειών στο υπέδαφος γίνεται αιτία μεταβολών της ειδικής αντίστασης,

ανάλογες της σχετικής θέσης των ηλεκτροδίων. Η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση, τότε, είναι γνωστή ως *φαινόμενη ειδική αντίσταση*. Αυτή, καθιστά δυνατή την ποιοτική εκτίμηση των ηλεκτρικών παραμέτρων του μέσου, δε δίνει όμως την πραγματική ειδική αντίσταση και τα σχήματα των ανομοιογενειών.

Εξαιτίας τούτων ορίζεται μια φαινόμενη ειδική αντίσταση, η οποία περιγράφει τη σχέση της τάσης, της έντασης του ρεύματος και της απόστασης των ηλεκτροδίων a , όπως φαίνεται ακολούθως [7]:

$$\rho'_a = 2\pi a \frac{U}{I} \quad (1.7)$$

Αποδεικνύεται ότι, αν το έδαφος είναι ομοιογενές, η ακριβής τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι ανεξάρτητη του a και η τιμή είναι σχεδόν ίδια με την πραγματική ειδική αντίσταση του εδάφους.

1.3.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι διάφορες μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους, η ανάλυση και ερμηνεία τους, καθώς και η ανάπτυξη προσεγγιστικών μοντέλων για την αναπαράσταση της δομής του εδάφους, υπήρξε αντικείμενο πολλών ερευνητών για δεκαετίες.

Οι Dawalibi-Blattner [11] προσπάθησαν να αναπτύξουν τεχνικές ερμηνείας των αποτελεσμάτων μέτρησης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, βασίζοντας τη μελέτη τους σε εμπειρικές και αναλυτικές ερμηνείες. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη μία μέθοδο συνέκριναν τις καμπύλες των πειραματικών τιμών με αντίστοιχες λογαριθμικές που είχαν θεωρητικώς υπολογίσει και με βάση το ποσοστό σύγκλισης αυτών των καμπυλών, διατυπώνονταν συμπεράσματα για το διστρωματικό μοντέλο εδάφους που μελετούσαν. Κατά μία άλλη υπολογιστική μέθοδο, με χρήση προγραμματιστικού πακέτου και με βάση τον αλγόριθμο *steepest-descent*, 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 εξέλιξαν οι Μελιόπουλος-Παπαλεξόπουλος [12] και οι Seedher-Aroga [13], οι οποίοι ανέπτυξαν 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 αναπτυχθέντος προγράμματος SOMIP (Soil Measurements Interpretation Program) και με βάση την ανάλυση που γίνεται 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. Ομοίως, με τη μέθοδο των δεύτερων, αναπτύσσονται πεπερασμένες εκφράσεις για τον υπολογισμό του δυναμικού και οι συντελεστές των εν λόγω εκφράσεων βελτιστοποιούνται με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου SPEF (Soil Parameters Estimation using Finite Expressions).

Στη συνέχεια οι Takahashi-Kawase [14] ανέλυσαν τη φαινόμενη ειδική αντίσταση μιας πολυστρωματικής δομής του εδάφους, επιλύοντας την εξίσωση δυναμικού [7], που παράγεται από σημειακές πηγές ρεύματος ή από ημισφαιρικά ηλεκτρόδια σε επαφή με τριστρωματικό μέσο. Διατύπωσαν μια γενικότερη σχέση για τον υπολογισμό των παραμέτρων μιας τέτοιας δομής, επεκτείνοντας τις αντίστοιχες σχέσεις του διστρωματικού μοντέλου. Με βάση τη μαθηματική σχέση που πρότειναν, κατέστη ικανή η χάραξη των καμπυλών ρ - a για αυθαίρετο αριθμό N στρωμάτων. Η θεωρητική έκφραση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που διατύπωσαν είναι η ακόλουθη [14]:

$$\rho_a = \rho_1 (1 + 2F_N(a) - F_N(2a)) \quad (1.8)$$

με $F_N(x) = 2x \int_0^\infty \frac{K_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda$, η οποία μπορεί να γραφεί και ως:

$$\rho_a^c = \rho_1 \{1 + 4a \int_0^\infty f(\lambda) [J_0(a\lambda) - J_0(2a\lambda)] d\lambda\} \quad (1.9)$$

όπου $J_0(\lambda x)$ είναι η συνάρτηση *Bessel* πρώτου είδους μηδενικής τάξης, x η οριζόντια απόσταση από το σημειακό ηλεκτρόδιο κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους και λ παράμετρος:

$$f(\lambda) = \frac{k_1 e^{-2h_1 \lambda} + k_2 e^{-2(h_1+h_2)\lambda}}{1 + k_1 k_2 e^{-2h_1 \lambda} - k_1 e^{-2h_1 \lambda} - k_2 e^{-2(h_1+h_2)\lambda}} \quad (1.10)$$

$k_1 = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$, $k_2 = (\rho_3 - \rho_2) / (\rho_3 + \rho_2)$, h_i και ρ_i είναι αντίστοιχα το πάχος και η ειδική αντίσταση του στρώματος i .

Σ' αυτήν τη θεωρητική βάση στηρίχθηκε αργότερα ο H. Yang [15] για να αναπτύξει το δικό του τριστρωματικό μοντέλο εδάφους, επιλύοντας το

ανάστροφο πρόβλημα προσδιορισμού του μοντέλου εδάφους από δεδομένα μετρήσεων της διάταξης Wenner. Για το τριστρωματικό μοντέλο, το πρόβλημα ουσιαστικά ανάγεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης των πέντε μεταβλητών ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , h_1 και h_2 της σχέσης (1.10), προκειμένου η θεωρητική φαινόμενη ειδική αντίσταση να φαίνεται όσο το δυνατό πιο κοντά σ' αυτήν που βρέθηκε με χρήση των αποτελεσμάτων στη σχέση (1.7), από m ζεύγη μετρήσεων με διαφορετικές αποστάσεις, ώστε:

$$\sum_{i=1}^m |\rho_{ai}^c - \rho_{ai}^t| / \rho_{ai}^t = \min \quad (1.11)$$

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης των πέντε μεταβλητών λοιπόν μπορεί να μετασχηματιστεί σ' ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων, η λύση του οποίου προκύπτει από τη σχέση (1.11) ως ακολούθως [15]:

$$g_i(x) = \rho_{ai}^c(x) - \rho_{ai}^t = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.12)$$

όπου διαφορετικό i αντιστοιχεί σε διαφορετικό a .

Στη βάση των άπειρων ολοκληρωμάτων των Takahashi-Kawase στηρίχθηκαν ο Uribe με τους συνεργάτες [16], οι οποίοι 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. Για την περικοπή των ολοκληρωμάτων πρότειναν ένα νέο κριτήριο περικοπής, που βασίζεται στην εκθετική συνάρτηση. Επίσης, εφάρμοσαν δύο τεχνικές βελτιστοποίησης, μία που βασίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους και μία που βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, με σκοπό την ακριβέστερη προσαρμογή των καμπυλών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που λαμβάνονται από μετρήσεις και από τα ολοκληρώματα του Takahashi, καθώς και για αξιολόγηση της ακρίβειας. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συγκρίνονται με μετρήσεις της ειδικής αντίστασης που έχουν γίνει με εφαρμογή της Wenner.

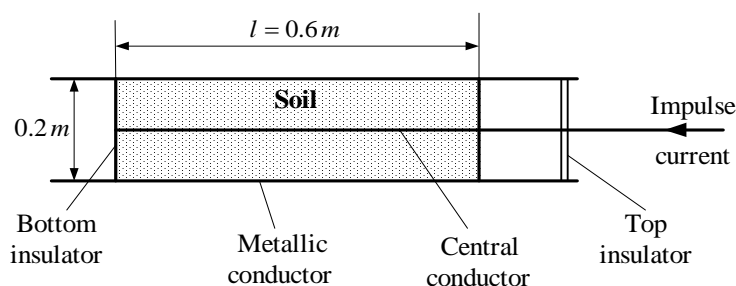
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών έχουν αναπτυχθεί και διάφορες άλλες μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του διστρωματικού μοντέλου από δεδομένα μετρήσεων της ειδικής αντίστασης εδάφους. Η χρήση γενετικών αλγορίθμων ανάγει το πρόβλημα προσδιορισμού των παραμέτρων σε

πρόβλημα βελτιστοποίησης, δηλαδή επιλογή των βέλτιστων τιμών, σύμφωνα με τον Γκόνο και τους συνεργάτες [17 , 18], με αξιοσημείωτη σύγκλιση αποτελεσμάτων προς τις πραγματικές πειραματικές τιμές. Την ίδια τεχνική ακολούθησαν και ο Galixto με τους συνεργάτες [19], των οποίων η μεθοδολογία προσδιορίζει και το βέλτιστο πλήθος στρωμάτων. Παράλληλα οι Lagace-Vuong [20] πρότειναν ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη για την ερμηνεία και επαλήθευση των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης, μέσω του υπολογισμού της γεωφυσικής αντιστροφής, ελαχιστοποιώντας το τετράγωνο της λογαριθμικής απόστασης μεταξύ της θεωρητικής καμπύλης της ρ και των πειραματικών μετρήσεων.

Όλες οι προαναφερθείσες μελέτες είχαν ως κύρια προϋπόθεση την ύπαρξη πειραματικών μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και μάλιστα, στη συντριπτική πλειοψηφία αυτών των μελετών, οι μετρήσεις ήταν on site με τη μέθοδο Wenner. Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων όμως, με δείγματα χώματος στο εργαστήριο, δεν είναι γνωστή η ειδική αντίστασή τους και είναι απαραίτητο να γίνει υπολογισμός της ειδικής αντίστασης. Οι Loboda [21], Γκόνος [22] και Chen [23], χρησιμοποίησαν δύο κυλινδρικά ομοαξονικά ηλεκτρόδια και στο μεταξύ τους διάκενο τοποθετήθηκε το δείγμα του υπό εξέταση χώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9. 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 του τύπου (1.13) υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του δείγματος:

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (1.13)$$

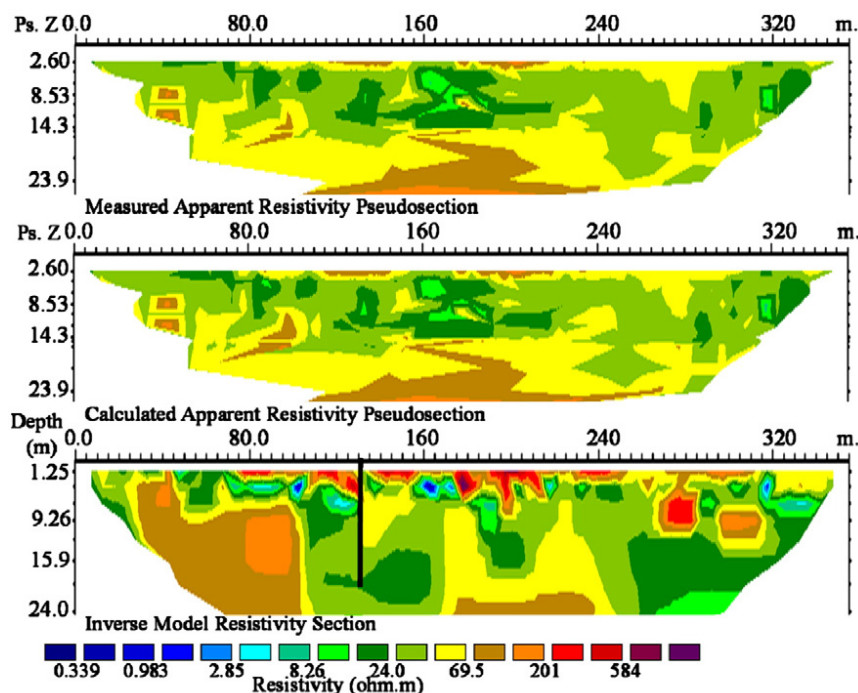
όπου l είναι το μήκος του κυλίνδρου, r_e είναι η ακτίνα του εξωτερικού κυλίνδρου και r_i είναι η ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου.



Σχήμα 1.9: Ομοαξονικό κυλινδρικό ηλεκτρόδιο για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης [21].

Η Liu [24] στα πειράματά της χρησιμοποίησε ημισφαιρική διάταξη, ενώ η Nor [25] χρησιμοποίησε διάταξη παράλληλων πλακών, που παράγει ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο, σύμφωνα με το πρότυπο BS 1377 [26]. Τέλος οι Manna-Chowdhuri [27] χρησιμοποίησαν διάταξη που αποτελείται από έναν κυλινδρικό σωλήνα από PVC, διαμέτρου 10cm και ύψους 5cm και δύο ασάλινες πλάκες διαμέτρου 13cm, η οποία παράγει ομοιογενές πεδίο. Με τη βοήθεια γέφυρας μετρείται η ωμική αντίσταση και κατόπιν εξ αυτής η ειδική αντίσταση του δείγματος.

Τέλος, τα τελευταία χρόνια, εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία η ηλεκτροτομογραφία, μία μέθοδος τελευταίας τεχνολογίας και με ακριβή αποτελέσματα. Σύμφωνα μ' αυτήν τη μέθοδο, με κατάλληλο εξοπλισμό, εκατοντάδες μετρήσεις σαρώνουν εξονυχιστικά το έδαφος, κάθετα και πλάγια. Το υπέδαφος παρουσιάζεται 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 1.10) το οποίο αποτυπώνει το υπέδαφος με τις τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασής του, ανά στρωματικό βάθος, με πολύ μεγάλη ακρίβεια και όχι της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, που δίνει μόνη της η μέθοδος Wenner [28].



Σχήμα 1.10: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ηλεκτροτομογραφίας [28].

Εκτός από την έρευνα πάνω σε μεθόδους μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους και την ανάπτυξη μοντέλων για την προσομοίωση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του εδάφους και των αγώγιμων χαρακτηριστικών του, τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχουν δημοσιευθεί ερευνητικές εργασίες, στις οποίες γίνεται μελέτη, τόσο της μεταβολής της τιμής της ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όσο και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν την τιμή της.

Οι Ma-Dawalibi σε αντίστοιχες εργασίες τους, μελέτησαν αφενός, την επίδραση της παρουσίας υπόγειων μεταλλικών κατασκευών στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης, σε διάφορους τύπους εδάφους, με διάφορες μεταλλικές κατασκευές και με διάφορες μεθόδους μέτρησης [29], αφετέρου την επίδραση που μπορεί να έχει στη μέτρηση και η επαγωγική σύζευξη μεταξύ των αγωγών μέτρησης [30]. Όσον αφορά την πρώτη μελέτη, κατέληξαν ότι η παρουσία μεταλλικών δομών επηρεάζει σημαντικά τη μέτρηση και ο βαθμός επιρροής εξαρτάται από τη μέθοδο μέτρησης, από το προφίλ της περιοχής που γίνεται η μέτρηση και από τη δομή του εδάφους. Η δεύτερη ερευνητική εργασία έδειξε ότι η μέθοδος Wenner είναι πιο ευαίσθητη στην εσωτερική επαγωγική σύζευξη των αγωγών απ' ό,τι η Schlumberger, αλλά σε όρους έντασης του σήματος είναι κυρίαρχη, οπότε σαφώς και προτιμάται σε πολλές πρακτικές εφαρμογές.

Επίσης, επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν σε μεγάλο 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 [31]. Η υγρασία του εδάφους, επίσης, 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 [32]. Επιπρόσθετα, οι τιμές της μετρούμενης εντοπισμένης ειδικής αντίστασης (σημείο προς σημείο) ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά από τη μέση ειδική αντίσταση όλης της εξεταζόμενης περιοχής [33].

Η συστηματική έρευνα της επίδρασης εξωγενών και μη παραγόντων στην ειδική αντίσταση έχει ως αποτέλεσμα τη διατύπωση μαθηματικών ή εμπειρικών

σχέσεων, οι οποίες περιγράφουν αυτήν την εξάρτηση και αποτελούν ένα εργαλείο για τον υπολογισμό της τιμής της ειδικής αντίστασης. Τέτοιες σχέσεις, που περιγράφουν τον εκάστοτε παράγοντα, είναι οι ακόλουθες [34]:

$$\text{➤ Φύση και διάταξη των στερεών συστατικών: } F = \frac{\rho}{\rho_w} = a \cdot \phi^{-m} \quad (1.14)$$

όπου F είναι συντελεστής αναλογίας και καλείται *παράγοντας σχηματισμού*, a και m σταθερές που σχετίζονται αντίστοιχα με τους συντελεστές κορεσμού και συγκόλλησης, ρ και ρ_w οι ειδικές αντιστάσεις του σχηματισμού του εξεταζόμενου δείγματος και του περιεχόμενου, σ' αυτό, νερού αντίστοιχα και ϕ το πορώδες του δείγματος.

$$\text{➤ Περιεκτικότητα σε νερό: } S^n = \frac{a \cdot \rho_w}{\phi^m \cdot \rho} \quad (1.15)$$

όπου S ο βαθμός κορεσμού του νερού και n μια παράμετρος σχετική με τον βαθμό S .

$$\text{➤ Εμπειρική σχέση για την περιεκτικότητα νερού: } \rho_{(z,t)} = a + b \cdot \theta_{(z,t)} \quad (1.16)$$

όπου a και b εμπειρικές σταθερές που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους και του νερού (π.χ. πορώδες, θερμοκρασία, περιεκτικότητα σε άλατα).

$$\text{➤ Θερμοκρασία: } \sigma_t = \sigma_{25^\circ\text{C}} [1 + \alpha \cdot (T - 25^\circ\text{C})] \quad (1.17)$$

όπου σ_t η ειδική αγωγιμότητα του εδάφους στη θερμοκρασία του πειράματος και α ένας συντελεστής διόρθωσης ίσος με 2,02%.

Τέλος, ιδιαίτερης αναφοράς χρήζουν και η περιεκτικότητα και το είδος των αλάτων στο νερό που περιέχει το εξεταζόμενο έδαφος, καθώς τα άλατα καθορίζουν την αγωγιμότητα του νερού, η οποία με τη σειρά της επιδρά σημαντικά στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Βρέθηκε ότι διαλύματα χώματος ίδιας συγκέντρωσης, αλλά διαφορετικής ιοντικής σύνθεσης (H^+ , OH^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^- , ...), παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης λόγω της διαφορετικής κινητικότητας των ιόντων [34].

1.4 Αντίσταση γείωσης

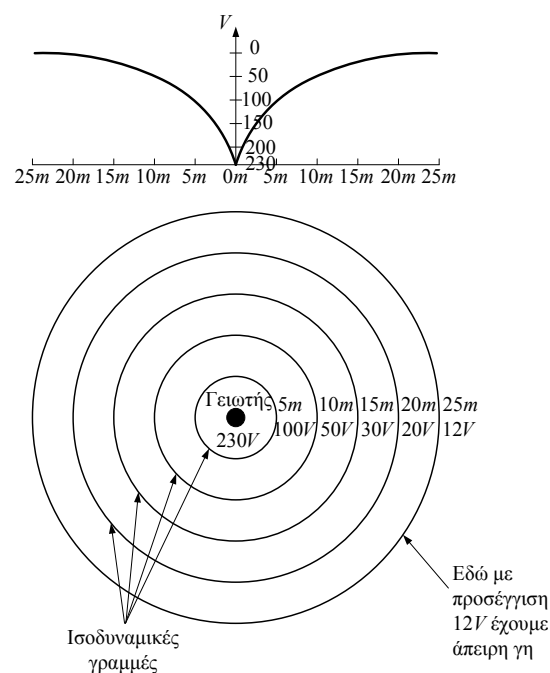
1.4.1 Εισαγωγή

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, θεωρείται δε ότι το δυναμικό της άπειρης γης είναι μηδέν (0). Για πρακτικούς λόγους, η «άπειρη απόσταση» θεωρείται 5–10 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 ροής και δυναμικού γύρω από τον γειωτή. Όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον γειωτή, τόσο μειώνεται το δυναμικό. Το διάγραμμα δυναμικού-απόστασης ονομάζεται χοάνη δυναμικού του γειωτή (Σχήμα 1.11). Από τη χοάνη του δυναμικού μπορεί κανείς να εκτιμήσει τις τάσεις επαφής και τη βηματική τάση. Η χοάνη δυναμικού δίνει, επίσης, την περιοχή επίδρασης του γειωτή ή την απόσταση της άπειρης γης.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η χοάνη δυναμικού δεν εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους, εφόσον φυσικά το έδαφος είναι ομοιογενές. Η χοάνη δυναμικού χρησιμοποιείται, επίσης, για να γίνει μια εκτίμηση του σφάλματος στη μέτρηση της αντίστασης γείωσης. Αν, για παράδειγμα, μετρηθεί η αντίσταση γείωσης του παραπάνω γειωτή, από το ηλεκτρόδιο μέχρι και 25m μακριά, τότε η μετρούμενη αντίσταση θα είναι το 95% της πραγματικής.



Σχήμα 1.11: Χοάνη δυναμικού.

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 $R=U/I$ [7, 8].

Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι, για τον λόγο αυτόν, μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου, εκφράζει δε την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το έδαφος που το περιβάλλει. Συνεπώς, 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 συμπέρασμα λοιπόν μπορεί να διατυπωθεί ότι, η ισοδύναμη αντίσταση γείωσης συνίσταται από τρία μέρη [7]:

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

1.4.2 Υπολογισμός και μέτρηση της αντίστασης γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση)

Μια ηλεκτρική σύνδεση με τη γη απαιτεί τον συμβιβασμό της χαμηλής αντίστασης γείωσης με το μικρότερο δυνατό κόστος. Αυτό το πρόβλημα εστιάζεται στην ανάγκη ύπαρξης εξισώσεων, έτσι, ώστε να καθίσταται δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών διατάξεων γείωσης. Προκειμένου να συγκριθούν δύο διατάξεις γειωτών, συχνά, γίνεται η υπόθεση ότι οι διατάξεις είναι τοποθετημένες σε εδάφη της ίδιας ομοιογενούς αγωγιμότητας. Όπως αναλύθηκε εκτενώς, σε προηγούμενες παραγράφους, εμφανίζεται αξιοσημείωτη μεταβολή της αγωγιμότητας του εδάφους στην περιοχή γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης.

Η επίδραση, όμως, αυτής της μεταβολής αποτελεί εντελώς ξεχωριστό πρόβλημα, που απαιτεί διαφορετικού είδους προσεγγίσεις [35].

Ένας πολύ συνηθισμένος τύπος συνδέσμου γείωσης είναι αυτός της κατακόρυφης ράβδου γείωσης. Μια τέτοια ράβδος 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 [35]. Επομένως, το πρόβλημα της αντίστασης γείωσης μιας ράβδου γείωσης, κατά τον Dwight [35], είναι ουσιαστικά το ίδιο με το πρόβλημα της χωρητικότητας ενός μεμονωμένου κυλίνδρου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μεγάλο, εν συγκρίσει με την ακτίνα του. Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει την τελευταία περίπτωση [36]:

$$\frac{C}{l} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1,22741}{4\lambda^2} + \frac{2,17353}{8\lambda^3} + \frac{11,0360}{16\lambda^4} + \dots \quad (1.18)$$

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*

Αντιστρέφοντας την προηγούμενη σειρά, προκύπτει μια έκφραση που είναι πιο βολική για πρακτικούς λόγους και η οποία συγκλίνει πιο γρήγορα, σ' ένα μικρό όριο. Η έκφραση αυτή είναι η ακόλουθη [35]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{l} \left(\lambda - 0,306852 - \frac{0,17753}{\lambda} - \frac{0,5519}{\lambda^2} - \dots \right) \quad (1.19)$$

Μια καλύτερη προσέγγιση για τη χωρητικότητα, δίνει η μέθοδος του μέσου δυναμικού [35]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 + 0,63 \frac{r}{l} - 0,16 \frac{r^2}{l^2} + 0,015 \frac{r^4}{l^4} \dots \right) \quad (1.20)$$

Για κυλίνδρους μεγάλου μήκους, με διαστάσεις ανάλογες των κατακόρυφων ράβδων, ο όρος r/l και οι δυνάμεις του έχουν πολύ μικρή επίδραση και μπορούν να αμεληθούν, χωρίς σημαντικό σφάλμα στην ακρίβεια, δίνοντας:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (1.21)$$

Η μέθοδος αλλαγής μιας εξίσωσης για τη χωρητικότητα σε μια εξίσωση για την αντίσταση γείωσης μπορεί να προκύψει θεωρώντας την απλή περίπτωση δύο παραλλήλων πλακών, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή και το φαινόμενο των άκρων μπορεί να αμεληθεί. Θεωρώντας 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, τότε το πλήθος των γραμμών της ηλεκτρικής ροής μέσω του αέρα θα είναι ίσο με $4\pi qA$ και θα ισχύει:

$$\frac{1}{C} = \frac{U}{qA} = \frac{4\pi S}{A} \quad (1.22)$$

Αν η διάταξη των δύο πλακών βρεθεί μέσα σε έδαφος ειδικής αντίστασης ρ , από την εξίσωση $R=\rho S/A$, θα προκύψει η σχέση $R=\rho/4\pi C$. Στην τελευταία, αν το C περιλαμβάνει και τη χωρητικότητα των ειδώλων του αγωγού μέσα στο έδαφος, τότε η εξίσωση για την αντίσταση γείωσης γράφεται:

$$R = \frac{\rho}{2\pi C} \quad (1.23)$$

Με αντικατάσταση της (1.21) στην (1.23), προκύπτει ο τύπος που πρότεινε ο Dwight, για την αντίσταση ενός κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου με μήκος l και ακτίνα r , για το οποίο θεωρείται ότι $l/r > 10$, [35]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (1.24)$$

όπου ρ , η ειδική αντίσταση του εδάφους που περικλείει το ηλεκτρόδιο.

Ο Sunde [8], ακολουθώντας τη δική του μέθοδο ανάλυσης και βασιζόμενος στην ανύψωση δυναμικού στο μέσο του ηλεκτροδίου, κατέληξε στην ακόλουθη σχέση:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left[\frac{2l}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right) \quad (1.25)$$

$$\cong \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right), \quad \text{όταν } l \gg r \quad (1.26)$$

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, διατυπώνει 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 ίση ή μεγαλύτερη από το μήκος τους l [8]:

$$R_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 + \frac{1}{D} \sum_{m=1}^{m=n-1} \frac{1}{\sin(\frac{\pi m}{n})} \right] \quad (1.27)$$

Ο Tagg [7] ακολουθώντας μια κάπως διαφορετική προσέγγιση θεώρησε ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο γείωσης, μέσω του οποίου το ρεύμα σφάλματος διαχέεται στο έδαφος υπό τη μορφή ομόκεντρων κύκλων. Η αντίσταση γείωσης, σ' αυτήν την περίπτωση, σε απόσταση r_1 από το ηλεκτρόδιο θα είναι ίση με:

$$R = \int_r^{r_1} \frac{\rho dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1.28)$$

η οποία, για πολύ μεγάλη απόσταση από το ηλεκτρόδιο ($r_1 = \infty$), γράφεται:

$$R_\infty = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (1.29)$$

Με βάση την υπόθεση ότι η χωρητικότητα ενός σφαιρικού ηλεκτροδίου που βρίσκεται στον αέρα είναι ανάλογη της ακτίνας του, η αντίσταση του ίδιου ηλεκτροδίου σ' ένα άπειρο αγώγιμο μέσο είναι ίση με [7]:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} \quad (1.30)$$

άρα και η αντίσταση ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου, τοποθετημένο κατά το ήμισυ στο έδαφος, θα είναι η διπλάσια από την αντίστοιχη της εξίσωσης (1.30), δηλαδή:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (1.31)$$

Αν στην εξίσωση (1.31) θεωρηθεί η ηλεκτροστατική χωρητικότητα C του ηλεκτροδίου, περιλαμβάνοντας και τη χωρητικότητα του ειδώλου του πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε προκύπτει μια γενική εξίσωση για την αντίσταση γείωσης, η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε μορφή ηλεκτροδίου [7]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi C} \quad (1.32)$$

Για την περίπτωση της κατακόρυφης ράβδου, ο Tagg θεώρησε το ηλεκτρόδιο ως το ήμισυ ενός ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, με τον μεγάλο άξονα να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον μικρό άξονα. Έτσι, η χωρητικότητα γι' αυτήν τη διάταξη λαμβάνεται ως $C = l / \ln(2l/r)$, κάτι που απορρίπτει ο Dwight ως

εσφαλμένη προσέγγιση λόγω του μεγάλου σφάλματος που παρουσιάζει, οπότε με αντικατάσταση στην (1.32) προκύπτει [7]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{r} \quad (1.33)$$

Την ίδια περίοδο ο Laurent [37], αναπτύσσοντας την εργασία του Dwight, διατύπωσε μια σχέση για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων, θεωρώντας την υπόθεση ότι το ηλεκτρόδιο μπορεί να διαιρεθεί σε μικρά τμήματα και ότι το ρεύμα που ρέει προς τη γη κατανέμεται σ' αυτά τα τμήματα. Τότε, το δυναμικό σε οποιοδήποτε εξεταζόμενο σημείο προκύπτει από την επαλληλία των δυναμικών, που αναπτύσσονται στο εν λόγω σημείο από κάθε τμήμα του ηλεκτροδίου ξεχωριστά. Η σχέση που διατύπωσε είναι:

$$R = 0,366 \frac{\rho}{l} \cdot \ln \frac{3l}{d} \quad (1.34)$$

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

Συνοπτικά, οι προτεινόμενες σχέσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου, φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Εξισώσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης.

Dwight [35]	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right)$
Tagg [7]	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{r}$
Sunde [8]	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left[\frac{2l}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right)$
Laurent [37]	$R = 0,366 \frac{\rho}{l} \cdot \ln \frac{3l}{d}$

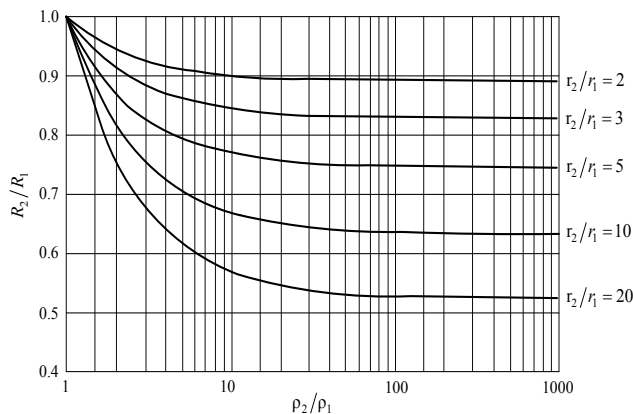
Για ηλεκτρόδια εγκιβωτισμένα σε σκυρόδεμα ή γενικότερα σε κάποιο βελτιωτικό υλικό γείωσης, για τα οποία θα γίνει εκτενής αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, η αντίσταση γείωσης θα είναι [2, 38, 39]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_1} - 1 \right) - \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) + \frac{\rho_2}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) \quad (1.35)$$

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.

Μετά από αλγεβρική επίλυση, η (1.35) γράφεται σε πιο σύντομη μορφή:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{\rho_2}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) \quad (1.36)$$



Σχήμα 1.12: Μείωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτινών και ειδικών αντιστάσεων [35].

Από τις εξισώσεις (1.35) και (1.36) προκύπτουν οι καμπύλες του διπλανού σχήματος, το οποίο δείχνει γραφικά τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση με τους λόγους r_2/r_1 και ρ_2/ρ_1 . Από το σχήμα δίνεται ένα πρώτο δείγμα των αποτελεσμάτων χρήσης των βελτιωτικών υλικών, καθώς παρατηρείται σημαντική μείωση

της αντίστασης με την αύξηση των λόγων r_2/r_1 και ρ_2/ρ_1 .

Σ' αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο, για λόγους πληρότητας, να γίνει αναφορά στις διακριτές έννοιες της αντίστασης γείωσης και της σύνθετης αντίστασης γείωσης βιομηχανικής συχνότητας. Στην πραγματικότητα, η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος γείωσης καθορίζεται κυρίως από τη σύνθετη αντίστασή του Z_E , η οποία μπορεί να εκφρασθεί από την εξίσωση [40]:

$$Z_E = \sqrt{R_E^2 + X_E^2} \quad (1.37)$$

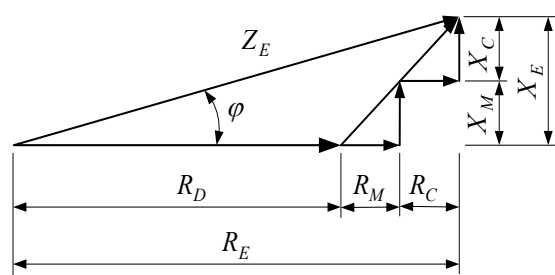
όπου:

$$R_E = R_D + R_M + R_C \quad (1.38)$$

και

$$X_E = X_M + X_C \quad (1.39)$$

R_E η αντίσταση γείωσης, R_D η αντίσταση διαχύσεως, R_M η αντίσταση του αγωγού του ηλεκτροδίου γείωσης, R_C η αντίσταση του αγωγού που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με την εγκατάσταση και X οι αντίστοιχες επαγωγικές αντιδράσεις.



Σχήμα 1.13: Λιανυσματικό διάγραμμα σύνθετης αντίστασης.

Τονίζεται ότι, για παροχή AC, η αντίδραση του αγωγού γείωσης είναι σημαντική, μόνο στην περίπτωση εκτεταμένων ταινιών γείωσης ή στην περίπτωση ράβδων γείωσης μεγάλου μήκους. Σ' όλες τις άλλες περιπτώσεις, η διαφορά μεταξύ της σύνθετης αντίστασης γείωσης και της αντίστασης γείωσης είναι τόσο μικρή, ώστε συχνά να μη γίνεται καμιά διάκριση μεταξύ αυτών των δύο ποσοτήτων. Τα σχετικά βιομηχανικά πρότυπα χρησιμοποιούν αυτές τις ποσότητες σαν να είναι ταυτόσημες [40].

Οι παραπάνω σχέσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης βασίστηκαν, εν πολλοίς, στην υπόθεση ότι το έδαφος στο οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο, χαρακτηρίζεται από ομοιογενή και ιστροπική ειδική αντίσταση ρ . Στην πραγματικότητα, οι περιπτώσεις αυτών των τύπων εδάφους είναι σπάνιες και μάλιστα, οι περιπτώσεις των πολυστρωματικών εδαφών μπορούν να αναχθούν σε ομοιογενή και ιστροπικά μετά από πλήθος προσεγγίσεων και παραδοχών. Η παρουσία στρωμάτων με διαφορετική ειδική αντίσταση επηρεάζει την αντίσταση γείωσης ενός ηλεκτροδίου, ακόμη και στην περίπτωση που αυτό είναι εγκατεστημένο ολόκληρο σ' ένα μόνο στρώμα. Για τον λόγο αυτόν, αρκετοί ερευνητές ανέπτυξαν μοντέλα και διετύπωσαν σχέσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης σε πολυστρωματική δομή του εδάφους, με σκοπό τον καλύτερο και πληρέστερο σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης στις πρακτικές εφαρμογές.

Σύμφωνα με τον Tagg [7], η επίδραση του κατώτερου στρώματος στη διαμόρφωση της αντίστασης γείωσης μιας κατακόρυφης ράβδου μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μέσου δυναμικού σε συνδυασμό με τη μέθοδο των ειδώλων (method of images). Πιο συγκεκριμένα, για ράβδο ακτίνας r και με μήκος l του τμήματός της μέσα στο έδαφος, διέκρινε δύο περιπτώσεις: στη μία περίπτωση η ράβδος είναι θαμμένη στο άνω στρώμα πάχους h και στην άλλη περίπτωση η ράβδος διεισδύει και στα δύο στρώματα του διστρωματικού μοντέλου. Ανάλογα, διατυπώθηκαν και οι εξής σχέσεις [7]:

α) Η ράβδος θαμμένη στο άνω στρώμα:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k^n}{2} \ln \frac{(nh/l)+1}{(nh/l)-1} \right] \quad (1.40)$$

όπου, ρ_1 και h η ειδική αντίσταση και το πάχος του άνω στρώματος αντίστοιχα, k ο συντελεστής ανάκλασης ($k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$), και n το πλήθος των ζευγών ειδώλων.

Γι' αυτήν την περίπτωση, ο Tagg ανέπτυξε και μια εναλλακτική μέθοδο, κατά την οποία υπολόγισε την επίδραση του κατώτερου στρώματος από την επίλυση της εξίσωσης Laplace για τις ειδικές συνθήκες του προβλήματος, κάνοντας την παραδοχή ότι το ηλεκτρόδιο μπορεί να αντικατασταθεί από μία γραμμική πηγή ρεύματος I ανά cm μήκους. Η εναλλακτική σχέση που πρότεινε είναι η εξής:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \ln \frac{1+(l/2nh)}{1-(l/nh)} \right] \quad (1.41)$$

Η εξίσωση (1.41) διαφέρει κάπως από την (1.40) της μεθόδου των ειδώλων και η διαφορά αυτή είναι η ίδια με εκείνη μεταξύ του τύπου του μέσου δυναμικού και του τύπου του ελλειψοειδούς για μοναδική κατακόρυφη ράβδο. Δεν είναι απαραίτητο να γίνουν λεπτομερείς υπολογισμοί από την (1.41), αφού και οι δύο τύποι είναι προσεγγιστικοί [7].

β) Η ράβδος διεισδύει και στα δύο στρώματα:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \cdot \frac{(1+k)}{(1-k) + 2k \frac{h}{l}} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \ln \frac{(2nh+l)}{(2n-2)h+l} \right] \quad (1.42)$$

η οποία γράφεται συντόμως και ως:

$$R = F [R_1 + R_a] \quad (1.43)$$

όπου, R_1 η αντίσταση της ράβδου μέσα σε ομοιογενές έδαφος ειδικής αντίστασης ρ_1 , R_a μια επιπρόσθετη αντίσταση λόγω του κατώτερου στρώματος και F ένας συντελεστής διείσδυσης, η τιμή του οποίου προσδιορίζεται από οικογένεια χαρακτηριστικών καμπυλών.

Οι Takahashi-Kawase [41] αναπτύσσουν προηγούμενη εργασία τους [14] και επιλύοντας τις εξισώσεις δυναμικού, πρότειναν τον δικό τους τύπο για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης ενός ηλεκτροδίου τύπου ράβδου μεγάλου μήκους l σε πολυστρωματικό έδαφος (N στρωμάτων):

$$R = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - H_{N-1}}{\rho_N}} \sum_{s=1}^N \left(\prod_{i=0}^{s-1} (1 - k_i) \times \int_{H_{s-1}}^{H_s} \int_0^{\infty} \frac{\alpha_{Ns} e^{-\lambda t} + \beta_{Ns} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} \times J_0(\lambda a) d\lambda dt \right) \quad (1.44)$$

όπου $H_{N-1} = \sum_{i=1}^{N-1} h_i$.

Στη συνέχεια, εφάρμοσαν αριθμητικά δεδομένα στην εξίσωση (1.44) για την επαλήθευση της εξίσωσης και τη χάραξη των καμπυλών $R-l$. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων της εξίσωσης (1.44) και της αντίστοιχης εξίσωσης του Tagg για διστρωματικό μοντέλο, βρέθηκε σύγκλιση των δύο μεθόδων, με σφάλμα της τάξης του 0,1% [41].

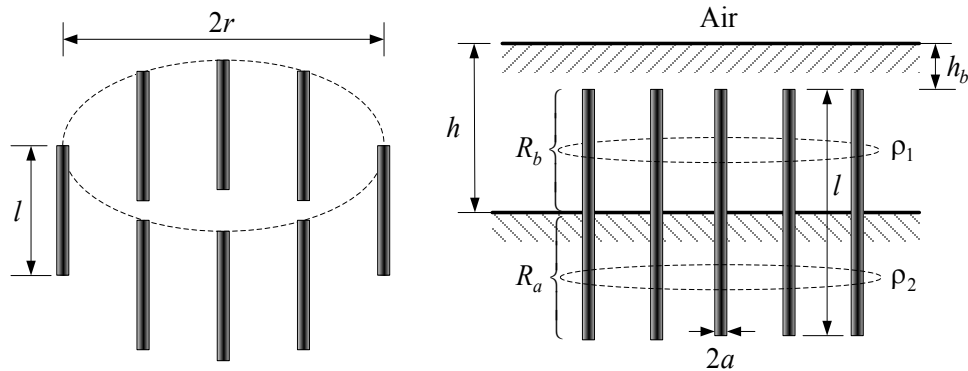
Ο Chow και οι συνεργάτες [42], θέλοντας να παρακάμψουν τον επίπονο προσδιορισμό διαφόρων σταθερών που απαιτούσε στους τύπους του το IEEE Std. 80-1986, πρότειναν τις δικές τους μαθηματικές σχέσεις για την αντίσταση γείωσης διατάξεων διαφόρων σχηματισμών, από κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης σε διστρωματικό έδαφος.

Σ' αυτήν την εργασία τους, εφάρμοσαν την προσέγγιση *Galerkin* της μεθόδου των ροπών για την ανάλυση των αντιστάσεων γείωσης. Το σφάλμα στις τιμές των υπολογισμών αυτής της προσέγγισης προέκυψε μικρότερο από 4%, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της τυπικής μεθόδου των ροπών (MoM). Το όφελος ήταν ότι χρησιμοποιήθηκε μήτρα αρκετά μικρότερων διαστάσεων, $2N \times 2N$ για διάταξη N κατακόρυφων ράβδων σε διστρωματικό έδαφος, με υψηλή ακρίβεια. Επίσης, στην ίδια εργασία γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με τα αντίστοιχα της [41] για διάταξη μιας ράβδου ($N=1$), όπου προκύπτει μια απόκλιση, που κυμαίνεται από 0% έως 1,3%, ανάλογα με το μήκος της ράβδου εντός του άνω στρώματος, με τη μέθοδο του Chow να εξάγει ελαφρώς μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες του Takahashi. Ο προτεινόμενος τύπος που προέκυψε με εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου είναι [42]:

$$R = \frac{U}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad (1.45)$$

όπου U η εφαρμοζόμενη τάση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως 1αμ και I_i η ένταση ρεύματος του κάθε τμήματος της ράβδου, εν προκειμένω μία ράβδος δύο τμημάτων, από ένα τμήμα για κάθε στρώμα του διστρωματικού μοντέλου.

Οι ίδιοι ερευνητές σε επόμενη εργασία τους [43], ανέπτυξαν και πρότειναν σχέσεις για την αντίσταση γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων σε διστρωματικό έδαφος, εφαρμόζοντας ένα σετ αναλυτικών μεθόδων σε συνδυασμό με την *τεχνική των συνθετικών ασυμπτώτων* [43]. Οι σχέσεις επαληθεύτηκαν αριθμητικά με αποτελέσματα από τη μέθοδο των ροπών και, αναλυτικά, μ' ένα μεγάλο πλήθος γνωστών ασυμπτώτων. Οι τύποι που πρότειναν είναι οι ακόλουθοι:



Σχήμα 1.14: Διάταξη κατακόρυφων ηλεκτροδίων σε διστρωματικό έδαφος [43].

α) Για ρηχό άνω στρώμα, όπου το ηλεκτρόδιο διεισδύει και στο κατώτερο στρώμα ($0 \leq h \leq l + h_b$)

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (1.46)$$

όπου R_t η αντίσταση γείωσης όλης της διάταξης με:

$$R_a = \frac{\rho_2}{(l + h_b - h)} \cdot g_0 \cdot \frac{F_0}{N} \quad (1.47)$$

$$R_b = \frac{\rho_1}{(h - h_b)} \cdot g_0 \cdot \frac{F_0}{N} + \frac{\rho_1}{h} \cdot \phi_0 \quad (1.48)$$

όπου:

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{r} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2) h_b}{l}} \right] \quad (1.49)$$

l το μήκος της ράβδου και r η ακτίνα της.

Για N , το πλήθος, ράβδους σε ομοιογενές έδαφος ισχύει:

$$F = 1 + \left(N - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \frac{R_s}{R_l} \quad (1.50)$$

στην οποία ο λόγος R_s/R_l ισούται με:

$$\frac{R_s}{R_l} = \frac{\sqrt{\frac{l}{r'} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{l}{l + \frac{r'}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}}{2\pi g_0} \quad (1.51)$$

Άρα, για διστρωματικό μοντέλο εδάφους θα ισχύει:

$$F_0 = F \Big|_{l \rightarrow \frac{l}{1-0,9K}}, \quad K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1.52)$$

Τέλος,

$$\phi_0 = \phi \Big|_{h=l+h_b} = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N}{F_0} - 1 \right)^2 + 1}} \quad (1.53)$$

β) Για βαθύ άνω στρώμα, όπου το ηλεκτρόδιο δε διεισδύει στο κατώτερο στρώμα ($l+h_b \leq h \leq \infty$)

$$R_l = \frac{\rho_1}{l} \cdot g_0 \cdot \frac{F_0}{N} + \frac{\rho_1}{h} \cdot \phi \quad (1.54)$$

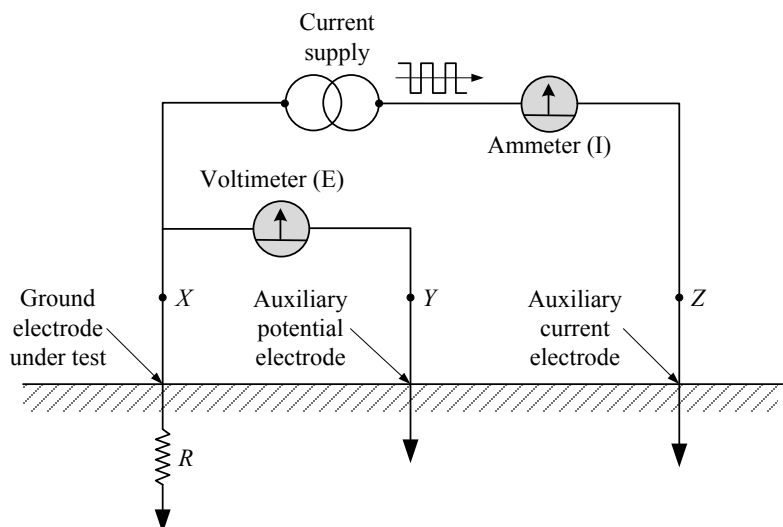
όπου

$$\phi = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N}{F_0} - 1 \right)^2 \cdot \left(\frac{l+h_b}{h} \right)^2 + 1}} \quad (1.55)$$

Για τον υπολογισμό και τη σχεδίαση σύνθετων συστημάτων γείωσης, εκτός από την αναλυτική επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς και αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων μερικών διαφορικών εξισώσεων, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method*). Η εν λόγω μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα στο πρόβλημα υπολογισμού της αντίστασης γείωσης [44].

Η πιο δημοφιλής και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης, σημειακών, αλλά και εκτεταμένων γειώσεων, είναι η μέθοδος της πτώσης δυναμικού (*Fall of Potential Method*) [7]. Αυτή η μέθοδος

δίνει την τιμή της αντίστασης γείωσης με αρκετά καλή ακρίβεια και χρησιμοποιείται για όλους τους τύπους των εφαρμογών, είτε αυτούσια, είτε με διάφορες παραλλαγές, ως προς τις θέσεις των βοηθητικών ηλεκτροδίων, καθώς συνιστάται από τα διεθνή πρότυπα [9]. Η διάταξη της μεθόδου εικονίζεται στο Σχήμα 1.15.



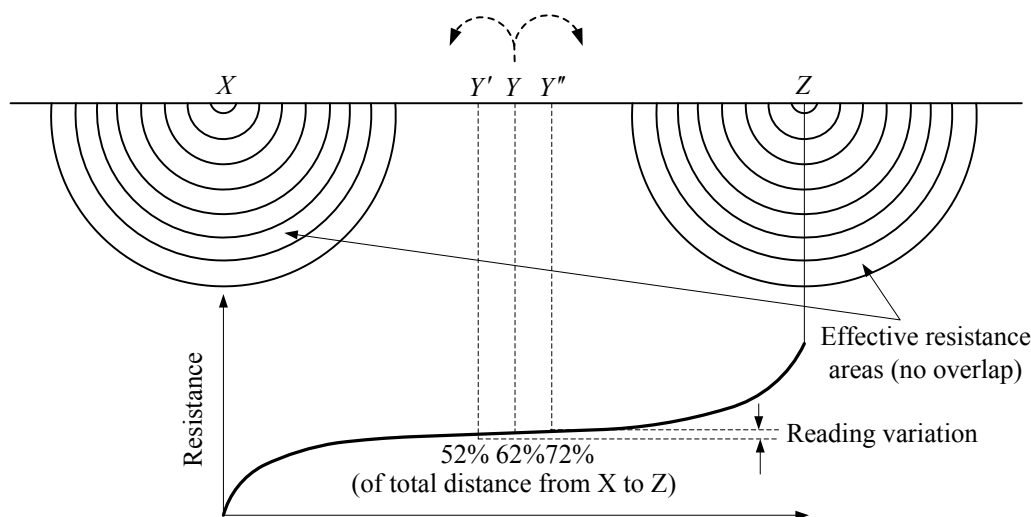
Σχήμα 1.15: Απεικόνιση της μεθόδου της πτώσης δυναμικού για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης [45].

Έστω X το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο γείωσης, Y το βοηθητικό ηλεκτρόδιο τάσης και Z το βοηθητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος. Το ηλεκτρόδιο Z τοποθετείται σε απόσταση ίση με το πενταπλάσιο, τουλάχιστον, της μεγαλύτερης διάστασης του εξεταζόμενου ηλεκτροδίου [9] και γίνεται έγχυση ρεύματος μέσω αυτού, το οποίο και επιστρέφει, μέσω του εξεταζόμενου ηλεκτροδίου γείωσης. Η ένταση του ρεύματος αυτού μετριέται μέσω αμπερομετρικού στοιχείου. Για τη μέτρηση του αναπτυσσόμενου δυναμικού στο έδαφος, τοποθετείται το ηλεκτρόδιο Y σε απόσταση ίση με το 62% της XZ [9] ή σε απόσταση $XZ/2$ [3] από το ηλεκτρόδιο X. Για τη μέτρηση της τάσης U_{XY} , συνδέεται βολτομετρικό στοιχείο μεταξύ των X και Y, οπότε η ζητούμενη φαινόμενη αντίσταση γείωσης δίνεται από τον τύπο:

$$R_G = \frac{U_{XY}}{I} \quad (1.56)$$

Για να εξακριβωθεί ότι οι περιοχές επιρροής δεν αλληλεπικαλύπτονται (no overlap), πραγματοποιούνται δύο ακόμη μετρήσεις, με μετακίνηση του βοηθητικού ηλεκτροδίου γείωσης Y κατά 5–7m πιο μακριά και κατά 5–7m πιο κοντά προς τη γείωση X, έτσι, ώστε οι μετρήσεις να βρίσκονται εντός της

περιοχής όπου η αντίσταση διατηρείται πρακτικά σταθερή (Σχήμα 1.16). Αν τα αποτελέσματα αυτών των τριών μετρήσεων ουσιαστικά συμπίπτουν, λαμβάνεται ως αντίσταση της γείωσης X ο μέσος όρος των τριών τιμών. Διαφορετικά επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις με αυξημένη την απόσταση μεταξύ X και Z [3].



Σχήμα 1.16: Μετακίνηση του ηλεκτροδίου Y κατά μήκος του άξονα XZ [45].

Εκτός από τη μέθοδο της πτώσης δυναμικού, έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι μέτρησης της αντίστασης γείωσης, όπως η μέθοδος των δύο σημείων [7], η μέθοδος των τριών σημείων [7, 9] και η *clamp-on method* [9], οι οποίες όμως εμφανίζουν αρκετές αδυναμίες στη σωστή μέτρηση της αντίστασης, εν συγκρίσει με τη FOP.

Οι Dawalibi-Mukhedkar σε μελέτη τους για την εφαρμογή της FOP σε ανομοιογενή εδάφη [46] έκαναν μια σύγκριση μέσω θεωρητικών υπολογισμών και μετρήσεων σε δικό τους εργαστηριακό διστρωματικό μοντέλο, μεταξύ της κλασικής μεθόδου FOP και μιας παραλλαγής της, την οποία πρότεινε ο Tagg [7] για διστρωματικό έδαφος και κατά την οποία το ηλεκτρόδιο δυναμικού τοποθετείται σε αντίθετη κατεύθυνση προς το ηλεκτρόδιο ρεύματος. Κατέληξαν να προτείνουν την εφαρμογή της κλασικής FOP, με την παρατήρηση ότι ο κανόνας του 62% μεταβάλλεται μεταξύ 50% και 90% για την περίπτωση του διστρωματικού μοντέλου.

Επίσης, στο πλαίσιο μελέτης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, έχουν παρουσιασθεί και εργασίες στις οποίες γίνεται μελέτη της κατανομής του δυναμικού γύρω από το ηλεκτρόδιο. Ο Γκόνοσ και οι συνεργάτες του [47, 48]

ανέλυσαν την κατανομή δυναμικού γύρω από τη ράβδο και στην επιφάνεια του εδάφους, χρησιμοποιώντας λογισμικά πακέτα που βασίζονταν στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο, αξίζει να σημειωθεί ότι παράλληλα με την έρευνα για τη συμπεριφορά της ειδικής αντίστασης του εδάφους και τον ακριβέστερο προσδιορισμό της αντίστασης γείωσης χαμηλής συχνότητας των κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, έχουν παρουσιασθεί κατά καιρούς και εργασίες για τη βελτίωση της τιμής της αντίστασης γείωσης σε υφιστάμενες ή μη κατασκευές. Σύμφωνα με τις εργασίες αυτές [49, 50] η χρήση των κατακόρυφων ράβδων, σε διάφορες διατάξεις και διάφορα πλήθη, σε συνδυασμό με τα πλέγματα γείωσης, μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της αντίστασης γείωσης, καθώς επίσης και στη μείωση των τιμών των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

Ο ρόλος, όμως, ενός συστήματος γείωσης δεν περιορίζεται στην απαγωγή μόνο των ρευμάτων σφάλματος χαμηλής συχνότητας. Τα σύγχρονα συστήματα γείωσης προορίζονται να διαχέουν στη γη και τα υψηλά κεραυνικά ρεύματα, κατά τη σύλληψη των κεραυνών από τα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας. Η συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης κατά την απαγωγή ρευμάτων υψηλής συχνότητας είναι εντελώς διαφορετική από την αντίστοιχη σε ρεύματα βιομηχανικής συχνότητας, καθώς αναπτύσσονται έντονα μεταβατικά φαινόμενα εντός του εδάφους. Αυτή η συμπεριφορά αποτελεί ένα μεγάλο πεδίο έρευνας από πολλούς ερευνητές σ' όλο τον κόσμο επί πολλές δεκαετίες. Για τον λόγο αυτόν, η μεταβατική συμπεριφορά των κατακόρυφων ηλεκτροδίων θα αναλυθεί με τη δέουσα προσοχή, ξεχωριστά, στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

Βιβλιογραφία

- [1] IEEE Std 142-2007, “IEEE Recommended Practice of Grounding for Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE Green Book, November 30th, 2007.
- [2] ANSI/IEEE Std 80-2013, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, May 2015.
- [3] ΕΛΟΤ HD 384, «Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις», 2^η έκδοση, 04/03/2004.
- [4] H. E. Martinez, E. L. Fuentealba, L. A. Cisternas, H. R. Galleguillos, J. F. Kasaneva and O. A. de la Fuente, “A new artificial treatment for the reduction of resistance in ground electrode”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, pp. 601–608, April 2004.
- [5] Π. Ντοκόπουλος, «Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384», Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2005.
- [6] Dehn and Söhne, “Lightning Protection Guide”, 3rd edition, December 2014.
- [7] C. F. Tagg, “Earth resistances”, First edition, London, England, George Newnes Ltd., 1964.
- [8] E. D. Sunde, “Earth conduction effects in transmission systems”, New York, Dover Publications Inc., 1968.
- [9] ANSI/IEEE Std 81-2012, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a grounding system”, December 28th, 2012.
- [10] F. Wenner, “A method of measuring earth resistivity”, Scientific Paper No. 258, Bulletin of the Bureau of Standards, Vol. 12, No. 4, pp. 469–478, May 1916.
- [11] F. Dawalibi and C. J. Blattner, “Earth resistivity measurement interpretation techniques”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 2, pp. 374–382, February 1984.
- [12] A. P. Meliopoulos and A. D. Papalexopoulos, “Interpretation of soil resistivity measurements: Experience with the model SOMIP”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, pp. 142–151, October 1986.

-
- [13] 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, No. 3, pp. 1213–1217, July 1992.
- [14] T. Takahashi and T. Kawase, “Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 604–612, April 1990.
- [15] H. Yang, J. Yuan and W. Zong, “Determination of three-layer earth model from Wenner four-probe test data”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 5, pp. 3684–3687, September 2001.
- [16] F. Uribe, P. Zúñiga and P. Gómez, “Geophysical exploration to estimate conductivity and permittivity model of an excavated soil block”, Revista Mexicana de Física, Vol. 60, pp. 46–52, January-February 2014.
- [17] I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 100–106, January 2005.
- [18] I. F. Gonos, V. T. Kontargyri, I. A. Stathopoulos, A. X. Moronis, A. P. Sakarellos and N. I. Kolliopoulos, “Determination of two layer earth structure parameters”, Proceedings of the XVII International Conference on Electromagnetic Disturbances (EMD 2007), Bialystok, Poland, September 19th–21st, 2007, pp. 10.1-1–10.1-6.
- [19] W. P. Calixto, L. M. Neto, M. Wu, K. Yamanaka and E. d. P. Moreira, “Parameter estimation of a horizontal multilayer soil using genetic algorithm”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1250–1257, July 2010.
- [20] P. J. Lagace and M. H. Vuong, “Graphical user interface for interpreting and validating soil resistivity measurements”, Proceedings of the IEEE ISIE 2006, Montréal, Québec, Canada, July 9th–12th, 2006, pp. 1841–1845.
- [21] M. Loboda and V. Scuka, “On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes on soil”, Proceedings of the 23rd International Conference on Lightning Protection (ICLP 1996), Florence, Italy, September 1996, pp.539–544.
- [22] I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Soil ionization under lightning impulse voltages”, IEE Proceedings-Science, Measurements and Technology, Vol. 151, No. 4, pp. 343–346, September 2004.

-
- [23] 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, No. 4, pp. 420-426, July 2003.
- [24] Y. Liu, N. Theethayi, R. M. Gonzalez and R. Thottappillil, “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 18th–22nd, 2003, paper no. TH-PM-2-4, pp. 794–799.
- [25] N. M. Nor, A. Haddad and H. Griffiths, “Factors affecting soil characteristics under fast transients”, Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST), New Orleans, USA, 2003.
- [26] BS 1377, “Soil for Civil Engineering Purposes: Classification Tests”, Part 2, 1990, British Standard Code of Practice.
- [27] 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”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 1, No. 5, pp. 811–817, September 2007.
- [28] K. Sudha, M. Israil, S. Mittal and J. Rai, “Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations”, Journal of Applied Geophysics, Vol. 67, No. 1, pp. 74–79, January 2009.
- [29] J. Ma and F. P. Dawalibi, “Study of influence of buried metallic structures on soil resistivity measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 356–365, April 1998.
- [30] J. Ma and F. P. Dawalibi, “Influence of inductive coupling between leads on resistivity measurements in multilayer soils”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 999–1004, October 1998.
- [31] 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 (ICLP 2006), Kanazawa, Japan, September 18th–22nd, 2006, pp. 740–744.
- [32] V. L. Coelho, A. Piantini, H. A. D. Almaguer, R. A. Coelho, W. do C. Boaventura and J. O. S. Paulino, “The influence of seasonal soil moisture on

- the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems”, Electric Power Systems Research, Vol. 118, pp.76–82, January 2015.
- [33] S. C. Lim, C. Gomes, G. Nourirad and M. Z. A. A. Kadir, “Significance of localized soil resistivity in designing a grounding system”, Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2014), Langkawi, The Jewel of Kedah, Malaysia, March 24th–25th, 2014, pp. 324–329.
- [34] A. Samouëlian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand and G. Richard, “Electrical resistivity survey in soil science: a review”, Soil and Tillage Research, Vol. 83, No. 2, pp. 173-193, September 2005.
- [35] H. B. Dwight, “Calculation of resistances to ground”, AIEE Transactions on Electrical Engineering, Vol. 55, No. 12, pp. 1319–1328, December 1936.
- [36] E. Hallén, “Lösung zweier potentialprobleme der elektrostatik”, Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, Vol. 21A, No. 22, Stochholm, 1929.
- [37] P. Laurent, “Les bases générales de la technique des mises à la terre dans les installations électriques”, Le bulletin de la Société Française des Electriciens, 1967,(Translated from the original French in IEEE guide for safety in AC substation grounding, ANSI/IEEE standard 80, 1986).
- [38] E. J. Fagan and 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, pp. 337–348, July/August 1970.
- [39] Report of the Substation Committee Working Group 78.1, “Safe substation grounding-Part II”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, pp. 4006–4023, October 1982.
- [40] E. Hering, “Measuring earth resistance”, Dresden, Germany.
- [41] T. Takahashi and T. Kawase, “Calculation of earth resistance for a deep-driven rod in a multi-layer earth structure”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp. 608–614, April 1991.
- [42] M. M. Elsherbiny, Y. L. Chow and M. M. A. Salama, “A fast and accurate analysis of grounding resistance of a driven rod in a two-layer soil”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 808–814, April 1996.
- [43] Y. L. Chow, M. M. Elsherbiny and M. M. A. Salama, “Resistance formulas of grounding systems in two-layer earth”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1330–1336, July 1996.

-
- [44] M. Trlep, Anton Hamler and Božidar Hribernik, “The analysis of complex grounding systems by FEM”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 2521–2524, September 1998.
- [45] AEMC Instruments, “Understanding ground resistance testing”, Workbook edition 7.0.
- [46] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, “Ground electrode resistance measurements in non uniform soils”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 1, pp. 109–115, January 1974.
- [47] I. F. Gonos, F. V. Topalis and I. A. Stathopoulos, “Influence of the soil non-uniformity to the potential distribution around a driven rod”, Proceedings of the 5th WSES/IEEE World Multiconference on Circuits, Systems Communications and Computers (CSCC 2001), Rethymnon, Greece, July 8th–15th, 2001, pp. 7971–7975.
- [48] F. E. Asimakopoulou, V. T. Kontargyri, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Influence of the earth structure to the potential distribution around a driven rod”, Proceedings of the 6th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution (MEDPOWER '08), Thessaloniki, Greece, November 2nd–5th, 2008.
- [49] R. Zeng, J. He, Z. Wang, Y. Gao, W. Sun and Qi Su, “Analysis on influence of long vertical grounding electrodes on grounding system for substation”, Proceedings of the International Conference on Power System Technology (PowerCon 2000), Perth, WA, December 4th–7th, 2000, Vol. 3, pp. 1475–1480.
- [50] A. Ackerman, P. K. Sen and C. Oertli, “Designing safe and reliable grounding in AC substations with poor soil resistivity: An interpretation of IEEE Std. 80”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 4, July/August 2013, pp. 1883–1889.

Κεφάλαιο 2

Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης

Πᾶσά τε ἐπιστήμη χωριζομένη δικαιοσύνης καὶ τῆς ἄλλης ἀρετῆς πανουργία, οὐ σοφία φαίνεται.

Πλάτωνος, «Μενέξενος» 347α

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης και, πιο συγκεκριμένα, στη μεταβατική συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα κατακόρυφα ηλεκτρόδια, τύπου ράβδου, υπό την επίδραση κρουστικών κεραυνικών ρευμάτων. Γίνεται αναφορά σε μοντελοποιήσεις των εν λόγω ηλεκτροδίων και προσομοιώσεις, με βάση τα μοντέλα αυτά, αλλά και σε πειραματικές εργασίες με μετρήσεις υπό υψηλά κρουστικά ρεύματα.

2.1 Εισαγωγή

Είναι γενικά γνωστό, ότι η θεωρία των συστημάτων γείωσης θεμελιώθηκε, σε πρώιμη μορφή, με τα πειράματα του Φραγκλίνου τον 17^ο αιώνα. Βεβαίως, πέρασαν πολλές δεκαετίες από τότε, μέχρι εκείνα τα πειράματα να πάρουν θεωρητική μορφή και να διατυπωθούν μαθηματικές σχέσεις που θα εξέφραζαν τη μορφή και το μέγεθος των ηλεκτροδίων γείωσης, τις ιδιότητες του εδάφους, ή ακόμη και την έννοια της αντίστασης γείωσης.

Τα πειράματα εκείνα είχαν ξεκινήσει με αφορμή το φαινόμενο του κεραυνού, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η αρχική χρήση των ηλεκτροδίων γείωσης ήταν για την παροχέτευση των υψηλών κεραυνικών ρευμάτων στη γη. Σήμερα δε, με βάση τους διεθνείς κανονισμούς προστασίας των εγκαταστάσεων, ένα σύστημα γείωσης μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα ως γείωση προστασίας και ασφαλείας. Για τον λόγο αυτόν, μια πλήρης μελέτη δε θα μπορούσε, σε καμία περίπτωση, να παραβλέψει τη μεταβατική συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα συστήματα γείωσης, όταν αυτά υπόκεινται σε υψηλά κεραυνικά ρεύματα.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις έως σήμερα εργασίες ερευνητών πάνω στην κρουστική καταπόνηση των ηλεκτροδίων γείωσης.

2.2 Μοντέλα κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση)

Όπως προαναφέρθηκε, καμία εργασία δεν είχε δημοσιευθεί σχετικά με τα χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων γείωσης υπό υψηλή κρουστική καταπόνηση έως το 1929, όταν ο Towne δημοσίευσε την εργασία του [1] για τα κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης. Σ' αυτήν, για πρώτη φορά, τα καταγραφόμενα δεδομένα έδειξαν ότι τα ηλεκτρόδια παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά, όταν αυτά υπόκεινται σε συνθήκες κρουστικού ρεύματος, κάτι που είναι εντελώς διαφορετικό από την κατάσταση χαμηλού ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας.

Από τότε, δημοσιεύθηκαν πολλές ερευνητικές εργασίες πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, οι οποίες ήταν είτε υπολογιστικές, είτε πειραματικές εντός του χώρου των εργαστηρίων, είτε πειραματικές μεγάλης κλίμακας σε υπαίθριους χώρους. Οι θεωρητικές μελέτες έχουν ως σκοπό να αναπτύξουν μοντέλα προσομοίωσης των ηλεκτροδίων με τεχνικές από τη θεωρία των κυκλωμάτων και τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Πιο συγκεκριμένα, τα κυκλωματικά μοντέλα περιλαμβάνουν συγκεντρωμένες ή κατανεμημένες παραμέτρους για την αναπαράσταση του κυκλώματος ενός ηλεκτροδίου. Τα απλά κυκλωματικά μοντέλα με συγκεντρωμένες παραμέτρους περιλαμβάνουν την επιμήκη αντίσταση και αυτεπαγωγή του ηλεκτροδίου και τον εγκάρσιο παράλληλο συνδυασμό της αντίστασης και της χωρητικότητας γης. Τα μοντέλα με κατανεμημένες παραμέτρους είναι ουσιαστικά αυτά που χρησιμοποιούνται στη θεωρία των γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους. Τα κυκλώματα των γραμμών μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή απλών ηλεκτροδίων, αλλά για πιο μεγάλα και σύνθετα συστήματα γείωσης. Η θεωρία των πεδίων προσφέρει ασύγκριτα πλεονεκτήματα ως προς την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα.

Αρχικά ο Towne [1] έκανε δοκιμές σε γαλβανισμένους σωλήνες διαφόρων μηκών έως $6m$ και ακτίνας $10,65mm$, όπου παρατήρησε ότι η αντίσταση γείωσης του σωλήνα των $6m$, σε χαμηλή συχνότητα, προέκυπτε από τη μέτρηση 24Ω , ενώ υπό την επίδραση κρουστικών ρευμάτων, μεγέθους έως $880A$, προέκυπτε 17Ω , δηλαδή πτώση 19%.

Λίγα χρόνια αργότερα, ο Bewley [2] διεξήγαγε παρόμοιες δοκιμές σε οριζόντιο αγωγό γείωσης ποικίλου μήκους, εφαρμόζοντας κρουστικά ρεύματα με

χρόνο μετώπου από $6\mu s$ έως $12\mu s$ και μέγιστες τιμές από $2kA$ έως $8kA$. Ομοίως με τον Towne παρατήρησε ότι η μεταβατική αντίσταση γινόταν μικρότερη από την αντίσταση χαμηλής συχνότητας.

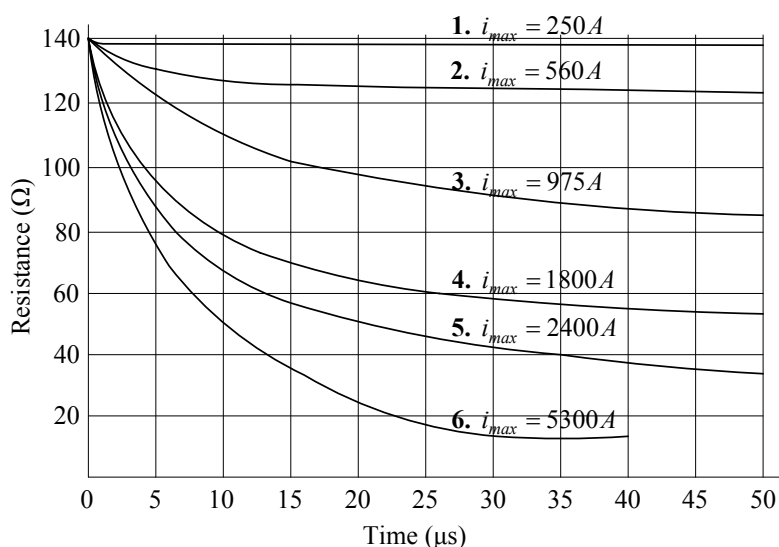
Ο Bellaschi [3] συνέκρινε τη συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης σε μεταβατική και μόνιμη κατάσταση. Για τον σκοπό αυτόν, διεξήγαγε σειρά δοκιμών με κρουστικά ρεύματα χρόνου μετώπου $6\mu s$ έως $12\mu s$ και μεγέθους $2kA$ έως $8kA$ πάνω σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης και σε διαφορετικές εποχές του χρόνου. Στη μελέτη του, βέβαια, θεώρησε τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση ως τον λόγο της μέγιστης τάσης προς το μέγιστο ρεύμα. Τα αποτελέσματα του Bellaschi επιβεβαίωσαν τα ευρήματα του Towne [1], αποδίδοντας αυτήν τη συμπεριφορά των ηλεκτροδίων σε βραχυκύκλωση, μέσω τόξων, της αντίστασης επαφής μεταξύ των αγωγίμων στοιχείων του εδάφους στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, η οποία γίνεται αντιληπτή λόγω της απότομης πτώσης της τάσης αμέσως μετά το μέγιστό της.

Ο ίδιος ερευνητής, σε επόμενη εργασία του [4], ανέφερε κρουστικές δοκιμές σε ηλεκτρόδια με εύρος ρεύματος από $400A$ έως $15,5kA$ και διαφόρων μορφών, όπως $20/50$, $8/125$ και $25/65\mu s$. Έκανε δε την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα υπέθεσε ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Από τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι η μείωση της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης ως προς την αντίσταση χαμηλής συχνότητας εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και τη διάταξη των ηλεκτροδίων γείωσης, αλλά είναι ανεξάρτητη από τον χρόνο μετώπου του ρεύματος. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η μεταβατική αντίσταση ενός ηλεκτροδίου, θαμμένο σε έδαφος υψηλής ειδικής αντίστασης, παρουσίαζε τον μεγαλύτερο βαθμό ελάττωσης.

Τα ευρήματα των Towne [1], Bewley [2] και Bellaschi [3, 4] ανέδειξαν τη μη γραμμική αντίσταση των ηλεκτροδίων γείωσης υπό υψηλά κρουστικά ρεύματα. Πιο συγκεκριμένα, έδειξαν ότι αυτή η μεταβατική αντίσταση μπορούσε να είναι μικρότερη σε μέγεθος από την αντίσταση χαμηλής συχνότητας.

Ο Berger [5] διεξήγαγε πειράματα με σφαιρικό ηλεκτρόδιο, ακτίνας $1,25cm$, το οποίο ήταν κατά το ήμισυ θαμμένο σε ημισφαιρικό σκάμμα διαμέτρου $2,5m$ και το οποίο σκάμμα γεμιζόταν με διαφορετικό τύπο χώματος κάθε φορά. Η

μέγιστη τιμή του εφαρμοζόμενου κρουστικού ρεύματος κυμαινόταν από $3,8kA$ έως $11,4kA$ και ο χρόνος μετώπου μεταξύ $3\mu s$ και $30\mu s$. Στην περίπτωση που το σκάμμα ήταν γεμισμένο με νερό, οι δοκιμές έδειξαν μια σταθερή τιμή της μεταβατικής αντίστασης, ίσης προς την αντίσταση χαμηλής συχνότητας. Στην περίπτωση των διαφόρων τύπων χώματος, ειδικής αντίστασης μεταξύ $300\Omega m$ και $57\Omega m$, η μεταβατική αντίσταση λάμβανε διαφορετικές τιμές. Μάλιστα, τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι, όταν η τιμή του ρεύματος ήταν μικρότερη από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου, οι χαρακτηριστικές καμπύλες $U-I$ παρουσίασαν γραμμική αναλογία προς την αντίσταση βιομηχανικής συχνότητας. Παρ' όλα αυτά, όταν το ρεύμα υπερέβαινε την τιμή κατωφλίου, τότε οι χαρακτηριστικές έδειχναν ότι η αντίσταση έπεφτε κάτω από την αντίστοιχη των $60Hz$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Ο Berger επίσης έκανε δοκιμές και μ' έναν αγωγό γείωσης μεγάλου μήκους των $110m$ και διαμέτρου $6mm$, ο οποίος ήταν θαμμένος σε βάθος $20cm$ και $30cm$ αντίστοιχα. Οι δοκιμές με κρουστικά ρεύματα έδειξαν ότι η μεταβατική αντίσταση λάμβανε μικρότερες τιμές από την αντίσταση σταθερής κατάστασης.



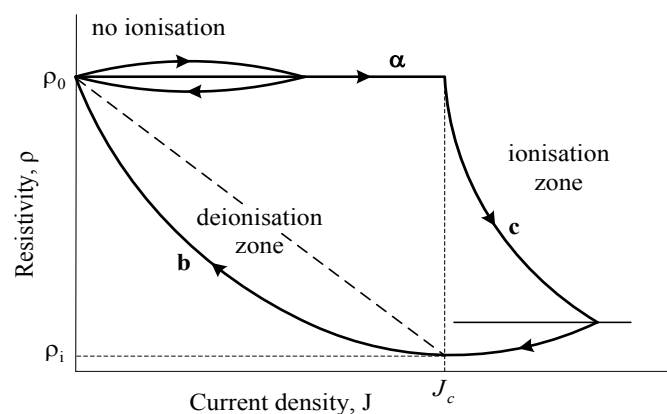
Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστικές μεταβατικής αντίστασης-χρόνου για μείγμα χώματος και διάφορα μεγέθη ρεύματος [5].

Την ίδια περίοδο, ο Πετρόπουλος [6] πειραματίστηκε, χρησιμοποιώντας ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο τύπου ράβδου που κατέληγε σε ακτινωτές ακίδες στο κάτω άκρο του. Ανακάλυψε ότι τα ηλεκτρόδια που είχαν ακίδες, παρουσίαζαν χαμηλότερες τιμές σύνθετης αντίστασης υπό κρουστικά ρεύματα. Αυτή η μείωση στην αντίσταση αποδόθηκε σε φαινόμενα διάσπασης του χώματος. Τα

αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι, καθώς αυξανόταν το μήκος των ακίδων, μειωνόταν η τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.

Αρκετά χρόνια αργότερα, οι Liew-Darveniza [7] έκαναν μια σειρά πειραμάτων σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια, αλλά και σ' ένα ημισφαιρικό, τα οποία ήταν θαμμένα σε εδάφη διαφορετικής ειδικής αντίστασης, η οποία κυμαινόταν από $50\Omega m$ έως $310\Omega m$. Το μέγεθος του κρουστικού ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε κυμαινόταν μεταξύ $1kA$ και $20kA$, με χρόνο μετώπου μεταξύ $6\mu s$ και $54\mu s$. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι η χαμηλότερη αντίσταση προέκυψε μετά τη χρονική στιγμή μεγίστου του ρεύματος και ότι η μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίστηκε πριν τη μέγιστη τιμή του ρεύματος.

Οι συγγραφείς [7] πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων γείωσης υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ιστροπικό. Το Σχήμα 2.2 δείχνει αυτό το μοντέλο, το οποίο χωρίζεται σε τρία στάδια: το στάδιο (a) αναπαριστά μια κατάσταση σταθερής ειδικής αντίστασης (ρ), αυξανομένης της πυκνότητας ρεύματος και το στάδιο (c), όπου το ρεύμα υπερβαίνει την κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος και μειώνεται ο χρόνος ιονισμού όταν συμβεί διάσπαση του χώματος, η ειδική αντίσταση εδάφους μειώνεται εκθετικά με μια τιμή γνωστή ως *χρονική σταθερά ιονισμού*. Στο τρίτο στάδιο (b), καθώς το ρεύμα μειώνεται, η ειδική αντίσταση αυξάνει εκθετικά, προς την τιμή της σταθερής κατάστασης, σύμφωνα με τη χρονική σταθερά απιονισμού. Όταν δε, το ρεύμα αυξανόταν στα $100kA$, τότε συνέβαινε μία σημαντική μείωση στην τιμή της αντίστασης. Βρέθηκε, επίσης, ότι το ποσοστό αυτής της μείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και είναι μεγαλύτερο στις περιπτώσεις υψηλής ειδικής αντίστασης και χαμηλότερων κλίσεων διάσπασης.

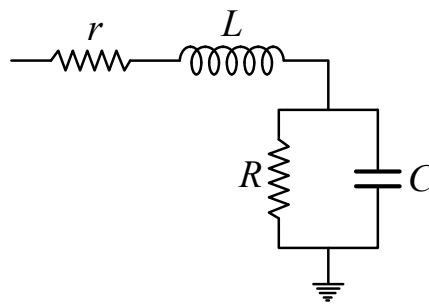


Σχήμα 2.2: Δυναμικό μοντέλο για τη διαδικασία ιονισμού του εδάφους [7].

Οι Wang, Liew και Darveniza [8] επέκτειναν αργότερα το μοντέλο του 1974, εισάγοντας και την περιοχή όπου εκδηλώνονται τα τόξα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κρουστική σύνθετη αντίσταση των ηλεκτροδίων γείωσης μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους, όπως με λογισμικό που βασίζεται στη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, με μοντέλα ισοδύναμων κυκλωμάτων με συγκεντρωμένες παραμέτρους, ή με ισοδύναμα κυκλώματα κατανεμημένων παραμέτρων από τη θεωρία των γραμμών μεταφοράς.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κατακόρυφου ηλεκτροδίου προτάθηκε από τον Rudenberg [9]. Πρόκειται για ένα απλό κύκλωμα που αποτελείται από μια αντίσταση σειράς r και την αυτεπαγωγή της ράβδου L , σε σειρά με τον παράλληλο συνδυασμό της αντίστασης προς γη R με τη χωρητικότητα προς γη C . Το κύκλωμα που προτάθηκε, φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 2.3:



Σχήμα 2.3: Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος για κατακόρυφη ράβδο γείωσης [9].

Οι σχετικές εξισώσεις για τις παραμέτρους του κυκλώματος της κατακόρυφης ράβδου, όπως προτάθηκαν από τον συγγραφέα [9], είναι οι ακόλουθες:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$G = \frac{2\pi}{\rho \left[\ln \left(\frac{2l}{a} \right) \right]} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r l}{\ln \left(\frac{2l}{a} \right)} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} \right) \quad (2.4)$$

όπου, l και a το μήκος και η ακτίνα της ράβδου αντίστοιχα, μ και ϵ_r η διαπερατότητα και η σχετική επιτρεπτότητα του εδάφους.

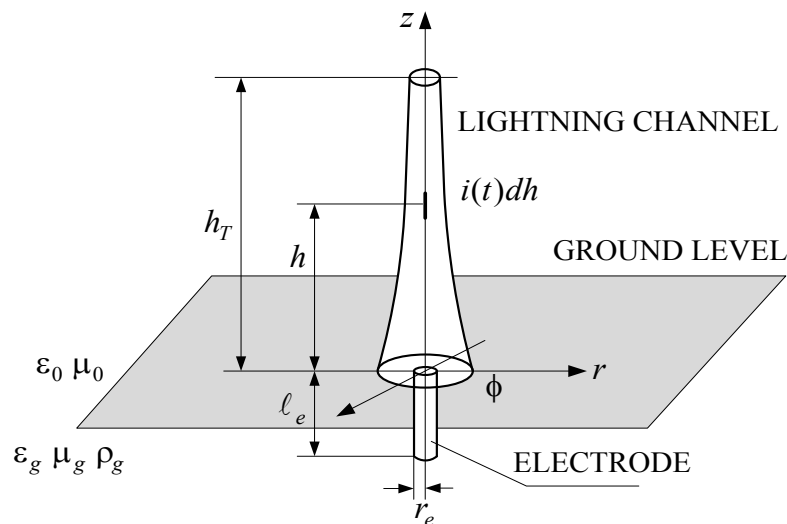
Αρκετά αργότερα, ο Μελιόπουλος και οι συνεργάτες του [10] πρότειναν μια γενικότερη μεθοδολογία επίλυσης του ισοδύναμου κυκλώματος του ηλεκτροδίου γείωσης, το οποίο θεωρήθηκε εντός διστρωματικής ημιάπειρης περιοχής. Το μοντέλο αυτό προέκυψε από την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Laplace ($\nabla^2 U=0$). Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα, μαζί με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αναπαριστά ένα μεγάλης κλίμακας δίκτυο, το οποίο επιλύεται με την τροποποιημένη μέθοδο κόμβων.

Οι Gupta-Thapar [11], την ίδια χρονική περίοδο, εφάρμοσαν το μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος για να ερευνήσουν και πειραματικά την επίδραση των κρουστικών ρευμάτων στα πλέγματα γείωσης, όπου και κατέληξαν σε μία εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της επαγωγής L τετραγωνικού πλέγματος. Παρατήρησαν, επίσης, ότι η κρουστική αντίσταση, η οποία ορίστηκε ως ο λόγος της μέγιστης τάσης προς το μέγιστο ρεύμα, εμφάνιζε υψηλότερη τιμή από την αντίσταση χαμηλής συχνότητας και μάλιστα αυτή η ποσότητα αυξανόταν όσο μεγάλωνε η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Εργαστηριακά πειράματα της ίδιας εργασίας σε μοντέλα πλέγματος έδειξαν το ίδιο πράγμα. Τέλος, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους είναι πολύ μικρό για τα πλέγματα γείωσης και συνεπώς μπορεί να αμεληθεί. Σε παρόμοια ευρήματα κατέληξε και η εργασία του Ramamoorty και των συνεργατών του [12], που χρησιμοποίησαν παρόμοια κυκλωματικά μοντέλα.

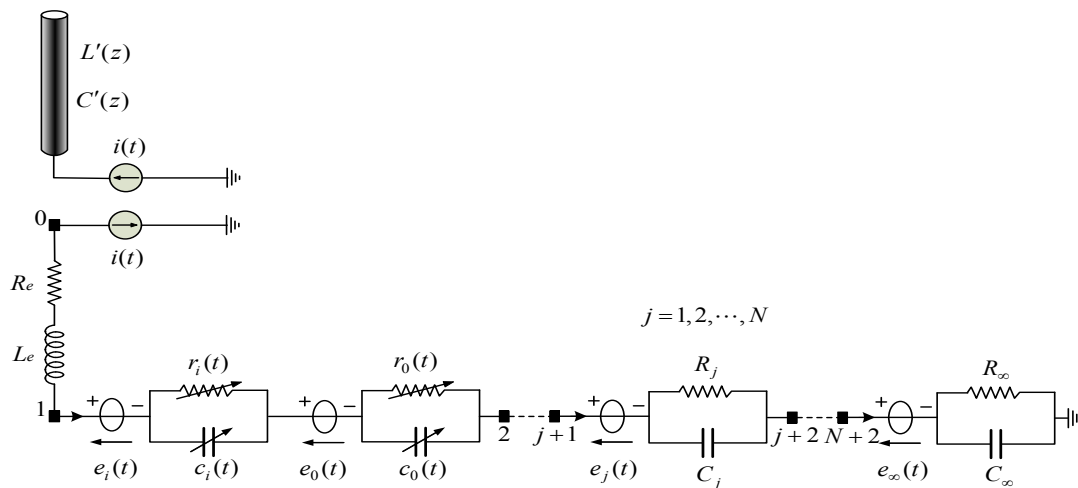
Κυκλωματικά μοντέλα με συγκεντρωμένες, ως επί το πλείστον, παραμέτρους ανέπτυξαν ο Geri και οι συνεργάτες του [13, 14], υποστηρίζοντας ότι η κυκλωματική προσέγγιση μπορεί να υστερεί σε ακρίβεια από την πεδιακή προσέγγιση, είναι όμως ένας πολύ καλός συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας των υπολογισμών, της απλότητας των μοντέλων και του υπολογιστικού φόρτου. Διεξήγαγαν πειράματα σε κατακόρυφα και οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης με μέγεθος ρεύματος δοκιμής έως $30kA$ και χρόνος μετώπου $2,5\mu s$. Παρατήρησαν ότι καθ' όλο το εύρος του ρεύματος, η κρουστική αντίσταση μειώθηκε από 18Ω σε 6Ω για το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο και από 10Ω σε 4Ω για το οριζόντιο. Για τη σχεδίαση των προτεινόμενων κυκλωμάτων, ανέπτυξαν κώδικα με τη βοήθεια εμπορικού λογισμικού πακέτου και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είχαν καλή προσέγγιση με τις πειραματικές τους τιμές. Σε μεταγενέστερη εργασία του

[15], πρότεινε ένα ισοδύναμο κύκλωμα-Π με συγκεντρωμένες παραμέτρους, οι οποίες υπολογίζονταν μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, η οποία βασιζόταν σε μικρογενετικό αλγόριθμο (μGA). Το προτεινόμενο μοντέλο μείωσε δραστικά τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνταν για τη γραμμική και μη γραμμική ανάλυση ενός τυπικού συστήματος γείωσης πύργου μεταφοράς.

Τέλος, ο ίδιος συγγραφέας, προχώρησε σε μια ανάλυση, συνδυάζοντας ένα μοντέλο γραμμής μεταφοράς για τον ανερχόμενο οχετό του κεραυνού με ένα μοντέλο συγκεντρωμένων μη γραμμικών παραμέτρων για κατακόρυφη ράβδο γείωσης (Σχήμα 2.4), η οποία πιθανόν να επηρεαζόταν από φαινόμενα ιονισμού του εδάφους λόγω υψηλών ρευμάτων. Το προτεινόμενο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 2.5 [16].



Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση ανερχόμενου κεραυνικού οχετού απευθείας από μια ομοαξονική κατακόρυφη ράβδο κάτω από το έδαφος [16].



Σχήμα 2.5: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κεραυνικού οχετού και ηλεκτροδίου γείωσης.

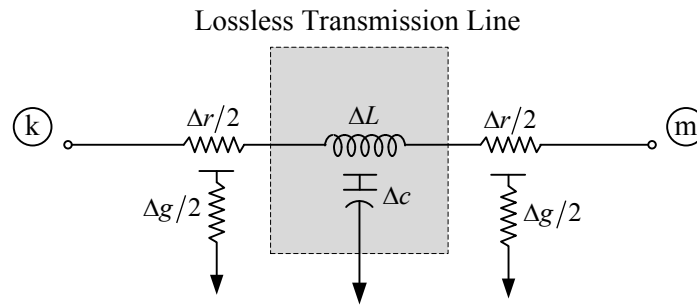
$$i(t) = G_L \cdot U(t) + i_N(t) \quad (2.5)$$

$$\frac{di_N(t)}{dt} = \frac{1}{T} [A \cdot U^a(t) - i_N(t)] \quad (2.6)$$

Η ίδια ομάδα ερευνητών, σε επόμενο συνέδριο [19], παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης που έκαναν με το κυκλωματικό μοντέλο που ανέπτυξαν στη [18], χρησιμοποιώντας το λογισμικό ATP-EMTP. Σύμφωνα με τους συγγραφείς χρησιμοποιήθηκε κυκλωματικό μοντέλο, ώστε να ληφθούν υπ' όψιν πιθανά μη γραμμικά φαινόμενα ιονισμού του εδάφους. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να αναπαρασταθούν με σταθερά και χρονομεταβλητά στοιχεία του ισοδυνάμου κυκλώματος. Τα αποτελέσματα, επίσης, επαλήθευσαν και τη χρησιμοποίηση τέτοιων ισοδυνάμων κυκλωμάτων για προσομοίωση στο EMTP.

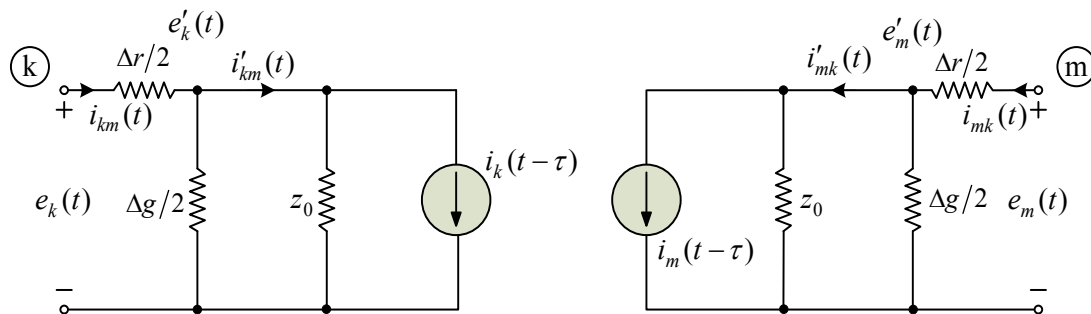
Μολαταύτα, η Ασημακοπούλου και οι συνεργάτες της [20] κατόπιν δικών τους προσομοιώσεων, διατύπωσαν τα δικά τους συμπεράσματα για την εφαρμογή των προαναφερόμενων μεθόδων υπολογισμού της κρουστικής αντίστασης και του ιονισμού του εδάφους. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μέθοδοι που βασίζονται στις προηγούμενες εξισώσεις και στα αναλογικά κυκλώματα παρουσιάζουν δυσκολία κατά την εφαρμογή τους σε προγράμματα προσομοίωσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων, όπως το Pspice και το WorkBench.

Η θεωρία των γραμμών μεταφοράς με τα κυκλώματα των ομοιόμορφα κατανεμημένων παραμέτρων έκανε την εμφάνισή της στην ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης σε εργασία των Μελιόπουλου-Moharam [21]. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν κυκλώματα με κατανεμημένα στοιχεία για την επαγωγή, τη χωρητικότητα και την αντίσταση διαρροής προς γη σε οριζόντιο αγωγό γείωσης. Χώρισαν τον αγωγό σε τμήματα και για κάθε τμήμα χρησιμοποίησαν παραμέτρους ανεξάρτητες της συχνότητας (ΔL , ΔC , ΔG , Δr_e). Η αντίσταση διαρροής προς γη υπολογίστηκε με ακρίβεια με τη μέθοδο των ροπών, ενώ οι υπόλοιπες υπολογίστηκαν από την αντίσταση, με επίλυση των εξισώσεων Maxwell. Το ενδιαφέρον σ' αυτήν την εργασία είναι ότι κάθε τμήμα του αγωγού γείωσης αντικαταστάθηκε από μία γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες και από δύο επιπλέον αγωγιμότητες διαρροής προς γη σε διακλάδωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7:



Σχήμα 2.7: Ισοδύναμο κύκλωμα προσέγγισης ενός αγωγού γείωσης μικρού μήκους [21].

Με εφαρμογή της μεθόδου Dommel [21] το κύκλωμα στο Σχήμα 2.7 μετασχηματίζεται στο ωμικό ισοδύναμο κύκλωμα του ακόλουθου σχήματος:



Σχήμα 2.8: Ωμικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός αγωγού γείωσης μικρού μήκους [21].

Μ' αυτόν τον τρόπο κάθε στοιχειώδες τμήμα μπορεί να αναπαρασταθεί με το ισοδύναμο κύκλωμα στο Σχήμα 2.8 και με τις ανάλογες εξισώσεις. Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι ωμικού χαρακτήρα και η εφαρμογή της μεθόδου κόμβων, γι' αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα, θα δώσει:

$$[Y] \cdot [e(t)] = [i(t)] + [b(t-h)] \tag{2.7}$$

όπου, Y η μήτρα των σύνθετων αγωγιμοτήτων του κυκλώματος, $e(t)$ το διάνυσμα των δυναμικών στους κόμβους του κυκλώματος, $i(t)$ το διάνυσμα των εξωτερικά εγγεόμενων ρευμάτων και $b(t-h)$ το διάνυσμα ιστορικού προηγούμενων τιμών ρεύματος.

Αργότερα, ως επέκταση της προηγούμενης εργασίας, ο ίδιος συγγραφέας [22] βελτίωσε την κυκλωματική προσέγγιση συστήματος γείωσης για αντικεραυνικές μελέτες. Υπολόγισε την απόκριση κάθε τμήματος σε οποιαδήποτε υπερδιέγερση ρεύματος, βασιζόμενος στις μερικώς στατικές εξισώσεις Maxwell, έτσι, ώστε οι παράμετροι κάθε τμήματος και οι προηγούμενες τιμές ρεύματος να είναι εξαρτώμενες από τη συχνότητα.

Την ίδια περίοδο, οι Verma-Mukhedkar [23] και Mazetti-Veca [24] εφάρμοσαν την έννοια της γραμμής μεταφοράς με απώλειες σε οριζόντιο αγωγό γείωσης, η περιγραφή του οποίου δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} + r_e I = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial U}{\partial t} + GU = 0 \quad (2.9)$$

Σκοπός της επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων (2.8) και (2.9) ήταν η εύρεση της αναλυτικής κατανομής ρεύματος και τάσης κατά μήκος του αγωγού γείωσης στο μιγαδικό επίπεδο. Κατόπιν, ακολουθούσε η μετατροπή των μιγαδικών εξισώσεων σε εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου με χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Laplace. Τα αποτελέσματα των Mazetti-Veca έδειξαν ότι η πτώση τάσης κατά μήκος του οριζόντιου αγωγού ήταν σημαντική λόγω της επαγωγής, αλλά μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος, το «ενεργό μήκος», συνέβαλε στη διάχυση του ρεύματος. Το ενεργό μήκος φάνηκε ότι αυξάνει με την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Αργότερα, η Liu [25] πρότεινε ένα βελτιωμένο μοντέλο γραμμής στο πεδίο του χρόνου, στο οποίο λάμβανε υπ' όψιν την αμοιβαία ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του συστήματος γείωσης και την επίδραση της διεπαφής αέρα-γης. Η Λορέντζου [26] ξεκίνησε από τις ίδιες εξισώσεις (2.8) και (2.9), αλλά ανέπτυξε την εξίσωση κατανομής ρεύματος και τάσης του αγωγού απευθείας στο πεδίο του χρόνου.

Ο λόγος που η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς ήταν η πρώτη για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης είναι ότι χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς οριζόντιου αγωγού γείωσης (counterpoise wire). Ο οριζόντιος αγωγός γείωσης έχει μεταβατική συμπεριφορά παρόμοια μ' αυτήν των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο αγωγός είναι θαμμένος στο έδαφος, ενώ η εναέρια γραμμή μεταφοράς βρίσκεται στον αέρα. Η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης μπορεί να γίνει είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας. Στο πεδίο του χρόνου, όμως, είναι εύκολο να συμπεριληφθεί και ο ιονισμός του εδάφους. Παρόμοια με την κυκλωματική προσέγγιση μπορεί,

επίσης, να εμπεριέχει όλες τις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στα διάφορα τμήματα των αγωγών γείωσης.

Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι η μέθοδος που δίνει τα ακριβέστερα και λεπτομερέστερα αποτελέσματα, επειδή επιλύει τις πλήρεις εξισώσεις Maxwell με ελάχιστες προσεγγίσεις. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τη μέθοδο των ροπών (MoM), είτε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Η μέθοδος των ροπών εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο από τους Grcev-Dawalibi το 1990 [27]. Βασίζεται στην ολοκληρωτική εξίσωση του Maxwell για το διεσπαρμένο (scattered) ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E}^s :

$$\mathbf{E}^s = \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int_l \mathbf{t}' \cdot I_l(\mathbf{r}') G_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dl \quad (2.10)$$

όπου:

$$G_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + G_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + G_s(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (2.11)$$

G η συνάρτηση Green, $\gamma^2 = -\omega^2\mu\epsilon$, με μ τη μαγνητική διαπερατότητα του μέσου και ϵ την ηλεκτρική επιτρεπτότητά του, \mathbf{r} και \mathbf{r}' ακτινικά διανύσματα και \mathbf{t}' μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος του άξονα σωληνοειδούς στοιχείου.

Η οριακή συνθήκη είναι ότι το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού γείωσης πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{t} \cdot (\mathbf{E}^i + \mathbf{E}^s) = I \cdot Z_s \cdot \Delta l \quad (2.12)$$

με \mathbf{E}^i το εντυπωμένο (impressed) ηλεκτρικό πεδίο, I και Z_s το ρεύμα και η επιφανειακή σύνθετη αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης.

Η αριθμητική επεξεργασία της εξίσωσης (2.12) καλείται μέθοδος των ροπών. Αυτή η μέθοδος δεν είναι τίποτε άλλο από τον μετασχηματισμό της σχετικής ολοκληρωτικής εξίσωσης σ' ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους. Οι N άγνωστοι συνήθως αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές του ρεύματος βάσει μερικών κατάλληλων επεκτάσεων.

Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε από τον Nekhoul και τους συνεργάτες το 1995 [28]. Το μοντέλο ξεκινά από εξισώσεις ηλεκτρικής ή μαγνητικής ενέργειας, οι οποίες εμπεριέχουν μερικές διαφορικές εξισώσεις Maxwell, αναφορικά με το διανυσματικό δυναμικό (\mathbf{A}) και το βαθμωτό δυναμικό (U) σε διαφορετικές περιοχές του συστήματος. Υλοποιείται, έπειτα, με τη χρήση της μεθόδου

πεπερασμένων στοιχείων για τις λύσεις που βασίζονται στη φυσική αρχή ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο σύστημα. Οι τελικές συναρτήσεις $A-U$ δίνονται από τις εξισώσεις (2.13)–(2.15), οι οποίες εμπεριέχουν τις συναρτήσεις βάρους \mathbf{W} και w για το διανυσματικό και βαθμωτό δυναμικό αντίστοιχα:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) + \frac{1}{\mu} (\nabla \cdot \mathbf{W})(\nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \cdot (j\omega \mathbf{W} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{W} \cdot \nabla U) \right] d\Omega = 0 \quad (2.13)$$

$$\int_{\Omega} [\sigma \cdot \nabla w \cdot (j\omega \mathbf{A} + \nabla U)] d\Omega = 0 \quad (2.14)$$

όπου w η συνάρτηση βάρους ενός βαθμωτού δυναμικού για τον στοιχειώδη όγκο $d\Omega$ και \mathbf{W} η συνάρτηση βάρους ενός διανυσματικού δυναμικού για τον στοιχειώδη όγκο $d\Omega$.

Για μη αγώγιμες περιοχές (αέρας) με πηγή ρεύματος χρησιμοποιείται γενικά η διατύπωση του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} η οποία δίνεται ως:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) + \frac{1}{\mu} (\nabla \cdot \mathbf{W})(\nabla \cdot \mathbf{A}) \right] d\Omega = 0 \quad (2.15)$$

Οι (2.13) και (2.14) αφορούν το πεδίο στο έδαφος ενώ η (2.15) το πεδίο στον αέρα. Προκειμένου να λυθούν τα προβλήματα αριθμητικά, οι εξισώσεις αυτές μετασχηματίζονται σε γραμμικές εξισώσεις, με διαίρεση ολόκληρου του συστήματος σε N μικρά στοιχεία. Η δυσκολία σ' αυτήν την προσέγγιση έγκειται στον μετασχηματισμό των ανοικτών ορίων του περιβάλλοντος, τόσο του αέρα όσο και της γης, σ' ένα κλειστό οριακό πρόβλημα με χρήση χωρικού μετασχηματισμού, ο οποίος θα μειώσει το μέγεθος του προβλήματος. Το κύριο πλεονέκτημα της βασισμένης στη FEM προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ότι η περιγραφή της περιοχής (γεωμετρία του μέσου) του προβλήματος διευκολύνεται από ιδιαίτερα ευέλικτα μη ομοιόμορφα στοιχεία, που μπορούν εύκολα να περιγράψουν πολύπλοκα σχήματα.

Ο Green σε επόμενες εργασίες του [29], [30] και [31] κάνει μια σύγκριση μεταξύ των κυκλωματικών προσεγγίσεων με συγκεντρωμένες παραμέτρους, των αντίστοιχων με κατανεμημένες παραμέτρους και του ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου, σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια μήκους $3m$ και $30m$, για διάφορες συχνότητες και για ειδικές αντιστάσεις $30\Omega m$ και $300\Omega m$. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές διαφορές στις υψηλές συχνότητες. Σ' εκείνες τις συχνότητες

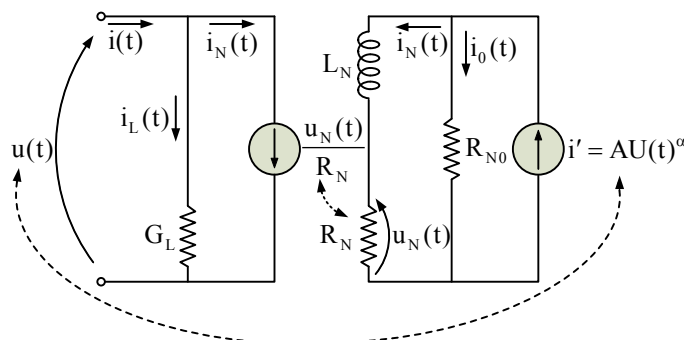
τα μοντέλα των συγκεντρωμένων παραμέτρων εμφανίστηκαν να υπερεκτιμούν την τιμή της κρουστικής αντίστασης, εν συγκρίσει με το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο που έδωσε πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Τα δε μοντέλα των κατανεμημένων παραμέτρων έβγαλαν τιμές κοντά στις αντίστοιχες του ηλεκτρομαγνητικού.

Μελέτες, επίσης, του Davies [32] έδειξαν ότι τα κυκλώματα με συγκεντρωμένες παραμέτρους μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά πολύ απλά συστήματα και σε χαμηλές συχνότητες. Σε υψηλές συχνότητες η χρήση τους οδηγεί σε εσφαλμένες και ανακριβείς εκτιμήσεις των μεγεθών της κρουστικής σύνθετης αντίστασης. Τα δε μοντέλα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους μπορούν να εκτιμήσουν με πολύ καλύτερη ακρίβεια την κρουστική αντίσταση απλών διατάξεων γείωσης σε υψηλές συχνότητες. Για μεγαλύτερες και πιο σύνθετες, πάντα σύμφωνα με τον Davies, διατάξεις γείωσης τα μοντέλα της θεωρίας των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων δίνουν τα ακριβέστερα αποτελέσματα και είναι σχετικώς πιο εύκολη η εφαρμογή τους. Επίσης, τα ίδια μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στον χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης.

Εκτός από τις κυκλωματικές προσεγγίσεις των συστημάτων γείωσης, αρκετοί ερευνητές διεξήγαγαν πειράματα σε ηλεκτρόδια γείωσης, κυρίως κατακόρυφα, με κρουστική καταπόνηση είτε υπό κλίμακα σε εργαστήρια, είτε σε πραγματική κλίμακα σε ανοικτό πεδίο. Οι Γκόνοβ [33], He [34], Sekioka [35] Nor [36, 37], Harid [38, 39], Griffiths-Haddad [40] και Visacro [41, 42] από τα πειράματα που διεξήγαγαν, πρότειναν εμπειρικές και αναλυτικές σχέσεις για την επίδραση των χαρακτηριστικών συχνότητας του εδάφους, της κυματομορφής του ρεύματος και του ενεργού μήκους του ηλεκτροδίου στην τιμή της κρουστικής αντίστασης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εργασία των Altafim και συνεργατών [43], στην οποία προτείνεται μονόθυρο μη γραμμικό κύκλωμα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης υπό κρουστική καταπόνηση. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο ισοδύναμο κύκλωμα προσομοιώνει τις εξισώσεις Loboda-Pochanke [18] ανάγοντας την επίλυση αυτών σε επίλυση ενός απλού ηλεκτρικού κυκλώματος. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε μοντέλα ηλεκτροδίων υπό κλίμακα και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, χαράχθηκαν οι καμπύλες $U \times I$ και προσδιορίστηκαν οι παράμετροι του

κυκλώματος. Στη συνέχεια το κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό προσομοίωσης WorkBench, τα αποτελέσματα του οποίου συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά.



Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα προσομοίωσης των εξισώσεων Loboda-Pochanke [43].

Τέλος, ο Haddad και οι συνεργάτες [44, 45] διεξήγαγαν μεγάλης κλίμακας πειράματα σε λιμνοταμιευτήρα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ενέργειας όπου έκαναν δοκιμές σε διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων γείωσης, ανάμεσά τους κατακόρυφες ράβδοι και πλέγματα γείωσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με χρήση DC, AC διαφόρων συχνοτήτων και κρουστικών ρευμάτων για την επαλήθευση των θεωρητικών τύπων υπολογισμού της αντίστασης γείωσης και για τη σύγκριση των πραγματικών μεγεθών μεταξύ της κρουστικής σύνθετης αντίστασης και της αντίστασης βιομηχανικής συχνότητας. Διερευνήθηκε η μείωση της τιμής της πρώτης έναντι της δεύτερης, σε πραγματικής κλίμακας κατασκευές και υπαίθριες συνθήκες, καθώς επίσης και η ομοιομορφία της ειδικής αντίστασης του νερού και της θερμοκρασίας του, ως προς το βάθος, αλλά και ως προς τα διαφορετικά σημεία της επιφάνειας της λίμνης.

Με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του παρόντος κεφαλαίου ολοκληρώνεται η μελέτη της συνολικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας τους. Βέβαια, η βιβλιογραφία στην παρούσα διατριβή αποτελεί ένα μικρό μόνο μέρος της συνολικής που αφορά τη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, έγινε όμως προσπάθεια να συμπεριλάβει αρκετές από τις σημαντικότερες, ίσως, αναφορές της παγκόσμιας βιβλιογραφίας που αποτελούν οδηγό και για τη σύγχρονη

έρευνα. Με την κατανόηση του ρόλου των συστημάτων γείωσης στις σύγχρονες εγκαταστάσεις και της απαραίτητης προϋπόθεσης αυτά να εμφανίζουν χαμηλές τιμές αντίστασης γείωσης, γίνεται φανερή η ανάγκη ανάπτυξης τεχνικών και υλικών για τη μείωση της αντίστασης γείωσης και τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων. Τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων και τις τεχνικές βελτιστοποίησης των συστημάτων γείωσης πραγματεύεται με λεπτομέρεια το επόμενο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφία

- [1] H. M. Towne, “Impulse characteristics of driven grounds”, General Electric Review, Vol. 31, No. 11, pp. 605–609, November 1929.
- [2] L. V. Bewley, “Theory and tests of the counterpoise”, AIEE Transactions on Electrical Engineering, Vol. 53, No. 8, pp. 1163–1172, August 1934.
- [3] P. L. Bellaschi, “Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds”, AIEE Transactions, Vol. 60, No. 3, pp. 123–128, March 1941.
- [4] P. L. Bellaschi, R. E. Armington and A. E. Snowden, “Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds-II”, AIEE Transactions, Vol. 61, No. 6, pp. 349–363, June 1942.
- [5] K. Berger, “The behaviour of earth connections under high intensity impulse currents”, CIGRE, Paris, France, Paper No. 215, 1946.
- [6] G. M. Petropoulos, “The high-voltage characteristics of earth resistances”, Journal of the IEE, Vol. 95, Part II, pp. 59–70, 1948.
- [7] A. C. Liew and M. Darveniza, “Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths”, Proceedings IEE, Vol. 121, No. 2, pp. 123–135, February 1974.
- [8] J. Wang, A. C. Liew and M. Darveniza, “Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 2160–2165, July 2005.
- [9] R. Rudenberg, “Electrical shock waves in power systems: Travelling waves in lumped and distributed circuit elements”, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, ISBN 011281, 1st edition, 1968.
- [10] A. P. Meliopoulos, R. P. Webb and E. B. Joy, “Analysis of grounding systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, pp. 1039–1048, March 1981.
- [11] B. R. Gupta and B. Thapar, “Impulse impedance of grounding grids”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2357–2362, November/December 1980.

-
- [12] M. Ramamoorthy, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran and D. Mukhedkar, “Transient performance of grounding grids”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2053–2059, October 1989.
- [13] A. Geri, G. M. Veca, E. Garbagnati and G. Santorio, “Non-linear behaviour of ground electrodes under lightning surge currents: computer modelling and comparison with experimental results”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 2, pp. 1442–1445, March 1992.
- [14] A. Geri, “Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1008–1017, July 1999.
- [15] F. M. Gatta, A. Geri, S. Lauria and M. Maccioni, “Equivalent lumped parameter Π -network of typical grounding systems for linear and non-linear transient analysis, 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania, June 28th–July 2nd, 2009.
- [16] V. Amoruso, F. Lattarulo, A. Geri and G. M. Veca, “EM lightning channel's effects on ground systems”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Dallas, TX, USA, August 9th–13th, 1993, pp. 447–452.
- [17] R. Kosztaluk, M. Loboda and D. Mukhedkar, “Experimental study of transient ground impedances”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4653–4660, November 1981.
- [18] M. Loboda and Z. Pochanke, “Experimental study of electric properties of soil with impulse current injections”, 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP 1985), Munich, Germany, September 16th–20th, 1985, pp.191–198.
- [19] W. Kalat, M. Loboda and Z. Pochanke, “Implementation of the dynamic model of surge soil conduction for transient behaviour of grounding electrodes simulations using ATP version of EMTP”, 22nd International Conference on Lightning Protection (ICLP 1994), Budapest, Hungary, September 1994.
- [20] F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Methodologies for determination of soil ionization gradient”, Journal of Electrostatics, Vol. 70, No. 5, pp. 457–461, October 2012.

-
- [21] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, “Transient analysis of grounding systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 2, pp. 389–399, February 1983.
- [22] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, “Frequency dependent characteristics of grounding systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, pp. 1073–1081, October 1987.
- [23] R. Verma and D. Mukhedkar, “Impulse impedance of buried ground wires”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003–2007, September/October 1980.
- [24] C. Mazzetti and G. M. Veca, “Impulse behavior of ground electrodes”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, pp. 3148–3156, September 1983.
- [25] Y. Liu, M. Zitnik and R. Thottappillil, “An improved transmission-line model of grounding system”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No. 3, pp. 348-355, August 2001.
- [26] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou and B. C. Papadias, “Time domain analysis of grounding electrodes impulse response”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 517–524, April 2003.
- [27] L. Grcev and F. Dawalibi, “An electromagnetic model for transients in grounding system”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp. 1773–1781, November 1990.
- [28] B. Nekhoul, C. Cuerin, P. Labie, G. Meunier and R. Feuillet, “A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 3, pp. 2150–2153, May 1995.
- [29] L. Grcev, M. Popov, “On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1598–1602, April 2005.
- [30] L. Grcev, “Impulse efficiency of ground electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, pp. 441–451, January 2009.
- [31] L. Grcev, “Modeling of grounding electrodes under lightning currents”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, pp. 559–571, August 2009.

- [32] A. M. Davies, “High frequency and transient performance of earthing systems”, Ph.D thesis, Cardiff University, 1999.
- [33] I. F. Gonos, F. V. Topalis and I. A. Stathopoulos, “Transient impedance of grounding rods”, 11th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 1999), London, UK, August 23rd-27th, 1999, Vol. 2, pp. 272–275.
- [34] J. He, R. Zeng, Y. Tu, J. Zou, S. Chen and Z. Guan, “Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 994–1001, July 2003.
- [35] S. Sekioka, T. Sonoda and A. Ametani, “Experimental study of current-dependent grounding resistance of rod electrode”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1569–1576, April 2005.
- [36] N. M. Nor, A. Haddad and H. Griffiths, “Determination of threshold electric field E_c of soil under high impulse currents”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 2108–2113, July 2005.
- [37] N. M. Nor and A. Ramli, “Soil characteristics of wet sand under different impulse polarity and earth electrode’s dimensions”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 4, pp. 910–914, August 2008.
- [38] N. Harid, H. Griffiths and A. Haddad, “Effect of ground return path on impulse characteristics of earth electrodes”, 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2011), Chengdu, China, November 1st–4th, 2011, pp. 686–689.
- [39] N. Harid, H. Griffiths, N. Ullah, M. Ahmeda, and A. Haddad, “Experimental investigation of impulse characteristics of transmission line tower footings”, Journal of Lightning Research, Vol. 4, No. 1, pp. 36–44, June 2012.
- [40] S. Mousa, H. Griffiths, N. Harid and A. Haddad, “Experimental investigation of high frequency and transient performance of earth rod systems”, 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, paper 247.
- [41] S. Visacro and G. Rosado, “Response of grounding electrodes to impulsive currents: an experimental evaluation”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 1, pp. 161–164, February 2009.
- [42] S. Visacro and R. Alipio, “Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning

-
- response of grounding electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, pp. 927–935, April 2012.
- [43] R.A.C. Altafim, L. Gonçalves Jr., R.A.P. Altafim, R.C. Creppe and A. Piantini, “One-port nonlinear electric circuit for simulating grounding systems under impulse current”, Electric Power Systems Research, Vol. 130, pp. 259–265, January 2016.
- [44] D. Guo, D. Lathi, N. Harid, H. Griffiths, A. Haddad and A. Ainsley, “Large-scale earthing test facilities at Dinorwig power station”, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Beijing, China, April 21st–24th, 2008, pp. 808–811.
- [45] D. Guo, D. Lathi, N. Harid, H. Griffiths, A. Haddad and A. Ainsley, “Experimental investigation into the performance of large-scale earthing electrodes”, 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2010), New Orleans, USA, October 11th–14th, 2010, pp. 465–468.

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές βελτίωσης συστημάτων γείωσης και βελτιωτικά υλικά γειώσεων στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση

Ἐτεῖ δὲ οὐδέν ἴδμεν· ἐν βυθῷ γὰρ ἡ ἀλήθεια.

Δημόκριτος (Διογένης Λαέρτιος)

Εξετάζονται τεχνικές βελτίωσης των συστημάτων γείωσης για τη μείωση της αντίστασης γείωσης, με επίκεντρο του ενδιαφέροντος τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων. Παρατίθεται πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση των σχετικών εργασιών, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της διατριβής και παρουσιάζεται, επίσης, το προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο προσομοίωσης της μεταβατικής κατάστασης.

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια, σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει την ύψιστη δυνατή ασφάλεια έναντι κινδύνων ηλεκτροπληξίας για τους ανθρώπους και έναντι καταστροφικών συνεπειών στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό από πάσης φύσεως διαρροές και βραχυκυκλώματα. Μία από τις κύριες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούται γι' αυτόν τον σκοπό είναι η αντίσταση του συστήματος γείωσης να είναι χαμηλής τιμής. Έχουν προταθεί, κατά καιρούς, διάφορες μέθοδοι όσον αφορά τόσο τη μορφή και το μέγεθος των ηλεκτροδίων γείωσης [1, 2], όσο και το πλήθος των ηλεκτροδίων σε ενιαία διάταξη [3], που θα μπορούσαν να ανακουφίσουν το πρόβλημα της υψηλής αντίστασης γείωσης σε εδάφη με υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης.

Σε περιπτώσεις όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι εξαιρετικά υψηλή και παράλληλα είναι αδύνατο να τοποθετηθούν ηλεκτρόδια σε μεγάλο βάθος λόγω της δομής του εδάφους (π.χ. βασάλτης) ή/και ο χώρος στον οποίο πρέπει

να εγκατασταθεί το σύστημα γείωσης είναι πολύ περιορισμένος για τοποθέτηση πολλαπλών ηλεκτροδίων, τότε επιβάλλεται κάποιος άλλος εναλλακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αυτό καθίσταται εφικτό με τη μέθοδο της τροποποίησης/διαμόρφωσης του εδάφους που βρίσκεται γύρω από το σημείο τοποθέτησης του ηλεκτροδίου γείωσης.

Συγκεκριμένα, ο στόχος της μεθόδου είναι η βελτίωση των φυσικών και των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του περιβάλλοντος εδάφους μέσω της τοποθέτησης εντός του ορύγματος, όπου πρόκειται να εγκατασταθεί το ηλεκτρόδιο, βελτιωτικών υλικών γείωσης. Τα βελτιωτικά αυτά υλικά είναι είτε φυσικά υλικά, όπως για παράδειγμα μπεντονίτης ή τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, είτε χημικά παρασκευάσματα, όπως για παράδειγμα συνθετικές ρητίνες. Σε κάθε περίπτωση, απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να επιλεγεί ένα υλικό για χρήση ως βελτιωτικό είναι να παρουσιάζει πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έτσι, με τις εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητές του μειώνει τεχνητά την ειδική αντίσταση του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο (τοπικά), αυξάνοντας τη φαινόμενη διάμετρο του ηλεκτροδίου και συνεπώς μειώνοντας την αντίσταση γείωσης.

3.2 Απαιτήσεις και προδιαγραφές για τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων

Με τον όρο βελτιωτικό υλικό γειώσεων τα Πρότυπα [4] αναφέρονται σ' ένα αγωγίμο 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. Όμως, η αγωγιμότητα ενός υλικού δεν αρκεί για να χαρακτηριστεί ως αποτελεσματικό βελτιωτικό υλικό γειώσεων.

Επιγραμματικά αναφέρονται τα κριτήρια, με βάση τα οποία πρέπει να γίνεται η αξιολόγηση και ο τελικός χαρακτηρισμός ενός υλικού ως αποτελεσματικού ή μη βελτιωτικού γειώσεων [4]:

1. Αγωγιμότητα.
2. Να είναι ασφαλές στη χρήση του και γενικότερα φιλικό προς το περιβάλλον.
3. Να είναι μόνιμο και να διατηρεί τις ιδιότητές του.

4. Να είναι φυσικά και χημικά αδρανές με το ηλεκτρόδιο γείωσης.
5. Εύκολο και απλό στην επεξεργασία.

Από το 2012 και μετά, ένα νέο βελτιωτικό υλικό προκειμένου να συμμορφώνεται με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία [4], θα πρέπει να υποβάλλεται σε συγκεκριμένους ελέγχους. Σκοπός αυτών των ελέγχων είναι να αποδειχθεί στην πράξη η ικανοποίηση ή μη των κριτηρίων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή 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 [5] ή ISO 14869-1 [6]. 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 [7]. Η μετρούμενη τιμή θα πρέπει να είναι χαμηλότερη, ή το πολύ ίση, μ' αυτήν που δίνει ο κατασκευαστής.

Τέλος, το υπό εξέταση βελτιωτικό υλικό θα πρέπει να υπόκειται σε δοκιμή διάβρωσης. Ο ρυθμός διάβρωσης προσδιορίζεται με τη χρήση ποτενσιοδυναμικών μεθόδων αντίστασης πόλωσης, όπως περιγράφεται στις προδιαγραφές ASTM G59-97 [8] και ASTM G102-89 [9]. Το υλικό για να περάσει επιτυχώς τον παραπάνω έλεγχο, θα πρέπει για ηλεκτρόδια γείωσης από κράμα χαλκού, η αντίσταση πόλωσής του να είναι μεγαλύτερη από $4\Omega m^2$ για μη επιθετικά περιβάλλοντα και από $8\Omega m^2$ για επιθετικά περιβάλλοντα. Για τα δε γαλβανισμένα ηλεκτρόδια γείωσης, οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης πόλωσης πρέπει να είναι $3\Omega m^2$ και $7,6\Omega m^2$.

Το ιδανικό βελτιωτικό υλικό θα πρέπει να πληροί όλα τα παραπάνω και ταυτόχρονα το κόστος επεξεργασίας, μεταφοράς και εγκατάστασής του να είναι πολύ χαμηλό. Σημειώνεται ακόμα ότι το Πρότυπο IEC/EN 62561-7:2012 [4] 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 συγκεκριμένης εφαρμογής.

Η σημασία των παραπάνω κανόνων έγινε φανερή σταδιακά μετά από μελέτες που διεξήχθησαν για ερευνητικούς σκοπούς τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά

συχνά και στην πράξη σε συστήματα γείωσης όπου είχαν χρησιμοποιηθεί βελτιωτικά υλικά κατά τον σχεδιασμό τους. Για παράδειγμα, ως γνωστόν η αγωγιμότητα είναι κυρίως ηλεκτρολυτική, συνεπώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υγρασία και τα άλατα που βρίσκονται στο έδαφος. Ενδεικτικά σημειώνεται ότι το θαλασσινό νερό παρουσιάζει ειδική αντίσταση μόλις $1\Omega m$, ενώ το καθαρό βρόχινο νερό παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από $1000\Omega m$. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις γρήγορα αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στην πράξη η ιδέα της χρήσης διαφόρων τύπων αλάτων ως βελτιωτικών υλικών, είτε μόνα τους, 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.

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

Όπως αναφέρεται και στο Πρότυπο IEEE Std 142-2007 [10], όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν άλατα και γενικότερα χημικά για την τροποποίηση του εδάφους, δεν πρέπει να έρχονται αυτά σε απευθείας επαφή με τα ηλεκτρόδια. Αντιθέτως, προτείνεται να ανοίγεται αύλακα περιμετρικά των ηλεκτροδίων σε κάποια απόσταση απ' αυτά και να τοποθετούνται εκεί. Βέβαια και σ' αυτήν την περίπτωση, δεν αποφεύγεται η σταδιακή διάχυση των αλάτων και η πιθανή μεταγενέστερη επαφή τους με τα ηλεκτρόδια. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται επανέγχυση (refill) μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα αυτού του τύπου βελτιωτικών υλικών.

3.3 Συμπεριφορά μόνιμης κατάστασης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση)

Το πρόβλημα της τεχνητής μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είχε αρχίσει να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, σε ερευνητικό επίπεδο, από τη δεκαετία κιάλας του 1940 [11]. Τότε είχε προταθεί, καθιερώθηκε δε αργότερα στα τεχνικά εγχειρίδια από τη βιομηχανία [12] ως τεχνική μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους η χρήση του άλατος (NaCl), με τις συνέπειες βέβαια που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Τα μειονεκτήματα του άλατος ως βελτιωτικού υλικού, αρχικά, επισημάνθηκαν από τους Clark και Watkins σε εργασία τους το 1960 [13]. Αντί του κοινού άλατος, 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. Πειράματα με φερροκυανίδιο χαλκού είχε αναφέρει ήδη από το 1953 ο Sanik [14].

Διεξήγαγαν εργαστηριακά και υπαίθρια πειράματα με κατακόρυφες ράβδους γείωσης, στις οποίες έκαναν έγχυση υπό πίεση με κατάλληλες αντλίες 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 ήταν σε 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. Τέλος, το κάθε υλικό παρουσίασε διαφορετική συμπεριφορά σε κάθε εξεταζόμενο έδαφος, με το φερροκυανίδιο του χαλκού να παρουσιάζει τα λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τα ίδια αποτελέσματα ανέφεραν ο Higashimura και οι συνεργάτες του στην εργασία ευρεσιτεχνίας τους [15], στην οποία δημιούργησαν ένα είδος ένυδρου

διαλύματος ακρυλαμίδης με διάφορους καταλύτες και το οποίο δοκίμασαν σε ηλεκτρόδια γείωσης για τη μείωση της αντίστασης γείωσης.

Οι Fagan και Lee [16] ήταν από τους πρώτους ερευνητές που πρότειναν ένα είδος θεμελιακής γείωσης, με την ηλεκτρική σύνδεση του ασάλινου 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. Την ιδιότητα αυτήν την απέδωσαν στην αποτελεσματικότητα του σκυροδέματος ως ομοιόμορφης ειδικής αντίστασης «έδαφος», λόγω της αλκαλικής σύνθεσής του και της υδροσκοπικής του φύσης. Αυτός ο συνδυασμός περιλαμβάνει τις δύο απαιτήσεις για την αγωγιμότητα ενός υλικού· την υγρασία και την κινητικότητα των ιόντων [16]. 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 χαμηλή την ειδική αντίστασή του.

Την ίδια περίπου χρονική περίοδο, οι Kutter-Lange [17], Mc Gowan [18], Jones [19] και Veledar και συνεργάτες [20] μελέτησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του μπεντονίτη και εξέτασαν την περίπτωση χρήσης του ως βελτιωτικό υλικό γειώσεων για τη μείωση της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ράβδων κάτω από πύργους του Συστήματος Μεταφοράς. Σ' αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν κάποια βασικά στοιχεία για τον μπεντονίτη, αφού χρησιμοποιείται ευρύτατα, σήμερα, στα συστήματα γείωσης είτε αυτούσιος, είτε ως βάση παραγωγής άλλων βελτιωτικών υλικών γειώσεων.

Ο μπεντονίτης είναι ένα είδος αργίλου που το κύριο συστατικό της είναι ο μοντμοριλλονίτης. Ο μοντμοριλλονίτης είναι ορυκτό πυριτικό άλας (ένυδρο πυριτικό αργίλιο) σε κρυσταλλική μορφή. Τα πυριτικά ορυκτά, ως γνωστόν, 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 $[(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O]$. Η περιεκτικότητά του σε νερό είναι μεταβλητή και διογκώνεται αρκετά όταν απορροφά υγρασία. Σ' αυτήν την ουσία ο μπεντονίτης οφείλει την έντονη υδροσκοπική φύση του. Δρα σαν παράγοντας

αφύγρανσης του περιβάλλοντος εδάφους, απορροφώντας όλη τη διαθέσιμη, γύρω του, υγρασία και εγκλωβίζοντάς τη στην εσωτερική του δομή [21]. 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 μ' 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 ($\text{pH}=8-10$) με πολύ χαμηλή ειδική αντίσταση ($2,5\Omega\text{m}$ σε 300% σχετική υγρασία) [21].

Ο Jones [19] εγκατέστησε ράβδους γείωσης εγκλιβωτισμένες 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.

Ανάλογα πειράματα διεξήχθησαν και στην Ιαπωνία από ερευνητές και μηχανικούς της εταιρίας ηλεκτρικών σιδηροδρόμων, οι οποίοι δοκίμασαν μπεντονίτη και διάφορα άλλα χημικά υλικά σε ημισφαιρικά ηλεκτρόδια και πλέγματα. Ειδικότερα, ο Sato και οι συνεργάτες [22] εφάρμοσαν ένα μείγμα μπεντονίτη, νερού και NaCl σε ηλεκτρόδια τα οποία αρχικά παρουσίαζαν αντίσταση γείωσης $20\Omega-500\Omega$ 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. Επιπλέον, σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, το μείγμα μπεντονίτη έχανε τις εξαιρετικές ιδιότητες διόγκωσής του και αγωγιμότητάς του.

Ο δε Takeuchi και οι συνεργάτες του [23,24] δοκίμασαν 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 $500\Omega m$ – $3000\Omega m$. 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.

Ο Liang [25], χρησιμοποιώντας βελτιωτικό υλικό στερεάς μορφής που παρασκευαζόταν στην Κίνα, απέδειξε ότι το υλικό διαπερνούσε το έδαφος κάποια εκατοστά πέρα από τον αρχικώς εγκατεστημένο όγκο του υλικού, σχηματίζοντας ένα στρώμα διαπερατότητας πάχους περίπου $10cm$. Το πάχος αυτού του στρώματος αυξανόταν με την αύξηση της χρησιμοποιούμενης ποσότητας του υλικού. Το στρώμα διαπερατότητας συνέβαλε στην περαιτέρω μείωση της αντίστασης γείωσης. Ανέφερε ποσοστά μείωσης μέχρι και 80% σε εδάφη πολύ υψηλής ειδικής αντίστασης και ποσοστά 40%–50% σε εδάφη με σχετικά καλή αγωγιμότητα.

Σε εργασία τους το 1993 ο Yamane και οι συνεργάτες [26] πρότειναν τη χρήση υδροαπορροφητικών πολυμερών για τη μείωση της αντίστασης γείωσης, υλικά τα οποία δεν είχαν εξετασθεί για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους μέχρι τότε. Η ιδέα της επιλογής των πολυμερών προέκυψε χάρη στις υδρόφιλες ιδιότητές τους, στις ιδιότητες διόγκωσης και στην εκπληκτική κατακράτηση νερού που εμφανίζουν. 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, αν γινόταν και ανάμειξη του υλικού αυτού με το χώμα του εδάφους τότε 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 [27] 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 πρώην λατομείο η άλλη, ειδικής αντίστασης ως 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 αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι τρεις τύποι βελτιωτικού υλικού παρουσίασαν σημαντική μείωση της αντίστασης γείωσης, ειδικά στις ξηρές και άνυδρες περιόδους. Πολύ σημαντικό συμπέρασμα της έρευνας είναι ότι η πούδρα μπεντονίτη μετά από μόλις τέσσερις μήνες εμφάνισε ιδιότητες αγωγιμότητας αντίστοιχες με αυτές του εναιωρήματος μπεντονίτη. Μάλιστα, σ' ό,τι αφορά 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.

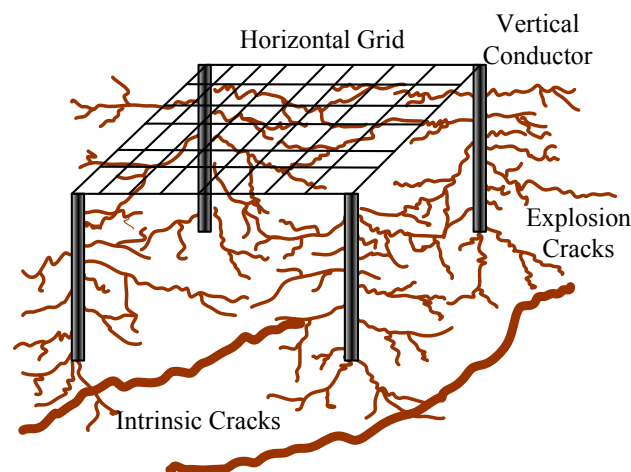
Σημειώνεται ότι η ίλυ γεώτρησης πετρελαίου είναι ίλυ που χρησιμοποιείται για μεταφορά θραυσμάτων από τη γεώτρηση, για ρύθμιση θερμοκρασίας (δρα ως ψυκτικό), για μείωση τριβών (τρυπάνι) και για εξισορρόπηση της υδροστατικής πίεσης στο κοίτασμα. Η σύστασή της εξαρτάται από τα πρόσθετα που περιέχει το μείγμα και, αν έχει βάση το νερό, τότε βασικό συστατικό της είναι ο μπεντονίτης, με πρόσθετα το θειϊκό βάριο, το ανθρακικό ασβέστιο και άλλους πολυηλεκτρολύτες για τη ρύθμιση του ιζώδους.

Σε συνέχεια της παραπάνω έρευνας, οι ίδιοι συγγραφείς το 2001 [28], 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 $80^{\circ}C$ [28]. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος

[28], 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.

Μια εναλλακτική μέθοδος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων γείωσης και έγχυσης του βελτιωτικού υλικού παρουσιάστηκε από τον Meng και τους συνεργάτες [29], βασισμένη στον τρόπο κατασκευής των θεμελίων των πύργων του συστήματος μεταφοράς σε βραχώδη εδάφη. Σύμφωνα με τη νέα μέθοδο, η διαδικασία χωρίζεται σε τρία στάδια. Πρώτα, ανοίγονται κάθετα ορύγματα στο έδαφος στις οποίες τοποθετούνται ελεγχόμενα εκρηκτικά. Με τη χρήση των εκρηκτικών δημιουργούνται επιπλέον ορύγματα στο υπέδαφος και συνήθως αυτές συνδέονται με φυσικές κοιλότητες που προϋπάρχουν. Στη συνέχεια, εγχύεται υπό πίεση στα ορύγματα βελτιωτικό υλικό πολύ χαμηλής ειδικής αντίστασης (μικρότερης των $5\Omega m$) το οποίο τις γεμίζει, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια επαφής του συστήματος γείωσης με το φυσικό έδαφος και επεκτείνοντάς το σε μεγαλύτερα βάθη (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Το κυβικό σύστημα γείωσης [29].

Τέλος, όλο αυτό το σύστημα αλληλοσυνδεόμενων ρωγμών χαμηλής ειδικής αντίστασης συνδέεται με το σύστημα ηλεκτροδίων γείωσης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε διαφορετικούς τύπους εδαφών στην Κίνα και αποδείχτηκε ότι

είναι αρκετά αποτελεσματική, αν και τονίζεται ότι το οικονομικό κόστος για την υλοποίησή της είναι ιδιαίτερος υψηλό.

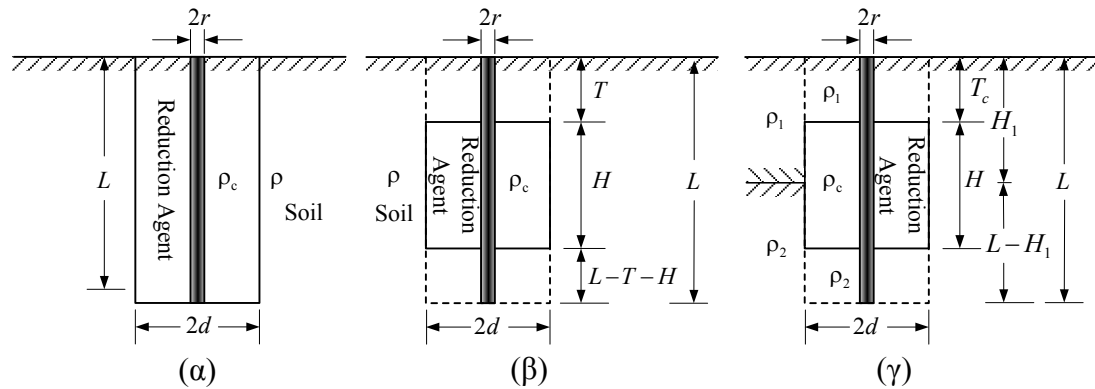
Η έρευνα πάνω σε διάφορα συνθετικά βελτιωτικά υλικά, εκτός του μπεντονίτη, συνεχίστηκε και σε χώρες της Λατινικής Αμερικής, όπως η Χιλή. Ο Martinez και οι συνεργάτες του [30] μελέτησαν τη συμπεριφορά μειγμάτων από ανόργανα άλατα, ορισμένα από τα οποία προέρχονταν από τη βιομηχανική επεξεργασία ορυκτών στη Χιλή. Το βελτιωτικό υλικό που παρασκεύασαν προέκυψε από την ανάμειξη τριών μειγμάτων από διάφορα ανόργανα άλατα, όπως π.χ. NaCl, στηβενσίτης ($\text{Ca}_{0.2}\text{Mg}_{2.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ανκερίτης ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$), μοντμοριλλονίτης ($(\text{Na},\text{Ca})_{0.33}(\text{Al},\text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$) και άλλες χημικές ενώσεις σε μικρότερες αναλογίες.

Τοποθετήθηκαν ηλεκτρόδια σε διάφορες περιοχές της Χιλής [30], καλύπτοντας έτσι μεγάλο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης, από καλλιεργήσιμα εδάφη έως ξηρά και σκληρά εδάφη, όπως στην τοποθεσία του πανεπιστημίου της Antofagasta με ειδική αντίσταση $3000\Omega m$. 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 αποτελέσματα έδειξαν ότι το νέο αυτό υλικό είναι αρκετά αποτελεσματικό για τη μείωση της αντίστασης γείωσης σ' όλους τους τύπους εδαφών, καθώς διατηρούσε περίπου σταθερή την αντίσταση γείωσης χωρίς την τεχνητή προσθήκη νερού και χωρίς να είναι ιδιαίτερος διαβρωτικό.

Την ίδια περίπου χρονική περίοδο στην Κίνα, ο L.-H. Chen [31] και ο S.-D. Chen [32] παρουσίασαν στις αντίστοιχες εργασίες τους τα αποτελέσματα πειραμάτων τους με κοκκώδη σκωρία υψικαμίνου, ενώ σε κοινή τους εργασία [33] παρουσίασαν τα αποτελέσματα πειραμάτων τους με ιπτάμενη τέφρα. Σε μεταγενέστερη δημοσίευσή του ο L.-H. Chen [34] 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 [31, 32] 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 (% κ.β. σκωρία: τσιμέντο : νερό: άλας, 1:0,4:0,3:0,15) τοποθετήθηκε ως βελτιωτικό υλικό σε τρία κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης (μερικώς ή ολικώς καλυμμένα), ενώ άλλα δύο ηλεκτρόδια

τοποθετήθηκαν απευθείας στο φυσικό έδαφος (Σχήμα 3.2). 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 3.2: (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 [31].

Επίσης, στις ίδιες εργασίες συνέκριναν τα αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων εντός βελτιωτικού υλικού με τις πειραματικές μετρήσεις και προέκυψε απόκλιση που κυμαινόταν από 10% έως 27,5%. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί έγιναν με χρήση της εξίσωσης (3.1) για κατακόρυφη ράβδο ολικώς καλυμμένη με βελτιωτικό υλικό, εκτός του κάτω άκρου της, εντός ομοιογενούς εδάφους και της εξίσωσης (3.2) για κατακόρυφη ράβδο μερικώς καλυμμένη με βελτιωτικό υλικό και εντός ομοιογενούς εδάφους. Για διστρωματικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν ανάλογες σχέσεις.

$$\begin{aligned}
 R = \frac{\rho_c}{2\pi L} & \left\{ \ln \frac{2L}{r} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} \\
 & + \frac{\rho - \rho_c}{2\pi L} \times \left\{ \ln \frac{2L}{d} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right] + \frac{d}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right\}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$R = \frac{\rho\rho_c}{2\pi[H\rho + (L-H)\rho_c]} \times \left\{ \ln \frac{2L}{r} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right\} + \frac{\rho(\rho - \rho_c)H}{2\pi L[H\rho + (L-H)\rho_c]} \times \left\{ \ln \frac{2L}{d} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L}\right)^2} \right] + \frac{d}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L}\right)^2} \right\} \quad (3.2)$$

Η απόκλιση αυτή αποδόθηκε σε δύο λόγους. Πρώτον, ότι το έδαφος στο πεδίο των μετρήσεων ήταν πολυστρωματικό και δεύτερον ότι η ειδική αντίσταση του βελτιωτικού μετρήθηκε στο εργαστήριο και όχι στον χώρο έγχυσής του. Αυτό επηρεάζει την ορθότητα της μέτρησης, καθώς είναι γνωστό ότι η υγρασία διατηρείται καλύτερα μέσα στο έδαφος παρά στον αέρα και συνεπώς το ποσοστό της κατά βάρος του υλικού αυξήθηκε μετά την τοποθέτησή του στο έδαφος.

Στην κοινή εργασία τους [33] χρησιμοποίησαν μείγμα ιπτάμενης τέφρας, ένα υποπροϊόν των θερμικών σταθμών παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα, μιας και 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.

Στην επόμενη εργασία του ο L.-H. Chen [34] υποστήριξε ότι η χρήση βελτιωτικών υλικών ελαττώνει την αντίσταση γείωσης έως ένα σημείο που καλείται *περιοχή κορεσμού*, από το οποίο και μετά η προσθήκη επιπλέον ποσότητας υλικού συμβάλλει ελάχιστα έως καθόλου στην περαιτέρω ελάττωση της αντίστασης. Μάλιστα, διατύπωσε σχέσεις τόσο για τον ρυθμό μείωσης της αντίστασης γείωσης, όσο και για τις βέλτιστες τιμές του ύψους H και της ακτίνας d του όγκου του βελτιωτικού υλικού. Το ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης ορίστηκε γενικά ως:

$$R_g = \frac{R_{wo} - R_w}{R_{wo}} \quad (3.3)$$

όπου R_{wo} είναι η αντίσταση γείωσης χωρίς βελτιωτικό υλικό και R_w είναι η αντίστοιχη με βελτιωτικό υλικό. Άρα, ο συντελεστής μείωσης της αντίστασης γείωσης για τις περιπτώσεις της πλήρως καλυμμένης ράβδου και της μερικώς καλυμμένης ράβδου δίνεται από τις εξισώσεις (3.4) και (3.5) αντίστοιχα [34]:

$$R_g = \frac{(\rho - \rho_c) \ln \frac{d}{r}}{\rho \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)} \quad (3.4)$$

$$R_g = \frac{H(\rho - \rho_c) \ln \frac{d}{r}}{\left[H\rho + (L - H)\rho_c \right] \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)} \quad (3.5)$$

Τέλος οι σχέσεις που πρότεινε για τον υπολογισμό του βέλτιστου όγκου του βελτιωτικού υλικού είναι οι:

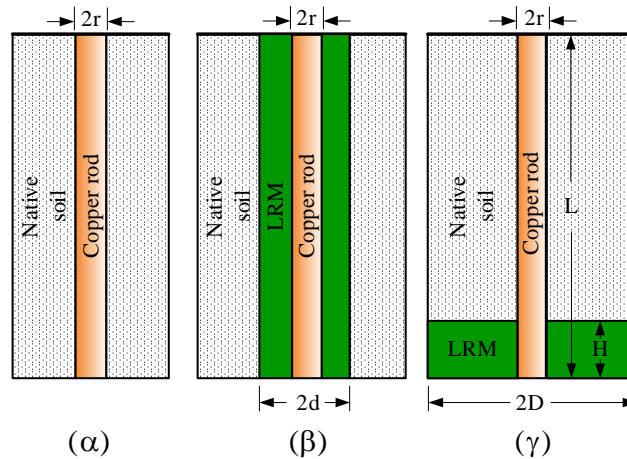
$$d = re^{\frac{2\pi\Delta R [H\rho + (L-H)\rho_c]}{\rho(\rho - \rho_c)H}} \quad (3.6)$$

$$H = \frac{4\pi L^2 \cdot \Delta R \cdot \rho_c}{\rho(\rho - \rho_c)} \quad (3.7)$$

όπου:

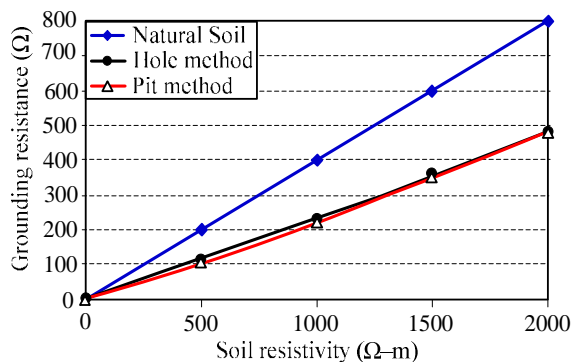
$$\Delta R = \frac{\rho(\rho - \rho_c)H}{2\pi L [H\rho + (L - H)\rho_c]} \ln \frac{d}{r} \quad (3.8)$$

Στο ίδιο πλαίσιο εργασίας με την [34] κινήθηκαν και ο Al-Arainy με τους συνεργάτες του [35, 36], οι οποίοι διερεύνησαν τη βελτιστοποίηση των διαστάσεων του σκάμματος, εντός του οποίου εγχέεται το βελτιωτικό υλικό, καθώς και του όγκου του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της αντίστασης γείωσης. Προσομοίωσαν τόσο την προτεινόμενη μέθοδο (pit method), όσο και τη συνήθη μέθοδο έγχυσης του υλικού γύρω από το ηλεκτρόδιο (hole method), κατά την οποία καλύπτεται όλο το μήκος του, οι οποίες φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 3.3:



Σχήμα 3.3: Διατάξεις γείωσης: (α) Κατακόρυφη ράβδος στο φυσικό έδαφος, (β) Κατακόρυφη ράβδος πλήρως καλυμμένη με βελτιωτικό υλικό, (γ) Κατακόρυφη ράβδος σε βελτιωτικό υλικό, εγχεόμενο σε κυκλικό σκάμμα στη βάση της ράβδου [35].

Για δεδομένο και σταθερό όγκο βελτιωτικού υλικού, ίσο με τον αντίστοιχο όγκο της διάταξης 3.2 (β) και δεδομένο μήκος ράβδου γείωσης, οι συγγραφείς εφάρμοσαν τεχνικές βελτιστοποίησης μέσω MatLab για τον προσδιορισμό της



Σχήμα 3.4: Σύγκριση των δύο μεθόδων ως προς την ελάττωση της αντίστασης γείωσης όταν $\rho_c=2\Omega\text{-m}$ και $L=2,4\text{m}$ [36].

καθόλου στη βελτίωση των τιμών της αντίστασης γείωσης. Η σύγκριση των δύο μεθόδων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4.

Οι Judson-D' Alessandro [37] 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 των

βέλτιστης τιμής της αντίστασης γείωσης, για διάφορες τιμές του λόγου H/L και, συνεπακόλουθα, των βέλτιστων τιμών των H και D . Επίσης, μετά από προσομοιώσεις, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για τις βέλτιστες διαστάσεις H και D του σκάμματος η προσθήκη επιπλέον ποσοτήτων βελτιωτικού υλικού συμβάλλει ελάχιστα έως

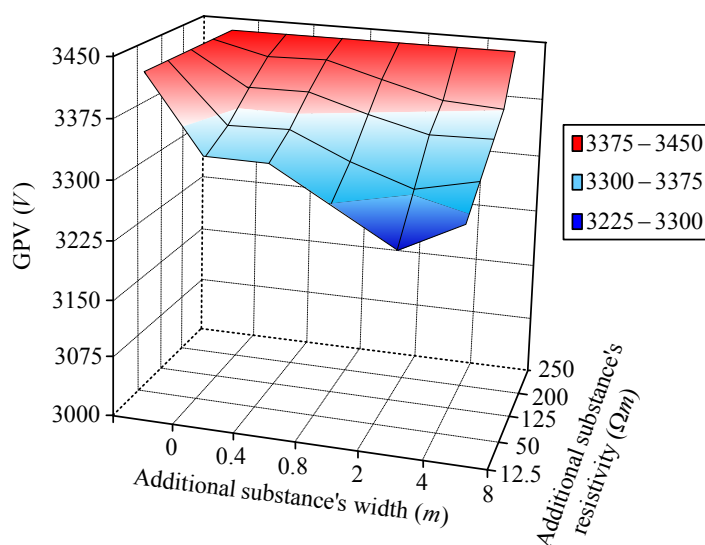
υλικών είναι ο χρόνος αποκατάστασης, η αναλογία του μείγματος (αρχικό περιεχόμενο σε νερό), η θερμοκρασία και το επίπεδο της υγρασίας στο μείγμα.

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, πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να μετριοούνται μετά την πλήρη αποκατάσταση του υλικού.

Ο Torres και οι συνεργάτες του [38] πειραματίστηκαν μ' 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 με αργό ρυθμό, 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 εμπορικώς διαθέσιμα και γνωστά υλικά στην αγορά του Μεξικού.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έδειξαν, καταρχάς, ότι 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 για χρήση ως βελτιωτικό παρουσίασε στο συγκεκριμένο πείραμα τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με όλα τα εμπορικά χημικά βελτιωτικά. Πάντως, σύμφωνα με τους συγγραφείς [38], προτείνεται η χρήση απλών ηλεκτροδίων με τοποθέτηση περιμετρικά τους βελτιωτικών υλικών παρά η αγορά χημικών ηλεκτροδίων, τα οποία κοστίζουν αρκετά περισσότερο.

Παράλληλα με την πειραματική μελέτη των βελτιωτικών υλικών στο εργαστήριο και στο ύπαιθρο, η επίδραση αυτών των υλικών μελετήθηκε και με προσομοιώσεις μέσω εμπορικών πακέτων λογισμικού. Ο Habjanič και οι συνεργάτες του παρουσίασαν το 2007 μία εργασία [39] 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 3.5.



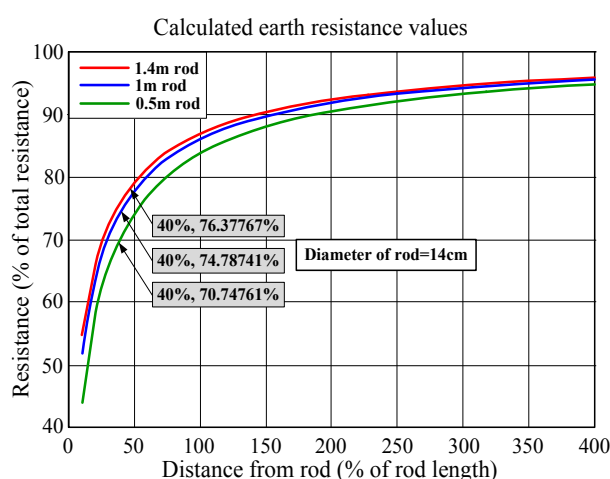
Σχήμα 3.5: Τρισδιάστατο γράφημα της επίδρασης του πλάτους και της ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού στο GPR, στην περίπτωση διστρωματικού μοντέλου εδάφους [39].

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 ΝΑ Ασίας, της Αφρικής και της Λατινικής Αμερικής.

Το 2008 ο Kumarasinghe [40], από το τμήμα Μετεωρολογίας της Σρι Λάνκα, πρότεινε ένα χαμηλού κόστους σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χωριό στη δυτική επαρχία της Σρι Λάνκα. 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 το 2009 παρουσίασαν τα αποτελέσματα της έρευνάς τους σε τρεις εργασίες [41–43]. Στις πρώτες δύο εργασίες μελέτησαν την απόδοση τεσσάρων τοπικών προϊόντων της Γκάνα, όπως μια πάστα από πυρηνέλαιο φοίνικα (*Palm Kernel Oil Cake-PKOC*), 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.

Τοποθετήθηκαν κατακόρυφα ηλεκτρόδια διαφορετικού μήκους σε διάφορες



Σχήμα 3.6: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης ως συνάρτηση της απόστασης από τα ηλεκτρόδια γείωσης [43].

τοποθεσίες με ποικίλες τιμές ειδικής αντίστασης και τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης γείωσης καθενός ηλεκτροδίου εκφράστηκαν ως συνάρτηση της απόστασης X από το ηλεκτρόδιο. Στη γραφική παράσταση που προέκυψε (Σχήμα 3.6) φάνηκε ξεκάθαρα ότι ανεξάρτητα των διαστάσεων του ηλεκτροδίου η τιμή της αντίστασης γείωσης, εκφρασμένη

ως ποσοστό της συνολικής αντίστασης γείωσης κάθε ηλεκτροδίου, αρχίζει να σταθεροποιείται (οι καμπύλες εισέρχονται στη φάση κορεσμού) σε απόσταση

που ισούται με το 40% του μήκους του ηλεκτροδίου. Συμπερασματικά, προτείνεται η απόσταση που ισούται με το 40% του μήκους του ηλεκτροδίου γείωσης να αποτελεί και την κρίσιμη ακτίνα γύρω από το ηλεκτρόδιο στην οποία θα τοποθετείται το οποιοδήποτε βελτιωτικό υλικό.

Ο κανόνας της ακτίνας κρίσιμης αντίστασης, όπως αναλύθηκε παραπάνω, εφαρμόστηκε στην εγκατάσταση των ηλεκτροδίων του πειράματος σε διάφορες περιοχές. Μετά από μετρήσεις τριών ετών τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ΡΚΟC εμφάνισε μέση μείωση της αντίστασης γείωσης, σε σύγκριση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς, της τάξης του 50%. Μάλιστα επέδειξε σταθερότητα κατά τη διάρκεια των τριών ετών των μετρήσεων ακόμα και σε εδάφη με υψηλή ειδική αντίσταση εδάφους και χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Επίσης, η χρήση στάχτης ξύλου, σκόνης από φλοιό κακάου και του ΡΚΟC οδηγεί σε μείωση της αντίστασης γείωσης για όσο διάστημα υπάρχουν επαρκείς βροχοπτώσεις στην περιοχή και η υγρασία του εδάφους είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, τα υλικά αυτά παρουσίασαν τιμές αντίστασης γείωσης μεγαλύτερες απ' αυτές του ηλεκτροδίου αναφοράς στο φυσικό έδαφος. Αντιθέτως, η στάχτη από ελαστικά εμφάνισε σχετικά σταθερές τιμές αντίστασης γείωσης καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, με ποσοστό μείωσης που έφτασε μέχρι και 16% σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Στην τρίτη δε εργασία τους [43] διερευνήθηκε το βέλτιστο πλήθος των προς κάλυψη με βελτιωτικό υλικό κατακόρυφων ηλεκτροδίων από το σύνολο των παράλληλα συνδεδεμένων ηλεκτροδίων μιας διάταξης, όμοιας μ' αυτής στο Σχήμα 1.14. Ως βελτιωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε στάχτη από ελαστικά, αφού αυτή εμφάνισε τη σταθερότερη τιμή αντίστασης γείωσης [42]. Εγκαταστάθηκαν έξι κατακόρυφα ηλεκτρόδια στο φυσικό έδαφος συνδεδεμένα μεταξύ τους και μετρήθηκε η αντίσταση γείωσης του συστήματος. Ύστερα, γινόταν προσθήκη βελτιωτικού διαδοχικά σ' ένα-ένα ηλεκτρόδιο, καταγράφοντας κάθε φορά την τιμή της αντίστασης γείωσης του συστήματος. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το βέλτιστο πλήθος ηλεκτροδίων με βελτιωτικό υλικό είναι τα τέσσερα σε διάταξη έξι ηλεκτροδίων, δηλαδή ποσοστό 66% του συνόλου των ηλεκτροδίων και η μείωση της αντίστασης εμφάνισε το υψηλότερο ποσοστό, ξεπερνώντας το 80% ως προς την αρχική μέτρηση χωρίς καθόλου βελτιωτικό υλικό. Οι συγγραφείς πρότειναν ως γενικότερο κανόνα την κάλυψη του 66% των ηλεκτροδίων μιας διάταξης με βελτιωτικά, καθώς η προσθήκη βελτιωτικού σε παραπάνω

ηλεκτρόδια συμβάλλει ελάχιστα στη βελτίωση της αντίστασης γείωσης του συστήματος.

Μια ευρεία έρευνα σε αρκετά εμπορικά βελτιωτικά υλικά, τόσο με πραγματικής κλίμακας πειράματα, όσο και με εργαστηριακά, έκανε ο Galván και οι συνεργάτες του. Σε δύο εργασίες τους [44, 45], 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, μετρίοταν η ειδική αντίσταση των υλικών και επίσης μετρίοταν 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 απ' αυτήν ορισμένων χημικών παρασκευασμάτων σε μορφή σκόνης.

Επιπροσθέτως, μετά από μελέτη της χρονικής μεταβολής της αντίστασης γείωσης του κάθε ηλεκτροδίου και της χρονικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης του κάθε υλικού, όπως μετρίοταν από τα resistivity pilots, διερεύνησαν τη σκοπιμότητα χρήσης αυτών των υλικών, καθώς και το μέγεθος

ωφέλειας από τη χρήση τους σε διάφορους τύπους εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, 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%. Αντίστοιχα, 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%.

Ο Galván με άλλη ερευνητική ομάδα, παράλληλα με τις προαναφερθείσες δοκιμές, διεξήγαγαν και εργαστηριακές δοκιμές, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσίασαν στα ίδια συνέδρια [46, 47]. Πιο συγκεκριμένα, ερευνήθηκαν οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες αυτών των υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Τα υλικά θερμαίνονταν σε διάφορες θερμοκρασίες μέσα σε ηλεκτρικό κλίβανο μέχρι τους $40^\circ C$ και γίνονταν μετρήσεις της απώλειας υγρασίας του υλικού, καθώς και της μεταβολής της ειδικής αντίστασής του σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την υγρασία σε συνθήκες περιβάλλοντος και σε θερμοκρασία $40^\circ C$ σταθερά, για μικρά χρονικά διαστήματα. Επίσης, έγιναν μετρήσεις με εφαρμογή μιας ηλεκτρομηχανικής τεχνικής, της γραμμικής αντίστασης πόλωσης (LPR), για τον προσδιορισμό του βαθμού της διαβρωτικής δράσης των εξεταζομένων υλικών στον χαλκό, διερευνώντας ένα ακόμα κριτήριο για την επιλογή του καταλληλότερου υλικού.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα υλικά με τη χαμηλότερη ειδική αντίσταση, ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που είχαν στην αρχική ρευστή τους κατάσταση, παρουσίαζαν μεγάλες διακυμάνσεις, όταν εκτίθεντο σε αρκετά μεγάλη απώλεια της υγρασίας τους. Επιπρόσθετα, παρουσίαζαν μεγάλη ευαισθησία σε ρωγμές και σπασίματα κατά τη διαδικασία της αφύγρανσης, γεγονός που αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα για τις πραγματικές κατασκευές.

Παρόμοια πειράματα με τους Kumarasinghe και Eduful έκανε και η Wan Ahmad με τους συνεργάτες της στη Μαλαισία με χημικά και φυτικής προέλευσης βελτιωτικά υλικά ως εναλλακτικές λύσεις έναντι του μπεντονίτη. Στη μεν πρώτη εργασία τους [48] εξέτασαν μπεντονίτη, τύρφη από φλοιό καρύδας κοκοφοίνικα, κηπευτικό αργιλώδες χώμα και πούδρα ρυζιού. Αντίθετα με όλες τις προαναφερόμενες εργασίες, τα υλικά δεν εγχύθηκαν στα ηλεκτρόδια, αλλά τοποθετήθηκαν σε κυκλικές αύλακες γύρω από τις ράβδους ακτίνας $11,5cm$

από τη ράβδο, σε βάθος 15cm από την επιφάνεια του εδάφους και με πάχος στρώματος του βελτιωτικού τα 7,5cm. Τα αποτελέσματα μετά από 138 ημέρες μετρήσεων έδειξαν ότι αυτά τα υλικά καταφέρνουν να διατηρούν με μεγάλη επιτυχία την υγρασία του εδάφους και να μειώνουν αποτελεσματικά την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων. Ειδικότερα, το αργιλώδες κηπευτικό χώμα παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές από τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά σε βάθος χρόνου και εμφάνισε την καλύτερη ικανότητα διατήρησης της υγρασίας εδάφους, αναδεικνύοντάς το ως το πιο αποτελεσματικό βελτιωτικό σε σύγκριση με τα άλλα που μελετήθηκαν.

Στη δεύτερη εργασία τους [49] παρουσίασαν τη μελέτη χημικών υλικών, όπως χλωριούχο νάτριο (NaCl), θειοθειικό νάτριο ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), χλωριούχο μαγνήσιο (MgCl_2), θειικός χαλκός (γαλαζόπετρα CuSO_4), και χλωριούχο αμμώνιο (NH_4Cl). Η εγκατάσταση των ηλεκτροδίων και των υλικών έγινε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, όπως και στα φυτικά υλικά. Μετά από 141 ημέρες μετρήσεων η αντίσταση γείωσης των υπό εξέταση ηλεκτροδίων μειώθηκε σε συνάρτηση με τον χρόνο. Πιο συγκεκριμένα το NaCl παρουσίασε μείωση κατά 67%, το $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ κατά 59,58%, το MgCl_2 κατά 58,74%, το CuSO_4 κατά 7,88%, ενώ τέλος το NH_4Cl εμφάνισε αύξηση της αντίστασης γείωσης κατά 15,64%. Η συγγραφέας πρότεινε δε το NaCl για χρήση σε συστήματα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας.

Σε ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα για το NaCl κατέληξαν ο Gomes και οι συνεργάτες του, οι οποίοι αναφέρουν στα αποτελέσματα της εργασίας τους [50] ότι το NaCl έφερε τα χειρότερα αποτελέσματα και ως προς τις τιμές της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου που περιέβαλλε και ως προς τον βαθμό διάβρωσης του ηλεκτροδίου. Για τον λόγο αυτόν οι συγγραφείς προτείνουν κατηγορηματικά τη μη χρήση του εν λόγω υλικού ως βελτιωτικό γειώσεων.

Στις εργασίες τους [50, 51] παραθέτουν τα αποτελέσματα δοκιμών τους και με άλλα υλικά, όπως η πούδρα οξειδίου του μετάλλου (απόβλητο προϊόν της βιομηχανίας χάλυβα με κύριο συστατικό το οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3), στοιχεία από άλλα μέταλλα και ίχνη από σκόνη σιδήρου), η πούδρα γρανίτη (μερικώς απόβλητο προϊόν της βιομηχανίας οικοδομικών κατασκευών με σύσταση SiO_2 (72%), Al_2O_3 (14%), K_2O (4%), Na_2O (4%), CaO, FeO και Fe_2O_3 (1–2% το καθένα), η πούδρα χυτοσίδηρου, ο μπεντονίτης, ο ασβεστόλιθος και η

πούδρα οπτάνθρακα, καθώς και μείγματα από ανάμειξη αυτών σε ηλεκτρόδια από γαλβανισμένο σίδηρο.

Τα υλικά εξετάστηκαν ως προς την ικανότητά τους να μειώνουν την αντίσταση γείωσης και να την κρατούν σταθερή, καθώς και ως προς τον βαθμό διάβρωσης που προκαλούν στο ηλεκτρόδιο. Το οξείδιο του μετάλλου εμφάνισε την καλύτερη απόδοση, αλλά αυτό, όπως και όλα τα άλλα σιδηρούχα υλικά που δοκιμάστηκαν, εμφάνισε καλή απόδοση μετά από αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ως προς τη διάβρωση, το πιο αδρανές υλικό αποδείχτηκε ο μπεντονίτης με επίπεδο διάβρωσης του ηλεκτροδίου λιγότερο από 1%, για περίοδο επαφής άνω των δύο ετών.

Ο Lim και οι συνεργάτες σε επόμενες εργασίες τους [52–54], μελέτησαν ενδελεχώς τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του μπεντονίτη και πειραματίστηκαν με διάφορες προσμίξεις του μπεντονίτη σε σκυρόδεμα, με στόχο τη βελτίωση της ικανότητας του σκυροδέματος να συγκρατεί μεγαλύτερα ποσά υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα, εγκατέστησαν μεταλλικούς κλωβούς από χάλυβα σε έδαφος με ειδική αντίσταση $100\Omega m$ και εγκιβώτισαν τους κλωβούς σε μείγματα μπεντονίτη-σκυροδέματος, με αναλογία μπεντονίτη στο μείγμα από 0% (καθαρό μπετόν) έως 70% με βήμα 10%. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η απόδοση των μειγμάτων βελτιώθηκε αισθητά με την πάροδο του χρόνου σε σύγκριση με το απλό σκυρόδεμα. Μετά την πάροδο δύο ετών προέκυψαν σαφείς ενδείξεις για τη μείωση της αντίστασης γείωσης των κλωβών και μάλιστα, από τα αποτελέσματα, κατέληξαν ότι η βέλτιστη ανάμειξη μπεντονίτη-σκυροδέματος ήταν αυτή με αναλογία 30%. Αυτό το μείγμα παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα μείωσης της αντίστασης γείωσης, καλύτερα ακόμα και από το σκυρόδεμα.

Παράλληλα με τις μετρήσεις στο ύπαιθρο, διεξήχθησαν και εργαστηριακές δοκιμές. Μιας και ο μπεντονίτης εμπορικά διατίθεται σε δύο τύπους [53] ως προς τη χημική του σύσταση, στον μπεντονίτη νατρίου και μπεντονίτη ασβεστίου, προσδιορίστηκαν οι χημικές ιδιότητές του ως προς αυτούς τους δύο τύπους. Έγινε χημική ανάλυση δειγμάτων μπεντονίτη νατρίου από το Πακιστάν και μπεντονίτη ασβεστίου από την Ινδονησία, μετρήθηκε η ικανότητα απορρόφησης νερού του κάθε τύπου και, επίσης, μετρήθηκε εργαστηριακά η ειδική αντίσταση του κάθε τύπου μπεντονίτη σε ξηρές και υγρές συνθήκες. Κατόπιν, παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δείγματα ύψους $10cm$ και διαμέτρου

10cm απ' όλα τα προαναφερθέντα μείγματα, τα οποία αφότου αφέθηκαν στον αέρα για 28 ημέρες, χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της μηχανικής αντοχής των μειγμάτων. Οι δοκιμές κατά ASTM C 469 C39 [54] έδειξαν ότι την καλύτερη αντοχή επέδειξε το μείγμα 30%, του οποίου η μηχανική αντοχή βρέθηκε μόλις 10% μικρότερη από την αντίστοιχη του καθαρού σκυροδέματος.

Τέλος, η Πουντουρέλη και συνεργάτες [55] πραγματοποίησαν προσομοιώσεις της συμπεριφοράς βελτιωτικών υλικών με χρήση κατάλληλου λογισμικού.

3.4 Συμπεριφορά μεταβατικής κατάστασης ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση)

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε μια εκτεταμένη ανασκόπηση των ερευνών, που έχουν γίνει τα προηγούμενα χρόνια πάνω στη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά γειώσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την ειδική αντίσταση του εδάφους, στο οποίο εγχέονται. Εξετάσθηκε η ικανότητα αυτών των υλικών να μειώνουν και να διατηρούν, κατά το δυνατό, σταθερή την αντίσταση γείωσης των συστημάτων συναρτήσει του χρόνου, παράμετρος που καθορίζει εν πολλοίς, το επίπεδο προστασίας έναντι σφαλμάτων και βραχυκυκλωμάτων βιομηχανικής ή εν γένει χαμηλής συχνότητας.

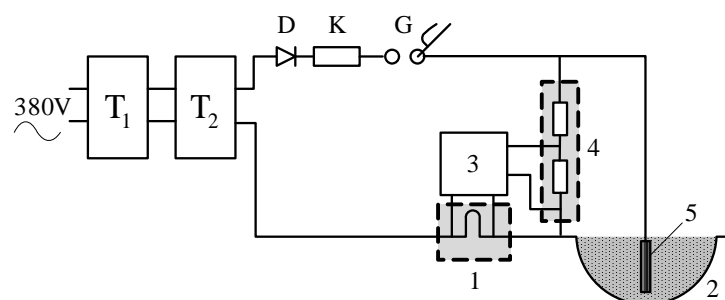
Ως γνωστόν, όμως, στη σύγχρονη εποχή τα συστήματα γείωσης καλούνται να διαδραματίσουν διπλό και ορισμένες φορές τριπλό ρόλο, αυτόν της γείωσης προστασίας, αυτόν της γείωσης ασφαλείας και αυτόν της γείωσης λειτουργίας. Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να είναι σε θέση να αποσβένει σφάλματα, είτε από αστοχία της ηλεκτρικής εγκατάστασης, είτε από κεραυνικά πλήγματα, διοχετεύοντας στη γη τα πολύ υψηλά ρεύματα με ασφαλή τρόπο. Καθίσταται επιτακτική η διερεύνηση της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά και στη μεταβατική κατάσταση, όταν τίθενται υπό την επίδραση υψηλών κεραυνικών ρευμάτων, άρα και ισχυρών μεταβατικών φαινομένων.

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πολλές αναφορές για τη μελέτη των βελτιωτικών υλικών υπό κρουστική καταπόνηση, κυρίως, διότι η διεξαγωγή

μετρήσεων σε διατάξεις πραγματικής κλίμακας στο ύπαιθρο είναι πολύ δύσκολες και συνάμα μεγάλου κόστους. Οι προσομοιώσεις τέτοιων συστημάτων υπό κρουστική καταπόνηση, από την άλλη μεριά, είναι πιο εύκολες και σχεδόν ανέξοδες, αφού τα λογισμικά πακέτα τελευταίας γενιάς δίνουν απίστευτες δυνατότητες στον χρήστη τους. Όμως, όπως επισημαίνουν αρκετοί ερευνητές, σχεδόν πάντοτε υπάρχει απόκλιση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης από την πραγματική κατάσταση, η οποία πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει τους ερευνητές και μηχανικούς σε εσφαλμένες εκτιμήσεις.

Το 1981 η Liu και οι συνεργάτες της [56] έκαναν την αρχή των πειραμάτων σε ηλεκτρόδια γείωσης με βελτιωτικά υλικά υπό την επίδραση κρουστικών ρευμάτων. Δοκίμασαν σε διάταξη πραγματικής κλίμακας στο ύπαιθρο οριζόντια και δακτυλιοειδή ηλεκτρόδια με και χωρίς βελτιωτικό υλικό, σε έδαφος με ειδική αντίσταση που κυμαινόταν από $700\Omega m$ έως $1400\Omega m$. Το κρουστικό ρεύμα δοκιμής κυμαινόταν από $8kA$ έως $34kA$. Όταν η χρήση του βελτιωτικού έγινε σε κανονικά επίπεδα, το ποσοστό μείωσης της κρουστικής σύνθετης αντίστασης κυμάνθηκε μεταξύ 21% και 41,2%, ενώ, όταν υπήρξε περίσσεια υλικού γύρω από τα ηλεκτρόδια, το ποσοστό μείωσης κυμάνθηκε μεταξύ 45,4% και 73,4%.

Ακολούθησαν η Tu με τους συνεργάτες της [57, 58], οι οποίοι διεξήγαγαν πειράματα σε μοντέλα ηλεκτροδίων υπό κλίμακα στον χώρο του εργαστηρίου. Γι' αυτόν τον σκοπό χρησιμοποίησαν χαλύβδινη ημισφαιρική λεκάνη διαμέτρου $5m$, την οποία γέμισαν με ψιλή άμμο, προσομοιώνοντας το είδος του εδάφους που θα πειραματίζονταν (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα κυκλώματος του πειράματος προσομοίωσης: T_1 ο ρυθμιστής τάσης και T_2 ο Μ/Σ, 1 το shunt ρεύματος, 2 η ημισφαιρική λεκάνη, 3 το σύστημα συλλογής δεδομένων, 4 ο καταμεριστής τάσης και 5 το ηλεκτρόδιο γείωσης [58].

Μετέβαλλαν τεχνητά την ειδική αντίσταση είτε θερμαίνοντας την άμμο, είτε βρέχοντάς την με νερό βρύσης ή αλατισμένο νερό. Μ' αυτόν τον τρόπο η ειδική

αντίσταση της άμμου κυμαινόταν μεταξύ 100Ωm και 5103 Ωm. Με βάση το γεγονός ότι στην Κίνα χρησιμοποιούνται συνήθως ηλεκτρόδια γείωσης με διάμετρο 10mm–20mm, η διάμετρος των υπό κλίμακα ηλεκτροδίων γείωσης επιλέχθηκε 0,4mm και επειδή η διάμετρος του ηλεκτροδίου μαζί με το βελτιωτικό υλικό είναι περίπου 200mm, η διάμετρος όλου του μοντέλου ηλεκτρόδιο-βελτιωτικό υλικό επιλέχθηκε 4mm. Οι τύποι των ηλεκτροδίων που δοκιμάστηκαν ήταν α) ατσάλινο ακτινικό ηλεκτρόδιο πύργου μεταφοράς, β) κυκλικό ηλεκτρόδιο, γ) ακτινικό ηλεκτρόδιο πύργου εντός σκυροδέματος, δ) οριζόντιο ηλεκτρόδιο, ε) οριζόντιο ηλεκτρόδιο με έγχυση ρεύματος στο μέσο του και στ) κατακόρυφο ηλεκτρόδιο. Ως βελτιωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε ένα είδος βελτιωμένου μπεντονίτη με προσμίξεις NaOH (1,6%), NaCl (2,6%), άσβεστου (1,5%), πούδρας γύψου (1,5%), σκόνης άνθρακα (18,5%) και σφιγτής αργίλου (18,5%). Η ειδική αντίσταση αυτού του μείγματος ήταν 1,47Ωm σε υγρασία 300% με ειδική πυκνότητα 1,2g/cm³.

Διερευνήθηκε η επίδραση της μορφής και του μεγέθους του κρουστικού ρεύματος, της ειδικής αντίστασης της άμμου, των γεωμετρικών διαστάσεων της κάθε διάταξης και του βελτιωτικού υλικού στη μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης. Πρότειναν διάφορους εμπειρικούς τύπους για την εκτίμηση: α) της κρουστικής αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίου με βελτιωτικό υλικό (R_I), β) του ποσοστού μείωσης της κρουστικής αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίου με βελτιωτικό υλικό (η_I), γ) του ποσοστού μείωσης της αντίστασης γείωσης βιομηχανικής συχνότητας ηλεκτροδίου με βελτιωτικό υλικό (η) και δ) του ενεργού μήκους του ηλεκτροδίου με βελτιωτικό υλικό (l_e). Οι τύποι με τη σειρά που προαναφέρθηκαν είναι οι ακόλουθοι [58]:

$$R_I = (1 - \eta_I) R_i \quad (3.9)$$

$$\eta_I = a + 3,14 \times 10^{-5} \rho \quad (3.10)$$

$$\eta = 0,236 + 1,9 \times 10^{-5} \rho \quad (3.11)$$

$$l_e = 5,222 (\rho T)^{0,379} / I_M^{0,097} \quad (3.12)$$

όπου, ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους, a μια σταθερά που σχετίζεται με την ειδική αντίσταση και τη δομή του εδάφους, R_i η κρουστική αντίσταση γείωσης του εξεταζόμενου ηλεκτροδίου χωρίς βελτιωτικό υλικό, I_M η μέγιστη τιμή του

εφαρμοζόμενου κρουστικού ρεύματος και T ο χρόνος μετώπου του εφαρμοζόμενου κρουστικού ρεύματος.

Τα αποτελέσματα [58] έδειξαν ότι το βελτιωτικό υλικό επιδρά σημαντικά στην κρουστική αντίσταση των ηλεκτροδίων γείωσης και μάλιστα η επίδραση αυτή γίνεται εντονότερη σε ποσοστό από 25% έως 45%, όσο αυξάνει η ειδική αντίσταση του εδάφους. Επίσης, αποδείχθηκε ότι η χρήση βελτιωτικού υλικού ελαττώνει κατά 10%–20% το ενεργό μήκος των ηλεκτροδίων.

Εργαστηριακές δοκιμές με παρόμοια πειραματική διάταξη με την Tu πραγματοποίησε και η Νογ [59, 60], η οποία διερεύνησε τη συμπεριφορά υλικών, όπως ο θειικός χαλκός (γαλαζόπετρα CuSO_4) και το αλάτι (NaCl). Για τον σκοπό αυτόν ανέμειξε άμμο μέτριου κόκκου με CuSO_4 και νερό σε διάφορες αναλογίες, άμμο με NaCl και νερό, επίσης, σε διάφορες αναλογίες [59], καθώς και άμμο με υγρή άργιλο και NaCl σε διάφορες αναλογίες [60]. Κατόπιν, υπέβαλε τα διάφορα παρασκευάσματα σε κρουστική καταπόνηση με κρουστικά ρεύματα μεγέθους έως 5kA .

Όσον αφορά το CuSO_4 , τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για τη μεγαλύτερη μείωση της κρουστικής αντίστασης γείωσης η αποτελεσματικότερη πρόσμειξη CuSO_4 σε άμμο με περιεκτικότητα νερού 5%, είναι 2,5%. Επίσης, τα μείγματα άμμου και CuSO_4 επέδειξαν την πιο αξιοσημείωτη μη γραμμικότητα απ' όλα τα εξεταζόμενα δείγματα. Βεβαίως, η απόδοση όλων των μειγμάτων ανέβαινε με την αύξηση της τιμής του ρεύματος. Συγκρίνοντας τα δύο υλικά μεταξύ τους, το NaCl φάνηκε να αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα από το CuSO_4 στην ανάμειξή τους με την άμμο, ανεξαρτήτως του ποσοστού πρόσμειξης.

Το μείγμα της άμμου με υγρή άργιλο, NaCl και νερό εμφάνισε ελάττωση της κρουστικής αντίστασης σε συνάρτηση με την αύξηση της τιμής του ρεύματος δοκιμής, για κάθε ποσοστό αναλογίας νερού που εξετάστηκε. Η συμπεριφορά αυτή αποδόθηκε από τους συγγραφείς σε θερμικές διεργασίες και φαινόμενα ιονισμού. Παρ' όλα αυτά, τα μείγματα εκείνα που είχαν πολύ υψηλή αγωγιμότητα, όπως αυτό με 10% NaCl και 15% νερό, έδειξαν μικρή εξάρτηση της συμπεριφοράς τους από το μέγεθος του ρεύματος. Όταν εφαρμόστηκαν κρουστικά ρεύματα σε εντελώς άνυδρα δείγματα (0% νερό), παρουσιάστηκαν υψηλές αρχικές ταλαντώσεις στο παλμογράφημα της τάσης και του ρεύματος, πιθανόν λόγω χωρητικών επιδράσεων και υψηλής ειδικής αντίστασης των δειγμάτων [60].

Πειράματα στο εργαστήριο και στο ύπαιθρο διεξήγαγε και ο Κόκκινος με τους συνεργάτες του, με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς κάποιων βελτιωτικών υλικών και τη σύγκρισή τους με δείγματα φυσικού εδάφους. Στα εργαστηριακά πειράματα [61] προσομοίωσαν κατακόρυφες ράβδους εντός δείγματος 100% άμμου, δείγματος 75% άμμου και 25% χαλίκι και δείγματος άμμου με βελτιωτικό υλικό του εμπορίου, τα οποία τοποθετήθηκαν εντός βαρελιών από PVC και διαστάσεων $39cm \times 55cm$. Για τις δοκιμές χρησιμοποίησαν μία φορητή υβριδική γεννήτρια ($12kV$, $6kA$) με εσωτερική αντίσταση 2Ω και μία 5-βαθμια κρουστική γεννήτρια Marx $1,2/50\mu s$.

Σκοπός ήταν να μετρηθεί η ανύψωση δυναμικού εντός του δείγματος, ώστε να διερευνηθούν οι επιπτώσεις που θα υπάρχουν σε γειτνιάζοντα μεταλλικά σώματα με το ηλεκτρόδιο γείωσης, το οποίο θα εκφορτίζει κρουστικά ρεύματα. Επίσης, μελετήθηκε η μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης των δειγμάτων με την εκφόρτιση του ρεύματος. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του εξεταζόμενου ηλεκτροδίου γείωσης και του ηλεκτροδίου αναφοράς, το οποίο ήταν τοποθετημένο $8,5cm$ από το κύριο ηλεκτρόδιο, μειώθηκε σημαντικά με την παρουσία του βελτιωτικού υλικού στο δείγμα.

Στα πειράματα σε εγκατεστημένα κατακόρυφα ηλεκτρόδια στο ύπαιθρο [62], οι συγγραφείς εκτέλεσαν μετρήσεις υψηλής συχνότητας της αντίστασης γείωσης, με τη βοήθεια ειδικού οργάνου μέτρησης. Το όργανο μετρούσε, με εντελώς αυτοματοποιημένο τρόπο, μέσω ενσωματωμένου επεξεργαστή, τη σύνθετη αντίσταση των συστημάτων γείωσης εντός ακτίνας $10Hz-1MHz$. Οι δοκιμές έγιναν σε γαλβανισμένες ταινίες γείωσης μήκους 10m και σε κατακόρυφες ράβδους. Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν στο φυσικό έδαφος, σε σκυρόδεμα, σε σκυρόδεμα το οποίο περιβαλλόταν από στρώμα πίσσας για μόνωση, σε σκυρόδεμα αναμεμειγμένο με το ρευστό υλικό Cerecit CC197 σε διάφορες αναλογίες, σε σκυρόδεμα αναμεμειγμένο με βελτιωτικό υλικό του εμπορίου και σε δύο βελτιωτικά υλικά διαθέσιμα στο εμπόριο. Η χρήση βελτιωτικών υλικών αποδείχθηκε ωφέλιμη σ' όλο το εξεταζόμενο εύρος συχνότητας.

Εργαστηριακά και υπαίθρια πειράματα εκτέλεσαν, επίσης, ο Laverde [63] και ο Hu [64].

Ο Laverde και οι συνεργάτες εξέτασαν στο εργαστήριο τη συμπεριφορά της άμμου, του τσιμέντου και του μπεντονίτη υπό κρουστική τάση $1,2/50\mu s$ και μέγιστης τιμής έως $220kV$ μέσω γεννήτριας Marx. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η

τάση διάσπασης του μπεντονίτη είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη του τσιμέντου, γεγονός που αποδίδεται από τους συγγραφείς στην αρκετά χαμηλότερη ειδική αντίστασή του από εκείνη του τσιμέντου. Επίσης καταγράφηκαν υαλώματα στη μάζα των δειγμάτων άμμου και μπεντονίτη μετά το πέρας των δοκιμών υπό κρουστικά ρεύματα.

Ο Hu εκτέλεσε πειράματα σε υπαίθρια εγκατάσταση ηλεκτροδίων στην Κίνα, όπου μελέτησε τη συμπεριφορά δύο εμπορικών βελτιωτικών υλικών. Χρησιμοποίησε λυόμενη γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων, η οποία παρήγαγε κρουστικό ρεύμα μορφής $8/20\mu s$ και πλάτους $1kA-10kA$. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι τα βελτιωτικά υλικά επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην αντίσταση γείωσης $50Hz$ και στην κρουστική σύνθετη αντίσταση, μιας και το ποσοστό μείωσης λόγω του βελτιωτικού ήταν 60% και 52%, αντίστοιχα [64].

Τέλος, παρόμοια πειράματα με τον Laverde και για τα ίδια υλικά, διεξήγαγαν και οι Lim και συνεργάτες [65] οι οποίοι πειραματίστηκαν με υψηλή κρουστική τάση μορφής $1,2/50\mu s$ και υψηλή εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας. Η κυριότερη παρατήρηση σ' αυτήν τη μελέτη, πέραν των συμπερασμάτων για τα επίπεδα της τάσης διάσπασης των διαφόρων υλικών, όπως εξετάστηκαν και στην [63], ήταν ο σχηματισμός υαλωμάτων μέσα στη μάζα αυτών των υλικών κατά την εφαρμογή και κρουστικής και εναλλασσόμενης υψηλής τάσης.

3.5 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Κλείνοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του παρόντος κεφαλαίου, μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για την απόδοση των εξεταζόμενων βελτιωτικών υλικών και τη μείωση της αντίστασης γείωσης μόνιμης κατάστασης που επιτυγχάνουν, τα οποία συνοπτικά παρατίθενται στον Πίνακα 3.1. Σημειώνεται ότι τα ποσοστά στον πίνακα αποτυπώνουν το μέσο εύρος μείωσης της αντίστασης γείωσης από τις προαναφερόμενες εργασίες, για την κάθε κατηγορία υλικών και για τα εδάφη στα οποία εξετάστηκαν.

Σ' αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο από τον συγγραφέα να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις και επισημάνσεις πάνω στα πειραματικά ευρήματα τόσο των

προαναφερθέντων ερευνητών, όσο και του ιδίου, τα οποία και παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο τις εργαστηριακές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του κάθε βελτιωτικού υλικού, όσο και τις μετρήσεις της αντίστασης γείωσης που πραγματοποιήθηκαν σε εγκατεστημένα ηλεκτρόδια στο ύπαιθρο, θα μπορούσε να πει κανείς ότι με εξαίρεση το σκυρόδεμα, που είναι εξαιρετικά συμπαγές, τα διάφορα βελτιωτικά υλικά γειώσεων που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα στις εγκαταστάσεις γειώσεων, δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ξεχωριστά και ανεξάρτητα μέρη από το περιβάλλον έδαφος στο οποίο εγχέονται, ούτε και να αγνοηθούν οι αλληλεπιδράσεις μ' αυτό.

Πίνακας 3.1: Ποσοστιαία μείωση της αντίστασης γείωσης από κάθε κατηγορία βελτιωτικών υλικών.

Βελτιωτικά υλικά	Έδαφος με $\rho < 100 \Omega m$	Έδαφος με $200 \Omega m < \rho < 1500 \Omega m$	Έδαφος με $\rho > 2000 \Omega m$	Συμπεριφορά
Φυτικά παρασκευάσματα				
PCOC			~50%	Έντονη μεταβλητότητα μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων.
Τύρφη κοκοφοίνικα, πούδρα κακάο, πούδρα ρυζιού κ.α.			80–85%	Καλή απόδοση σε υγρές και ξηρές περιόδους.
Αλάτι (NaCl)		~67%		Έντονα διαβρωτικό για τα ηλεκτρόδια και διαλύεται γρήγορα στο έδαφος.
Χημικά παρασκευάσματα				
Gels πυριτικών αλάτων, gel φερροκυανιδίου Cu, $Na_2S_2O_3$, $CuSO_4$ κ.α.		30–40%		Διαβρωτικά για τα ηλεκτρόδια, επικίνδυνα για το έδαφος λόγω μόλυνσης και διαλύονται σχετικά γρήγορα.
Υδροφιλα πολυμερή		40–60%	40–60%	Μη διαβρωτικά για τα ηλεκτρόδια, δε διαλύονται στο έδαφος, αμφίβολα για τη μόλυνση του εδάφους.
Συνθετικά παρασκευάσματα				
Ίλυ γεώτρησης πετρελαίου		25–35%		Πολύ χαμηλή διάβρωση των ηλεκτροδίων.
Κοκκώδη σκωρία υψικαμίνου	40%			Διαβρωτική για τα ηλεκτρόδια.
Ιπτάμενη τέφρα	35–40%			Μη διαβρωτική.
Στάχτη από ελαστικά			16–24%	Μη διαβρωτική, εξαιρετική σταθερότητα μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων.
Μπεντονίτης		23–36%	35–55%	Αδρανές υλικό με καλύτερη συμπεριφορά στις υγρές περιόδους.
Σκυρόδεμα		30–40%	32–47%	Αδρανές υλικό με εξαιρετική συμπεριφορά μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων.

Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή έγχυσης του βελτιωτικού υλικού στο έδαφος αρχίζουν μια σειρά από αντιδράσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Τα φαινόμενα δε αυτά είναι εντονότερα, όταν ο τύπος του βελτιωτικού είναι τέτοιος, που απαιτεί ανάμειξη σε προκαθορισμένη από τον παρασκευαστή αναλογία με το έδαφος στο οποίο θα εγχυθεί. Ως εκ τούτου, η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του υλικού στο εργαστήριο δεν μπορεί να αποτελεί παρά μόνο ένα ενδεικτικό μέτρο της αγωγιμότητάς του και όχι μία δεδομένη και σταθερή τιμή, που θα καθορίσει μονοδιάστατα την αντίσταση γείωσης του συστήματος. Πόσο μάλλον δε, όταν χρησιμοποιείται ως μία σταθερή και δεδομένη τιμή στους σχετικούς τύπους υπολογισμού της αντίστασης γείωσης.

Άλλωστε, η ειδική αντίσταση του υλικού που μετριέται στο εργαστήριο ή που αναγράφεται στις προδιαγραφές του από την παρασκευάστρια εταιρία πάντοτε αναφέρεται σε συγκεκριμένο ποσοστό σχετικής υγρασίας. Είναι αυτονόητο ότι η υγρασία αυτή δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν γύρω από το υλικό και μέσα σ' αυτό. Οι μακροχρόνιες έρευνες στα συστήματα γείωσης έχουν δείξει ότι τόσο η ειδική αντίσταση του εδάφους, όσο και η αντίσταση γείωσης είναι διαρκώς μεταβαλλόμενες ποσότητες συναρτήσεως του χρόνου και της υγρασίας του εδάφους.

Είναι σημαντικό να έχει κάποιος κατά νου ότι μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα μόρια του εδάφους έχουν εισέλθει στο υλικό και το αντίστροφο. Αυτό σημαίνει πως το έδαφος που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο μαζί με το βελτιωτικό υλικό, μετά από χρόνια, συμπεριφέρονται ως ένα ενιαίο αγωγίμο μέσο γύρω από το ηλεκτρόδιο με μία ενιαία ειδική αντίσταση. Η χρήση της εργαστηριακής ειδικής αντίστασης του υλικού στους τύπους υπολογισμού της αντίστασης γείωσης είναι πηγή σημαντικού σφάλματος, όπως προκύπτει ξεκάθαρα και από τις μετρήσεις της αντίστασης γείωσης στην αναφορά [32], στην οποία ο Chen επισημαίνει το ίδιο πράγμα.

Συνοψίζοντας, οι λόγοι αυτών των σημαντικών αποκλίσεων μεταξύ εργαστηριακών και υπαίθριων μετρήσεων είναι οι εξής:

- α. Η υγρασία του βελτιωτικού υλικού διατηρείται καλύτερα μέσα στο έδαφος απ' ότι στον αέρα, άρα η ειδική αντίστασή του μέσα στο περιβάλλον έδαφος εμφανίζεται μικρότερη από τη μετρούμενη στο εργαστήριο.
- β. Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ειδική αντίσταση του υλικού και εν γένει του εδάφους. Η εποχική μεταβλητότητα

που παρουσιάζει, αλλά και η ανομοιομορφία των τιμών κατά μήκος του ηλεκτροδίου, λόγω των διαφορετικών στρωμάτων του εδάφους, είναι σχεδόν αδύνατο να ληφθούν ως παράγοντες στις εργαστηριακές συνθήκες μέτρησης.

- γ. Η κινητικότητα των ιόντων μέσα στο υλικό, που καθορίζουν την αγωγιμότητά του, είναι σε ευθεία εξάρτηση με την αλληλεπίδραση του υλικού με το περιβάλλον έδαφος.
- δ. Η ειδική αντίσταση του βελτιωτικού υλικού αλλά και του εδάφους μεταβάλλονται με την πυκνότητά τους. Οι πυκνότητες αυτές αλλάζουν στιγμιαία κατά τη διαδικασία διάνοιξης των ορυγμάτων και έγχυσης του υλικού, με αποτέλεσμα να αλλάζουν και οι ειδικές αντιστάσεις, έως ότου αποκατασταθεί ισορροπία και πολύ καλή επαφή των δύο υλικών.
- ε. Τα οργανικά και ανόργανα στοιχεία του εδάφους επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ειδική αντίσταση του βελτιωτικού, κάτι που δεν μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν στις μετρήσεις στο εργαστήριο.

3.6 Πειραματική διερεύνηση της αντίστασης συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά εδάφους στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση

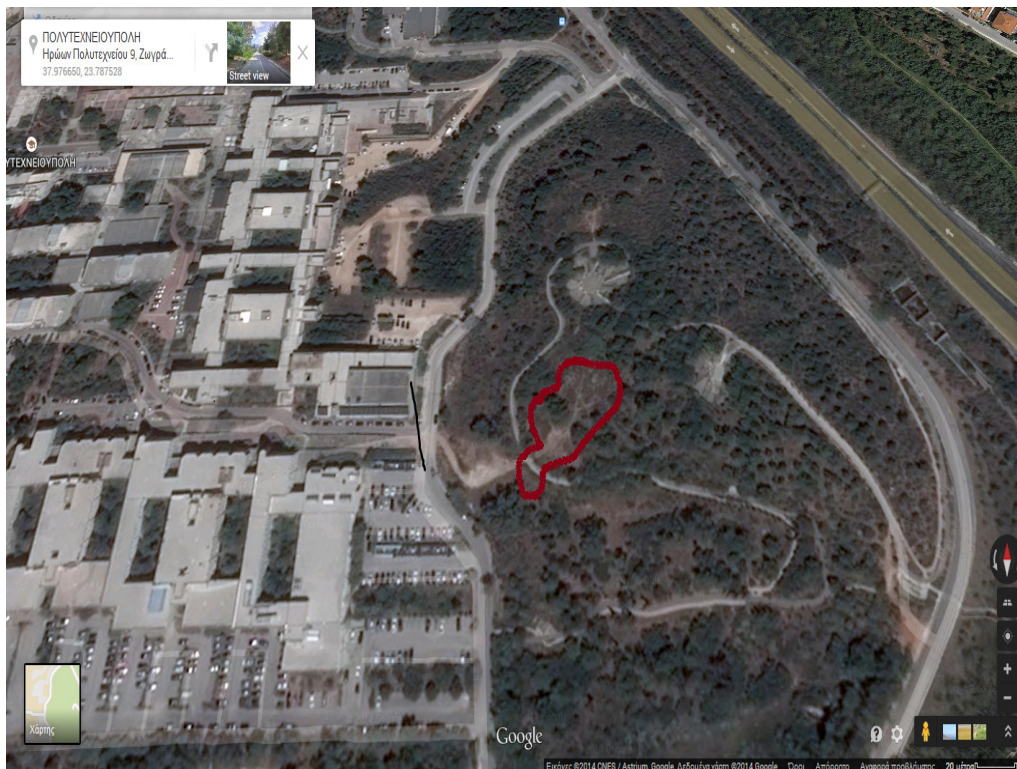
3.6.1 Πειραματική διάταξη

3.6.1.1 Τοποθεσία και ανάλυση του εδάφους του πεδίου δοκιμών

Για την πραγματοποίηση των, επί σειρά ετών, μετρήσεων που προβλέπονταν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, υλοποιήθηκε εγκατάσταση κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης εντός του χώρου της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, σε ελεύθερη υπαίθρια έκταση και σε κοντινή απόσταση από το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. (όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1 με το κόκκινο περίγραμμα), για την εύκολη και απρόσκοπτη πρόσβαση στον χώρο των μετρήσεων.

Το έδαφος στη συγκεκριμένη περιοχή αποτελείται από χαλίκι και λίθους μέτριου και ακανόνιστου σχήματος (κροκάλεις) σε ποσοστό 54,78%, από άμμο σε ποσοστό 39,47% και από άργιλο σε ποσοστό 5,74%, σύμφωνα με δημοσιευμένη εργασία των Φραγκογιάννη και συνεργατών [66] στην οποία

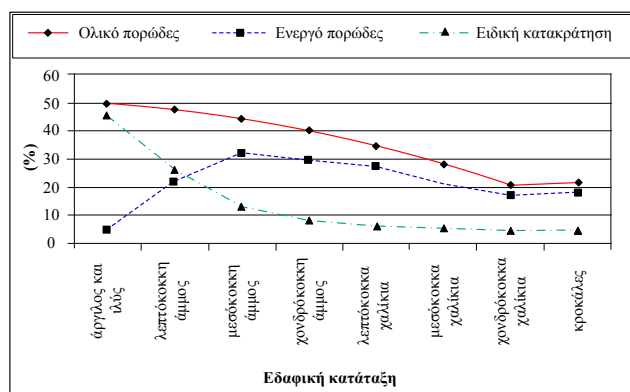
διεξήχθη κοκκομετρική ανάλυση σε δείγματα χώματος από την εν λόγω περιοχή. Ο συγκεκριμένος τύπος εδάφους χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, μέγεθος το οποίο μετρά την ικανότητα κατακράτησης του νερού από το έδαφος. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι τα όμβρια ύδατα αποστραγγίζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα από το έδαφος. Μια εικόνα για την ικανότητα συγκράτησης του νερού από το έδαφος στον χώρο του πειράματος μπορεί να σχηματιστεί από το διάγραμμα στο Σχήμα 3.8.



Εικόνα 3.1: Δορυφορική απεικόνιση του χώρου του πειράματος.



Εικόνα 3.2: Χώρος διεξαγωγής του πειράματος.



Σχήμα 3.8: Μεταβολή του πορώδους και της ειδικής κατακράτησης σε σχέση με τον τύπο του εδάφους [67].

Για την καλύτερη γνώση της συμπεριφοράς του εδάφους στον χώρο του πειράματος όσον αφορά την κατανομή των τιμών της ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος, επιχειρήθηκε μια λεπτομερής σάρωση του υπεδάφους με εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροτομογραφίας. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο προέκυψε μία αναλυτική εικόνα για την κατανομή των τιμών της ειδικής αντίστασης ανά στρώμα, κάτι το οποίο προφανώς δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο Wenner, από την οποία μόνο μια γενική εικόνα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης μπορεί να αποκομιστεί.

Οι μετρήσεις της ηλεκτροτομογραφίας πραγματοποιήθηκαν τον Μάιο του 2011 σε συνεργασία με το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. και η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η SYSCAL Pro Switch-48, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Κατά τη διεξαγωγή αυτής της μεθόδου, ένα μεγάλο πλήθος ηλεκτροδίων τοποθετούνται συνήθως σ' έναν άξονα σε διάταξη Schlumberger-Wenner και η συσκευή προγραμματίζεται για την εκτέλεση πολλαπλών και συνδυαστικών μετρήσεων μεταξύ των ηλεκτροδίων. Οι μετρήσεις καταλήγουν στον επεξεργαστή της συσκευής μέσω πολυπολικών καλωδίων.

Κατά τη διαδικασία της μέτρησης, εκατοντάδες μετρήσεις σαρώνουν εξονυχιστικά το έδαφος με τρόπο που φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 3.9. Το υπέδαφος παρουσιάζεται ως ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο με μπλοκ, εκ των οποίων το καθένα έχει μία ορισμένη τιμή ειδικής αντίστασης (Σχήμα 3.10). Οι μετρήσεις και η ερμηνεία αυτών δίνουν το τελικό γεωηλεκτρικό μοντέλο (Σχήμα 1.10), το οποίο αποτυπώνει το υπέδαφος με τις τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασής του και όχι της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, που δίνει η μέθοδος Wenner.

Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη από τις τρεις γραφικές απεικονίσεις που φαίνονται στο Σχήμα 1.10 δίνεται μια αίσθηση της κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ως προς το βάθος, όπως ακριβώς λαμβάνονται οι τιμές από το όργανο μέτρησης. Κατόπιν, χρησιμοποιείται το μοντέλο εδάφους (Σχήμα 3.10), στο οποίο το υπέδαφος χωρίζεται σε μπλοκ. Αυτά τα μπλοκ είναι διαφορετικού πάχους ανά στρώμα, καθώς η διακριτική ικανότητα γίνεται μεγαλύτερη κατά βάθος, έτσι ώστε αυτά να είναι ισοδύναμα στη μέθοδο αντιστροφής. Στη συνέχεια, σε κάθε μπλοκ αποδίδεται αρχικά μια τιμή πραγματικής ειδικής αντίστασης, η οποία υπολογίζεται από το λογισμικό πακέτο. Με βάση αυτές τις τιμές της πραγματικής ρ υπολογίζονται οι τιμές φαινόμενης ρ με κάποιον αλγόριθμο του λογισμικού, η οποία φαινόμενη ρ αποτυπώνεται στη δεύτερη γραφική απεικόνιση στο Σχήμα 1.10. Κατόπιν, συγκρίνονται τα δύο γραφήματα της μετρηθείσας φαινόμενης ρ και της υπολογισθείσας φαινόμενης ρ , τα οποία θα πρέπει σχεδόν να ταυτίζονται. Αν διαφέρουν, τότε επανασχεδιάζεται το μοντέλο εδάφους στο Σχήμα 3.10, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μοντέλο της φαινόμενης ρ που θα ξανασχεδιαστεί να μοιάζει αρκετά με το αντίστοιχο της μετρηθείσας. Ο βαθμός σύγκλισης της επαναληπτικής μεθόδου είναι ίσος με το *rms error*, το οποίο είναι συνήθως γύρω στο 5%.

Αν οι δύο γραφικές απεικονίσεις μοιάζουν αρκετά στη μορφή και τις τιμές, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις, τότε πια αποτυπώνεται στην τρίτη γραφική απεικόνιση (Σχήμα 1.10) η κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης στον χώρο του υπεδάφους, όπου γίνεται η μέτρηση.

Στον χώρο του πειράματος τοποθετήθηκαν 72 ηλεκτρόδια μήκους 0,5m το καθένα και σε απόσταση 1m μεταξύ τους κατά μήκος του ίδιου άξονα, στον οποίο γίνονται και οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο Wenner. Η διεξαγωγή της μέτρησης σ' ένα μόνο άξονα οδηγεί σε μια ψευδο-τριδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους μόνο κατά έναν άξονα και σε συνάρτηση με το βάθος. Για την πραγματική τριδιάστατη απεικόνιση θα πρέπει να ληφθούν μετρήσεις σε τουλάχιστον άλλους 2 κάθετους προς τον αρχικό άξονες, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό στη συγκεκριμένη περίπτωση λόγω περιορισμένου χώρου. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα καλώδια, που περιελάμβαναν 18 εξόδους το καθένα και τα οποία συνδέθηκαν ανά δύο σαν προεκτάσεις του ενός προς το άλλο. Στη συνέχεια, τα δύο καλώδια που προέκυψαν από τη σύνδεση απλώθηκαν σε αντίθετες κατευθύνσεις ως προς το κέντρο της περιοχής που επρόκειτο να

μετρηθεί, οπότε οι συνολικά 72 απολήξεις των καλωδίων συνδέθηκαν στα 72 προεγκατεστημένα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Τέλος, τα δύο καλώδια της διάταξης καταλήγουν στη συσκευή μέτρησης σε δύο υποδοχές των 36 pins η καθεμία.

Κάθε φορά χρησιμοποιείται ένα δίπολο έγχυσης ρεύματος με σταθερή ένταση που φθάνει τα 2,5A. Αυτό που επιλέγεται και ρυθμίζεται στη συσκευή είναι η τάση, της οποίας η τιμή μπορεί να φθάσει και τα 1000V, η δε ισχύς της συσκευής είναι 250W. Με την έγχυση του ρεύματος λαμβάνονται μετρήσεις της τάσης U από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Η συνολική διαδικασία της εγκατάστασης και λήψης των μετρήσεων διαρκεί περίπου 3,5 ώρες.

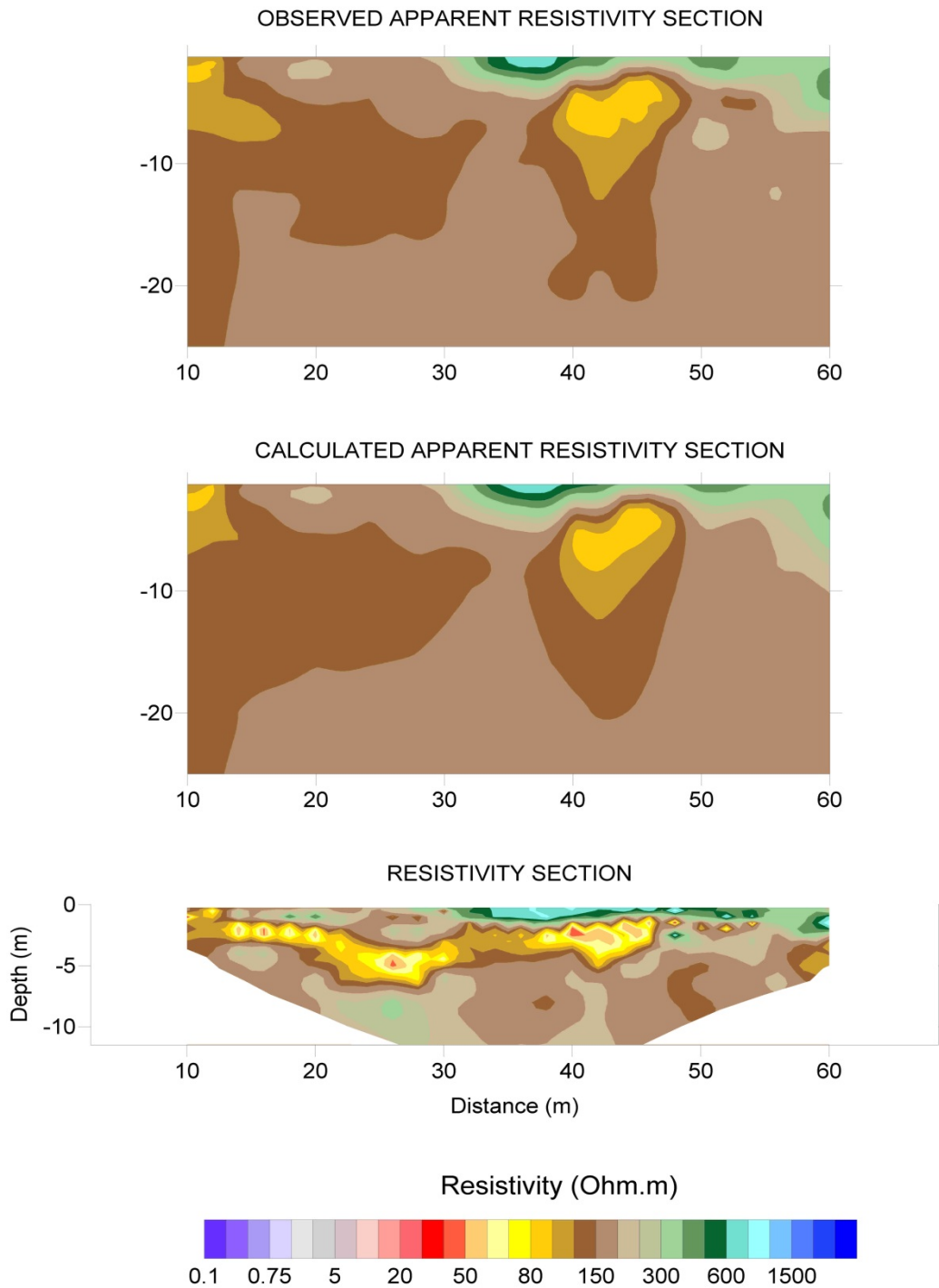
Ελήφθησαν συνολικά 1224 μετρήσεις, εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν τελικά οι 922 για τη σχεδίαση των γραφικών αποτυπώσεων, αφού κάποιες τιμές παρουσίαζαν τεράστια απόκλιση από το υπόλοιπο πλήθος των τιμών. Η επεξεργασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποτυπώνονται σε γράφημα στο Σχήμα 3.11.

Από την τρίτη γραφική απεικόνιση στο Σχήμα 3.11 φαίνεται ότι υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα το οποίο, από το μέσο του προφιλ και προς νότια



Εικόνα 3.4: Έδαφος πειραματικού πεδίου σε τομή.

κατεύθυνση εμφανίζει πολύ υψηλή ειδική αντίσταση, της τάξεως των 600–1000 Ωm , διότι συνίσταται από πυκνή κροκαλοπαγή δομή. Αντιθέτως, προς την άλλη πλευρά (προς βόρεια) το εν λόγω στρώμα εμφανίζει μια πιο χαλαρή δομή. Στο διάστημα μεταξύ 10m και 47m και σε βάθος 1m–6m από την επιφάνεια ανιχνεύεται αργιλικό στρώμα, με κάπως στρογγυλεμένους λίθους, μέσου πάχους 2m και ειδικής αντίστασης περίπου στα 80 Ωm . Το τελευταίο σε βάθος στρώμα είναι ένα συνεκτικά κροκαλολατιποπαγές στρώμα υπεδάφους που περιλαμβάνει καστανόχρωμες χερσαίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις, δηλαδή συνεκτικούς αργιλοπηλούς με διάσπαρτες κροκάλες και λατίπες. Η δε ειδική αντίσταση που παρουσιάζει το εν λόγω στρώμα είναι της τάξης των 150 Ωm .



Σχήμα 3.11: Γράφημα ηλεκτροτομογραφίας στον χώρο του πειράματος.

3.6.1.2 Εργαστηριακές δοκιμές στα βελτιωτικά υλικά γείωσης

Μία από τις εργαστηριακές δοκιμές, που θα πρέπει να υποβάλλεται κάθε βελτιωτικό υλικό γείωσης, πριν γίνει εμπορικά διαθέσιμο, είναι ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασής του [4]. Με σκοπό τον πλήρη καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών, που θα χρησιμοποιούνταν στα συστήματα γείωσης του

πειράματος της παρούσας ερευνητικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή μέτρηση της ειδικής αντίστασης αυτών. Η πειραματική διάταξη και ο εξοπλισμός μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για την εν λόγω δοκιμή, στο πλαίσιο της διατριβής, ικανοποιούν τις προδιαγραφές των σχετικών προτύπων IEC/EN 62561-7 [4] και ASTM G57-06 [7].

Τα υλικά προετοιμάστηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή και πήραν την ίδια μορφή και πυκνότητα, όπως ακριβώς εγχύθηκαν γύρω από τα ηλεκτρόδια της υπαίθριας πειραματικής διάταξης, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο. Κατ' αυτόν τον τρόπο τέθηκαν υπό δοκιμή και μέτρηση της ειδικής αντίστασης τα εξής πέντε (5) υλικά: 1) σκυρόδεμα θεμελίωσης, 2) μπεντονίτης, 3) συνθετικό υλικό Α, 4) συνθετικό υλικό Β, και 5) συνθετικό υλικό C.

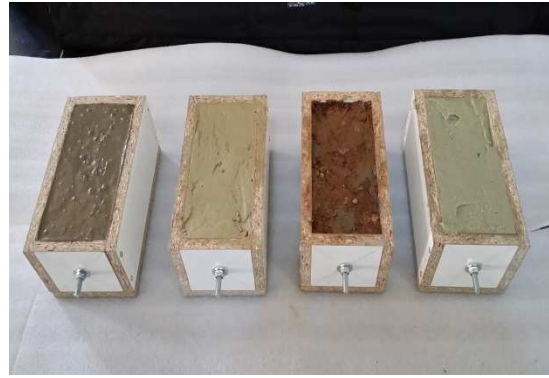
Πιο συγκεκριμένα, ο μπεντονίτης ήταν συσκευασμένος σε μορφή πούδρας και αναμίχθηκε με απεσταγμένο νερό, ώστε να λάβει τη μορφή πυκνού ρευστού εναιωρήματος, όπως ακριβώς εγχύθηκε και γύρω από τη ράβδο γείωσης. Τα τρία συνθετικά υλικά ήταν σε έτοιμη μορφή προς άμεση χρήση (έγχυση). Ειδικά για το συνθετικό υλικό Α, αυτό αναμίχθηκε με δείγμα χρώματος από τον υπαίθριο χώρο του πειράματος, σε αναλογία 1:3, σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή, ενώ τα άλλα δύο εγχύονται απευθείας γύρω από το ηλεκτρόδιο, οπότε και δοκιμάστηκαν στην εργοστασιακή τους μορφή και πυκνότητα. Στιγμιότυπο από τη διαδικασία προπαρασκευής του μείγματος δίνεται στην Εικόνα 3.5, ενώ στην Εικόνα 3.6 εικονίζονται τα υλικά μετά την τοποθέτησή τους στα δοχεία δοκιμής.

Ακολούθως τα υλικά τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα, για τη δοκιμή, δοχεία ορθογώνιας διατομής (Σχήμα 3.12) [4], τα οποία είναι εφοδιασμένα με τέσσερα ηλεκτρόδια, για την έγχυση του ρεύματος και τη μέτρηση της πτώσης δυναμικού. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης είναι το LEM SATURN GEO-X Earth Tester, το οποίο διακριβώνεται κάθε χρόνο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων. Στο Σχήμα 3.13 αποτυπώνεται η τοπολογία του κυκλώματος μέτρησης κατά ASTM G57-06, ενώ στην Εικόνα 3.7 δίνεται στιγμιότυπο των μετρήσεων.

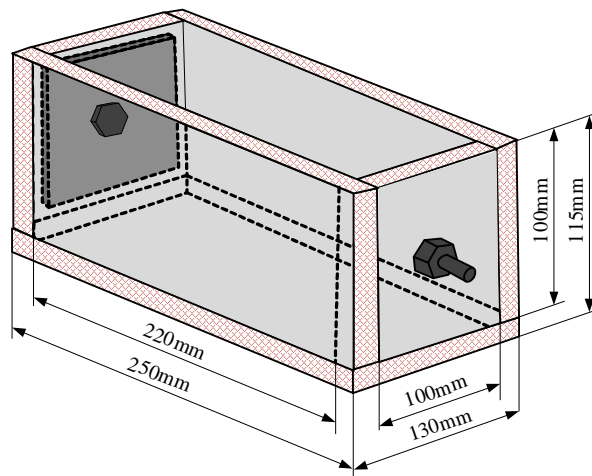
Πραγματοποιήθηκαν 10 διαδοχικές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του κάθε υλικού, επί τέσσερις ημέρες, με διαφορά 24 ωρών μεταξύ τους, οι τρεις πρώτες, και 5 ημερών η τέταρτη από την τρίτη. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταχωρήθηκαν στον Πίνακα 3.2.



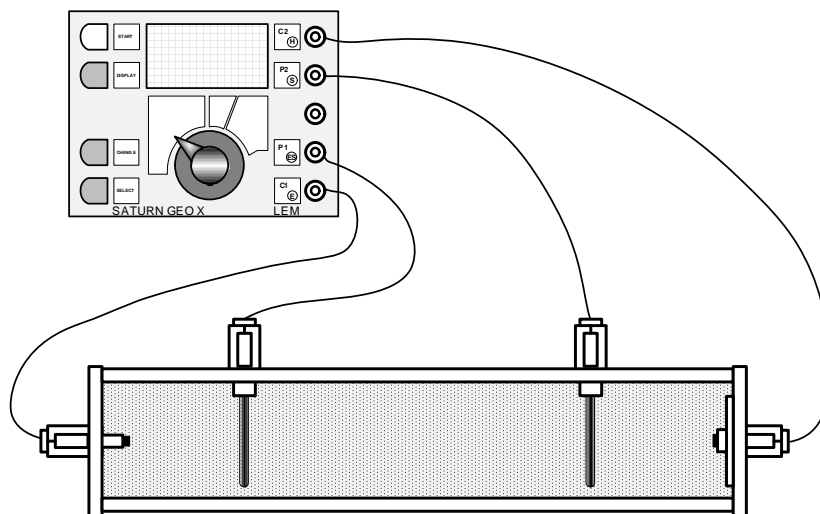
Εικόνα 3.5: Προετοιμασία υλικών πριν τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης.



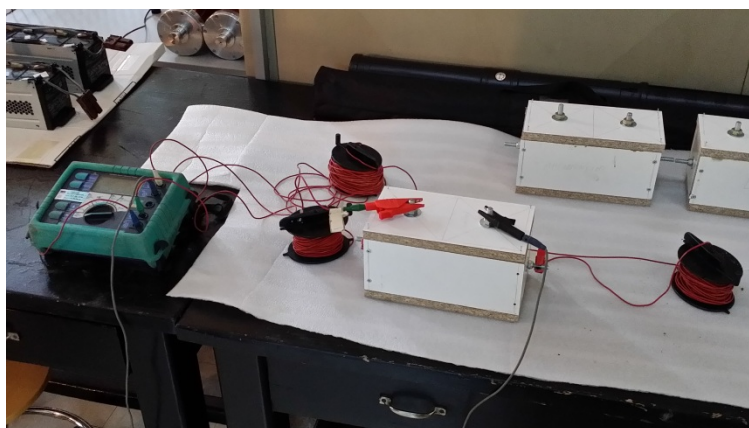
Εικόνα 3.6: Βελτιωτικά υλικά γείωσης εντός των δοχείων δοκιμής.



Σχήμα 3.12: Δοχείο εργαστηριακών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης.



Σχήμα 3.13: Κύκλωμα πειραματικής διάταξης μέτρησης της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης.



Εικόνα 3.7: Μέτρηση ειδικής αντίστασης βελτιωτικών υλικών γείωσης.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα μετρήσεων ειδικής αντίστασης.

	Σκυρόδεμα	Μπεντονίτης	Υλικό Α	Υλικό Β	Υλικό C
1 ^η ημέρα					
$\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	689,3	276,4	1354	365,8	560,4
s^2	75,032	0,077	0,718	$3,59 \cdot 10^{-27}$	0,077
2 ^η ημέρα					
$\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	625,4	270,2	1310,5	357,3	559,3
s^2	0,077	$3,59 \cdot 10^{-27}$	0,342	0,180	0,205
3 ^η ημέρα					
$\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	848,7	266,7	1298,1	354,7	559,0
s^2	0,214	$3,59 \cdot 10^{-27}$	0,137	0,205	0,180
4 ^η ημέρα					
$\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	942,8	272,0	1463,4	365,5	557,2
s^2	0,137	0,077	0,180	0,522	0,137

3.6.1.3 Εγκατάσταση και περιγραφή της πειραματικής διάταξης

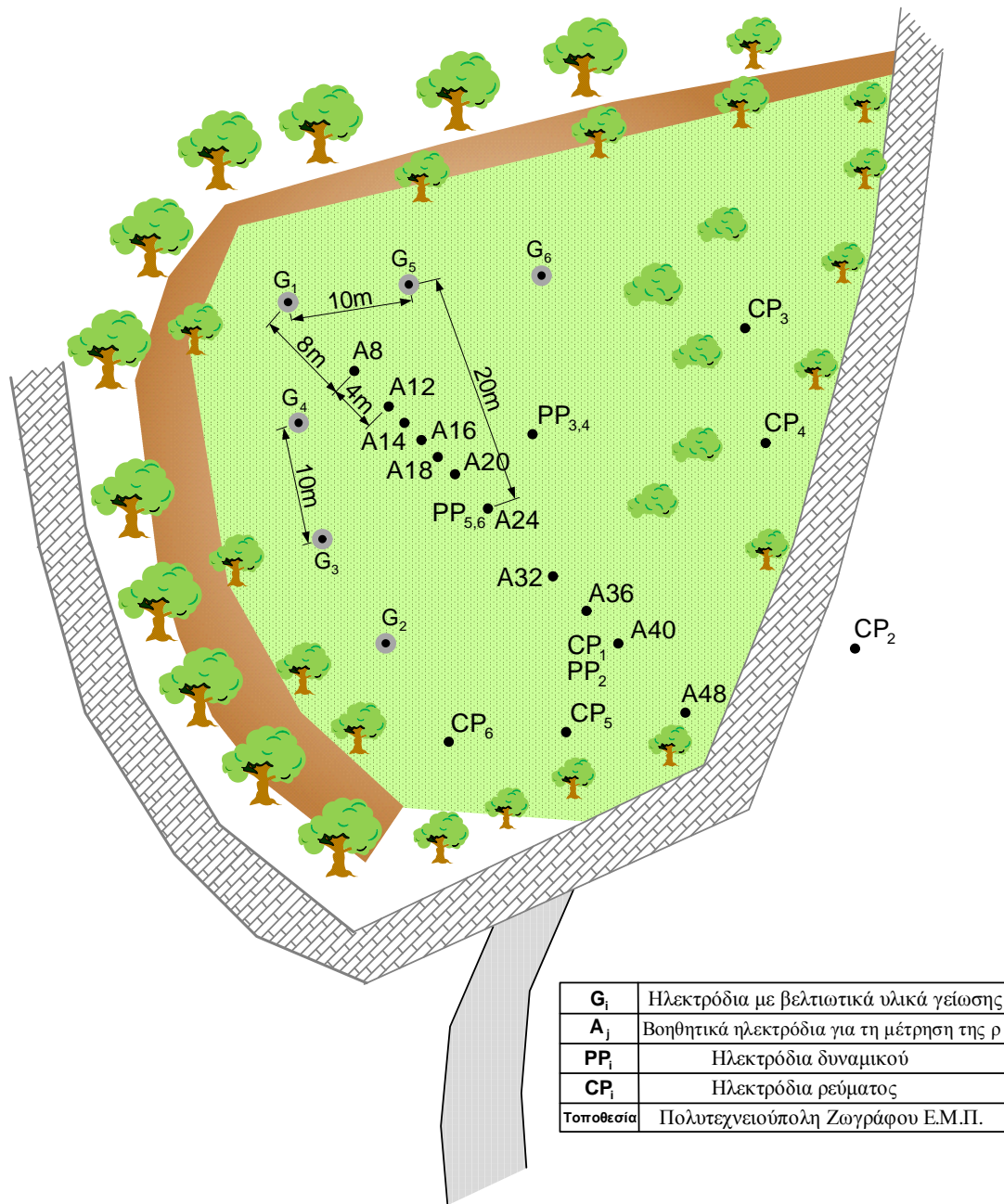
Στον χώρο του πειράματος εγκαταστάθηκαν έξι ηλεκτρόδια ράβδου St/e-Cu τύπου Α, διαστάσεων $17 \times 1500 \text{mm}$, με πάχος επιχάλκωσης $254 \mu\text{m}$ και σε απόσταση 10m το ένα από το άλλο. Τα πέντε ηλεκτρόδια εγκιβωτίστηκαν μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης, τα οποία είναι εμπορικά διαθέσιμα και ευρέως χρησιμοποιούμενα στις εγκαταστάσεις γειώσεων, το δε έκτο τοποθετήθηκε σε

άμεση επαφή με το φυσικό έδαφος. Η αντίστοιχη διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Τα ηλεκτρόδια και τα βελτιωτικά υλικά της διάταξης παρατίθενται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3.3: Ηλεκτρόδια και βελτιωτικά υλικά πειραματικής διάταξης.

<i>Ηλεκτρόδιο</i>	<i>Υλικό</i>
G₁	Φυσικό έδαφος
G₂	Σκυρόδεμα
G₃	Μπεντονίτης
G₄	Συνθετικό υλικό A
G₅	Συνθετικό υλικό B
G₆	Συνθετικό υλικό C

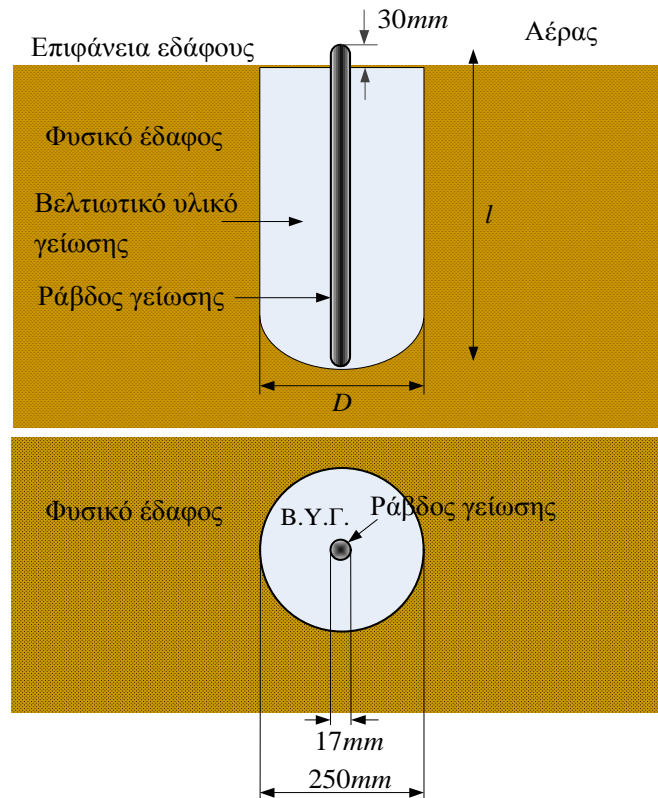
Για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων έγινε διάνοιξη ορυγμάτων διαμέτρου $D=0,25m$ και βάθους $1,6m-1,65m$ (Σχήμα 3.15) με εκσκαφέα βαρέως τύπου (Εικόνα 3.8). Κατόπιν, έγινε πλήρωση των ορυγμάτων με τα βελτιωτικά υλικά και τέλος τοποθετήθηκαν εντός αυτών τα ηλεκτρόδια (Εικόνα 3.9). Σημειώνεται ότι κατόπιν υποδείξεων των παρασκευαστών των υλικών A, B και C, το υλικό A αναμίχθηκε με ποσότητα χώματος από το μέρος όπου θα γινόταν η έγχυσή του σε ορισμένη αναλογία, ενώ τα υλικά B και C εγχύθηκαν απευθείας στα σκάμματα όπου τοποθετήθηκαν άμεσα και τα ηλεκτρόδια. Επίσης, τοποθετήθηκαν μόνιμα στο έδαφος σε διάφορες θέσεις (Σχήμα 3.14) δεκαεπτά βοηθητικά ηλεκτρόδια μήκους $0,5m$ και ίδιου τύπου με τα αρχικά, για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης ρ και της αντίστασης γείωσης R . 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.



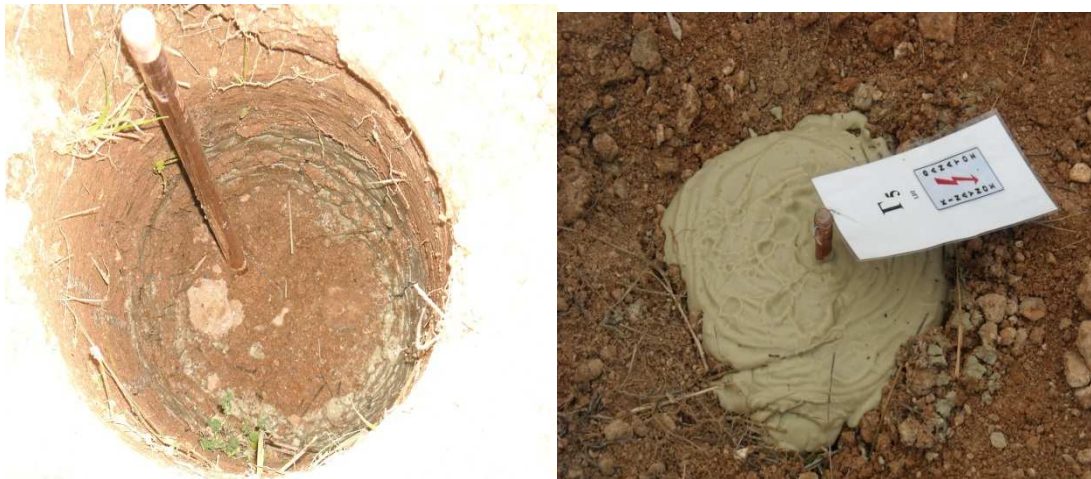
Σχήμα 3.14: Διάταξη ηλεκτροδίων στο πεδίο δοκιμών.



Εικόνα 3.8: Διάνοιξη ορυγμάτων με εκσκαφέα βαρέως τύπου.



Σχήμα 3.15: Ράβδος γείωσης εγκιβωτισμένη σε βελτιωτικό υλικό.



Εικόνα 3.9: Ράβδος γείωσης πριν και μετά την έγχυση του υλικού.

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, το οποίο διακριβώνεται κάθε χρόνο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων του εξωτερικού. Οι τιμές του ύψους βροχόπτωσης λαμβάνονται on line 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. Αποτελεί μέρος του παλαιότερου Meteoronet το οποίο πλέον έχει εξελιχθεί στο Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθήνας (HOA).

3.6.2 Πειραματική μελέτη της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας Μετρήσεις και αποτελέσματα

3.6.2.1 Μεθοδολογία

Οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή, διεξήχθησαν το διάστημα 17/02/2011–16/02/2015. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε τακτά χρονικά διαστήματα (2–3 φορές την εβδομάδα), με σκοπό την κάλυψη όλων των εποχών του έτους, αλλά και την καταγραφή των διαφορετικών καιρικών συνθηκών που παρατηρούνταν σε ίδιες εποχές μεταξύ διαφορετικών ετών (π.χ. 10–12/2011 με 10–12/2012). Η συχνότητα των μετρήσεων μέσα στην εβδομάδα ήταν η προαναφερόμενη λόγω της δύσκολης διαδικασίας των μετρήσεων. Επίσης, πολλές φορές οι καιρικές συνθήκες ήταν ιδιαίτερες δύσκολες, άλλες φορές με καταρρακτώδη βροχή ή ψύχος, που έκαναν το έδαφος ιδιαίτερα λασπώδες και άλλες με καύσωνα.

Για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους εφαρμόστηκε η μέθοδος Wenner (μέθοδος των 4 ηλεκτροδίων). Χρησιμοποιήθηκαν τα έντεκα βοηθητικά ηλεκτρόδια A_j και το G_1 για την πραγματοποίηση των μετρήσεων σ' έναν άξονα. Με τις θέσεις των ηλεκτροδίων και τις αποστάσεις μεταξύ τους, που φαίνονται στο Σχήμα 3.14, ο συνδυασμός τους ανά τέσσερα έκανε δυνατή τη μέτρηση σε βάθη $1m$, $2m$, $4m$, $6m$ και $8m$. Η μέτρηση πραγματοποιούνταν με το MEGGER DET2/2 Auto Earth Tester σε συχνότητα λειτουργίας $128Hz$. Με το όργανο μετριόταν η φαινόμενη αντίσταση γείωσης του όγκου του εδάφους μεταξύ των τεσσάρων ηλεκτροδίων και στη συνέχεια μέσω του τύπου (1.6) λαμβανόταν η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης [68].

Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης καθενός από τα ηλεκτρόδια G_i εφαρμόστηκε η μέθοδος πτώσης δυναμικού με το ίδιο όργανο όπως προηγουμένως και στην ίδια συχνότητα λειτουργίας, πάντα την ίδια ημέρα που

μετριότητα και η ειδική αντίσταση εδάφους. Οι αποστάσεις που τηρούνταν για το ηλεκτρόδιο δυναμικού και το ηλεκτρόδιο ρεύματος ήταν 20m και 40m αντίστοιχα [68]. Οι αποστάσεις αυτές, σε συνδυασμό με το μήκος των εξεταζόμενων ράβδων, απέκλεισαν κάθε περίπτωση επικάλυψης (overlapping) των πεδίων ροής των βοηθητικών ηλεκτροδίων.



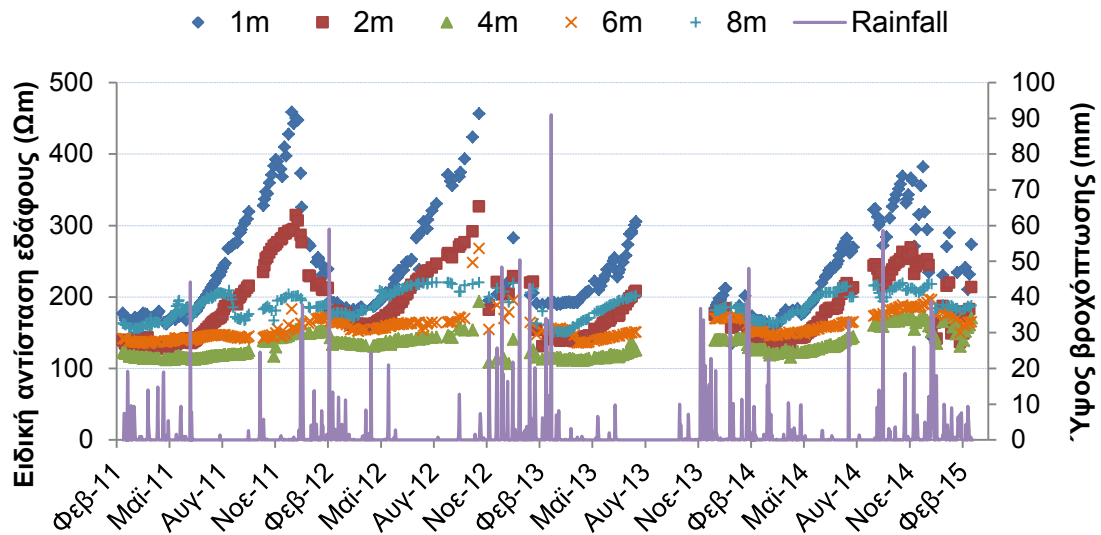
Εικόνα 3.10: Διεξαγωγή των μετρήσεων.

3.6.2.2 Αποτελέσματα

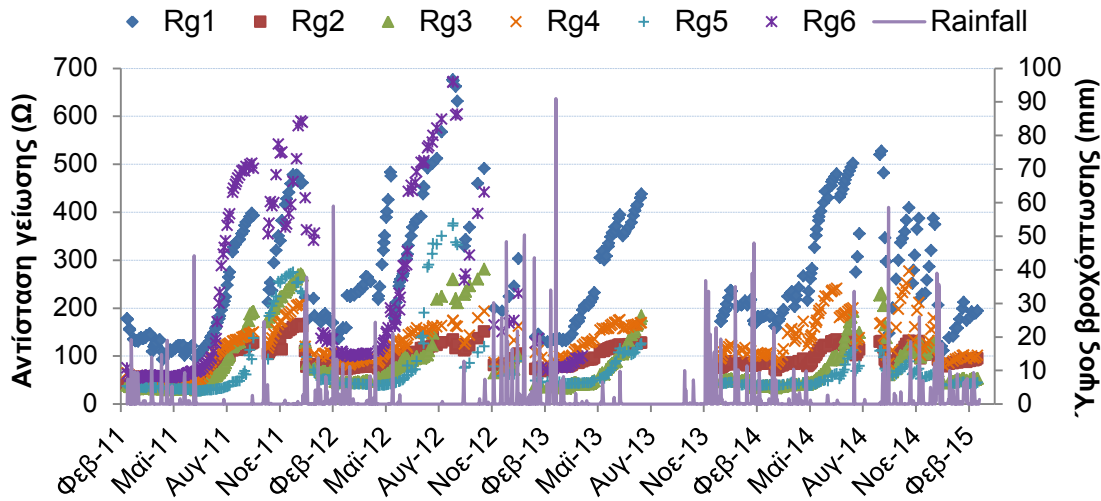
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, συνολικά στο διάστημα των τεσσάρων ετών ως συνάρτηση του χρόνου και του ύψους βροχόπτωσης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.16 για την ειδική αντίσταση και στο Σχήμα 3.17 για την αντίσταση γείωσης. Οι γραφικές περιλαμβάνουν συγκεντρωτικά τις τιμές των μετρήσεων για όλα τα εξεταζόμενα βάθη του εδάφους, καθώς και για όλα τα εξεταζόμενα ηλεκτρόδια G_i . Οι τιμές του ύψους βροχόπτωσης στα δύο γραφήματα είναι τιμές συνολικής βροχόπτωσης 24ώρου για κάθε ημέρα επί τέσσερα έτη, με σκοπό την καταγραφή των σταδιακών μεταβολών της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης παρουσία ή απουσία βροχής, καθώς και στις ημέρες μετά από τη βροχόπτωση. Επίσης, στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης του κάθε βελτιωτικού υλικού σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ο συντελεστής απόδοσης εκφράζεται ως η ποσοστιαία ελάττωση της αντίστασης γείωσης που επιτυγχάνεται με τη χρήση του εκάστοτε βελτιωτικού υλικού, σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς, και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_i = 1 - \frac{R_{gi}}{R_{g1}} \quad (3.13)$$

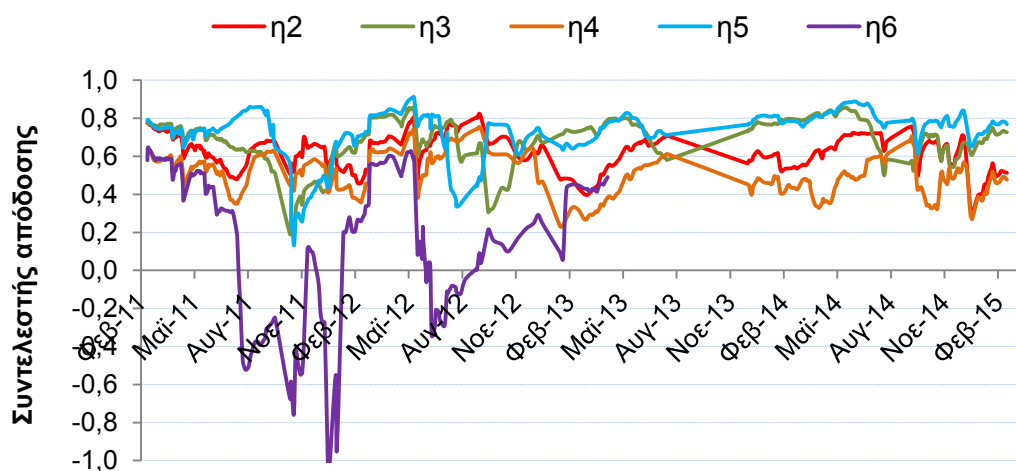
όπου R_{gi} η αντίσταση γείωσης του εκάστοτε κατακόρυφου ηλεκτροδίου εντός βελτιωτικού υλικού και R_{g1} η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου αναφοράς G_1 .



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους.



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης γείωσης των έξι ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.18: Συντελεστής απόδοσης βελτιωτικών υλικών.

3.6.2.3 Ανάλυση

Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κενό στα δεδομένα που παρατηρείται μεταξύ Αυγούστου 2013 και Δεκεμβρίου 2013 οφείλεται σε διακοπή της διεξαγωγής των μετρήσεων λόγω τεχνικών προβλημάτων. Από τα διαγράμματα στο Σχήμα 3.16 διαπιστώνεται η ισχυρή επίδραση της βροχόπτωσης στη διαμόρφωση των τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους, καθώς και η έντονη διακύμανση των τιμών αυτών στα ανώτερα στρώματα των 1m και 2m. Αυτά τα στρώματα φαίνονται να επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό και αρκετά γρήγορα από τις καιρικές μεταβολές, μιας και βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και αποτελούνται από διαφορετικής σύστασης υλικά, όπως φαίνεται και από το έγχρωμο διάγραμμα της ηλεκτροτομογραφίας στο Σχήμα 3.11.

Η διαφορετική τάξη μεγέθους και η διαφορά στη διακύμανση της ειδικής αντίστασης, από βάθος σε βάθος, είναι ισχυρές ενδείξεις της πολυστρωματικότητας του εδάφους, όπως επιβεβαιώνουν και τα ευρήματα της ηλεκτροτομογραφίας. Η παρατήρηση της μορφής των καμπυλών συνολικά στα τέσσερα έτη αναδεικνύει την περιοδικότητα της μεταβολής της ειδικής αντίστασης, υποκρύπτοντας μάλιστα μια ημιτονικότητα του φαινομένου, αν εξαιρεθούν βεβαίως κάποιες διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στις μέγιστες τιμές και στην περίοδο της μεταβολής.

Από τα αποτελέσματα, επίσης, φαίνεται πως το έδαφος παρουσιάζει αξιοσημείωτη σταθερότητα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του στα βαθύτερα στρώματα, όπου η αποστράγγιση των ομβρίων υδάτων γίνεται με πολύ πιο αργό ρυθμό λόγω της σύστασης του εδάφους. Αυτό έχει ως συνέπεια τη διατήρηση υψηλών επιπέδων υγρασίας και για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, απ' ότι στα πιο επιφανειακά στρώματα, γεγονός που αξιοποιείται κατά την εγκατάσταση των συστημάτων γείωσης.

Παρόμοια εικόνα παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.17, από τα διαγράμματα του οποίου είναι εμφανής η επίδραση της βροχόπτωσης, συνεπώς και της υγρασίας του εδάφους στη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών. Σε γενικές γραμμές, τα υλικά αυτά επιτυγχάνουν μείωση της αντίστασης γείωσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων σε σύγκριση με το φυσικό έδαφος, καταγράφεται,

όμως, σε μερικά απ' αυτά, έντονη διακύμανση της απόδοσής τους σε συνάρτηση με τον χρόνο και τη βροχόπτωση, με βάση τα διαγράμματα στο Σχήμα 3.18.

Η μεταβολή της αντίστασης γείωσης, όλων των ηλεκτροδίων, εμφανίζει και αυτή με τη σειρά της μια περιοδικότητα στον χρόνο, αφού κατά κανόνα οι φθινοπωρινοί και χειμερινοί μήνες είναι ιδιαίτερα βροχεροί, σε αντίθεση με τους καλοκαιρινούς που χαρακτηρίζονται από έντονη ανομβρία. Υπάρχουν, βέβαια, και χρονικές περίοδοι οι οποίες δεν ακολουθούν αυτόν τον γενικό κανόνα των καιρικών συνθηκών, οι οποίες και είναι αιτίες διαταραχής της εν λόγω περιοδικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίοδος Οκτωβρίου 2011–Ιανουαρίου 2012, όπου χαρακτηρίστηκε από παρατεταμένη και ασυνήθιστη για την εποχή ανομβρία, σε αντίθεση με τις ίδιες περιόδους των επόμενων ετών, όπου καταγράφηκαν μεγάλα ύψη βροχής.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα της παρούσας διατριβής, σκοπός της προσθήκης αυτών των υλικών γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης είναι η συγκράτηση, όσο το δυνατόν, υψηλότερων ποσοτήτων υγρασίας γύρω από τα ηλεκτρόδια και η διαμόρφωση κατάλληλου αγωγίμου περιβάλλοντος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της αντίστασης γείωσης σε χαμηλά επίπεδα. Η συγκράτηση της υγρασίας και η χαμηλή ειδική αντίσταση του εδάφους, γύρω από τον γειωτή, βασίζονται σε ορυκτά υλικά, π.χ. μπεντονίτης, τα οποία είναι η βάση των περισσότερων βελτιωτικών υλικών που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Αυτά τα υλικά περιέχουν υψηλές ποσότητες ηλεκτρολυτών, οι οποίοι διατηρούν την τιμή της ειδικής αντίστασης σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα, τα ορυκτά αυτά έχουν την ιδιότητα να απορροφούν υγρασία από το περιβάλλον έδαφος έως και 10 φορές τον όγκο τους, να διογκώνονται και να τη διατηρούν στο εσωτερικό τους. Από τα παραπάνω διαγράμματα, όμως, δε φαίνεται να επιτυγχάνεται, σε μεγάλο βαθμό, το επιθυμητό αποτέλεσμα με τη χρήση συνθετικών υλικών που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο έτοιμα προς χρήση.

Η γραφική αναπαράσταση του συντελεστή απόδοσης για κάθε ηλεκτρόδιο στο Σχήμα 3.18 καταδεικνύει τη συμβολή αυτών των υλικών στη μείωση της τιμής της αντίστασης γείωσης, συγχρόνως, όμως, αποδεικνύει και των ισχυρισμό των τελευταίων γραμμών της προηγούμενης παραγράφου.

Πιο συγκεκριμένα, το βελτιωτικό υλικό Β παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή απόδοσης απ' όλα τα υλικά, τιμές που φθάνουν το 86% έως και 91% σε μεγάλα χρονικά διαστήματα κατά την περίοδο που εξετάζεται.

Ταυτόχρονα, όμως, είναι και το υλικό που εμφανίζει την ευρύτερη διακύμανση στην τιμή του η , με τις ελάχιστες τιμές να σημειώνονται σε περιόδους έντονης ξηρασίας όπως αυτές των Οκτωβρίου 2011–Ιανουαρίου 2012 και Ιουνίου–Αυγούστου 2012. Μάλιστα, στις 24/10/2011 παρουσίασε τη χαμηλότερη τιμή του η που ήταν μόλις 13,1%, ενώ η υψηλότερη σημειώθηκε στις 14/05/2012 και ήταν 91,3%. Η διακύμανση αυτή δείχνει τον έντονο υδροσκοπικό χαρακτήρα αυτών των υλικών. Η απουσία υγρασίας στο περιβάλλον έδαφος, αλλά και η μη ικανότητα συγκράτησης υγρασίας από το ίδιο το υλικό στο εσωτερικό του όγκου του, για μεγάλες χρονικές περιόδους, έχουν σαν αποτέλεσμα την αδρανοποίηση των ηλεκτρολυτών που περιέχουν και την ξήρανση του υλικού. Άμεση συνέπεια αυτών είναι η εμφάνιση ρωγμών στον όγκο του και η απότομη άνοδος της τιμής της αντίστασης γείωσης. Αντιθέτως, σε περιόδους υψηλών βροχοπτώσεων η εικόνα είναι εντελώς διαφορετική. Η παρουσία υψηλών ποσοστών υγρασίας στο έδαφος ευνοεί το υλικό στη διαμόρφωση μιας περιοχής πολύ χαμηλής ειδικής αντίστασης γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης.

Παρόμοια εικόνα εμφανίζει και το υλικό Α, χωρίς όμως αυτό να καταφέρνει να σημειώσει υψηλές τιμές του συντελεστή απόδοσης. Από το Σχήμα 3.18 προκύπτει ότι το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει, σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια των παρατηρήσεων, τον χαμηλότερο συντελεστή απόδοσης και, μάλιστα, από τον Νοέμβριο του 2012 η διαφορά από τα υπόλοιπα υλικά είναι μεγάλη. Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλότερη τιμή του συντελεστή απόδοσης που παρουσίασε ήταν μόλις 23,1% στις 18/01/2013, ενώ η υψηλότερη 75,5% στις 03/09/2012. Όπως και στην περίπτωση του υλικού Β, από τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή του η φαίνεται το μεγάλος εύρος διακύμανσης που παρουσιάζει το εν λόγω υλικό.

Σαφώς καλύτερη εικόνα παρουσιάζει ο υγρός μπεντονίτης, που εγχύθηκε στο ηλεκτρόδιο G₃, ο οποίος, αν και εμφανίζει την ίδια μορφή μεταβολής σε κάποιες συγκεκριμένες περιόδους (Οκτώβριος 2011 – Ιανουάριος 2012 και Ιούλιος – Αύγουστος 2012) με το υλικό Β, γενικότερα παρουσιάζει σταθερότερη απόδοση κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι, η ομοιότητα των κυματομορφών αυτών των δύο υλικών σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους υποδηλώνει τη χρήση του μπεντονίτη ως βάση για την παρασκευή τέτοιων συνθετικών υλικών γειώσεων.

Το δε σκυρόδεμα, παρόλο που δεν εμφανίζει πολύ υψηλές τιμές του συντελεστή απόδοσης, όπως το υλικό Β, ή εμφανίζει ελαφρώς χειρότερη

απόδοση από τον μπεντονίτη σε πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους, εντούτοις, εμφανίζει τη μεγαλύτερη σταθερότητα σε απόδοση απ' όλα τα εξεταζόμενα υλικά κατά τη διάρκεια των 4 ετών παρατήρησης. Μάλιστα, όπως ήταν αναμενόμενο, δεν παρουσίασε καμία αλλαγή στη συνεκτικότητά του γύρω από το ηλεκτρόδιο και κανενός είδους συρρίκνωση ή αλλοίωση, όπως συνέβη σε κάποια από τα υπόλοιπα εξεταζόμενα βελτιωτικά υλικά.

Ξεχωριστή αναφορά γίνεται στο συνθετικό υλικό C το οποίο, ενώ, ξεκίνησε με πολύ καλή απόδοση και μια μέση βελτίωση της τιμής της αντίστασης γείωσης σε ποσοστό 54,3% της μέσης τιμής της αντίστασης του ηλεκτροδίου αναφοράς G_1 , παρουσίασε στη συνέχεια δραματική επιδείνωση στη συμπεριφορά του, φθάνοντας ή ακόμα και ξεπερνώντας τις τιμές του ηλεκτροδίου G_1 στο φυσικό έδαφος. Χαρακτηριστική είναι η περίοδος του Δεκεμβρίου του 2011, όπου το ηλεκτρόδιο G_6 εμφάνισε τιμή αντίστασης κατά 108,6% μεγαλύτερη της αντίστασης του G_1 . Αυτό οφειλόταν στη σταδιακή συρρίκνωση του υλικού και στην πλήρη απορρόφησή του από το περιβάλλον έδαφος, σε διάστημα 10–11 μηνών, δημιουργώντας μεγάλα κενά αέρα γύρω από τη ράβδο. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται παραστατικά στην Εικόνα 3.11. Η πλήρωση του ορύγματος της ράβδου G_6 με βελτιωτικό υλικό επαναλήφθηκε για ακόμα δύο φορές, με το ίδιο δυστυχώς αποτέλεσμα, οπότε και κρίθηκε ακατάλληλο για περαιτέρω παρατήρηση και έρευνα. Σημειώνεται δε, ότι οι μετρήσεις από το εν λόγω ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκαν μόνο στην εκπαίδευση του αρχικού ΤΝΔ για μια πρώτη εκτίμηση, τα αποτελέσματα του οποίου παρατίθενται σε επόμενη ενότητα.

Στον Πίνακα 3.4 παρατίθενται στατιστικά στοιχεία που αφορούν την απόδοση των βελτιωτικών υλικών γείωσης σε διάφορες χρονικές περιόδους, με σκοπό την αποδοτικότερη μελέτη και ανάλυση της συμπεριφοράς τους κατά τη μακροχρόνια χρήση τους σε συστήματα γείωσης. Η επιλογή των χρονικών περιόδων έγινε με κριτήριο την αξιολόγηση των υλικών την περίοδο αμέσως μετά την έγχυσή τους στα συστήματα γείωσης, αλλά και σε περιόδους που χαρακτηρίζονται «δύσκολες» γι' αυτά τα συστήματα.



Εικόνα 3.11: Σταδιακή συρρίκνωση και απορρόφηση του συνθετικού υλικού C.

Πίνακας 3.4: Στατιστικά στοιχεία για την απόδοση των βελτιωτικών υλικών γειώσεως.

Περίοδος παρατήρησης	$R_{g(av)}$ (Ω)	$R_{g(max)}$ (Ω)	$R_{g(min)}$ (Ω)	Μέγιστη ποσοστιαία αύξηση της R_g (% της $R_{g(av)}$)	Μέγιστη ποσοστιαία ελάττωση της R_g (% της $R_{g(av)}$)	Μέση ελάττωση της R_g (% της $R_{g1(av)}$)
Φεβ 2011– Μαι 2011						
R_{g1}	127,1	178,2	92,4	40,2	27,3	-
R_{g2}	38,7	46,7	34,0	20,7	12,1	69,6
R_{g3}	31,9	39,1	29,1	22,4	8,9	74,9
R_{g4}	54,5	64,6	48,8	18,4	10,5	57,1
R_{g5}	33,2	37,5	29,7	13,1	10,4	73,9
R_{g6}	58,1	75,0	53,9	29,1	7,2	54,3
Οκτ 2011– Ιαν 2012						
R_{g1}	302,8	478,0	171,0	57,9	43,5	-
R_{g2}	118,0	166,3	77,3	40,9	34,5	61,0
R_{g3}	168,8	271,0	63,2	60,5	62,6	44,2
R_{g4}	146,2	208,0	97,8	42,3	33,1	51,7
R_{g5}	169,5	275,0	50,2	62,3	70,4	44,0
R_{g6}	372,7	590,0	130,0	58,3	65,1	-23,1
Ιουν 2012– Αυγ 2012						
R_{g1}	446,3	676,0	266,0	51,5	40,4	-
R_{g2}	114,4	138,7	97,7	21,2	14,6	74,4
R_{g3}	133,1	260,0	84,0	95,4	36,9	70,2
R_{g4}	150,4	174,1	118,1	15,8	21,5	66,3
R_{g5}	190,4	376,0	49,6	97,5	74,0	57,3
R_{g6}	485,6	672,0	267,0	38,4	45,0	-8,8
Φεβ 2011– Φεβ 2015						
R_{g1}	254,2	676,0	92,4	166,0	63,6	-
R_{g2}	88,3	166,3	34,0	88,2	61,5	65,2
R_{g3}	80,1	281,0	29,1	250,9	63,7	68,5
R_{g4}	117,7	276,6	46,5	135,0	60,5	53,7
R_{g5}	67,7	376,0	25,9	455,3	61,8	73,4

Έτσι, η πρώτη χρονική περίοδος, στον Πίνακα 3.4, είναι διάρκειας 3 μηνών, αμέσως μετά την εγκατάσταση των ηλεκτροδίων. Αυτή η περίοδος είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού, η συντριπτική πλειοψηφία των μηχανικών διενεργούν μέτρηση της επιτευχθείσας αντίστασης γείωσης αμέσως μετά την έγχυση του βελτιωτικού υλικού και την τοποθέτηση του ηλεκτροδίου γείωσης. Οι επόμενες δύο αφορούν περιόδους έντονης ανομβρίας και ξηρασίας, ενώ στην

τελευταία παρατίθενται στοιχεία απ' όλη την τετραετή διάρκεια του πειράματος. Στον πίνακα, επίσης, παρατίθενται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της αντίστασης γείωσης που σημειώνει το κάθε ηλεκτρόδιο στη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, η μέγιστη άνοδος και πτώση της τιμής της R_g των ηλεκτροδίων σε σχέση με τη μέση τιμή της και στην τελευταία στήλη η μέση ποσοστιαία ελάττωση (βελτίωση) που επιφέρει το κάθε βελτιωτικό σε σχέση με τη μέση τιμή της R_{gl} .

Τονίζεται ότι, από τη συνολική εκτίμηση της απόδοσης των βελτιωτικών υλικών (περίοδος Φεβ 2011 – Φεβ 2015) έχει εξαιρεθεί το υλικό C, μιας και η μελέτη του σταμάτησε στα δύο περίπου χρόνια του πειράματος. Κατ' αυτήν την έννοια δεν έχει νόημα η καθολική σύγκρισή του με τα υπόλοιπα υλικά.

Εξετάζοντας αρχικά τις τιμές της τελευταίας στήλης του παραπάνω πίνακα για την περίοδο Φεβρουαρίου – Μαΐου 2011, συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα βελτιωτικά υλικά επιτελούν τον σκοπό χρήση τους, αφού τα ποσοστά βελτίωσης της τιμής της R_g είναι γενικά άνω του 50%, με εξέχοντα τον μπεντονίτη και το υλικό B που φθάνουν το 74,9% και 73,9% αντίστοιχα. Τα υψηλά αυτά ποσοστά δικαιολογούνται λόγω της αυξημένης εποχικής υγρασίας του εδάφους, αλλά και λόγω του ότι οι μετρήσεις διεξήχθησαν την περίοδο αμέσως μετά την εγκατάσταση των συστημάτων γείωσης με τα βελτιωτικά υλικά. Αυτή η πρακτική της επιλογής του χρόνου μέτρησης της αντίστασης γείωσης, που ακολουθείται στην πλειονότητα των περιπτώσεων από τους μηχανικούς όταν χρησιμοποιούν τέτοια υλικά, αναμφισβήτητα οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση της αντίστασης γείωσης και της μετέπειτα συμπεριφοράς του συστήματος γείωσης.

Αυτό επιβεβαιώνεται από τα στατιστικά στοιχεία των επόμενων δύο περιόδων παρατήρησης, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν από έντονη ξηρασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το υλικό B, το οποίο παρουσιάζει την καλύτερη επίδοση στη βελτίωση της αντίστασης γείωσης καθ' όλη τη διάρκεια των 4 ετών, με μέση ποσοστιαία μείωση της R_g κατά 73,4% (βλέπε συγκεντρωτικά στοιχεία της περιόδου Φεβ 2011–Φεβ 2015 στον Πίνακα 3.4).

Στις δύο αυτές περιόδους, εμφανίζει πολύ μεγάλη διακύμανση στην τιμή της R_g , αφού σημειώνει μέγιστη ποσοστιαία αύξηση και ελάττωση ως προς τη μέση τιμή της κάθε περιόδου, 62,3% και 70,4% αντίστοιχα, την περίοδο Οκτωβρίου 2011–Ιανουαρίου 2012 και 97,5% και 74% αντίστοιχα, την περίοδο Ιουνίου–Αυγούστου 2012. Εκτός από την έντονη αστάθεια που παρουσιάζει το υλικό B

στη συμπεριφορά και στις επιδόσεις του, φαίνεται να υστερεί, ως προς την απόδοσή του, απ' όλα τα υπόλοιπα υλικά. Ενδεικτικά αναφέρονται το σκυρόδεμα και ο μπεντονίτης, υλικά πολύ φθηνότερα από το συνθετικό υλικό Β, τα οποία εμφανίζουν καλύτερη απόδοση από το εν λόγω υλικό κατά 38,6% και 0,5% αντίστοιχα, την περίοδο Οκτωβρίου 2011–Ιανουαρίου 2012 και 29,8% και 22,5% αντίστοιχα, την περίοδο Ιουνίου–Αυγούστου 2012. Τέλος, σημαντική ένδειξη της αστάθειας της απόδοσης του υλικού Β αποτελεί και η συνολική εκτιμηθείσα διακύμανση της R_g κατά τη διάρκεια των 4 ετών παρατήρησης, καθώς η μέγιστη ποσοστιαία αύξηση της τιμής της R_g του ηλεκτροδίου G_5 έφθασε το 455,3% της μέσης τιμής των 4 ετών, ενώ η μέγιστη ποσοστιαία ελάττωση έφθασε το 61,8% της μέσης τιμής της R_g .

Το συνθετικό υλικό Α, αντιθέτως, ενώ παρουσιάζει τη χαμηλότερη απόδοση 4 ετών από τα υπόλοιπα υλικά (53,7%), εντούτοις, στις περιόδους ξηρασίας εμφανίζει καλή και σταθερή απόδοση με σχετικά μικρή διακύμανση των τιμών της R_g (42,3% και 33,1% την περίοδο Οκτ 2011 – Ιαν 2012, 15,8% και 21,5% την περίοδο Ιουν – Αυγ 2012).

Ο δε μπεντονίτης κάνει εμφανή την παρουσία του γύρω από το ηλεκτρόδιο με σημαντική μείωση της R_g , κατά 74,9% τους πρώτους μήνες της εγκατάστασης, καθώς περιέχει σημαντικά ποσά υγρασίας στο εσωτερικό του από τη φάση της παρασκευής και έγχυσής του στο σύστημα. Στις επόμενες περιόδους εμφανίζει και αυτός μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή της R_g , με χαρακτηριστικότερη την περίοδο Ιουν – Αυγ 2012 (95,4% και 36,9%). Συνολικά δε, σημειώνει τη δεύτερη καλύτερη απόδοση των υλικών μετά το υλικό Β και ελάχιστα καλύτερη απ' αυτήν του σκυροδέματος.

Τέλος, το σκυρόδεμα παρουσιάζει, όχι μόνο πολύ ικανοποιητική συνολική απόδοση κατά τη διάρκεια των 4 ετών (65,2% μέση βελτίωση της R_g ως προς την αντίστοιχη του φυσικού εδάφους), αλλά επίσης και αξιοσημείωτη σταθερότητα των τιμών της R_g τόσο κατά τις βροχερές περιόδους όσο και κατά τις περιόδους ανομβρίας. Στη συνολική εικόνα εμφανίζει τη μικρότερη, από τα υπόλοιπα υλικά, διακύμανση τιμών αντίστασης (88,2% και 61,5%), ενώ και στις περιόδους ξηρασίας η συμπεριφορά του είναι άκρως ικανοποιητική, με χαρακτηριστικότερη την περίοδο Ιουν – Αυγ 2012. Στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο η μέγιστη και ελάχιστη ποσοστιαία απόκλιση φθάνουν το 21,2% και 14,6% αντίστοιχα, με επίτευξη μέσης μείωσης (βελτίωσης) της R_g κατά 74,4%.

Συνεπώς, είναι φανερό ότι παρουσιάζεται μικρή διακύμανση στην τιμή της αντίστασης του ηλεκτροδίου G_2 (σκυροδέμα) και, ταυτόχρονα, εξαιρετικά μειωμένη μέση τιμή ως προς την αντίστοιχη του G_1 . Το γεγονός αυτό οφείλεται, όχι τόσο στην ικανότητα του σκυροδέματος να μειώνει την τιμή της R_g , αλλά στην ικανότητά του να διατηρεί αυτήν τη μειωμένη τιμή περίπου σταθερή, τη στιγμή που η ειδική αντίσταση του εδάφους, άρα και η αντίσταση γείωσης χωρίς υλικό, εμφανίζουν μεγάλο ρυθμό ανόδου των τιμών τους. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το σκυροδέμα, τελικά, ενδεχομένως να συγκρατεί μικρότερες ποσότητες νερού απ' ό,τι τα συνθετικά υλικά ή ο μπεντονίτης, λόγω σύνθεσής τους, όμως καταφέρνει να τις συγκρατεί αποτελεσματικότερα και μακροπρόθεσμα στον όγκο του. Αυτή η ιδιότητά του το καθιστά σαφώς πιο αξιόπιστο από τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά. Σε συνδυασμό, δε, με το χαμηλότερο κόστος του, ως προς τα άλλα, αναδεικνύεται ίσως το καταλληλότερο υλικό για απαιτητικές και μεγάλης έκτασης εγκαταστάσεις γειώσεως.

3.6.2.4 Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, η συμπεριφορά και η απόδοση των βελτιωτικών υλικών γειώσεως δεν είναι, σε καμία περίπτωση, σταθερή κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους και ίδια με την κατάσταση που παρουσιάζουν κατά τον πρώτο καιρό μετά την τοποθέτησή τους γύρω από τα ηλεκτρόδια. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αναδεικνύουν την έντονη μεταβλητότητα της συμπεριφοράς αυτών των υλικών κατά τη διάρκεια μόλις 4 ετών από την εγκατάστασή τους. Οι ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητές τους, όπως δηλώνονται από τις παρασκευάστριες εταιρίες κατά τις εργοστασιακές δοκιμές, μεταβάλλονται με την έγχυσή τους εντός του εδάφους, λόγω της άμεσης ανάμιξης και αλληλεπίδρασης τους μ' αυτό.

Η επιλογή του καταλληλότερου, για κάθε περίπτωση εγκατάστασης γείωσης, υλικού θα πρέπει να γίνεται ύστερα από προσεκτική μελέτη και αναφορές της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους και όχι μόνο με βάση το κριτήριο της άμεσης και ευκαιριακής ελάττωσης της τιμής της αντίστασης γείωσης στα εκάστοτε θεσπισμένα όρια, όπως γίνεται συνήθως. Αν και ο ρόλος αυτών των υλικών μοιάζει να είναι χαμηλής σημασίας, εκ πρώτης όψεως, παρόλα αυτά συμβάλλουν σημαντικά στην ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων για τους

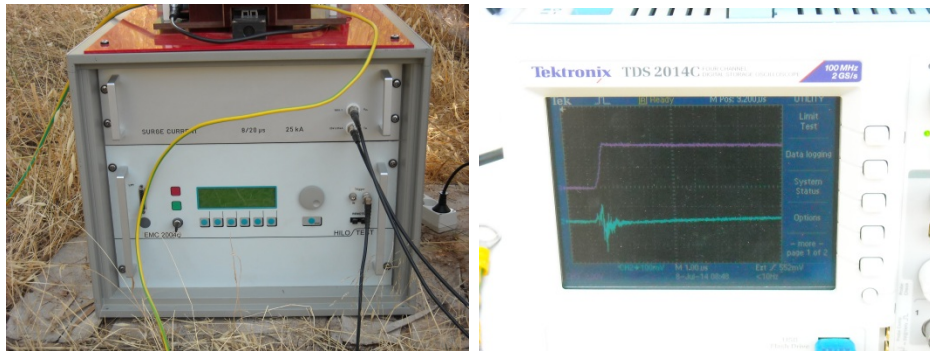
χρήστες και η επιλογή ενός ακατάλληλου υλικού μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για τους ανθρώπους και τον εξοπλισμό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.11.

3.6.3 Πειραματική μελέτη της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας Μετρήσεις και αποτελέσματα

3.6.3.1 Πειραματική διάταξη

Στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης μελέτης των συστημάτων γείωσης δε θα μπορούσε να παραληφθεί και η μεταβατική συμπεριφορά τους σε ταχέως μεταβατικά υψηλά ρεύματα, όπως είναι τα κεραυνικά. Γι' αυτόν τον λόγο, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πειραματική διάταξη, στα ήδη εγκατεστημένα και εγκιβωτισμένα σε βελτιωτικά υλικά, ηλεκτρόδια, στον υπαίθριο χώρο του πειράματος, για τη διεξαγωγή δοκιμών υπό κρουστική καταπόνηση. Πιο συγκεκριμένα, οι κατακόρυφες ράβδοι γείωσης G_1-G_5 (Σχήμα 3.14) υποβλήθηκαν σε δοκιμές και μετρήσεις της κρουστικής σύνθετης αντίστασης υπό κρουστικά ρεύματα και αξιολογήθηκε η μεταβολή αυτής της αντίστασης σε συνάρτηση με την εποχή και το επίπεδο τάσης σε φυσικές κλιματικές συνθήκες [69, 70].

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η φορητή γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων HILO/TEST:EMC-2004. Η γεννήτρια παράγει κρουστικά ρεύματα κυματομορφής $8/20\mu s$ και μέγιστης τιμής $25kA$ σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Η γεννήτρια, επίσης, διαθέτει δύο εξόδους για τη μέτρηση των μεγεθών της τάσης και του ρεύματος, μέσω ενός καταμεριστή τάσης με σχέση καταμερισμού 1000:1 και μιας αντίστασης μέτρησης $1m\Omega$. Για την καταγραφή και μέτρηση της κρουστικής τάσης και της έντασης του κρουστικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος Tektronix TDS 2014C. Διαθέτει 4 κανάλια και θύρα USB, μέσω της οποίας γινόταν ψηφιακή αποθήκευση όλων των μετρούμενων κυματομορφών. Για τη σύνδεση της γεννήτριας με τον παλμογράφο χρησιμοποιήθηκαν ομοαξονικά καλώδια τύπου RG 223U MIL-C-17 50Ω . Επίσης, χρησιμοποιήθηκε μία βενζινογεννήτρια για την παροχή της απαιτούμενης τάσης τροφοδοσίας με ονομαστικά μεγέθη $3kW/220V$, $50Hz$, $3000RPM$, καθώς και ένας σταθεροποιητής τάσης.



Εικόνα 3.12: Αριστερά: Γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων HILO/TEST:EMC-2004
Δεξιά: Παλμογράφος Tektronix TDS 2014C.

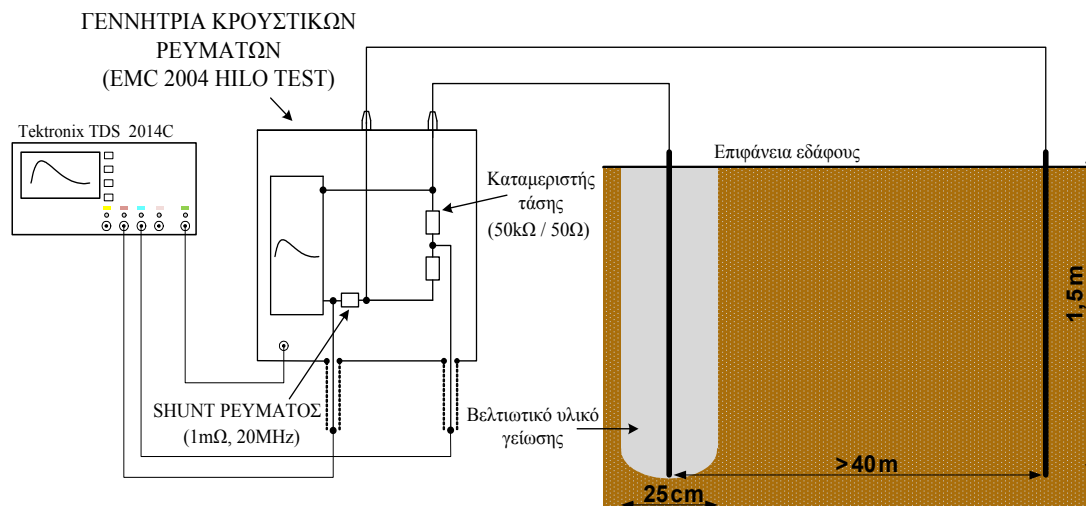


Εικόνα 3.13: Πειραματική διάταξη.



Εικόνα 3.14: Κατακόρυφη ράβδος εντός βελτιωτικού υλικού υπό κρουστική καταπόνηση.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της τάσης τοποθετήθηκε μία ακόμα κατακόρυφη ράβδος St/e-Cu τύπου A, διαστάσεων 17x1500mm σε απόσταση άνω των 40m από το κάθε εξεταζόμενο ηλεκτρόδιο. Η πειραματική διάταξη εικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



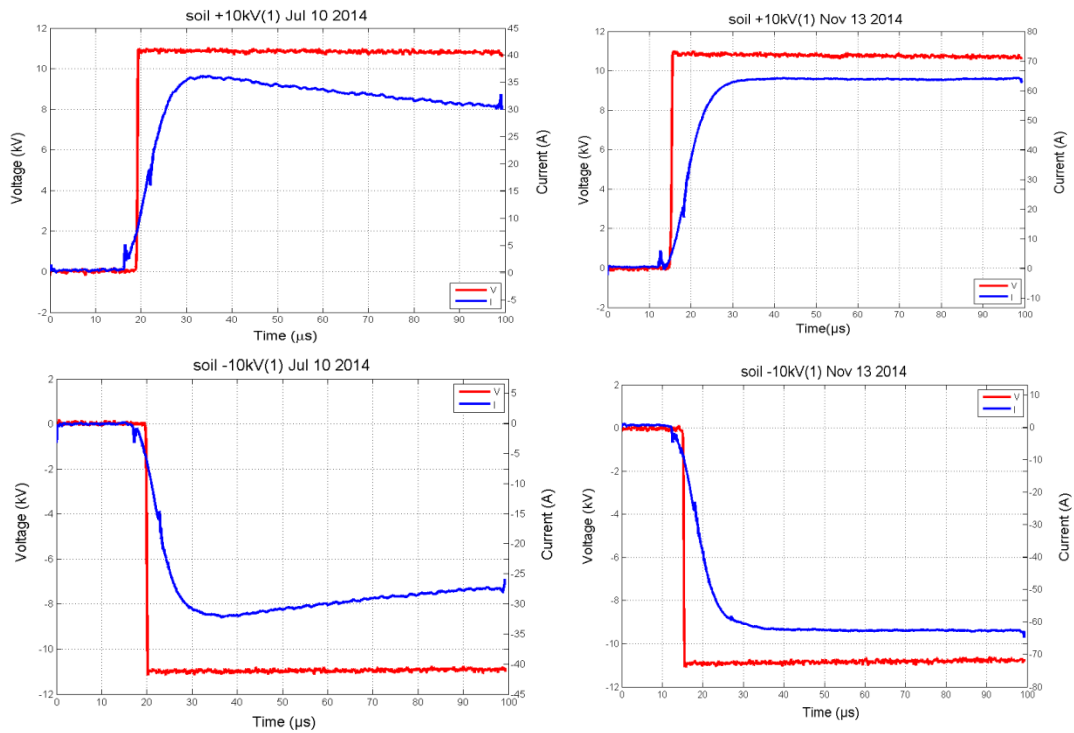
Σχήμα 3.19: Κύκλωμα πειραματικής διάταξης δοκιμών υπό κρουστικό ρεύμα.

3.6.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

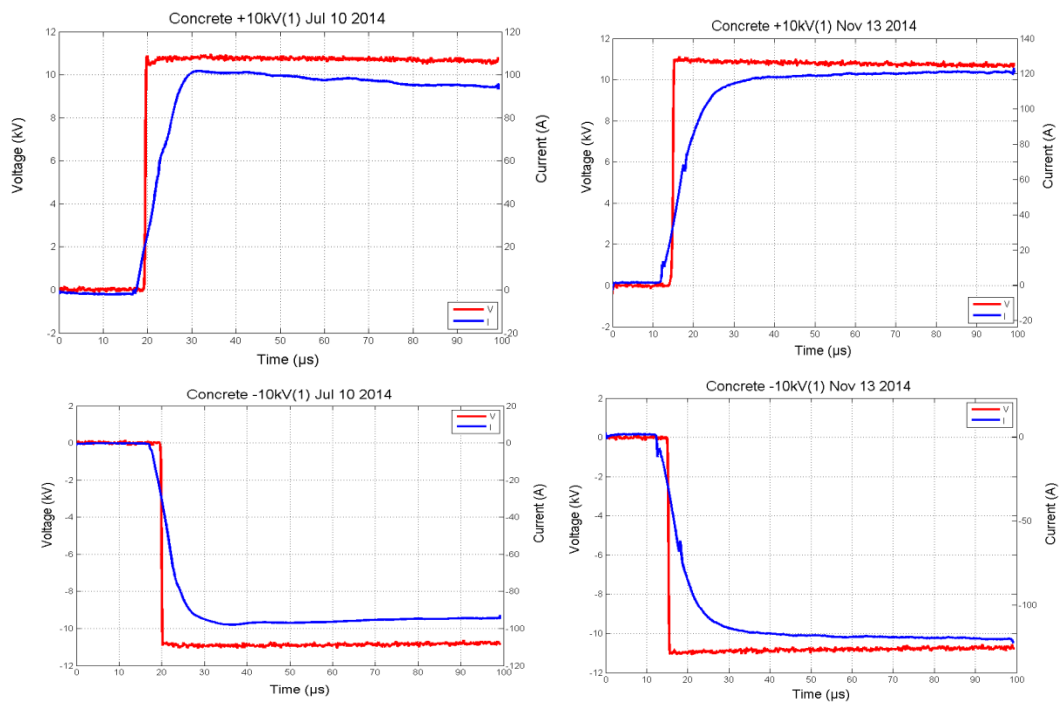
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο, τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο του 2014, κατά τις οποίες λαμβάνονταν πέντε μετρήσεις, κατά μέσο όρο, σε οκτώ διαφορετικές, ονομαστικές, στάθμες φόρτισης οι οποίες ήταν: $\pm 4kV$, $\pm 6kV$, $\pm 8kV$ και $\pm 10kV$, για κάθε κατακόρυφο ηλεκτρόδιο. Οι ληφθείσες κυματομορφές τάσης και ρεύματος, αφού υποβληθούν σε κατάλληλη εξομάλυνση, για την απαλοιφή του περιεχόμενου θορύβου, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z . Ενδεικτικά, στα Σχήματα 3.20–3.24 παρατίθενται κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος, όπως ελήφθησαν από τον παλμογράφο, για τιμές φόρτισης της κρουστικής γεννήτριας τα $\pm 10kV$ και για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων.

Σημειώνεται, δε, ότι στην παρούσα εφαρμογή ως Z λαμβάνεται ο λόγος της τιμής της τάσης $u(t_{i=\hat{i}_p})$, τη χρονική στιγμή $t_{i=\hat{i}_p}$ που το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή, προς τη μέγιστη τιμή (peak) του ρεύματος \hat{I}_p , δηλαδή:

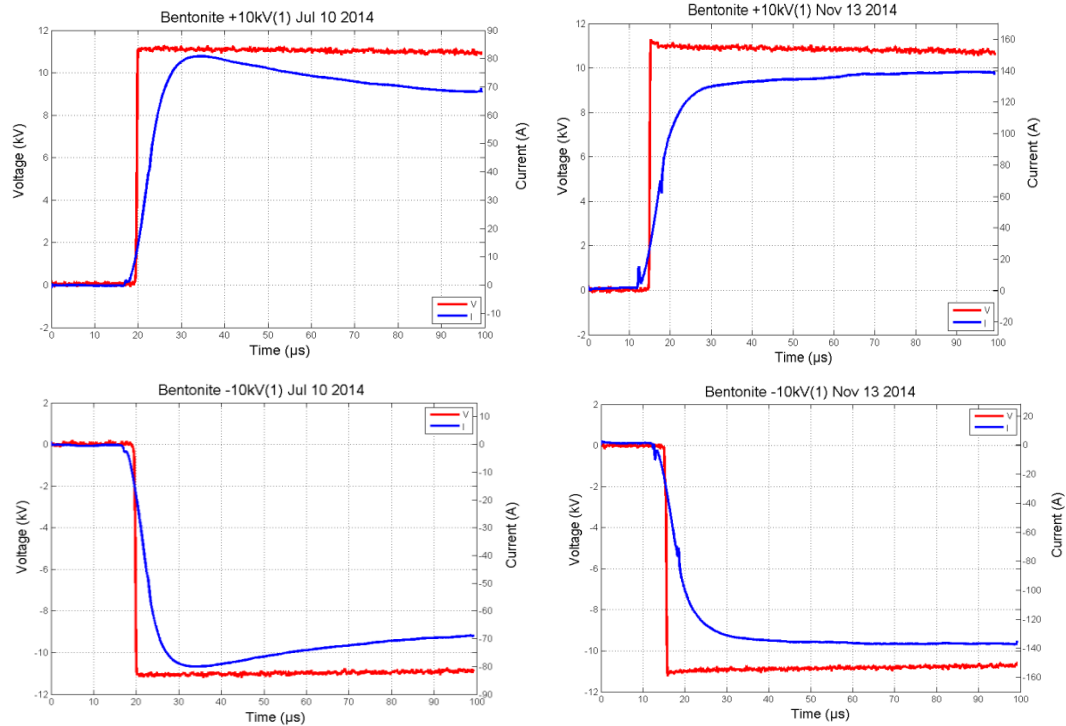
$$Z = \frac{u(t_{i=\hat{i}_p})}{\hat{I}_p} \quad (3.14)$$



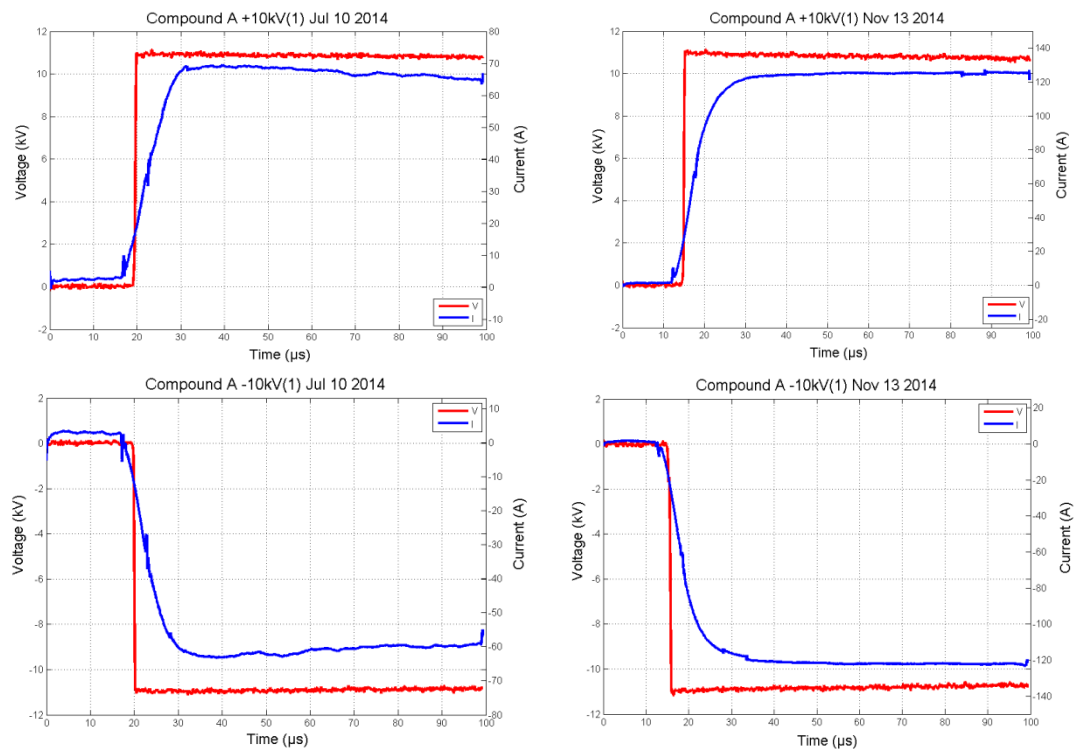
Σχήμα 3.20: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_1 για τάση $\pm 10kV$.



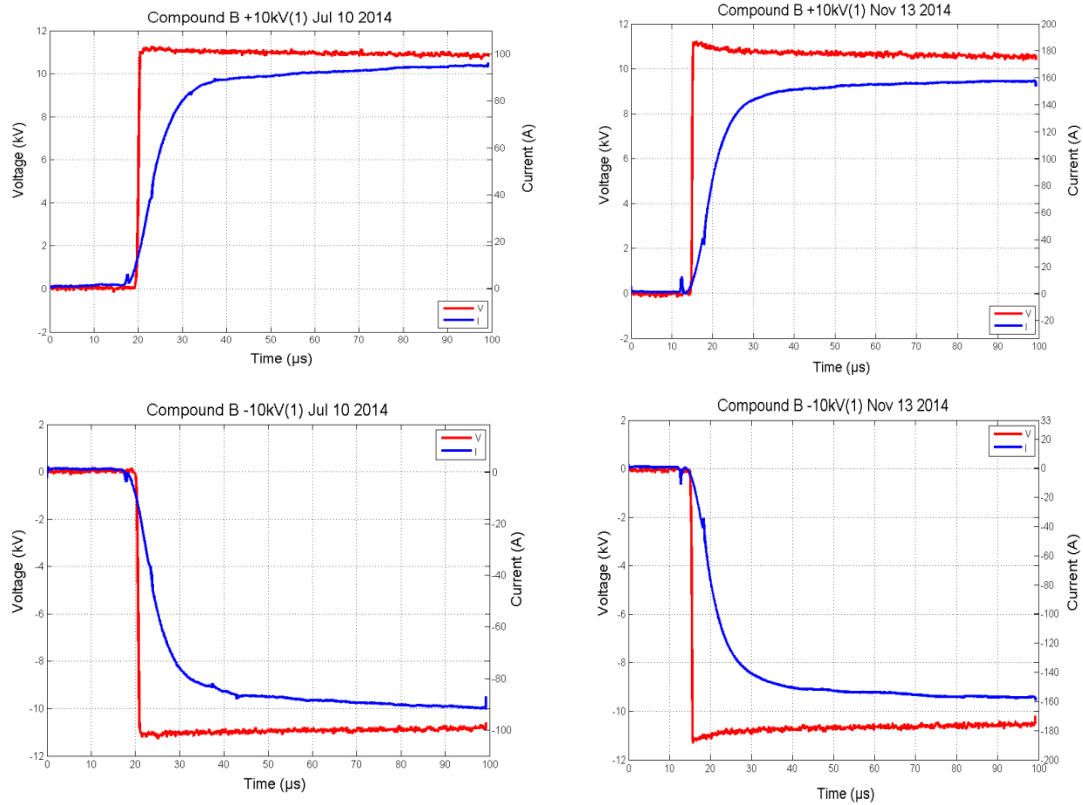
Σχήμα 3.21: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_2 για τάση $\pm 10kV$.



Σχήμα 3.22: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_3 για τάση $\pm 10kV$.



Σχήμα 3.23: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_4 για τάση $\pm 10kV$.

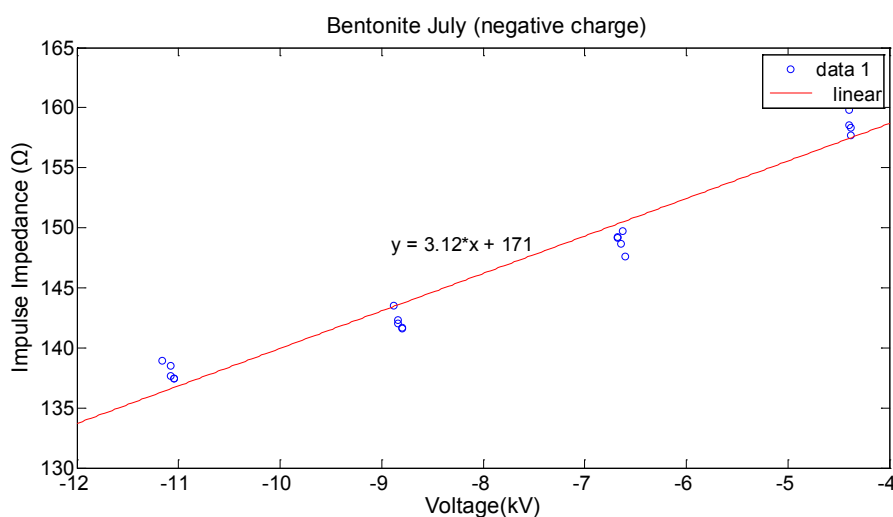


Σχήμα 3.24: Πειραματικές κυματομορφές $u(t)$ και $i(t)$ του ηλεκτροδίου G_5 για τάση $\pm 10kV$.

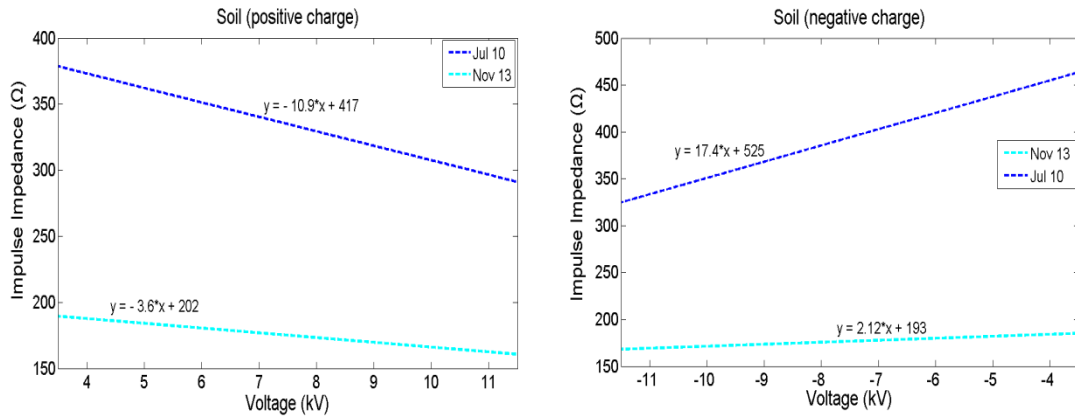
Ακολουθώς, λαμβάνονται οι μέσες τιμές της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z από τις i επαναλήψεις, ανά στάθμη φόρτισης, και ταξινομούνται ανά ηλεκτρόδιο και χρονική περίοδο μέτρησης στον Πίνακα 3.5. Στη συνέχεια, με βάση όλες τις μετρούμενες τιμές της Z , από κάθε κρούση, και από τα διαγράμματα διασποράς αυτών (π.χ. Σχήμα 3.25), χαράσσονται οι αντίστοιχες γραμμές τάσης για τη μεταβολή της Z . Τα διαγράμματα αυτά παρατίθενται ακολούθως ανά υλικό και στάθμη φόρτισης, καθώς και συγκεντρωτικά ανά χρονική περίοδο μετρήσεων και στάθμη φόρτισης, για καλύτερη σύγκριση και αξιολόγηση αυτών.

Πίνακας 3.5: Μέση τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (σε Ω) ανά ηλεκτρόδιο γείωσης και ανά επίπεδο φόρτισης.

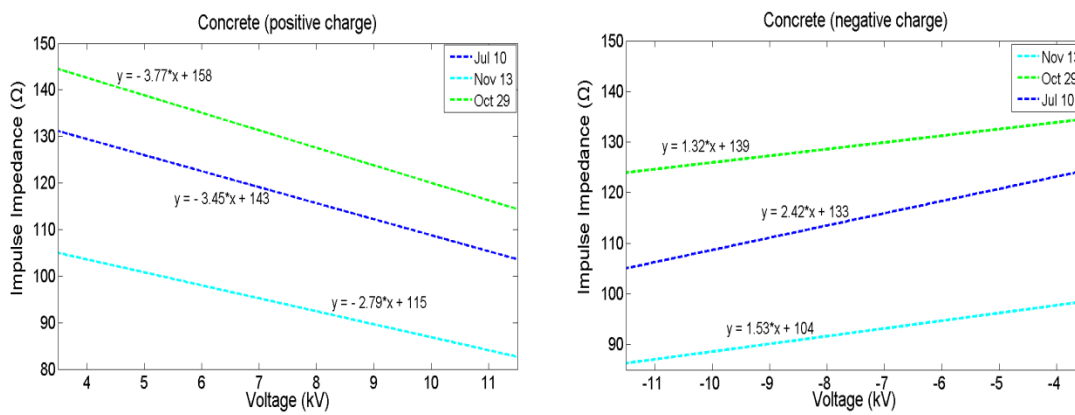
	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV
Z_{g1}								
Ιούλιος	453,0	406,98	370,56	336,70	369,44	346,16	323,3	296,46
Νοέμβριος	181,0	184,16	173,58	169,12	185,34	183,52	168,04	164,18
Z_{g2}								
Ιούλιος	123,9	115,82	111,42	104,96	130,14	118,34	112,36	106,36
Οκτώβριος	136,7	128,08	123,36	117,72	143,26	130,9	124,06	117,94
Νοέμβριος	98,66	91,7	91,36	87,96	104,24	95,34	90,2	86,02
Z_{g3}								
Ιούλιος	158,94	148,88	142,22	138,0	163,14	149,34	143,96	137,7
Οκτώβριος	144,4	138,92	135,32	132,52	148,28	139,64	137,12	132,22
Νοέμβριος	89,3	84,32	82,26	76,42	98,62	88,48	81,1	75,82
Z_{g4}								
Ιούλιος	191,58	185,0	175,66	171,8	179,08	166,96	165,12	154,6
Νοέμβριος 4	182,32	176,28	167,34	163,14	155,72	151,76	152,88	147,28
Νοέμβριος 13	103,88	95,96	89,98	86,96	117,14	102,18	89,76	83,62
Z_{g5}								
Ιούλιος	123,88	122,6	109,16	115,48	128,56	120,72	115,48	113,84
Νοέμβριος	79,76	76,88	71,66	65,72	77,48	73,84	69,66	65,46



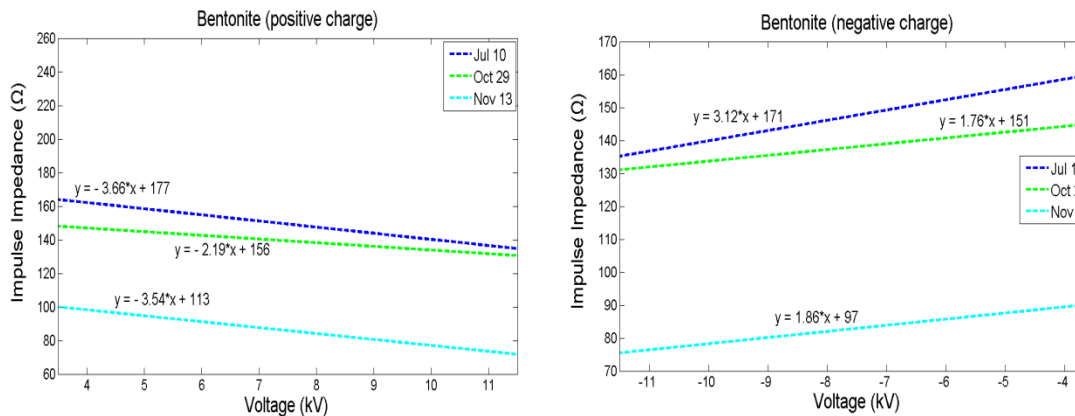
Σχήμα 3.25: Διάγραμμα διασποράς με γραμμή τάσης για το G₃ (Ιούλιος 2014).



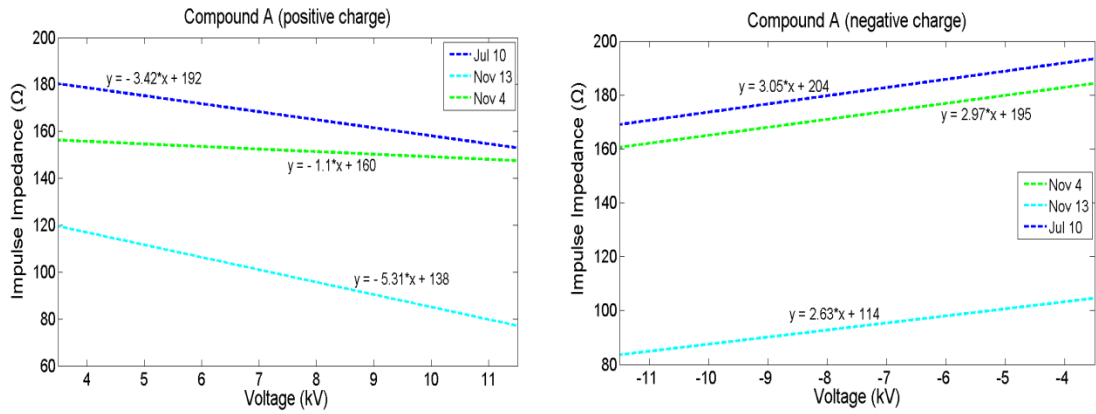
Σχήμα 3.26: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G₁.



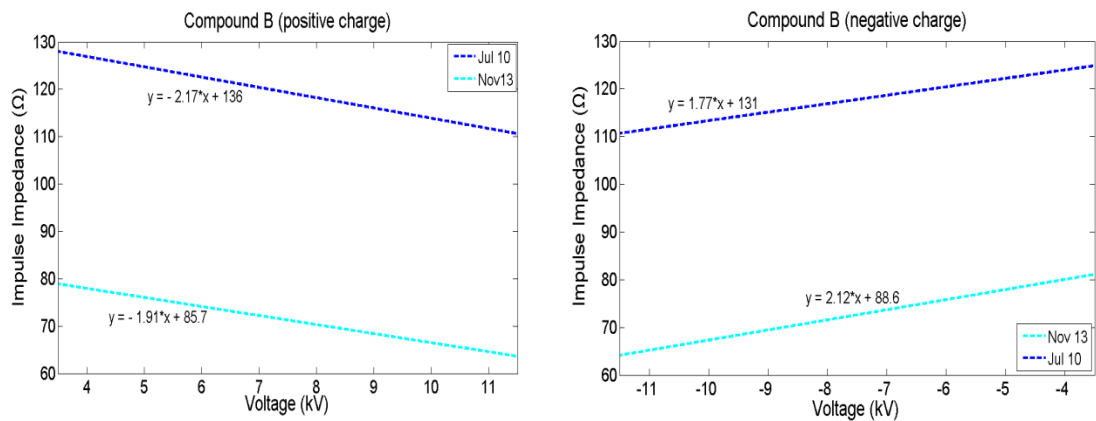
Σχήμα 3.27: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G₂.



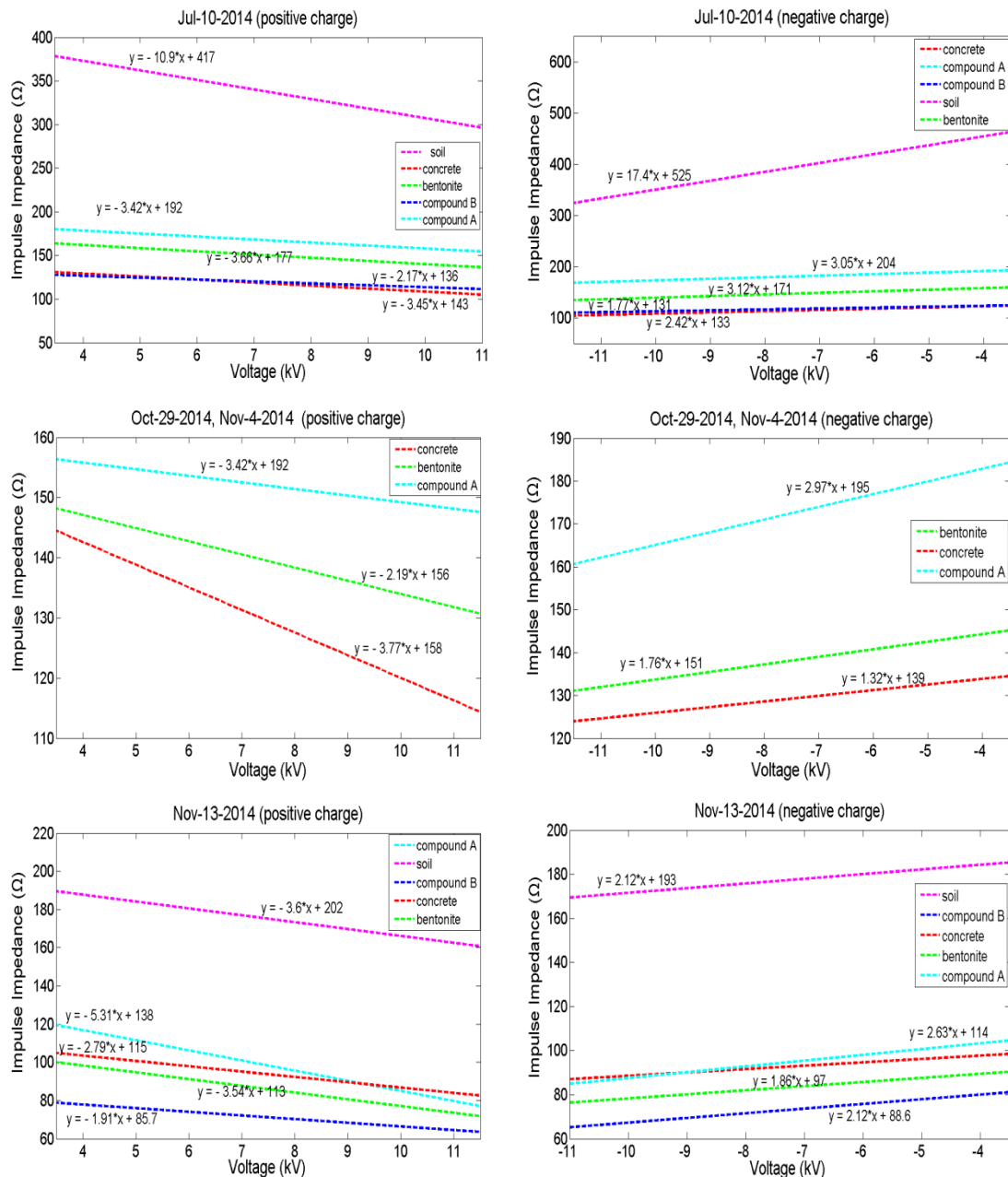
Σχήμα 3.28: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G₃.



Σχήμα 3.29: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G₄.



Σχήμα 3.30: Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου G₅.



Σχήμα 3.31: Διαγράμματα μεταβολής της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (Z) των κατακόρυφων ράβδων γείωσης.

3.6.3.3 Ανάλυση

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να διατυπωθεί, με βάση τα παραπάνω διαγράμματα μεταβολής της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, είναι η επίδραση, τόσο της στάθμης φόρτισης, όσο και της πολικότητας της τάσης φόρτισης, στη διαμόρφωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης γείωσης. Η περίπτωση του ηλεκτροδίου G_1 είναι η πλέον χαρακτηριστική αυτού του φαινομένου. Τον Ιούλιο του 2014 καταγράφεται μια διαφορά της τάξης του 22,8% για τις μέσες

τιμές της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z , μεταξύ θετικής και αρνητικής πολικότητας (μεγαλύτερη τιμή στην αρνητική πολικότητα) για τη στάθμη των $\pm 4kV$, ενώ η αντίστοιχη διαφορά για τη στάθμη των $\pm 10kV$ μειώνεται στο 14%. Οι αντίστοιχες διαφορές των τιμών της Z φαίνονται να μειώνονται, σημαντικά, τον Νοέμβριο του ίδιου έτους, όπου φθάνουν τα επίπεδα του 1,5% για τα $\pm 4kV$ (και μάλιστα μεγαλύτερη τιμή στη θετική πολικότητα) και 5,5% για τα $\pm 10kV$. Σ' αυτό το σημείο εμφανίζεται και ο παράγοντας εποχή, ο οποίος με τα διαφορετικά επίπεδα υγρασίας και βροχόπτωσης επηρεάζει αισθητά την επίδραση της πολικότητας της τάσης στο φυσικό έδαφος.

Όσον αφορά τα βελτιωτικά υλικά, οι τιμές της Z παραμένουν, πρακτικά, σχεδόν αμετάβλητες με την αλλαγή της πολικότητας της τάσης φόρτισης, για όλα τα υλικά. Ως παράδειγμα, αναφέρονται η περίπτωση του μπεντονίτη, στον οποίο εμφανίζεται μια διαφορά της τάξης του 2% για τα $\pm 4kV$ και 0,55% για τα $\pm 10kV$ τον Ιούλιο, 9,6% και 2,8% αντίστοιχα τον Νοέμβριο και η περίπτωση του συνθετικού υλικού Β, στο οποίο οι αντίστοιχες τιμές είναι 1,8% και 3,3% τον Ιούλιο, 3,2% και 0,8% τον Νοέμβριο. Στην περίπτωση των διαφόρων βελτιωτικών υλικών, παρατηρούνται κάποιες εναλλαγές των δύο πολικότητων, ως προς τη μεγαλύτερη τιμή της κρουστικής αντίστασης που σημειώνεται. Παρόλα αυτά, είναι αξιοσημείωτη η σταδιακή μείωση της τιμής της κρουστικής αντίστασης, σε συνάρτηση με την άνοδο της τιμής της τάσης.

Επιπλέον, τεράστια επίδραση στην κρουστική σύνθετη αντίσταση έχει και η υγρασία του εδάφους, η οποία είναι άμεση εξάρτηση του ύψους βροχόπτωσης, κάτι βεβαίως που είναι αναμενόμενο, όπως και στην περίπτωση της αντίστασης γείωσης χαμηλής συχνότητας. Στην περίπτωση του φυσικού εδάφους, σημειώνεται μια μέση μείωση της τάξης του 44,6% στη θετική πολικότητα και 49,8% στην αρνητική για τη στάθμη των $10kV$ μεταξύ Ιουλίου και Νοεμβρίου. Περίπου ίδια εικόνα, με τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, παρουσιάζουν τα ηλεκτρόδια με τα βελτιωτικά υλικά. Το σκυρόδεμα σημειώνει μείωση 19,1% και 16,2% στη θετική και αρνητική πολικότητα των $\pm 10kV$, αντίστοιχα, μεταξύ Ιουλίου και Νοεμβρίου, επιβεβαιώνοντας, και στην παρουσία μεταβατικών φαινομένων, τη σταθερή συμπεριφορά και απόδοσή του κατά τις μεταβολές της υγρασίας του εδάφους. Για την ίδια περίοδο και το ίδιο επίπεδο στάθμης, ο μπεντονίτης εμφανίζει μείωση 44,9% και 44,6%, αντίστοιχα, ενώ για το

συνθετικό υλικό Β τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 42,5% και 43,1%. Αυτά τα ποσοστά είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τις μεταβολές της αντίστασης γείωσης, βιομηχανικής συχνότητας, αυτών των δύο υλικών, σε συνάρτηση με τη βροχόπτωση, όπως περιγράφηκε στην §3.6.2.3.

Στη συνέχεια, μια προσεκτική εξέταση των πειραματικών τιμών της κρουστικής σύνθετης αντίστασης στον Πίνακα 3.5 και των 6 συγκεντρωτικών διαγραμμάτων στο Σχήμα 3.31, με όλα τα υλικά, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, η συνεισφορά των βελτιωτικών υλικών στη μείωση της τιμής της Z είναι κρίσιμη και της ίδιας σπουδαιότητας με την ελάττωση της αντίστασης χαμηλής συχνότητας στα συστήματα γείωσης. Η ιδιότητα αυτή αποδίδεται εξ ολοκλήρου στα βελτιωτικά υλικά γείωσης, μιας και η γεωμετρία των εξεταζομένων συστημάτων γείωσης παραμένει ίδια, καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Για παράδειγμα, το σκυρόδεμα και ο μπεντονίτης είναι υλικά, σαφώς, πιο πυκνής σύνθεσης και υφής και με μικρότερο μέγεθος κόκκων από το φυσικό έδαφος του πειραματικού πεδίου. Συνεπώς, η έγχυσή τους, γύρω από τις ράβδους γείωσης, επιφέρει ελάττωση τόσο της μεταβατικής όσο και της μόνιμης αντίστασης γείωσης.

Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις τιμές του Πίνακα 3.5 και τα αντίστοιχα συγκεντρωτικά διαγράμματα της κρουστικής αντίστασης, στο Σχήμα 3.31, το σκυρόδεμα σημειώνει μια αξιοσημείωτη μέση ελάττωση της τιμής της κατά 65,0% στη θετική πολικότητα και 70,7% στην αρνητική, σε σχέση με το φυσικό έδαφος, τον Ιούλιο. Από τα ποσοστά αυτά γίνεται κατανοητή η σημαντική βελτίωση, που επιφέρει το σκυρόδεμα, στα χαρακτηριστικά του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης και, συνεπώς, στην τιμή της κρουστικής αντίστασης, ιδιαίτερα σε δυσχερείς περιόδους για τα συστήματα γείωσης, όπως είναι οι καλοκαιρινοί μήνες. Στους φθινοπωρινούς μήνες η βελτίωση της τιμής της Z είναι λιγότερο εμφανής, παραμένει όμως σημαντική, καθώς τα αντίστοιχα ποσοστά διαμορφώνονται στο 46,4% και 47,8% για τον μήνα Νοέμβριο.

Με παρόμοιο τρόπο συμπεριφέρεται και ο μπεντονίτης, ο οποίος σημειώνει, εξίσου με το σκυρόδεμα, σημαντικές επιδόσεις στη μείωση της κρουστικής αντίστασης. Τα ποσοστά μείωσης που επιτυγχάνει, ανέρχονται κατά μέσο όρο σε 55,4% στη θετική και 62,2% στην αρνητική πολικότητα τον Ιούλιο, ενώ τον Νοέμβριο τα αντίστοιχα ποσοστά διαμορφώνονται σε 51,0% και 53,1%. Ειδικότερα τον Νοέμβριο, με υψηλά ύψη βροχόπτωσης, ο μπεντονίτης

παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σχέση με το σκυρόδεμα, χάρη στην έντονη υγροσκοπική φύση του που τον βοηθά να απορροφά καλύτερα την περιβάλλουσα υγρασία. Η διαφορά αυτή, όμως, δε φαίνεται να ξεπερνά το 10% συνολικά και για τις δύο πολικότητες. Για τους μήνες Ιούλιο και Οκτώβριο, βέβαια, το σκυρόδεμα εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά από τον μπεντονίτη και, όπως συμπεραίνεται από τα προηγούμενα, υψηλότερη σταθερότητα.

Επιπροσθέτως, εξίσου, σημαντική είναι και μια επισκόπηση της ικανότητας των δύο υλικών να διατηρούν την τιμή της κρουστικής αντίστασης σε σταθερά και χαμηλά επίπεδα, κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Αυτό το κριτήριο, ίσως, είναι αποφασιστικής σημασίας για την επιλογή, ενός εκ των δύο υλικών, ως καταλληλότερου για την εκάστοτε εφαρμογή. Γι' αυτόν τον σκοπό, αρκεί η μελέτη της μεταβολής των τιμών της κρουστικής αντίστασης καθενός από τα ηλεκτρόδια G_2 και G_3 , μεταξύ Ιουλίου και Νοεμβρίου. Αυτοί οι δύο μήνες είναι αντιπροσωπευτικοί της άνυδρης και βροχερής εποχής του έτους, αντίστοιχα. Η μέγιστη διακύμανση του σκυροδέματος, απ' όλες τις στάθμες της ομώνυμης πολικότητας φθάνει το 19,5% για τη θετική και το 18,8% για την αρνητική πολικότητα, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά για τον μπεντονίτη διαμορφώνονται στα 42,2% και 43,5%. Είναι προφανής η έντονη διακύμανση των τιμών της Z του ηλεκτροδίου G_3 με μπεντονίτη, γεγονός που σημειώθηκε και στην αντίσταση γείωσης βιομηχανικής συχνότητας, αποτελεί, δε, ένα σοβαρό μειονέκτημα της χρήσης του σε ξηρά και θερμά κλίματα.

Τέλος, σημαντική βελτίωση στην τιμή της Z των κατακόρυφων ηλεκτροδίων επιφέρει και η χρήση των δύο συνθετικών χημικών υλικών Α και Β. Ιδιαίτερα τον Ιούλιο, η χρήση του υλικού Α επιφέρει μέση ελάττωση της Z κατά 50,0% κατά τη θετική και 53,5% κατά την αρνητική πολικότητα σε σχέση με το φυσικό έδαφος (ράβδος G_1). Το υλικό Β, την ίδια περίοδο, σημειώνει μέση ελάττωση κατά 64,1% για τη θετική και 69,7% για την αρνητική πολικότητα. Αξιοσημείωτη, δε, είναι η βελτίωση του εδάφους που επιτυγχάνεται με το υλικό Β και τον Νοέμβριο, αφού τα ποσοστά ελάττωσης της Z ανέρχονται σε 59,2% και 58,5% για θετική και αρνητική πολικότητα, αντίστοιχα, δηλαδή η καλύτερη απόδοση απ' όλα τα υλικά μέσα στο φθινόπωρο. Από την άλλη μεριά, όμως, η εποχική διακύμανση που παρουσιάζει στις τιμές της Z είναι περίπου της ίδια τάξης με του μπεντονίτη, με ποσοστά 40,2% και 37,6%, αντίστοιχα. Τα

αποτελέσματα αυτά, επίσης, έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με τα αντίστοιχα της μελέτης αυτών των υλικών στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Είναι, πλέον, πρόδηλο ότι η έγχυση βελτιωτικών υλικών γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης επιφέρει σημαντική ελάττωση και της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, όπως ακριβώς συμβαίνει με την αντίσταση γείωσης μόνιμης κατάστασης. Καθώς αυτά τα υλικά είναι πιο πυκνής και συμπαγούς σύστασης, με μικρού μεγέθους κόκκους, απ' ότι το φυσικό χώμα, αποκαθιστούν πολύ καλύτερη επαφή με το ηλεκτρόδιο και, συνεπώς, εμφανίζεται πολύ μικρότερη αντίσταση επαφής από την αντίστοιχη του χώματος. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη ειδική αντίσταση των υλικών, σε σύγκριση με του εδάφους, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαχεόμενη πυκνότητα ρεύματος, στα υλικά, είναι μεγαλύτερης τιμής από την αντίστοιχη στο φυσικό έδαφος, υπό κεραυνικές συνθήκες. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται, ως γνωστόν, από τη σχέση:

$$E = \rho \cdot J \quad (3.15)$$

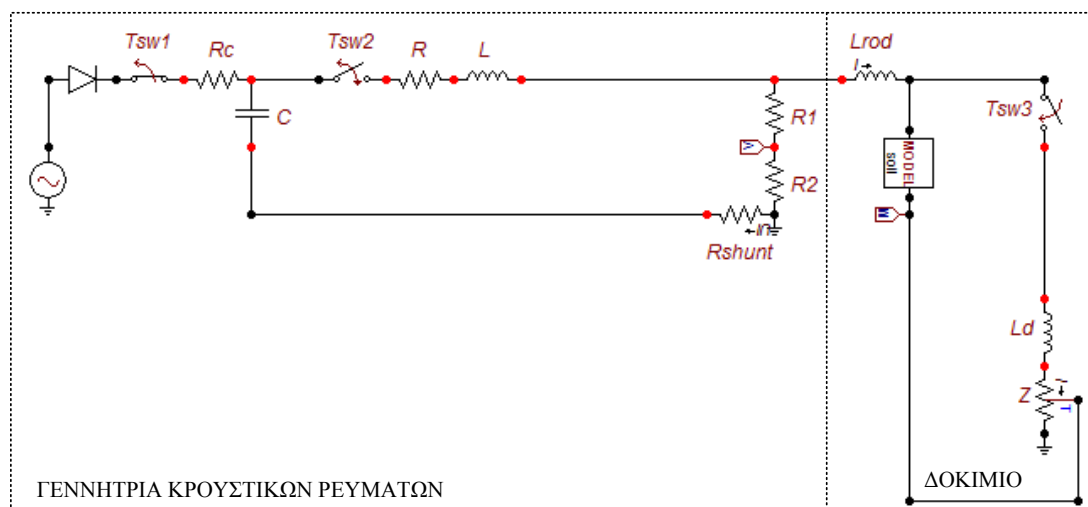
Ως εκ τούτου, είναι πολύ πιθανόν η τιμή της έντασης του πεδίου, που αναπτύσσεται γύρω από τα εγκιβωτισμένα, στα υλικά, ηλεκτρόδια, να ευνοεί την ανάπτυξη εκκενώσεων γύρω από αυτά και εντός του όγκου των υλικών. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με την εξίσωση (3.15), είναι δύσκολο να συμπεράνει κανείς αν η ένταση του πεδίου γύρω από τη ράβδο, εντός του υλικού, είναι πάντοτε υψηλότερη από την αντίστοιχη της ράβδου στο φυσικό έδαφος, καθώς αυτό εξαρτάται και από τον τύπο του υπό μελέτη εδάφους και από το εκάστοτε εξεταζόμενο βελτιωτικό υλικό γειώσεως.

3.6.4 Προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ράβδων εντός βελτιωτικών υλικών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της τάσης $u(t)$ και του ρεύματος $i(t)$, υπό κρουστική καταπόνηση, καθώς και του προσδιορισμού της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης, αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη κυκλωματικού μοντέλου προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς των κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, όταν είναι εγκιβωτισμένα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης. Η κατασκευή του προτεινόμενου κυκλώματος στηρίχθηκε στην κυκλωματική προσέγγιση του

φαινομένου του ιονισμού εδάφους [71], η οποία προέκυψε από αντίστοιχα πειράματα σε μοντέλα υπό κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα βελτιώνεται με τη χρήση νέων προτεινόμενων εξισώσεων για την κρουστική σύνθετη αντίσταση, μέσα από μετρήσεις σε πραγματικού μεγέθους ηλεκτρόδια εγκατεστημένα στο ύπαιθρο και προτείνεται ένα νέο τροποποιημένο κύκλωμα για συστήματα γείωσης εντός βελτιωτικών υλικών.

Σχεδιάστηκε στο ATP EMTP το κύκλωμα της αντίστοιχης πειραματικής διάταξης, η οποία εικονίζεται στο Σχήμα 3.19, αρχικά για το ηλεκτρόδιο G₁ χωρίς βελτιωτικό υλικό. Το κύκλωμα προσομοίωσης εικονίζεται στο Σχήμα 3.32.



Σχήμα 3.32: Κυκλωματικό μοντέλο προσομοίωσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου στο έδαφος.

Οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος της γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, είναι οι ακόλουθες: $C=30\mu F$, $R_C=0,66567\Omega$, $L=0,00193mH$, $R=0,208\Omega$, $R_1=50k\Omega$, $R_2=50\Omega$, $R_{shunt}=1m\Omega$. Η συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας είναι $f=50Hz$ και οι χρονικές παράμετροι έναρξης και τερματισμού είναι $startA=-5s$ και $stopA=100s$. Ο υπολογισμός της τιμής του επαγωγικού στοιχείου L_{rod} έγινε από τη σχέση (3.16) [72]:

$$L_{rod} = 2l \cdot \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \cdot 10^{-7} [H] \quad (3.16)$$

όπου l και d το μήκος και η διάμετρος του ηλεκτροδίου αντίστοιχα. Μετά από αντικατάσταση των τιμών στην παραπάνω εξίσωση, προέκυψε $L_{rod}=1,76\mu H$. Η δε τιμή του επαγωγικού στοιχείου L_d , το οποίο αντιπροσωπεύει τη χρονική καθυστέρηση, προσδιορίζεται με δοκιμές κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης και το διάστημα διακύμανσης της τιμής του είναι το $[0,4...0,9]mH$.

Οι χρονικές παράμετροι των διακοπών που χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργία του κυκλώματος προσομοίωσης είναι:

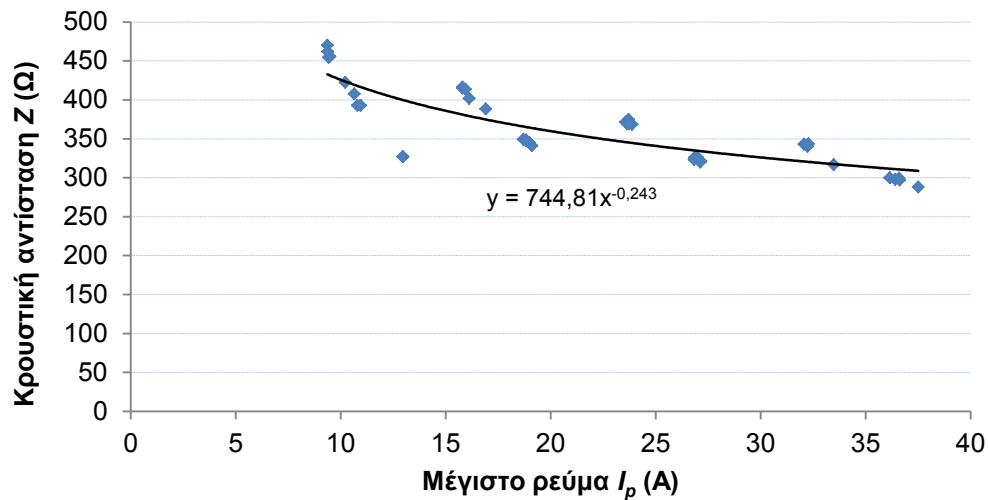
Πίνακας 3.6: Χρονικές παράμετροι των διακοπών του κυκλώματος προσομοίωσης.

	T_{sw1}	T_{sw2}	T_{sw3}
T_{-cl} (s)	-1	Ιούλιος: $2 \cdot 10^{-5}$ Νοέμβριος: $1,6 \cdot 10^{-5}$	0
T_{-op} (s)	0	0	-1

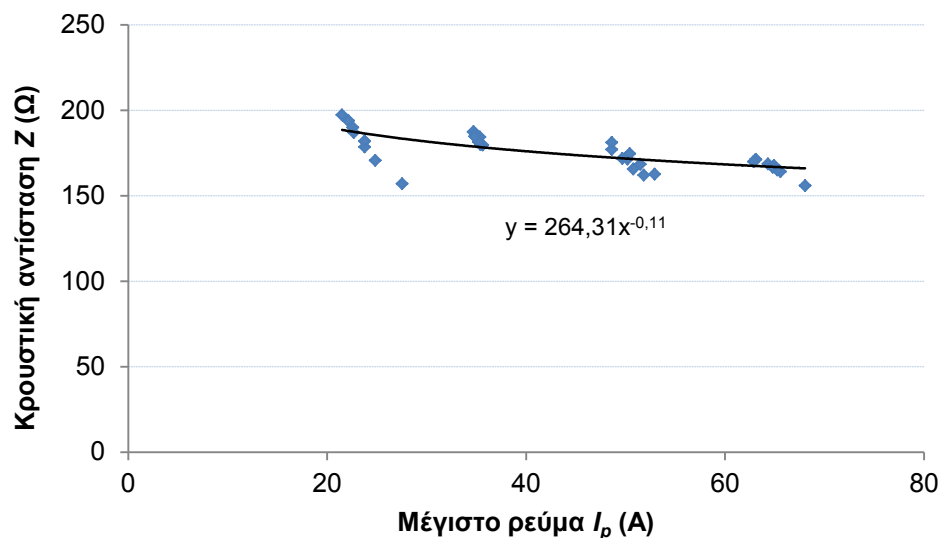
Η κρουστική αντίσταση Z εισάγεται στο κύκλωμα υπό τη μορφή εκθετικών σχέσεων, οι οποίες προσδιορίζονται με τη βοήθεια των πειραματικών τιμών των $u(t)$ και $i(t)$, παραδείγματα των οποίων παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 3.20–3.24. Ειδικότερα, για κάθε παλμογράφημα κρούσης και για όλα τα επίπεδα της τάσης φόρτισης (θετικής και αρνητικής πολικότητας), υπολογίζεται η τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης από τη σχέση (3.14). Στη συνέχεια και από το διάγραμμα διασποράς των τιμών (I_p, Z), προσδιορίζεται η εκθετική συνάρτηση $Z(I_p)$, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του ρεύματος προσομοίωσης. Στους ακόλουθους πίνακες τιμών παρατίθενται, ενδεικτικά, μερικές μόνο από τις πειραματικές μετρήσεις των $u(t_{i=\hat{I}_p})$ και \hat{I}_p και οι αντίστοιχες τιμές της Z από το ηλεκτρόδιο G_1 , για τις δύο χρονικές περιόδους μετρήσεων. Το σύνολο των μετρήσεων παρατίθεται στο Παράρτημα Π.1.

Πίνακας 3.7: Μέρος από τις πειραματικές τιμές για τα μεγέθη $u(t_{i=\hat{I}_p})$, \hat{I}_p και Z .

Ιούλιος			Νοέμβριος		
$u(t_{i=\hat{I}_p})$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_{i=\hat{I}_p})$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)
8760	26,867	326,05	8400	51,84	162,037
8680	27,123	320,03	8533	49,68	171,7593
8680	26,836	323,44	8600	50,184	171,3694
8720	27,153	321,14	8600	52,92	162,5094
8800	26,990	326,05	8640	50,0763	172,5367
10840	36,151	299,85	10840	64,3063	168,5682
10800	37,500	288,00	10880	64,9399	167,5395
10960	36,594	299,51	10760	65,5537	164,1402
10840	36,399	297,81	10600	68,04	155,7907
10880	36,615	297,15	10760	65,2351	164,9419



Σχήμα 3.33: Εξίσωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 τον Ιούλιο.



Σχήμα 3.34: Εξίσωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 τον Νοέμβριο.

Όπως προκύπτει και από τα γραφήματα των Σχημάτων 3.33 και 3.34, οι εξισώσεις της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, για την περίπτωση του ηλεκτροδίου στο έδαφος, είναι:

- $Z=744,81 \cdot I^{0,243}$ για τον μήνα Ιούλιο και
- $Z=264,31 \cdot I^{0,11}$ για τον μήνα Νοέμβριο

Τέλος, στο EMTP καταχωρούνται και οι τιμές της αντίστασης μόνιμης κατάστασης των ηλεκτροδίων, όπως έχουν μετρηθεί την ημέρα των κρουστικών δοκιμών, οι οποίες χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα ως αρχικές τιμές για τη

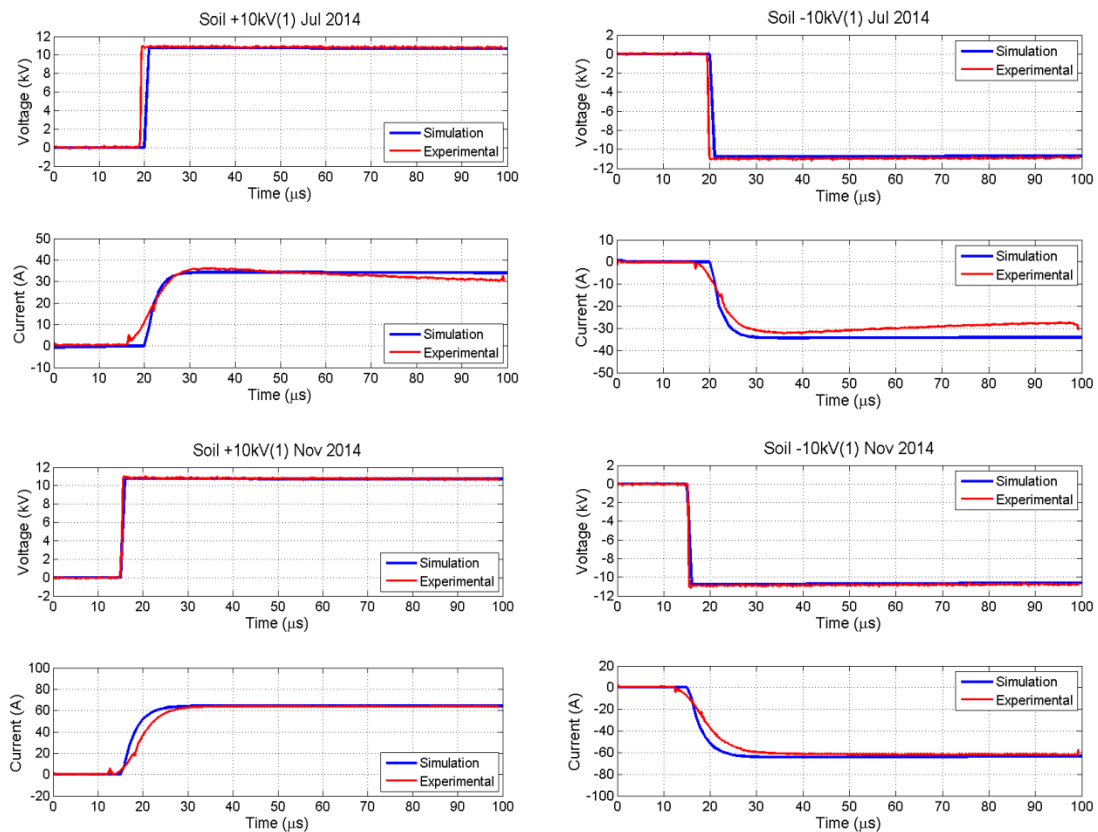
διαδικασία της προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι η χωρητικότητα του δοκιμίου (C_{soil}) δε λαμβάνεται υπ' όψιν στο κύκλωμα του ηλεκτροδίου, αφού σε υψηλής τιμής μεταβατικά ρεύματα κυριαρχεί το ρεύμα ωμικού χαρακτήρα και η χωρητικότητα δεν παίζει σημαντικό ρόλο [71].

Οι απαιτούμενες παράμετροι του κυκλώματος στο Σχήμα 3.32, στην πλευρά του δοκιμίου για το G_1 (έδαφος), είναι οι εξής:

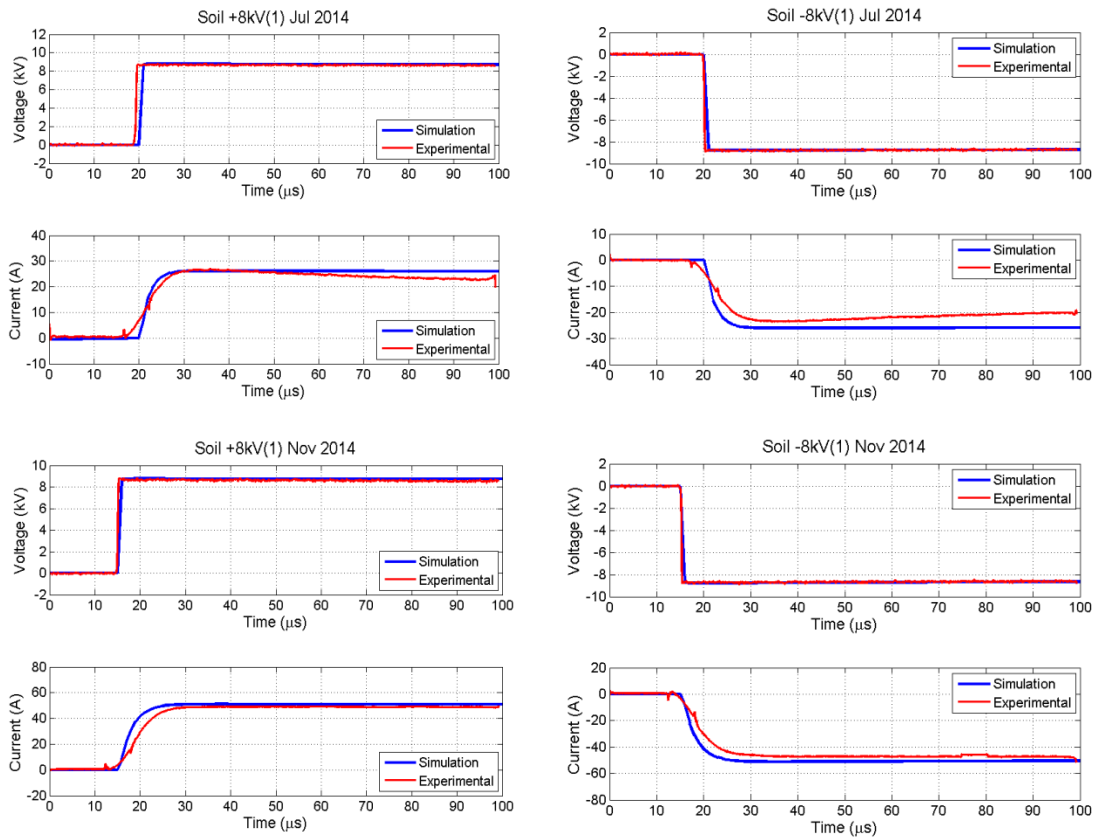
Πίνακας 3.8: Παράμετροι κυκλώματος προσομοίωσης για το ηλεκτρόδιο G_1 .

	Ιούλιος	Νοέμβριος
R_{ss} (Ω)	486	228,6
$Z(i)$	$744,81 \cdot I^{-0,243}$	$264,31 \cdot I^{-0,11}$
L_d (mH)	0,4	0,4

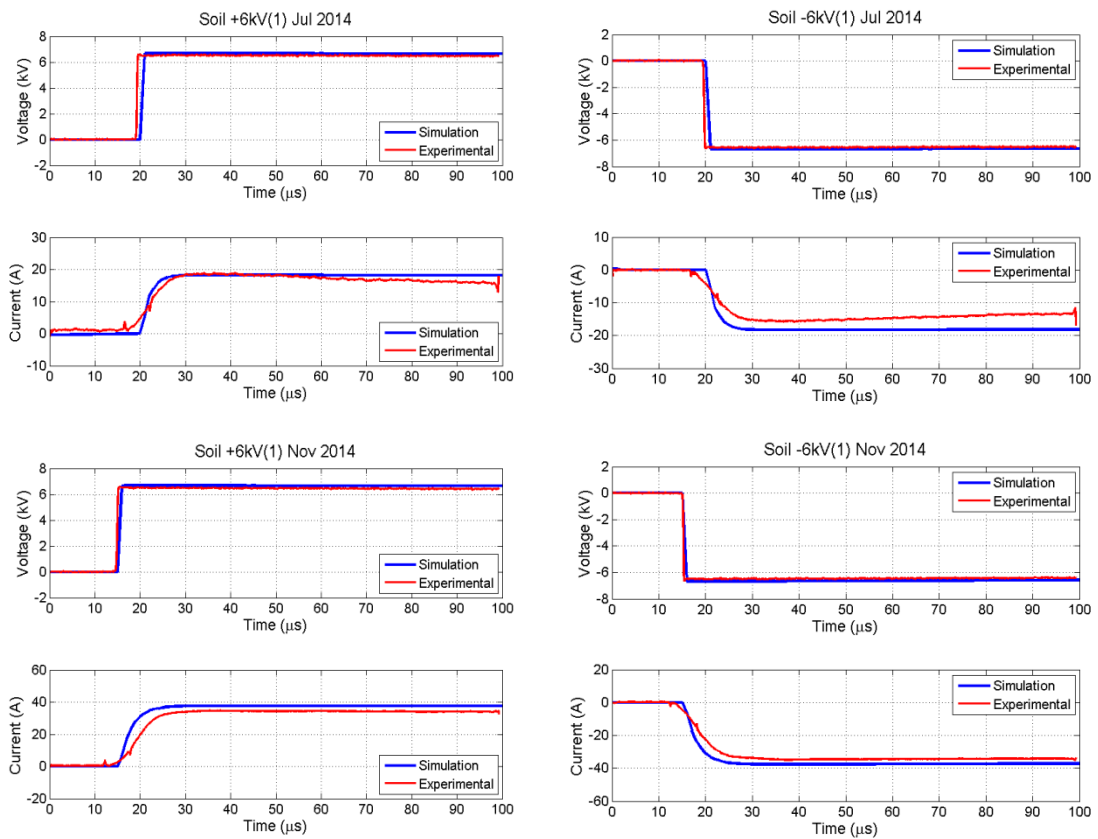
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από το προτεινόμενο κύκλωμα παρατίθενται ακολούθως στα Σχήματα 3.35–3.38.



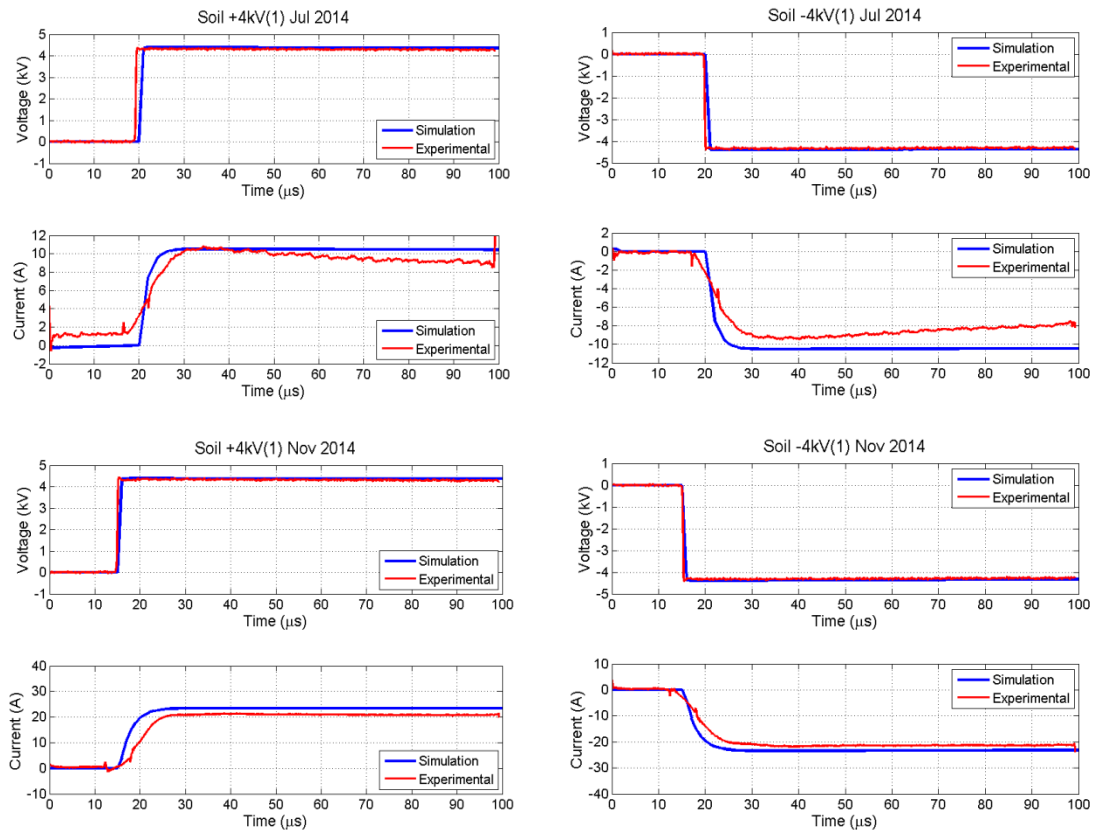
Σχήμα 3.35: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 10kV$.



Σχήμα 3.36: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 8kV$.

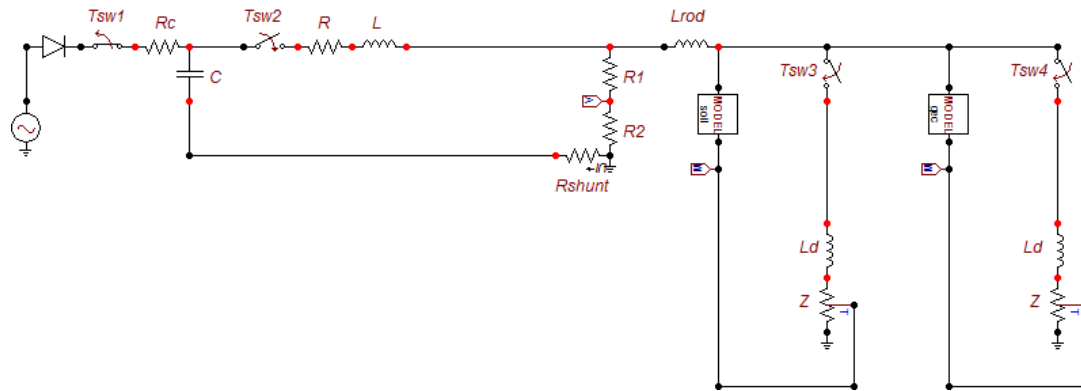


Σχήμα 3.37: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 6kV$.



Σχήμα 3.38: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_1 για $\pm 4kV$.

Με παρόμοια διαδικασία, το κυκλωματικό μοντέλο, που προτείνεται για τα εγκιβωτισμένα στα βελτιωτικά υλικά ηλεκτρόδια, αποτελείται από δύο παράλληλους κλάδους σύνθετης αντίστασης, έναν που αντιστοιχεί στο έδαφος και έναν στο βελτιωτικό υλικό. Σημειώνεται ότι οι χρονικές παράμετροι των διακοπών T_{sw1} και T_{sw3} παραμένουν ίδιες μ' αυτές που καταγράφονται στον Πίνακα 3.6, ο νέος διακόπτης T_{sw4} είναι ίδιος με τον T_{sw3} και λαμβάνει τις ίδιες τιμές μ' αυτόν, ενώ ο T_{sw2} διατηρεί την ίδια τιμή που έχει στον Πίνακα 3.6 για τον Ιούλιο και μεταβαλλόμενες τιμές για τον Νοέμβριο, οι οποίες καταχωρούνται στον Πίνακα 3.9. Επίσης, ο κλάδος του εδάφους διατηρεί τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά μ' αυτά που προσδιορίστηκαν από το κύκλωμα του Σχήματος 3.32, ενώ στο ακόλουθο κύκλωμα, τίθεται $L_{rod}=0,953416\mu H$. Το προτεινόμενο κύκλωμα εικονίζεται στο Σχήμα 3.39 και οι τιμές των παραμέτρων για κάθε υλικό και εποχή καταχωρούνται στον Πίνακα 3.9.

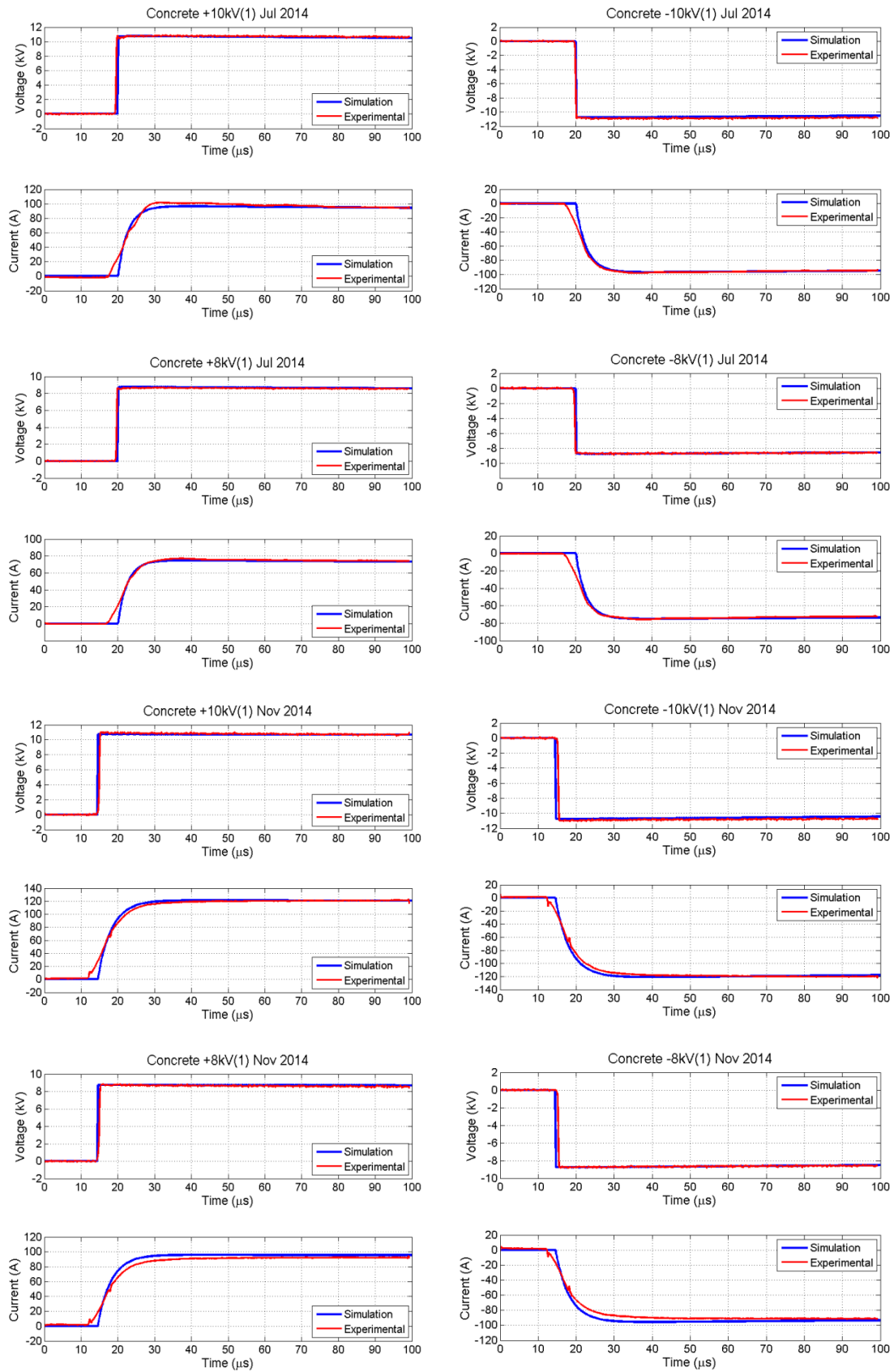


Σχήμα 3.39: Κυκλωματικό μοντέλο προσομοίωσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου σε βελτιωτικό υλικό γείωσης.

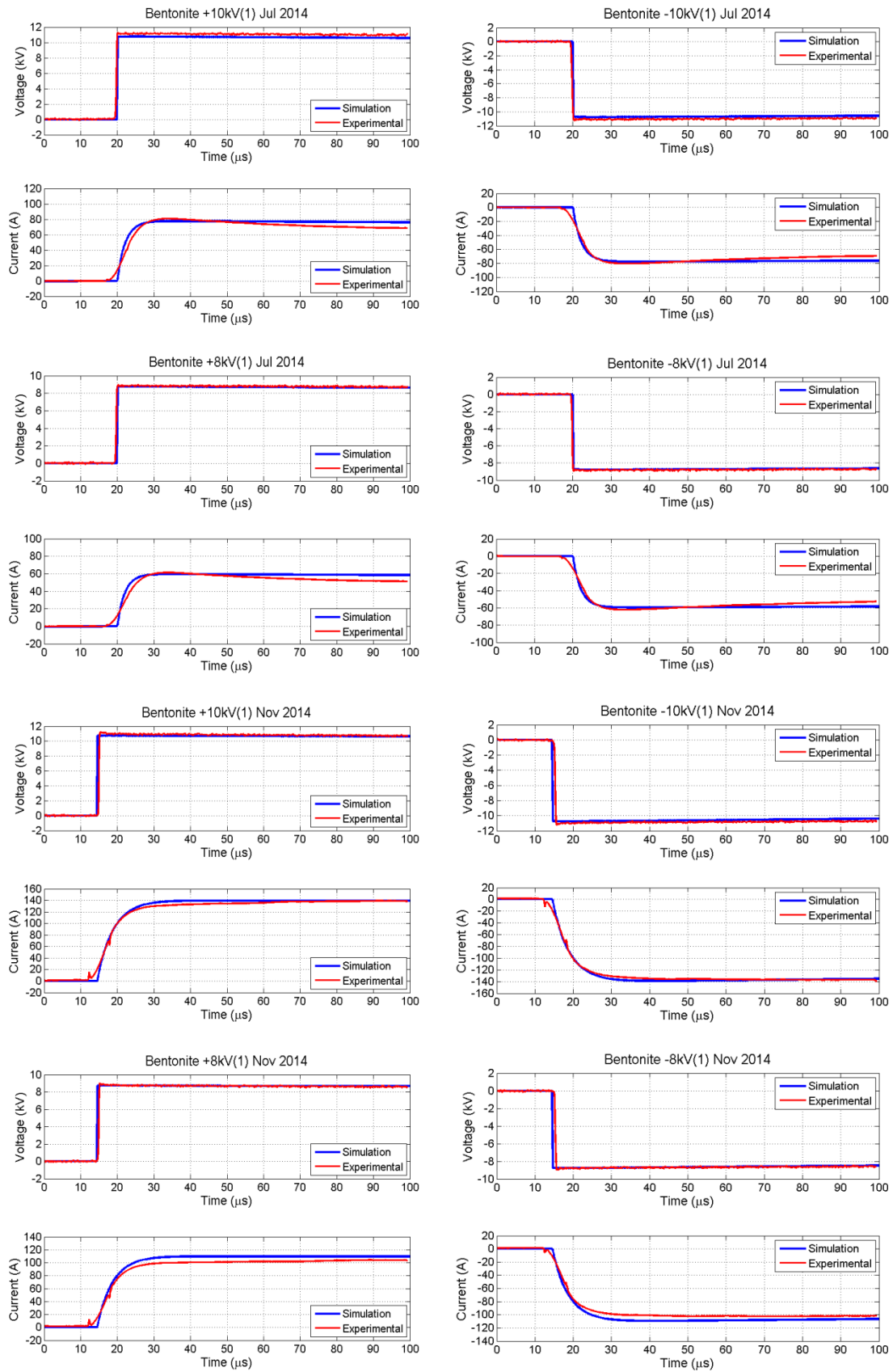
Πίνακας 3.9: Παράμετροι κυκλώματος προσομοίωσης για τα ηλεκτρόδια $G_2 - G_5$.

	Ιούλιος			Νοέμβριος			
	R_{ss} (Ω)	$Z(i)$	L_d (mH)	R_{ss} (Ω)	$Z(i)$	L_d (mH)	T_{sw2} (s)
G_2 (σκυρόδεμα)	135,2	$301 \cdot I^{0,16}$	0,5	101,2	$350 \cdot I^{0,15}$	0,6	$1,45 \cdot 10^{-5}$
G_3 (μπεντονίτης)	170,8	$520 \cdot I^{0,21}$	0,5	103,9	$322 \cdot I^{0,19}$	0,6	$1,45 \cdot 10^{-5}$
G_4 (Υλικό A)	196	$465 \cdot I^{0,10}$	0,9	116,7	$340 \cdot I^{0,14}$	0,6	$1,4 \cdot 10^{-5}$
G_5 (Υλικό B)	102,7	$305 \cdot I^{0,14}$	0,9	55,1	$260 \cdot I^{0,19}$	0,6	$1,6 \cdot 10^{-5}$

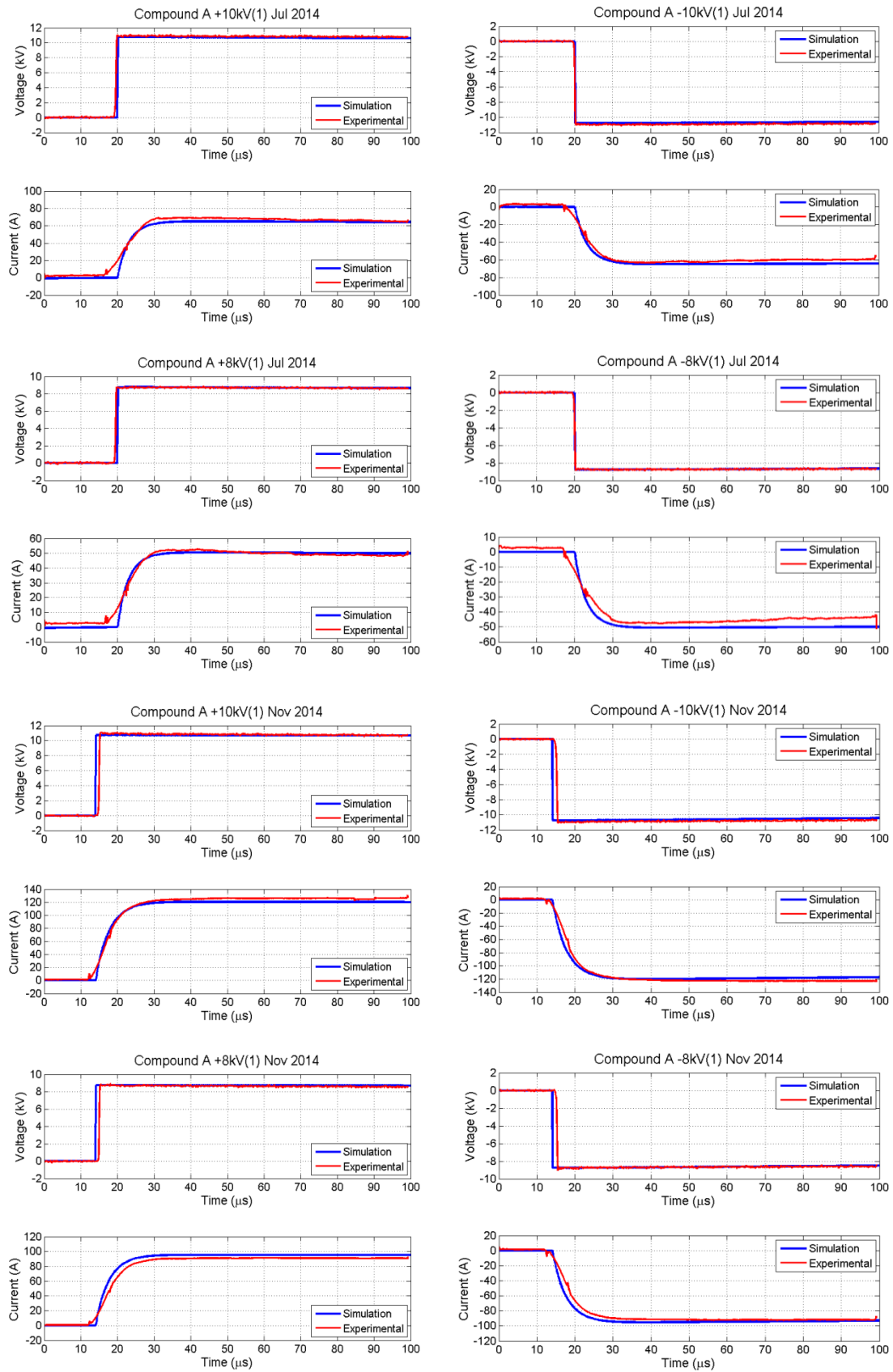
Ακολούθως παρατίθενται τα διαγράμματα $u(t)$ και $i(t)$ των προσομοιώσεων για τα ηλεκτρόδια με τα τέσσερα (4) βελτιωτικά υλικά, με τάση φόρτισης $\pm 8kV$ και $\pm 10kV$. Περισσότερα διαγράμματα, συμπεριλαμβανομένων και των υπόλοιπων επιπέδων φόρτισης, παρατίθενται στο Παράρτημα Π.1.



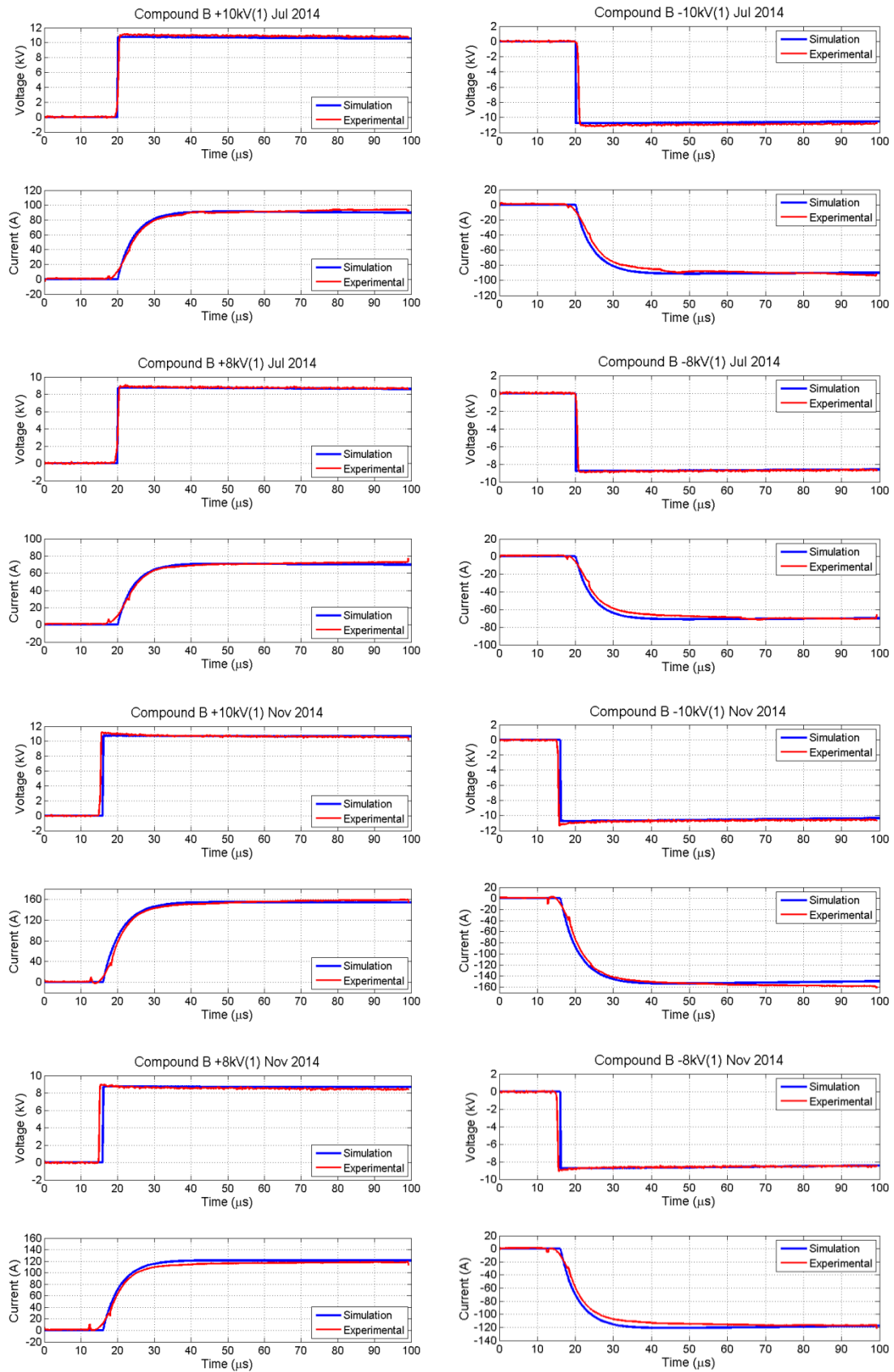
Σχήμα 3.40: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_2 .



Σχήμα 3.41: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G₃.

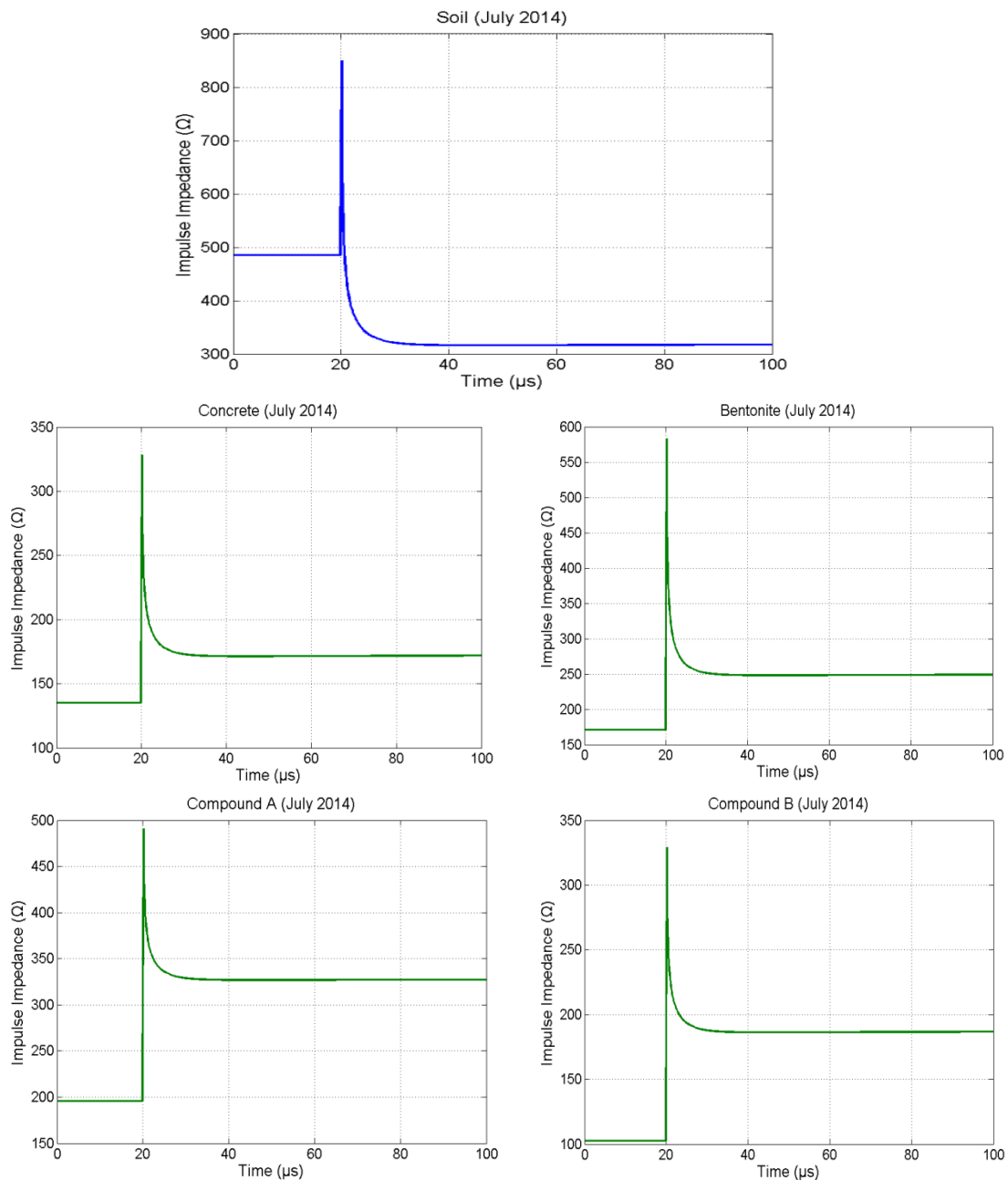


Σχήμα 3.42: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G₄.



Σχήμα 3.43: Διαγράμματα προσομοίωσης $u(t)$ και $i(t)$ από το ηλεκτρόδιο G_5 .

Τέλος, από τα αποτελέσματα του κυκλώματος ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μορφή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, όπως αυτή προκύπτει από το μοντέλο προσομοίωσης, κατά την εκδήλωση του μεταβατικού φαινομένου. Στο Σχήμα 3.44 φαίνονται τα διαγράμματα της αντίστασης σε συνάρτηση με τον χρόνο για όλα τα ηλεκτρόδια τον μήνα Ιούλιο.



Σχήμα 3.44: Διαγράμματα $Z(t)$ από το μοντέλο προσομοίωσης σε όλα τα ηλεκτρόδια.

3.6.5 Συμπεράσματα

Τα παραπάνω διαγράμματα τάσης και ρεύματος καταδεικνύουν την ικανότητα του προτεινόμενου κυκλώματος να αναπαράγει με ακρίβεια τις μετρούμενες μη γραμμικότητες που εμφανίζονται στις κυματομορφές των κρουστικών ρευμάτων. Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος που προκύπτουν από τη διαδικασία προσομοίωσης του κυκλώματος προσεγγίζουν με πολύ καλή ακρίβεια τις καταγραφείσες με παλμογράφο, από τις κρουστικές δοκιμές, αντίστοιχες κυματομορφές. Αυτό, μάλιστα, παρατηρείται σ' όλα τα επίπεδα τάσης θετικής και αρνητικής πολικότητας που χρησιμοποιήθηκαν στη διεξαγωγή του πειράματος.

Η χρήση των βελτιωτικών υλικών γείωσης, σαφώς, έχει σημαντική επίδραση στην τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, αφού τόσο τα παλμογραφήματα των κρουστικών δοκιμών, όσο και τα αποτελέσματα του προτεινόμενου κυκλωματικού μοντέλου, με την παρουσία δευτέρου παράλληλου κλάδου στην πλευρά του δοκιμίου, δείχνουν την άνοδο στην τιμή του κρουστικού ρεύματος, με άμεση συνέπεια την πτώση της σύνθετης αντίστασης γείωσης. Μια πτώση, που φαίνεται να είναι καθοριστικής σημασίας για τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, στην περιοχή γύρω από τα συστήματα γείωσης, σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος.

Βιβλιογραφία

- [1] Megger, “Getting down to earth: A practical guide to earth resistance testing”, Distributed by MeterCenter, pp. 1–77, November 2005.
- [2] R. B. Carpenter, Jr and J. A. Lanzoni, “Designing for a low resistance earth interface (grounding)”, LEC Publications, pp. 1–15, October 2007.
- [3] G. Eduful, J. E. Cole and P.Y. Okyere, “Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance”, Proceedings of the 2nd International Conference on Adaptive Science and Technology (ICAST 2009), Accra, Ghana, January 14th–16th, 2009, pp. 140–145.
- [4] IEC/EN 62561-7:2012, “Lightning Protection System Components (LPSC)-Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds, January 2012.
- [5] ISO 4689-3:2015, “Iron ores – Determination of sulfur content – Part 3: Combustion/infrared method”.
- [6] ISO 14869-1:2001, “Soil quality – Dissolution for the determination of total element content – Part 1: Dissolution with hydrofluoric and perchloric acids”.
- [7] ASTM G57-06:2012, “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method”.
- [8] ASTM G59-97, “Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements”.
- [9] ASTM 120-89:1999, “Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements”.
- [10] IEEE Std 142-2007, “IEEE Recommended Practice of Grounding for Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE Green Book, November 30th, 2007.
- [11] J. R. Eaton, “Grounding electric circuits effectively”, Bulletin 25T2, James G. Biddle Company, pp. 2–19, 1941.
- [12] “Practical Grounding”, Copperweld Steel Company, Glassport, Pa., 1957.
- [13] 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, pp. 1016–1023, December 1960.
- [14] I. H. Sanik, Bull Scheiz Electrotechn., Vol 44, No. 25, s. 1052, 1953.

- [15] E. Higashimura, Y. Sekimoto and E. Hatabu, “Earth resistance-reducing agent and method of reducing earth resistance by use of same”, United States Patent, Appl. No. 212.658, publ. No. US3857991 A, December 31st, 1974.
- [16] E. J. Fagan and 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, pp. 337–348, July/August 1970.
- [17] H. Kutter and W. Lange, “Grounding improvement by using bentonite”, *Elektrie*, Vol. 21, No. 11, pp.421–424, 1967.
- [18] K. L. Mc 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, July 20th–25th, 1975.
- [19] W. R. Jones, “Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1343–1346, July 1980.
- [20] M. Veledar, Z. Timic, S. Skok and Z. First, “Improvement of grounding properties by using bentonite”, Proceedings of the CIGRE Paris Conference, paper 22-06, 1982.
- [21] ANSI/IEEE Std 80-2013, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, May 2015.
- [22] T. Sato, T. Morimoto and Y. Kiyotani, “Decrement and ground resistance by the chemical treatment”, *Electrical Communication Laboratory Technical Journal*, Vol. 16, pp. 1211–1215, 1967. (in Japanese)
- [23] Y. Miyamoto, K. Tsurumaki and S. Sakagami, “Improving grounding technique in rocky soil”, The Institute of Electrical Engineers of Japan Technical Report, PE-87-18, 1987. (in Japanese)
- [24] K. Takeuchi, Y. Miyamoto, K. Tsurumaki and S. Sakagami, “Application of ground resistance reducing materials to model grounding mesh”, The Institute of Electrical Engineers of Japan Technical Report, PE-89-148, 1989. (in Japanese)
- [25] Y. Huai-Liang, “Research on the mechanism of grounding resistance-reducing agent and the used quantity”, Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, July 8th–12th, 1991, Vol. 2, pp. 1230–1233.

- [26] 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, No. 5, pp. 68–78, May 1994. (Translated from *Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi*, Vol. 76-B-II, No. 3, pp. 173–180, March 1993).
- [27] M. B. Kostic, Z. R. Radakovic, N. S. Radovanovic and M. R. Tomasevic-Canovic, “Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud”, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 146, No. 1, pp. 1–6, January 1999.
- [28] Z. R. Radakovic and M. B. Kostic, “Behaviour of grounding loop with bentonite during a ground fault at an overhead line tower”, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 148, No. 4, pp. 275–278, July 2001.
- [29] Q. Meng, J. He, F. P. Dawalibi and J. Ma, “A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp. 911–916, July 1999.
- [30] H. E. Martinez, E. L. Fuentealba, L. A. Cisternas, H. R. Galleguillos, J. F. Kasaneva and O. A. de la Fuente, “A new artificial treatment for the reduction of resistance in ground electrode”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, pp. 601–608, April 2004.
- [31] L.-H. Chen, J.-F. Chen, T.-J. Liang, and W.-I Wang, “A study of grounding resistance reduction agent using granulated blast furnace slag”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 973–978, July 2004.
- [32] S.-D. Chen, “Granulated blast furnace slag used to reduce grounding resistance”, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 151, No. 3, pp. 361–366, May 2004.
- [33] S.-D. Chen, L.-H. Chen, C.-K. Cheng and J.-F. Chen, “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, art. 7, pp. 1–19, September 2006.
- [34] L.-H. Chen, J.-F. Chen, T.-J. Liang and W.-I Wang, “A research on used quantity of ground resistance reduction agent for ground systems”, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 20, No. 4, pp. 408–421, May 2010.

- [35] A. A. Al-Arainy, Y. Khan, M. I. Qureshi, N. H. Malik and F. R. Pazheri, “Optimized pit configuration for efficient grounding of the power system in high resistivity soils using low resistivity materials”, Proceedings of the 4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Kuala Lumpur, Malaysia, April 19th–21st, 2011.
- [36] A. A. Al-Arainy, N. H. Malik, M. I. Qureshi and Y. Khan, “Grounding pit optimization using low resistivity materials for applications in high resistivity soils”, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 12, No. 1, art. 3, 2011, pp. 1–18.
- [37] W. Judson and F. D' Alessandro, “Electrical and mechanical properties of a selection of ground enhancing compounds”, Proceedings of the VIII International Symposium on Lightning Protection, Sao Paulo, Brazil, November 21st–25th, 2005.
- [38] C. Romualdo-Torres, R. Velázquez-Sánchez and J. Loza-Rodriguez, “The application of backfills for improving the grounding resistance of power systems”, Proceedings of the 2005/2006 IEEE PES, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA, May 21st–24th, 2006, pp. 947–950.
- [39] A. Habjanič, 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, pp. 1257–1260, April 2007.
- [40] N. Kumarasinghe, “A low cost lightning protection system and its effectiveness”, Proceedings of the 20th International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, USA, April 21st–23rd, 2008.
- [41] G. Eduful, J. E. Cole and F. M. Tetteh, “Palm Kernel Oil Cake as an alternative to earth resistance-reducing agent”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 4, No. 1, pp. 115–121, 2009.
- [42] P. Y. Okyere, G. Eduful 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, pp. 126–130, August 2009.
- [43] G. Eduful, J. E. Cole and P. Y. Okyere, “Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance”, Proceedings of

- the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2009), San Francisco, USA, October 20th–22nd, 2009, pp. 514–519.
- [44] A. D. Galván, E. E. Gaona and G. G. Pretelín, “Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods”, Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA), Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009, pp. 335–341.
- [45] A. D. Galván, G. G. Pretelín and E. E. Gaona, “Practical evaluation of ground enhancing compounds for high soil resistivities”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1233-1–1233-4.
- [46] A. D. Galván, D. M. Soto and J. M. G. Malo, “Evaluation under controlled conditions of ground enhancing compounds used in grounding rods”, Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA), Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009, pp. 343–346.
- [47] J. M. G. Malo, D. M. Soto and A. D. Galván, “Corrosion assessment of a ground electrode in contact with ground enhancing compounds”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1232-1–1232-2.
- [48] J. Jasni, L. K. Siow, M. Z. A. Ab Kadir and W. F. Wan Ahmad, “Natural materials as grounding filler for lightning protection system”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1101-1–1101-6.
- [49] W. F. Wan Ahmad, M. S. Abdul Rahman, J. Jasni, M. Z. A. Ab Kadir and H. Hizam, “Chemical enhancement materials for grounding purposes”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1106-1–1106-6.
- [50] C. Gomes, C. Lalitha and C. Priyadarshane, “Improvement of earthing systems with backfill materials”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1086-1–1086-9.
- [51] C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir, Chamath. L. Kottachchi and S. C. Lim, “Industrial wastes and natural substances for improving electrical earthing systems”, International Journal of Electrical Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 39–47, 2014.

- [52] S. C. Lim, C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir and S. D. Buba, “Preliminary results of the performance of grounding electrodes encased in bentonite-mixed concrete”, Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012.
- [53] S. C. Lim, C. Gomes and M. Z. A. Ab Kadir, “Characterizing of bentonite with chemical, physical and electrical perspectives for improvement of electrical grounding systems”, International Journal of Electrochemical Science, Vol. 8, pp. 11429–11447, August 2013.
- [54] S. C. Lim, M. Z. A. Ab Kadir, C. Gomes and N. Azis, “Steady state performance of improvised Ufer grounding practice”, Proceedings of the 32nd International Conference on Lightning Protection (ICLP 2014), Shanghai, China, October 11th–18th, 2014, pp. 572–580.
- [55] A. K. Pountourelis, G. D. Peppas and E. C. Pyrgioti, “An investigation of nonconventional grounding installations”, Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen Czech Republic, August 23rd–28th, 2015.
- [56] J. Liu, L. Y. Ye, X. P. Zhang and G. R. Xia, “The impulse property of grounding device covered with long-term chemical low resistivity material under high impulse current”, High Voltage Technique, No. 4, pp. 1–8, 1981. (in Chinese)
- [57] Y. Tu, J. He and R. Zeng, “Influences of Low-Resistivity-Materials on lightning impulse properties of grounding devices”, Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2004), Avignon, France, September 13th–16th, 2004.
- [58] Y. Tu, J. He and R. Zeng, “Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, pp. 1706–1713, July 2006.
- [59] N. M. Nor, “Effect of enhancement materials when mixed with sand under high impulse conditions”, Proceedings of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Denpasar, Bali, Indonesia, June 26th–30th, 2006, pp. 916–919.
- [60] N. M. Nor, A. Haddad and H. Griffiths, “Performance of earthing systems of low resistivity soils”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp. 2039–2047, October 2006.

- [61] N. Kokkinos, J. Koutsoubis, A. Rousseau and D. Kokkinos, “Impulse testing of soil samples for lightning earthing design”, Proceedings of the 29th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2008), Uppsala, Sweden, June 23rd–26th, 2008, pp. 5a-6-1–5a-6-10.
- [62] D. Kokkinos, N. Kokkinos, J. Koutsoubis and A. Rousseau, “High frequency behavior of soil improver compounds”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1400-1–1400-5.
- [63] V. Laverde, M. Z. A. Ab Kadir and C. Gomes, “Performance of backfill materials under impulse and AC testings”, Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, pp. 121-1–121-7.
- [64] W. Hu, S. Yu, R. Cheng and J. He, “A testing research on the effect of conductive backfill on reducing grounding resistance under lightning”, Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, pp. 155-1–155-4.
- [65] S. C. Lim, C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir, G. Nourirad and Z. A. Malek, “Behaviour of backfill materials for electrical grounding systems under high voltage conditions”, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 10, No. 6, pp. 811–826, June 2015.
- [66] G. Fragogiannis, N. Papatheodorou and S. Stamataki, “Evaluation of thermal performance of ground-Source Energy Systems. A geophysics supported approach”, Proceedings of the World Renewable Energy Congress (WREC), Glasgow, Scotland, UK, July 21st–25th, 2008.
- [67] <http://www.geo.auth.gr>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας
- [68] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Performance of ground enhancing compounds during the year”, Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, paper 231.
- [69] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds”, Proceedings of the 32nd International Conference on Lightning Protection (ICLP 2014), Shanghai, China, October 11th–18th, 2014, pp. 359–363.

- [70] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds”, *Electric Power Systems Research*, 2015, DOI: 10.1016/j.epsr.2015.11.032.
- [71] N. M. Nor, A. Haddad and H. Griffiths, “Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 1, pp. 353–361, January 2006.
- [72] I. F. Gonos, F. V. Topalis and I. A. Stathopoulos, “Transient impedance of grounding rods”, 11th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 1999), London, UK, August 23rd-27th, 1999, Vol. 2, pp. 272–275.

Κεφάλαιο 4

Υπολογιστική νοημοσύνη στα συστήματα γείωσης

Όλες οι ακριβείς επιστήμες κυριαρχούνται από την ιδέα της προσέγγισης.

Bertrand Russell

Η υπολογιστική νοημοσύνη είναι στην ουσία μία συλλογή αλγορίθμων και μεθόδων για την αντιμετώπιση προβλημάτων, που με τις προϋπάρχουσες συμβατικές τεχνικές είναι πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να αντιμετωπιστούν. Σ' αυτήν την ενότητα γίνεται αναφορά σε τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα wavelet νευρωνικά δίκτυα και η επαγωγική μηχανική μάθηση, των οποίων γίνεται ή σχεδιάζεται να γίνει εφαρμογή στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

4.1 Εισαγωγή

Η υπολογιστική νοημοσύνη βοηθά στην εξαγωγή πληροφορίας από βάσεις δεδομένων σε διάφορες μορφές. Στόχος της υπολογιστικής νοημοσύνης είναι να μοντελοποιήσει, μέσω αλγορίθμων H/Y , τον τρόπο με τον οποίο μαθαίνουν οι άνθρωποι και να χρησιμοποιήσει τα μοντέλα στην επίλυση πραγματικών προβλημάτων.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες η υπολογιστική νοημοσύνη έχει αναπτυχθεί πάρα πολύ, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο εφαρμογών. Ίσως ο σημαντικότερος λόγος να είναι η μεγάλη αύξηση σε υπολογιστική ισχύ. Η πρόοδος της επιστήμης των υπολογιστών επιτρέπει να εφαρμόζονται πολύπλοκοι αλγόριθμοι υπολογιστικής νοημοσύνης σε πρακτικά προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Έτσι, οι αλγόριθμοι αυτοί επιτρέπουν να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της υπάρχουσας υπολογιστικής ισχύος αξιοποιώντας με τον καλύτερο τρόπο την πληροφορία που εμπεριέχεται σε βάσεις δεδομένων [1].

Οι τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης προσπαθούν, με δεδομένο ένα σύνολο από παραδείγματα εισόδων/εξόδων (σύνολο μάθησης), είτε να εξάγουν γενικούς κανόνες για τη σχέση εισόδων/εξόδων, ή να προβλέπουν τις τιμές

εξόδου για οποιεσδήποτε τιμές εισόδου (οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στο σύνολο μάθησης).

Στην περιοχή των συστημάτων γείωσης των εγκαταστάσεων η εφαρμογή της υπολογιστικής νοημοσύνης βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί μόνο κάποια νευρωνικά δίκτυα για την εκτίμηση είτε της ειδικής αντίστασης εδάφους, είτε της αντίστασης γείωσης. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται αναφορά σε κάποιες τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης που έχουν εφαρμοστεί στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και κάποιες σχεδιάζεται να εφαρμοστούν σε επόμενο στάδιο.

4.2 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

4.2.1 Εισαγωγή

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) είναι κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης και αποτελούν μία σχετικά νέα περιοχή στις φυσικές επιστήμες, αφού έχουν αναπτυχθεί σε διεθνές επίπεδο μόνο κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Ωστόσο, η περιοχή αυτή έχει παρουσιάσει μεγάλη άνθηση, η οποία διαφαίνεται από τη μεγάλη ανάπτυξη που έχει παρατηρηθεί, από τον αριθμό των επιστημόνων που ασχολούνται με αυτά τα θέματα και βέβαια από τα πολύ σημαντικά επιτεύγματα που έχουν συμβάλλει στο να γίνουν τα νευρωνικά δίκτυα γνωστά σ' ένα ευρύτερο κύκλο. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι πρώτες αρχές και λειτουργίες τους βασίζονται και εμπνέονται από το νευρικό σύστημα των ζώων οργανισμών, αλλά η μελέτη και η χρήση τους έχει προχωρήσει πολύ πέρα από τους βιολογικούς οργανισμούς.

Ουσιαστικά δημιουργήθηκε μια νέα περιοχή που έχει αποκοπεί τελείως από τη βιολογία και σήμερα τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για να λύσουν κάθε είδους προβλήματα με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η φιλοσοφία τους όμως είναι διαφορετική από τον τρόπο με τον οποίο δουλεύουν οι κλασικοί υπολογιστές. Η λειτουργία τους προσπαθεί να συνδυάσει τον τρόπο σκέψης του ανθρώπινου εγκεφάλου με τον αφηρημένο μαθηματικό τρόπο σκέψης. Έτσι στα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται τέτοιες ιδέες, όπως π.χ. «ένα δίκτυο μαθαίνει και εκπαιδεύεται, θυμάται ή ξεχνά μια αριθμητική τιμή» κτλ.,

πράγματα που μέχρι τώρα αποδίδονταν μόνο στην ανθρώπινη σκέψη. Βέβαια, μπορούν και χρησιμοποιούν επιπλέον και περίπλοκες μαθηματικές συναρτήσεις και κάθε είδους εργαλεία από τη μαθηματική ανάλυση [2].

4.2.2 Ιστορική αναδρομή

Η περιοχή των νευρωνικών δικτύων ξεκίνησε με την εργασία των Mc Culloch και Pitts το 1943, οι οποίοι μελέτησαν ένα μοντέλο του βασικού κυττάρου του ανθρώπινου εγκεφάλου, το οποίο ονόμασαν νευρώνα και σήμερα είναι γνωστό ως νευρώνας Mc Culloch και Pitts. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από μεταβλητές αντιστάσεις και αθροιστικούς ενισχυτές, οι οποίοι αναπαριστούν τις συναπτικές διασυνδέσεις (ή αλλιώς τα συναπτικά βάρη) που συνδέουν τους νευρώνες μεταξύ τους και τη λειτουργία του σώματος του νευρώνα [3].

Το επόμενο μεγάλο βήμα στην εξέλιξη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων έγινε το 1949 από τον Hebb, όταν στο βιβλίο του «The organization of behavior» διατύπωσε για πρώτη φορά την έννοια της μάθησης μέσω της διαμόρφωσης των συναπτικών βαρών. Αυτό που πρότεινε ο Hebb ήταν ότι η συνδετικότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου μεταβάλλεται συνεχώς, όσο ο οργανισμός μαθαίνει διάφορες εργασίες και οι μεταβολές αυτές δημιουργούν τις νευρωνικές δομές. Σημαντικό ρόλο διαδραμάτισαν ακόμα η διδακτορική διατριβή του Minsky το 1954 από το πανεπιστήμιο του Princeton, καθώς και η εργασία του Gabor και των συνεργατών του το 1954, όπου η μάθηση υλοποιήθηκε τροφοδοτώντας τη μηχανή με δείγματα μιας στοχαστικής ανέλιξης μαζί με τη συνάρτηση στόχου, την οποία έπρεπε να δώσει σαν έξοδο η μηχανή.

Έπειτα το 1958 ο Rosenblatt ανέπτυξε την έννοια του *Perceptron* ως μια νέα λύση στο πρόβλημα αναγνώρισης προτύπων, διατυπώνοντας παράλληλα και το θεώρημα σύγκλισης του αλγορίθμου μάθησης του Perceptron. Το 1960 οι Widrow και Hoff θεμελίωσαν τον αλγόριθμο μάθησης των *ελαχίστων μέσων τετραγώνων*, τον οποίο χρησιμοποίησαν στο νευρωνικό μοντέλο τους ADALINE (Adaptive Linear Element). Ο Von der Malsburg ήταν ο πρώτος, ο οποίος κατέδειξε το 1973 την *αυτο-οργάνωση* και ανέπτυξε το *αυτο-οργανούμενο νευρωνικό δίκτυο*, το οποίο ονόμασε *αυτο-οργανούμενη απεικόνιση* (self-organizing map) [3].

Τη δεκαετία του 1980 σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην ανάλυση και σχεδίαση των νευρωνικών δικτύων. Κάποια από τα σημαντικά γεγονότα εκείνης της δεκαετίας είναι:

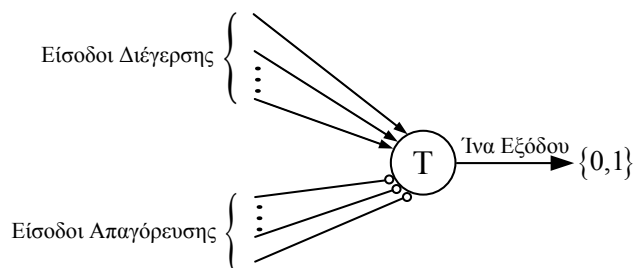
- Ανάπτυξη της ανταγωνιστικής μάθησης ως μίας νέας αρχής αυτο-οργάνωσης το 1980 από τον Grossberg.
- Ανάπτυξη των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων Hopfield και χρήση της ιδέας της ενεργειακής συνάρτησης για την ανάλυσή τους.
- Νέα θεώρηση της ενισχυτικής μάθησης από τους Barto, Sutton και Anderson.
- Ανάπτυξη του αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος (back-propagation algorithm) από τους Rumelhart, Hinton και Williams.
- Μελέτη των νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινικής βάσης (radial basis functions / RBF) από τους Broomhead και Lowe.

Μέχρι σήμερα τα νευρωνικά δίκτυα έχουν αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό. Βέβαιο είναι πως στο μέλλον η ανάπτυξη θα συνεχιστεί ποικιλοτρόπως σε συνδυασμό με άλλους τομείς, όπως τα ασαφή συστήματα, οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα έμπειρα συστήματα κ.ά.

4.2.3 Μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων

4.2.3.4 Μοντέλο McCulloch-Pitts

Η σημαντικότερη προσπάθεια μοντελοποίησης του βιολογικού νευρώνα έγινε από τους McCulloch και Pitts. Το μοντέλο των McCulloch-Pitts δεν είναι πλήρες μοντέλο του νευρικού κυττάρου, αλλά μια απλή παρουσίαση δύο καταστάσεων της λογικής διαδικασίας που λαμβάνει χώρα σ' αυτό. Το βασικό μοντέλο νευρώνα McCulloch-Pitts έχει τη μορφή του ακόλουθου σχήματος:

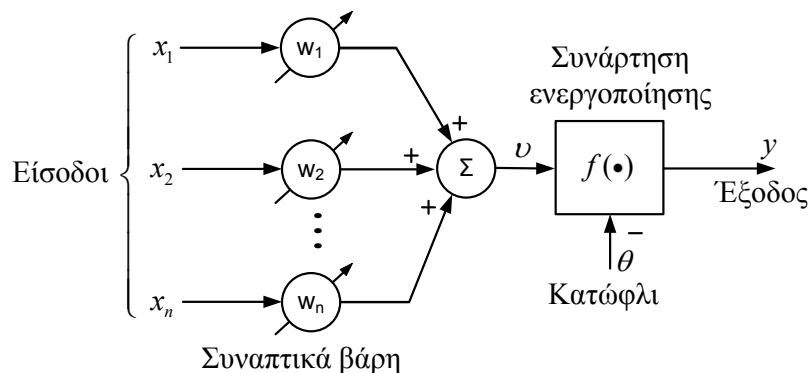


Σχήμα 4.1: Μοντέλο νευρώνα McCulloch-Pitts [3].

Η ένα εξόδου του κυττάρου συσχετίζει τις πληροφορίες που αφορούν στην κατάσταση του νευρώνα (διέγερση ή όχι) και τελικά γίνεται είσοδος σ' ένα άλλο κύτταρο (ή και στο ίδιο). Επιτρέπεται οποιοσδήποτε αριθμός εισόδων και οι εισοδοί διαιρούνται σε δύο κατηγορίες: στις εισόδους που διεγείρουν το κύτταρο και στις απαγορευτικές εισόδους. Οι εισοδοί διέγερσης που αναπαρίστανται με μία γραμμή, η οποία καταλήγει σ' ένα βελάκι, τείνουν στο να διεγείρουν το κύτταρο κατά αυξανόμενο τρόπο μέχρι την τελική διέγερση. Οι απαγορευτικές εισοδοί αναπαρίστανται από μία γραμμή, η οποία καταλήγει σ' ένα μικρό κύκλο. Οι εισοδοί αυτές είναι ικανές να απαγορεύσουν εντελώς τη διέγερση του κυττάρου.

4.2.3.5 Το βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα

Το βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα στηρίζεται στο μοντέλο McCulloch-Pitts και έχει τη μορφή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 4.2: Βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα [3].

Ο νευρώνας είναι μία θεμελιακή μονάδα επεξεργασίας πληροφορίας η οποία αποτελείται από τρία στοιχεία:

- Ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης (συνάψεων).
- Έναν κόμβο άθροισης (γραμμικής άθροισης).
- Μία συνάρτηση ενεργοποίησης (μη γραμμικότητα).

Κάθε κλάδος διασύνδεσης έχει ένα βάρος (weight) το οποίο είναι θετικό, εάν η σύναψη είναι *διεγερτικού τύπου* (excitatory) και αρνητικό, εάν η σύναψη είναι *απαγορευτικού* ή *αναχαιτιστικού τύπου* (inhibitory). Ο κόμβος άθροισης αθροίζει τα σήματα εισόδου, αφού έχουν πολλαπλασιαστεί με τα αντίστοιχα βάρη των συνάψεων.

Συνεπώς, ο κόμβος άθροισης είναι μια μονάδα γραμμικού συνδυασμού. Τέλος, η *συνάρτηση ενεργοποίησης* (activation function), η οποία ονομάζεται και *συνάρτηση σύνθλιψης* (squashing function) περιορίζει (συνθλίβει) το επιτρεπόμενο πλάτος του σήματος εξόδου σε κάποια πεπερασμένη τιμή (συνήθως στο κανονικοποιημένο διάστημα $[0,1]$ ή στο διάστημα $[-1,1]$). Το μοντέλο του νευρώνα περιέχει, επίσης, ένα κατώφλι θ που εφαρμόζεται εξωτερικά και, πρακτικά, υποβιβάζει την καθαρή είσοδο στη συνάρτηση ενεργοποίησης. Φυσικά, αν ο όρος πόλωσης θ είναι αρνητικός, το σήμα εισόδου ενισχύεται. Από το Σχήμα 4.2 ο νευρώνας περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις [3, 4]:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (4.1)$$

$$y = f(u - \theta), \quad \theta > 0 \quad (4.2)$$

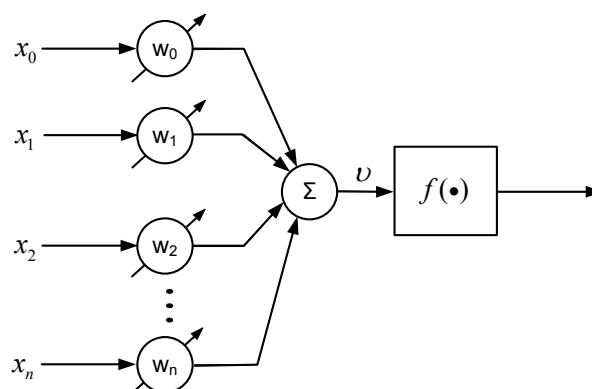
όπου x_i είναι τα σήματα εισόδου, w_i είναι τα συναπτικά βάρη του νευρώνα, ($i=1,2,\dots,n$), u είναι η είσοδος του γραμμικού συνδυαστή, θ είναι το *κατώφλι*, $f(\dots)$ είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης και y είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα.

Όπως φαίνεται η συνάρτηση ενεργοποίησης εφαρμόζεται στο σήμα $v = u - \theta$, $\theta > 0$ και συνεπώς εάν η είσοδος κατωφλίου θ περιληφθεί στις κανονικές εισόδους θέτοντας $x_0 = -1$ και $w_0 = \theta$, τότε οι παραπάνω εξισώσεις γράφονται:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (4.3)$$

$$y = f(u) \quad (4.4)$$

Το μοντέλο του νευρώνα παίρνει πλέον την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 4.3: Το βασικό μοντέλο του νευρώνα με το κατώφλι ή την πόλωση συμπεριλαμβανόμενα στο σύνολο των κανονικών εισόδων [3].

Ο νευρώνας που παριστάνεται από το μοντέλο των προηγούμενων σχημάτων ονομάζεται στατικός, διότι η έξοδος του αθροιστή (u ή v) περνάει αμέσως στη μονάδα (συνάρτηση) ενεργοποίησης $f(\cdot)$. Εάν το σήμα u ή v περάσει προηγουμένως από ένα δυναμικό σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς $H(s)$, όπου s είναι η μιγαδική μεταβλητή του μετασχηματισμού Laplace, τότε σχηματίζεται ένας δυναμικός νευρώνας. Δυναμικός νευρώνας συναντάται και όταν υπάρχει ανατροφοδότηση από την έξοδο του νευρώνα σε κάποιες ή όλες τις εισόδους του [3, 4].

4.2.3.6 Το απλό Perceptron

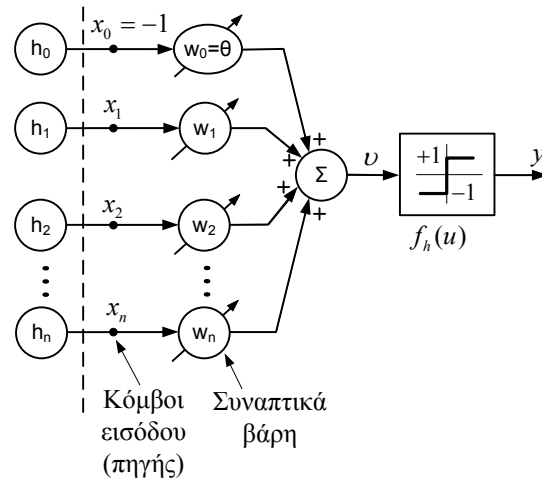
Το νευρωνικό δίκτυο Perceptron αναπτύχθηκε από τον Rosenblatt και αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες σχεδίασης και κατασκευής ευφυών συστημάτων με δυνατότητες αυτομάθησης. Είναι το απλούστερο νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση γραμμικά διαχωρίσιμων προτύπων, τα οποία διαχωρίζονται από ένα υπερεπίπεδο. Αποτελείται από έναν απλό νευρώνα με προσαρμόσιμα βάρη, το οποίο ακολουθείται από μία διπολική συνάρτηση ενεργοποίησης όμοια με τη συνάρτηση κατωφλίου. Η δομή του Perceptron ενός νευρώνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4 και μπορεί να πραγματοποιήσει ταξινόμηση μόνο όταν υπάρχουν δύο κατηγορίες. Για να είναι δυνατός ο διαχωρισμός σε περισσότερες κατηγορίες, τότε πρέπει στην έξοδο να υπάρχει ο αντίστοιχος αριθμός νευρώνων.

Η έξοδος του Perceptron δίνεται από τη σχέση:

$$y(t) = f_h(v(t)) \quad (4.5)$$

$$v(t) = \sum_{i=0}^n w_i x_i = \mathbf{w}^T(t) \mathbf{x}(t) \quad (4.6)$$

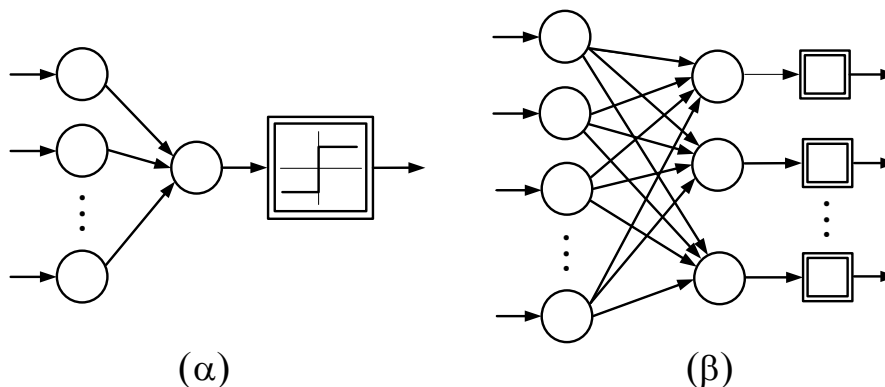
όπου f_h είναι η διπολική συνάρτηση, x το διάνυσμα εισόδων και w το διάνυσμα των βαρών.



Σχήμα 4.4: Μοντέλο απλού Perceptron με την πόλωση συμπεριλαμβανόμενη στο σύνολο των κανονικών εισόδων [3].

4.2.3.7 Μηχανές ADALINE / MADALINE

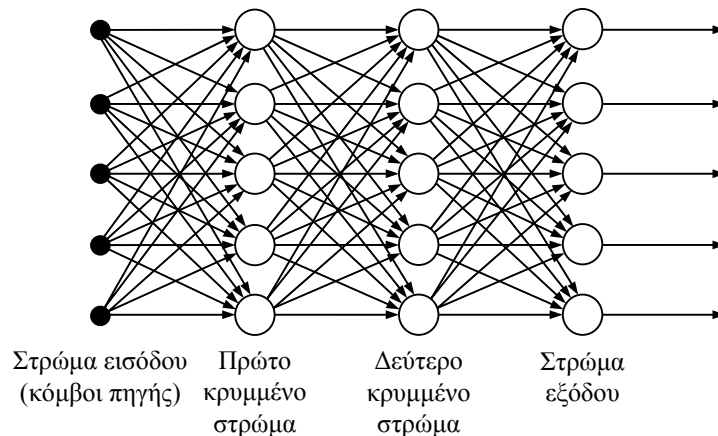
Τα δύο αυτά πρότυπα παρουσιάστηκαν το 1959 από τον Widrow. Το adaline προέρχεται από το adaptive linear neuron, ενώ το madaline από το multilayer adaline. Το πρότυπο adaline έχει πολλές εισόδους και μία έξοδο, με κάθε είσοδο να έχει το δικό της βάρος. Επειδή η επιθυμητή απόκριση είναι γνωστή, στην έξοδο γίνεται σύγκριση, ώστε να βρεθεί η τιμή του σφάλματος. Συνοπτικά ο στόχος της διαδικασίας μάθησης στην adaline είναι να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των βαρών w και του κατωφλίου θ , ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πραγματική μέση τετραγωνική τιμή του σφάλματος. Στο πρότυπο madaline υπάρχει ένα επίπεδο μονάδων adaline που ενώνονται με μία μονάδα εξόδου, σχηματίζοντας έτσι μία μονάδα madaline. Η διαδικασία εκπαίδευσης είναι όμοια με το πρότυπο madaline, με τη διαφορά ωστόσο ότι σε κάθε χρονική στιγμή μόνο μία μονάδα adaline μεταβάλλει τα βάρη της.



Σχήμα 4.5: Τοπολογία (α) ADALINE και (β) MADALINE

4.2.3.8 Το πολυεπίπεδο Perceptron (MLP)

Τα πολυεπίπεδα Perceptron περιλαμβάνουν, εκτός από το στρώμα κόμβων εισόδου και εξόδου, ένα ή περισσότερα κρυμμένα επίπεδα. Τα πολυεπίπεδα perceptron είναι κατάλληλα για την επίλυση πλήθους πολύπλοκων προβλημάτων και εκπαιδεύονται με επιβλεπόμενη μάθηση. Χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος ο οποίος στηρίζεται στον κανόνα μάθησης διόρθωσης σφάλματος.



Σχήμα 4.6: Πολυεπίπεδο Perceptron με δύο κρυμμένα επίπεδα [3].

Τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών είναι ότι:

- Οι νευρώνες των κρυμμένων επιπέδων περιέχουν μία μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία είναι συνεχής και παραγωγίσιμη σε κάθε σημείο. Η εμφάνιση της μη γραμμικότητας είναι καθοριστική για τις μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες που παρέχουν τα δίκτυα MLP.
- Δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ νευρώνων του ίδιου επιπέδου ή συνήθως μεταξύ νευρώνων που ανήκουν σε μη διαδοχικά επίπεδα. Αντίθετα, στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει πλήρης διασύνδεση μεταξύ των νευρώνων των διαδοχικών επιπέδων.
- Σ' αυτό το σημείο να τονιστεί ότι και ένα μόνο κρυμμένο στρώμα αρκεί για να εκτελέσει το ΤΝΔ λειτουργίες που μπορεί να κάνει με πολλά κρυμμένα στρώματα. Αυτό οφείλεται στο *θεώρημα προσέγγισης του Kolmogorov* (approximation theorem) [5] και τις εφαρμογές του στα νευρωνικά [6, 7] σύμφωνα με το οποίο:

Οποιαδήποτε συνεχής συνάρτηση στο πεδίο ορισμού της, για την οποία ισχύει $F : [0,1]^n \subset \mathfrak{R}^n \rightarrow R^m, F(x) = y$, όπου $I = [0,1]^n$ ο μοναδιαίος n-διάστατος

κύβος, μπορεί να προσεγγιστεί, με ακρίβεια, μέσω ενός νευρωνικού δικτύου εμπρόσθιας τροφοδότησης (perceptron) τριών στρωμάτων που έχει n κόμβους στο επίπεδο εισόδου x , $2n+1$ κόμβους στο μεσαίο (κρυμμένο) επίπεδο και m κόμβους στο επίπεδο εξόδου.

4.2.4 Κατηγοριοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Τα ΤΝΔ με βάση την επιθυμητή συμπεριφορά που χρειάζεται να παρουσιάσουν διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Συσχετιστές προτύπων: Η λειτουργία αυτού του δικτύου είναι η συσχέτιση προτύπων και η υλοποίηση επιθυμητών απεικονίσεων εισόδου-εξόδου. Συνήθως υλοποιούνται με δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης.

Μοντέλο μνήμης συμφραζομένων: Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι το δίκτυο Hopfield.

Αυτοοργανούμενα (self-organized) δίκτυα: Στην κατηγορία αυτήν ανήκουν δίκτυα με ικανότητα μάθησης χωρίς επίβλεψη, τα οποία κατηγοριοποιούν την είσοδο σύμφωνα με κάποια κριτήρια ομοιότητας.

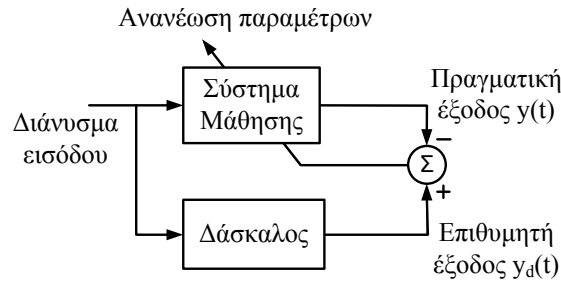
Ανάλογα με την τοπολογία και τη δομή των ΤΝΔ μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

- Επαναληπτικά δίκτυα, δηλαδή με αναδράσεις.
- Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης.
- Δίκτυα με δομή επιπέδων ή ιεραρχική (πλήρως ή μερικώς συνδεδεμένα).
- Δίκτυα με ανταγωνιστικές συνδέσεις.

Ένας ακόμα διαχωρισμός των ΤΝΔ γίνεται με βάση τον τρόπο μάθησης, οπότε ισχύει:

▪ Μάθηση με επίβλεψη

Το δίκτυο με επίβλεψη είναι η βάση πολλών εφαρμογών τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Perceptron, Madaline, RBF, MLP με προς τα πίσω διάδοση σφάλματος). Το βασικό σημείο στη μάθηση με επίβλεψη είναι ότι μία γνωστή έξοδος συνδυάζεται με κάθε πρότυπο εισόδου. Επομένως, η διαδικασία μάθησης μπορεί να αξιοποιήσει επαναληπτικά τη γνώση αυτήν ως δάσκαλος ή επόπτης, για να διορθώσει το δίκτυο, όταν αυτό αποτυγχάνει να δώσει τη σωστή απάντηση σε μία κατάλληλη είσοδο.



Σχήμα 4.7: Δομή επιβλεπόμενης μάθησης [3].

Η εκμάθηση με επίβλεψη είναι μια προσέγγιση μάθησης μιας απεικόνισης του χώρου εισόδου n διαστάσεων στον χώρο εξόδου m διαστάσεων. Η απεικόνιση είναι μια συναρτησιακή προσέγγιση ανάμεσα στον χώρο εισόδου και εξόδου και δίνει τη δυνατότητα γενίκευσης στο δίκτυο, δηλαδή να δίνει σωστές απαντήσεις στην έξοδο για πρότυπα εισόδου που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί νωρίτερα για την εκπαίδευσή του. Αυτή η δυνατότητα γενίκευσης είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων [4].

▪ Μάθηση χωρίς επίβλεψη

Παραδείγματα αρχιτεκτονικών νευρωνικών δικτύων με μάθηση χωρίς επίβλεψη είναι η Adaptive Resonance Theory (ART) και ο αυτοοργανώμενος χάρτης χαρακτηριστικών (Self-Organized Feature Map-SOM). Αυτή η κατηγορία νευρωνικών δικτύων στοχεύει στον προσδιορισμό φυσικών ομάδων ή όμοιων χαρακτηριστικών σ' ένα δεδομένο σύνολο προτύπων. Επειδή τα δίκτυα αυτά διαθέτουν μόνο πρότυπα εισόδου, ο τρόπος εκπαίδευσής τους αναφέρεται ως μάθηση χωρίς επίβλεψη. Ο χρήστης ενός δικτύου με μάθηση χωρίς επίβλεψη πρέπει να εξετάσει το αποτέλεσμα του δικτύου και να ελέγξει αν η ταξινόμησή του έχει πρακτική σημασία. Αν δεν είναι ικανοποιητική, τότε πρέπει να ρυθμιστεί κάποια από τις παραμέτρους εκπαίδευσης και το δίκτυο να εκπαιδευτεί ξανά. Οι παράμετροι εκπαίδευσης είναι ένα μέτρο της ομοιότητας των προτύπων και χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν τη μάθηση του δικτύου [3, 4].

4.2.5 Εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Η έννοια της εκπαίδευσης μπορεί να οριστεί, σε γενικές γραμμές, ως η κατάλληλη χρήση πληροφοριών για βελτίωση της συμπεριφοράς ενός

συστήματος. Στην περίπτωση των προβλημάτων απεικόνισης, δηλαδή συσχέτισης προτύπων εισόδου-εξόδου, η εκπαίδευση μπορεί να οριστεί ως η τροποποίηση των παραμέτρων-βαρών του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, ώστε με τη χρήση ενός συνόλου δεδομένων να επιτευχθεί σταδιακά η επιθυμητή συμπεριφορά, συγκρίνοντας την τρέχουσα απόκριση του δικτύου με την επιθυμητή απόκριση [8].

Υποθέτοντας ότι υπάρχει ένα σύνολο δεδομένων απεικόνισης εισόδου-εξόδου ή μόνο εισόδου, τα οποία καθορίζουν την επιθυμητή συμπεριφορά του δικτύου, το σύνολο αυτό ονομάζεται σύνολο εκπαίδευσης. Στη μάθηση με επίβλεψη το σύνολο αυτό παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη συσχέτιση των εισόδων I με τις εξόδους O , οπότε αποτελείται από ζεύγη τιμών (I_i, O_i) για $i=1, \dots, n$, όπου I και O είναι στη γενική περίπτωση διανύσματα. Αντίστοιχα, υπάρχει και το σύνολο ελέγχου, το οποίο επιτελεί τη λειτουργία του ελέγχου του δικτύου μετά το πέρας της εκπαίδευσης. Σημειώνεται ότι τα σύνολα αυτά δεν περιλαμβάνουν κοινά στοιχεία.

Ένα σημαντικό θέμα στη διαδικασία της εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων είναι η δημιουργία αποτελεσματικών συνόλων εκπαίδευσης. Τα σύνολα εκπαίδευσης πρέπει να αποτελούνται από τον πλήρη χώρο προτύπων, τα οποία χρειάζονται να αναγνωρίζονται σωστά κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης του δικτύου. Η επιλογή του συνόλου εκπαίδευσης επηρεάζει ευθέως την ευαισθησία του ΤΝΔ ως προς την παροχή αποτελεσμάτων.

Γενικά, δεν υπάρχει ακριβής οδηγός για την επιλογή του αριθμού των κρυφών επιπέδων και των νευρώνων ανά επίπεδο. Ωστόσο, σύμφωνα με το θεώρημα του Kolmogorov το οποίο περιγράφηκε παραπάνω, ένα κρυφό επίπεδο αρκεί για να περιγράψει ένα αρκετά περίπλοκο πρόβλημα. Αναφορικά με το πλήθος των κρυμμένων νευρώνων, ανάλογα με το πρόβλημα και την πολυπλοκότητά του, ο αριθμός των νευρώνων διαφέρει. Σε γενικές γραμμές, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι μεγάλος αριθμός νευρώνων στο κρυφό επίπεδο μπορεί να οδηγήσει σε απομνημόνευση των συνόλων εκπαίδευσης, με αποτέλεσμα την ανικανότητα του δικτύου να κάνει επαρκή γενίκευση του προβλήματος. Αντιθέτως, ένας πολύ μικρός αριθμός νευρώνων εμποδίζει την αποτελεσματική ταξινόμηση προτύπων. Τέλος, όσον αφορά τον χρόνο εκπαίδευσης του δικτύου, αυτός μπορεί να είναι μεγάλος είτε εξαιτίας της περίπλοκης τοπολογίας, είτε λόγω του μεγάλου αριθμού προτύπων εκπαίδευσης.

Αυτό το πρόβλημα αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι μετά την εκπαίδευση η απόκριση του δικτύου θα είναι πολύ γρήγορη [8].

4.2.6 Εφαρμογή των ΤΝΔ στα συστήματα γείωσης (βιβλιογραφική ανασκόπηση)

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν γνωρίσει τεράστια εφαρμογή σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Ειδικότερα, στον τομέα των συστημάτων και εγκαταστάσεων ηλεκτρικής ισχύος τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία για τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [9, 10]. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή τους στα συστήματα γείωσης για την πρόβλεψη διαφόρων παραμέτρων βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη δυσκολία συλλογής ενός ικανοποιητικού πλήθους τιμών μετρήσεων, από πραγματικά συστήματα γείωσης, μιας και η επαναληπτική διαδικασία της μέτρησης είναι επίπονη και σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλου κόστους.

Μία πρώτη προσπάθεια πρόβλεψης της ειδικής αντίστασης του εδάφους και εμμέσως της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ράβδων γείωσης μεγάλου μήκους, χωρίς νευρωνικά δίκτυα, έγινε από τον Blattner [11] το 1980. Αρχικά, θεώρησε ότι οι λογαριθμικές καμπύλες προσεγγίζουν καλύτερα, από όλες τις καμπύλες, τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Διατύπωσε μια εμπειρική λογαριθμική σχέση, η οποία ουσιαστικά προσέγγιζε με καλή ακρίβεια τις καμπύλες της ειδικής αντίστασης, που είχαν χαραχτεί από πειραματικές μετρήσεις. Αυτή η σχέση συνέδεε τις γνωστές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης της ράβδου για τα πρώτα λίγα μέτρα βάθους. Με την επίλυση των σταθερών της εμπειρικής σχέσης κατάφερε να οδηγηθεί σε μια γενικότερη εξίσωση, η οποία έκανε πρόβλεψη των τιμών της ρ και σε μεγαλύτερα βάθη απ' αυτά των διαθέσιμων μετρήσεων (extrapolation). Στη συνέχεια, με αντικατάσταση των προβλεπόμενων τιμών της ρ στους γνωστούς τύπους της αντίστασης γείωσης, έκανε εκτίμηση των τιμών της αντίστασης γείωσης για ράβδους μεγαλύτερου μήκους στο εξεταζόμενο κάθε φορά έδαφος.

Αρκετά χρόνια αργότερα, ο Salam με τους συνεργάτες του δημοσίευσαν [12] τα αποτελέσματα εφαρμογής ενός μοντέλου, βασισμένου σε νευρωνικά δίκτυα,

για τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της σχέσης μεταξύ της αντίστασης γείωσης και του μήκους του ηλεκτροδίου. Πραγματοποίησαν μετρήσεις της αντίστασης γείωσης σε κατακόρυφη ράβδο, η οποία βυθιζόταν στο έδαφος σταδιακά με βήμα $6m$. Μ' αυτόν τον τρόπο έλαβαν μετρήσεις της R για μήκη ηλεκτροδίου από $6m$ έως $36m$. Στη συνέχεια, ανέπτυξαν νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης τριών στρωμάτων, στο οποίο είσοδοι ήταν το μήκος του ηλεκτροδίου και ο μήνας μέτρησης και έξοδος η εκτιμήτρια της αντίστασης γείωσης. Το συνολικό σύνολο δεδομένων αποτελούνταν από 18 περιπτώσεις, 13 για το σύνολο εκπαίδευσης και 5 για το σύνολο ελέγχου. Ο συντελεστής προσδιορισμού που επετεύχθη μεταξύ εκτιμητριών και επιθυμητών τιμών ήταν 0,995 για το σύνολο εκπαίδευσης και 0,925 για σύνολο ελέγχου.

Η Ασημακοπούλου με τους συνεργάτες της ανέπτυξαν νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση της εποχικής μεταβολής της αντίστασης γείωσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου [13, 14] σε φυσικό έδαφος. Μεταβλητές εισόδου αποτέλεσαν η ειδική αντίσταση του εδάφους στον χώρο της εγκατάστασης και το ύψος βροχόπτωσης στη συγκεκριμένη περιοχή, ενώ ως μεταβλητή εξόδου ήταν η αντίσταση γείωσης της ράβδου. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης σε διάφορα βάθη, που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο νευρωνικό, προήλθαν από περιοδικές μετρήσεις με τη μέθοδο Wenner, ενώ τα ύψη βροχόπτωσης προήλθαν από στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Οι δε τιμές της αντίστασης γείωσης μετρήθηκαν με τη μέθοδο πτώσης δυναμικού.

Ανέπτυξαν ένα πολυεπίπεδο δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης, το οποίο αποτελούνταν από τρία στρώματα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η εκπαίδευσή του έγινε με βάση τον αλγόριθμο της προς τα πίσω διάδοσης σφάλματος και των παραλλαγών του και το διαθέσιμο σύνολο δεδομένων χωρίστηκε σε τρία υποσύνολα, το σύνολο εκπαίδευσης (53 περιπτώσεις), το σύνολο αξιολόγησης (14 περιπτώσεις) και το σύνολο ελέγχου (10 περιπτώσεις). Το στρώμα εισόδου περιελάμβανε 5 νευρώνες: τη μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση σε βάθος $1m$ και $2m$, τη βροχόπτωση της ημέρας της μέτρησης, τη μέση βροχόπτωση της εβδομάδας που προηγούταν της μέτρησης και τη μέση τιμή της αντίστασης γείωσης την εβδομάδα που προηγούταν της μέτρησης. Το πλήθος των νευρώνων του κρυφού στρώματος προσδιοριζόταν με εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης, για κάθε παραλλαγή του αλγορίθμου εκπαίδευσης και κάθε σενάριο.

Η εκπαίδευση έγινε με σχεδόν όλες τις παραλλαγές του βασικού αλγορίθμου της προς τα πίσω διάδοσης σφάλματος, με σκοπό τον προσδιορισμό του καταλληλότερου για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Σ' αυτήν την εφαρμογή [14] τα καλύτερα αποτελέσματα σύγκλισης των τιμών παρήχθησαν από τον αλγόριθμο συζευγμένης μεταβολής κλίσης (conjugate gradient algorithm) με εξίσωση Fletcher-Reeves και με χρήση τριών κριτηρίων τερματισμού. Έτσι, το νευρωνικό εκπαιδεύτηκε, σε τελική φάση, μ' αυτόν τον αλγόριθμο και τα αποτελέσματα σύγκλισης ήταν αρκετά ικανοποιητικά τόσο για το σύνολο αξιολόγησης και για το σύνολο ελέγχου, όσο και για τα διαστήματα εμπιστοσύνης.

4.2.7 Μεθοδολογία ΤΝΔ στα συστήματα γείωσης με βελτιωτικά υλικά

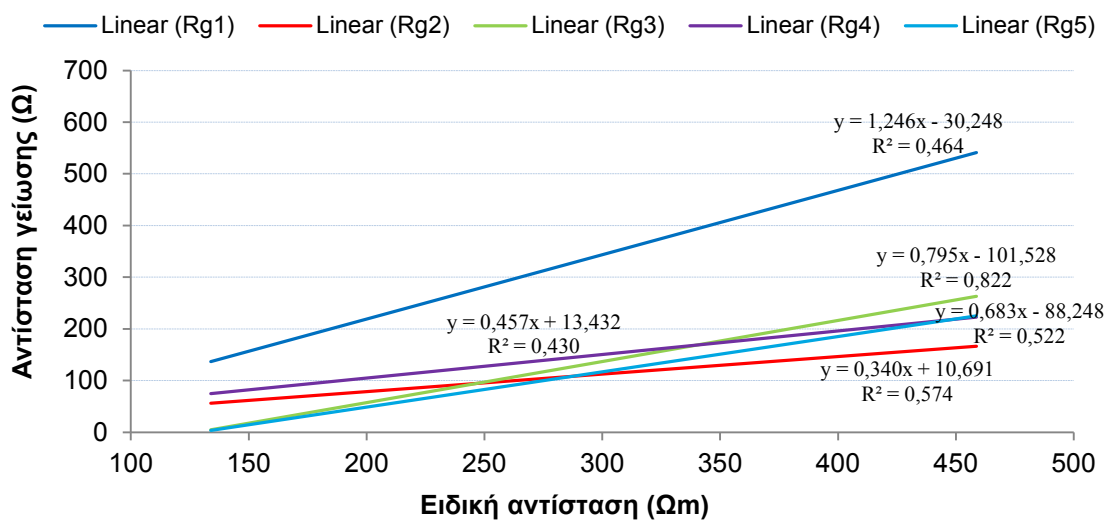
4.2.7.1 Αρχική προσέγγιση του προβλήματος εκτίμησης της αντίστασης γείωσης

Η χρήση βελτιωτικών υλικών γείωσης συμβάλλει στη δημιουργία διαφορετικών και ποικίλων συνθηκών εδάφους, αφού το κάθε υλικό αλληλεπιδρά με το έδαφος με διαφορετικό τρόπο. Με την πάροδο του χρόνου και τη σταδιακή αφομοίωση του κάθε υλικού από το περιβάλλον έδαφος, δημιουργήθηκε ένας ιδιαίτερος και ομοιόμορφος τύπος μικροεδάφους γύρω από την κάθε ράβδο γείωσης. Έτσι, στην παρούσα πειραματική εργασία, προέκυψαν πέντε διαφορετικά μεταξύ τους συστήματα γείωσης, με τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ηλεκτρικές ιδιότητες το καθένα.

Γίνεται κατανοητό ότι αυτές οι διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης λόγω αστάθμητων παραγόντων, όπως η διαφορά του ύψους βροχής μεταξύ ιδίων εποχών διαδοχικών ετών, καθιστούν πολύ δύσκολη τη σύνταξη ενός γενικότερου κανόνα, με τα κλασικά μαθηματικά εργαλεία, για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης. Πόσο μάλλον, όταν σ' αυτόν τον κανόνα θα υπάγονται σχεδόν όλες οι περιπτώσεις συστημάτων γείωσης και κλιματικών συνθηκών. Ο ισχυρισμός αυτός ενισχύεται και από τα διαγράμματα στο Σχήμα 4.8, στο οποίο θα γίνει αναφορά στη συνέχεια. Γι' αυτόν τον λόγο, στην παρούσα διατριβή διερευνάται η εφαρμογή μοντέλων υπολογιστικής νοημοσύνης, τα οποία μαθαίνουν την υποκείμενη συνάρτηση

μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της μεταβλητής στόχου μέσω συνεχούς εκπαίδευσης με σύνολα δεδομένων από πειραματικές τιμές.

Μια πρώτη προσέγγιση της σχέσης μεταξύ της αντίστασης γείωσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων με βελτιωτικά υλικά και της ειδικής αντίστασης του εδάφους, έγινε με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης, με στόχο να προσεγγιστεί η πιθανή γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Από τις πειραματικές τιμές της αντίστασης γείωσης των πέντε ηλεκτροδίων (G_1 – G_5) και από τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους στο 1m, με γραμμική παρεμβολή χαράχθηκαν οι ευθείες του ακόλουθου σχήματος:



Σχήμα 4.8: Σχέση γραμμικής παλινδρόμησης αντίστασης γείωσης-ειδικής αντίστασης εδάφους για τα 5 ηλεκτρόδια γείωσης.

Από τη μορφή των καμπυλών του παραπάνω σχήματος, διαπιστώνεται η, κατ' αρχήν, γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Η μεταβολή του σημείου εκκίνησης και της κλίσης από καμπύλη σε καμπύλη, καθιστά δύσκολη τη συσχέτιση μεταξύ τους και, συνεπώς, την εξαγωγή μιας γενικότερης συναρτησιακής σχέσης, με χρήση κλασικών αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης, που θα περιγράψει με τρόπο, γενικό, την υποκείμενη σχέση μεταξύ των μεταβλητών ρ και R . Η παρουσία, δε, ενδεχόμενων, μη γραμμικών φαινομένων περιπλέκει την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Η δυσκολία αυτή έστρεψε το ενδιαφέρον στην εφαρμογή τεχνικών υπολογιστικής νοημοσύνης, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, η οποία επιχειρεί να υπερκεράσει το συγκεκριμένο πρόβλημα της μη γραμμικότητας και να αναπτύξει μοντέλα για την ακριβή εκτίμηση και πρόβλεψη των τιμών της αντίστασης γείωσης.

4.2.7.2 Κατασκευή και αρχιτεκτονική του προτεινόμενου ΤΝΔ

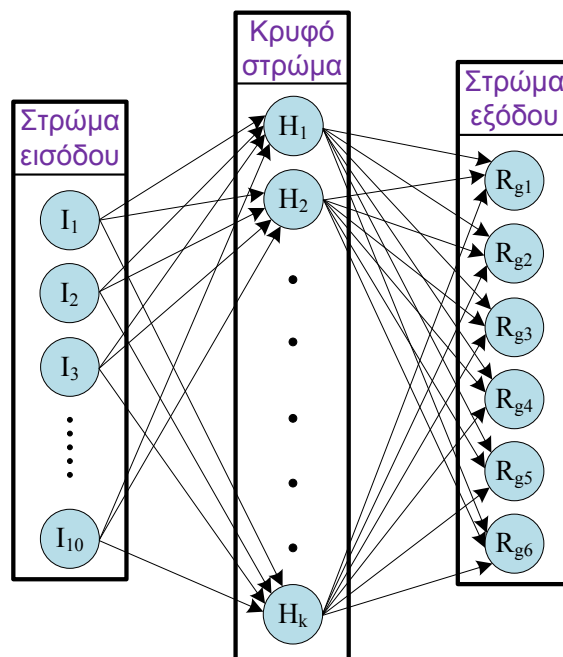
Σαν πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα της εκτίμησης της αντίστασης γείωσης ήταν η ανάπτυξη τεχνητού νευρωνικού δικτύου σε περιβάλλον MatLab. Οι διαφορετικοί τύποι μικροεδάφους και εν γένει συστημάτων γείωσης προσφέρουν μεγάλη ποικιλία τιμών για την εκπαίδευση τέτοιων μοντέλων. Αναπτύχθηκε νευρωνικό δίκτυο τριών στρωμάτων, με το στρώμα εισόδου, το κρυφό στρώμα και το στρώμα εξόδου.

Ως μεταβλητές εισόδου στο πρώτο στρώμα χρησιμοποιήθηκαν, οι μέσες τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, για κάθε εξεταζόμενο βάθος ($1m$, $2m$, $4m$, $6m$ και $8m$), των τελευταίων 7 ημερών πριν από την ημέρα της μέτρησης της αντίστασης γείωσης (ρ_{1w} , ρ_{2w} , ρ_{4w} , ρ_{6w} , ρ_{8w}), οι μέσες τιμές της ειδικής αντίστασης στα βάθη $1m$ και $2m$ των τελευταίων 30 ημερών πριν από την ημέρα της μέτρησης (ρ_{1m} , ρ_{2m}), το συνολικό ύψος βροχόπτωσης (r_d) την ημέρα μέτρησης της αντίστασης γείωσης, το αθροιστικό συνολικό ύψος βροχόπτωσης (r_w) των τελευταίων 7 ημερών πριν από την ημέρα μέτρησης και το αθροιστικό συνολικό ύψος βροχόπτωσης (r_m) των τελευταίων 30 ημερών πριν από την ημέρα μέτρησης. Η μεταβλητή εξόδου στο στρώμα εξόδου του ΤΝΔ είναι η αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι εξεταζόμενα ηλεκτρόδια [15]. Η δομή του προτεινόμενου ΤΝΔ εικονίζεται στο Σχήμα 4.9.

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι το πλήθος των νευρώνων του κρυφού στρώματος θα πρέπει να καθοριστεί με εφαρμογή κάποιας επαναληπτικής διαδικασίας. Σύμφωνα με το θεώρημα προσέγγισης του Kolmogorov, που αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.3.8, εάν γίνει κατάλληλη επιλογή του πλήθους των νευρώνων στο κρυφό στρώμα, τότε ένα μόνο κρυφό στρώμα είναι αρκετό. Πριν την έναρξη της διαδικασίας εκπαίδευσης, όλες οι τιμές εισόδου και εξόδου κανονικοποιήθηκαν στο διάστημα $[-1, 1]$. Σκοπός της κανονικοποίησης είναι η αποφυγή προβλημάτων κορεσμού, τα οποία δημιουργούνται με τη χρήση σιγμοειδών συναρτήσεων ενεργοποίησης. Αυτές παρουσιάζουν έντονη μη γραμμική συμπεριφορά έξω από το διάστημα $[-1, 1]$. Η κανονικοποιημένη τιμή \hat{x} της εκάστοτε μεταβλητής x δίνεται από τον τύπο:

$$\hat{x} = \alpha + \frac{b - \alpha}{x_{\max} - x_{\min}}(x - x_{\min}) \quad (4.7)$$

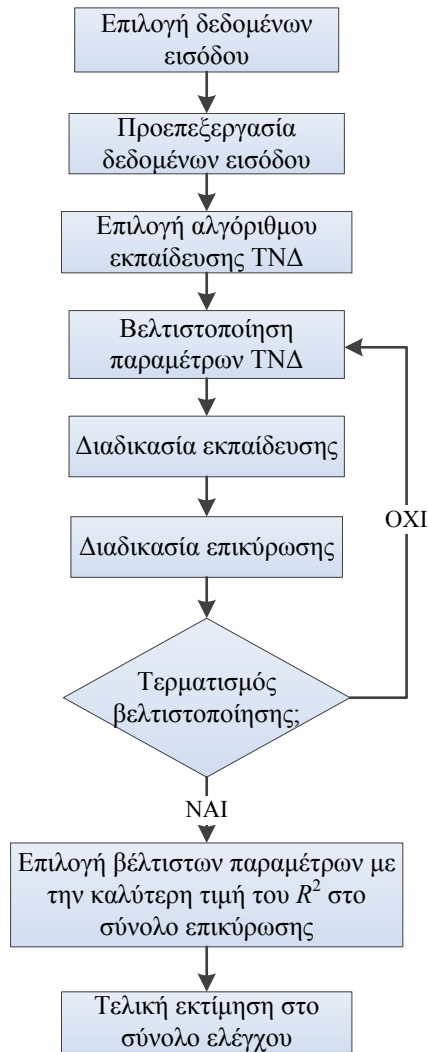
όπου \hat{x} η κανονικοποιημένη τιμή της μεταβλητής x , x_{\min} και x_{\max} η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της x αντίστοιχα, a και b η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της κανονικοποιημένης μεταβλητής. Η μεθοδολογία εκτίμησης της αντίστασης γείωσης στην έξοδο του νευρωνικού δικτύου παρουσιάζεται εποπτικά με το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.9: Αρχιτεκτονική προτεινόμενου ΤΝΔ.

Κατά την προτεινόμενη μεθοδολογία το σύνολο των πειραματικών δεδομένων, που αποτελούνταν μέχρι εκείνη την περίοδο από 126 πρότυπα εισόδου-εξόδου, χωρίστηκε με τυχαίο τρόπο σε τρία υποσύνολα:

- Το σύνολο εκπαίδευσης (training set) με 102 πρότυπα, που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του δικτύου και την εκμάθηση της σχέσης μεταξύ εισόδου και εξόδου.
- Το σύνολο επικύρωσης (ή αξιολόγησης-validation set) με 26 πρότυπα, που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων του δικτύου.
- Το σύνολο ελέγχου (test set) με 24 πρότυπα, που χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση της ικανότητας γενίκευσης του δικτύου σε άγνωστα δεδομένα.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Το TNΔ εκπαιδεύτηκε με τη χρήση του αλγόριθμου της προς τα πίσω διάδοσης σφάλματος με εκπαίδευση ανά πρότυπο (stochastic mode) και με ρυθμιζόμενους ρυθμό μάθησης και όρο ορμής (decreasing exponential functions). Στόχος της επαναληπτικής εκτέλεσης του αλγόριθμου ήταν η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους. Σ' αυτήν τη διαδικασία, τα πρότυπα εισάγονται στο δίκτυο με τυχαία σειρά και η ρύθμιση των συναπτικών βαρών υλοποιείται στη βάση πρότυπο προς πρότυπο ανάλογα με την καθοδική κλίση (gradient descent) της συνάρτησης κόστους, η οποία στην προκειμένη περίπτωση ήταν η συνάρτηση συνολικού στιγμιαίου σφάλματος όλου του δικτύου (total instantaneous error function):

$$G(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} (d_j(n) - y_j(n))^2 \quad (4.8)$$

όπου C είναι το πλήθος των νευρώνων εξόδου, $d_j(n)$ είναι η τιμή στόχος και $y_j(n)$ είναι η εκτιμώμενη τιμή από τον j νευρώνα για την n -οστή επανάληψη.

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία, η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση των αποτελεσμάτων ανά εποχή (παρουσίαση όλων των προτύπων εκπαίδευσης στο δίκτυο τουλάχιστον μία φορά), η οποία ήταν και ο τελικός στόχος ελαχιστοποίησης από την επαναληπτική διαδικασία του αλγόριθμου, ήταν η συνάρτηση μέσου σφάλματος απ' όλο το σύνολο εκπαίδευσης:

$$G_{av} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C} (d_j(n) - y_j(n))^2 \quad (4.9)$$

Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί ένα από τα τρία κριτήρια τερματισμού που τέθηκαν και τα οποία είναι:

$$\text{Σταθεροποίηση βαρών: } |w_{kv}^{(l)}(ep) - w_{kv}^{(l)}(ep-1)| < \text{limit}_1, \forall k, v, l \quad (4.10)$$

$$\text{Ελαχιστοποίηση συνάρτησης σφάλματος: } |\text{RMSE}(ep) - \text{RMSE}(ep-1)| < \text{limit}_2 \quad (4.11)$$

$$\text{Μέγιστο πλήθος εποχών: } ep \geq \text{max_epochs} \quad (4.12)$$

όπου $w_{kv}^{(l)}$ είναι το συναπτικό βάρος μεταξύ του k νευρώνα του l στρώματος και του v νευρώνα του $(l-1)$ στρώματος, το RMSE είναι ίσο με

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m_2 \cdot q_{out}} \sum_{m=1}^{m_2} \sum_{k=1}^{q_{out}} e_k^2(m)}$$

με m_2 μέλη και q_{out} νευρώνες στο στρώμα εξόδου

και τέλος max_epochs το μέγιστο πλήθος εποχών.

Το μέγιστο πλήθος των εποχών καθορίστηκε στις 7000. Αρχικά δόθηκαν σταθερές τιμές σ' όλες τις παραμέτρους του δικτύου, εκτός από το πλήθος των νευρώνων του κρυφού στρώματος. Ως βέλτιστο πλήθος των νευρώνων επιλέχθηκε εκείνο το οποίο, μετά την επαναληπτική διαδικασία του αλγόριθμου, έδωσε τη μικρότερη τιμή της συνάρτησης μέσου σφάλματος στο σύνολο επικύρωσης. Η περιοχή μεταβολής του πλήθους ήταν από 2 έως 25 νευρώνες και τελικά επιλέχθηκαν $N=21$ (Σχήμα 4.11).

Στη συνέχεια, με σταθερό πλήθος νευρώνων του κρυφού στρώματος καθορίστηκαν οι τιμές της χρονικής παραμέτρου και της αρχικής τιμής του όρου

ορμής ($T_\alpha=1500$, $\alpha_0=0,4$, Σχήμα 4.12) και οι τιμές της χρονικής παραμέτρου και της αρχικής τιμής του ρυθμού μάθησης ($T_n=2400$ and $\eta_0=0,8$, Σχήμα 4.13).

Κατόπιν, καθορίστηκε ο τύπος της συνάρτησης ενεργοποίησης για τους νευρώνες του κρυφού στρώματος και του στρώματος εξόδου. Οι υποψήφιες συναρτήσεις που εξετάστηκαν ήταν:

$$\text{Λογιστική} \quad f(x) = 1/(1 + e^{-ax}) \quad (4.13)$$

$$\text{Υπερβολική εφαπτομένη} \quad f(x) = \tanh(ax + b) \quad (4.14)$$

$$\text{Γραμμική} \quad f(x) = ax + b \quad (4.15)$$

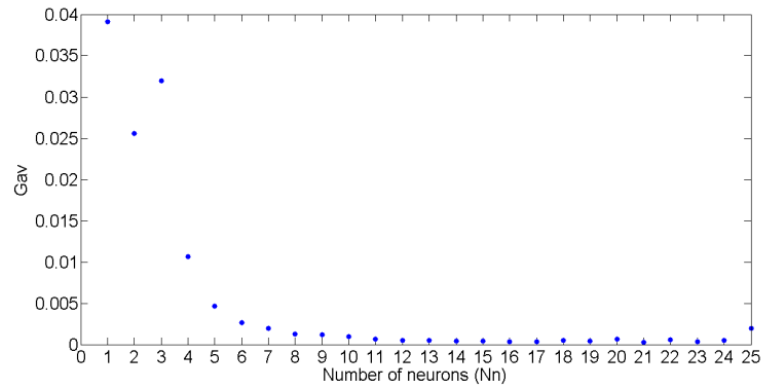
Εξετάζοντας κάθε πιθανό συνδυασμό για τη συνάρτηση ενεργοποίησης μεταξύ του κρυφού στρώματος και του στρώματος εξόδου και με συνεχή μεταβολή των παραμέτρων a και b , επιλέχθηκαν η $f_1(x) = \tanh(2x)$ για το κρυφό στρώμα και η $f_2(x) = 1/(1+e^{-0.5x})$ για το στρώμα εξόδου (Σχήμα 4.14).

Τέλος, υπολογίστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού, για το σύνολο ελέγχου (test set) του κάθε ηλεκτροδίου γείωσης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

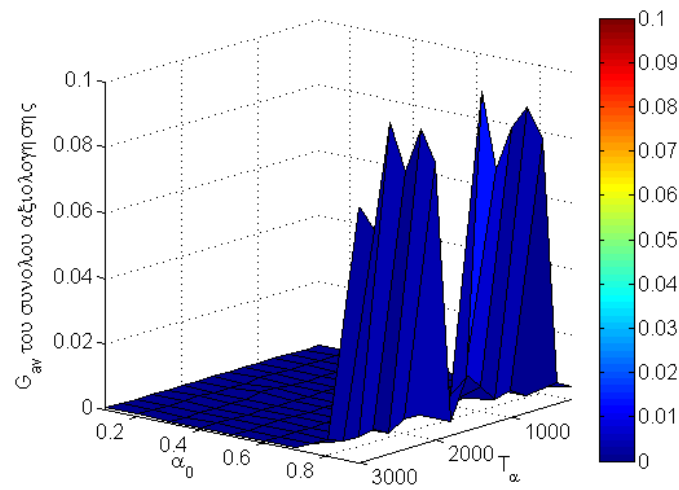
$$R^2 = r_{y-\hat{y}}^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N ((y_i - \bar{y}_{real}) \cdot (\hat{y}_i - \bar{y}_{est})) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_{real})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_{est})^2} \quad (4.16)$$

όπου y_i η πραγματική τιμή της αντίστασης γείωσης, \bar{y}_{real} η μέση πραγματική τιμή της αντίστασης γείωσης στο σύνολο ελέγχου, \hat{y}_i η εκτιμώμενη από το δίκτυο τιμή της αντίστασης γείωσης, \bar{y}_{est} η μέση εκτιμώμενη τιμή της αντίστασης γείωσης και n ο πληθυσμός του συνόλου ελέγχου.

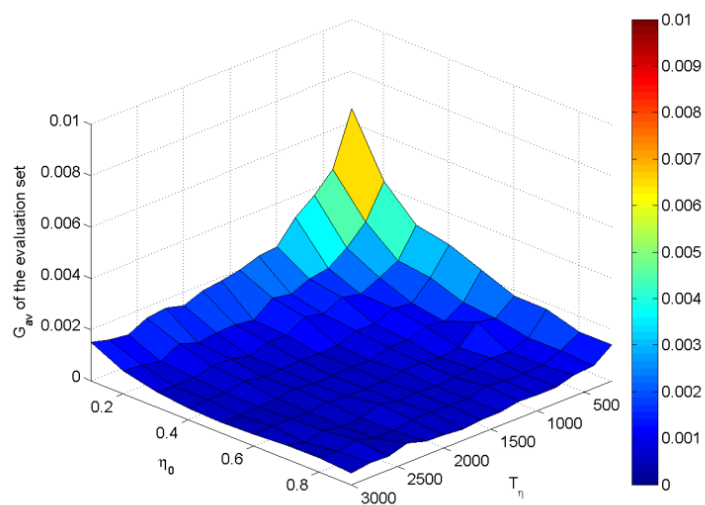
Τα αποτελέσματα του νευρωνικού για το σύνολο ελέγχου, καθώς και οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού για κάθε ηλεκτρόδιο για το σύνολο ελέγχου, παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.



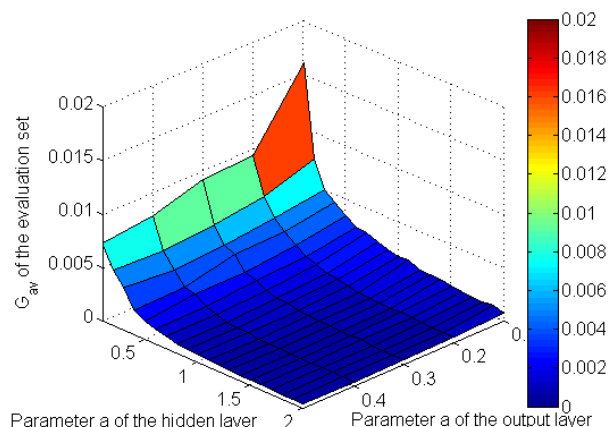
Σχήμα 4.11: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης για μεταβλητό πλήθος νευρώνων του κρυφού στρώματος.



Σχήμα 4.12: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης με μεταβολή των παραμέτρων του όρου ορμής α .



Σχήμα 4.13: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης με μεταβολή των παραμέτρων του ρυθμού μάθησης η .



Σχήμα 4.14: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης όταν επιλέγεται η συνάρτηση υπερβολικής εφαστομένης και η λογιστική συνάρτηση για το κρυφό στρώμα και το στρώμα εξόδου αντίστοιχα, ως συναρτήσεις ενεργοποίησης.

Πίνακας 4.1: Πραγματικές και εκτιμώμενες τιμές της αντίστασης γείωσης.

Αντίσταση γείωσης (Ohm)												
	G_1		G_2		G_3		G_4		G_5		G_6	
	Πραγμ.	Εκτιμ.	Πραγμ.	Εκτιμ.	Πραγμ.	Εκτιμ.	Πραγμ.	Εκτιμ.	Πραγμ.	Εκτιμ.	Πραγμ.	Εκτιμ.
1	141,9	143,7	38,2	37,7	32,6	31,9	57,9	57,6	35,2	36,2	58,3	55,8
2	109,6	118,9	34,0	37,1	32,0	30,7	51,2	55,2	33,2	32,4	57,3	56,9
3	134,1	127,8	38,7	39,3	32,4	32,2	53,6	53,7	33,8	34,5	58,6	57,6
4	112,3	108,7	37,5	36,9	29,7	29,5	51,0	51,8	30,1	31,3	55,0	56,3
5	115,4	115,0	40,6	38,7	30,0	30,6	51,9	52,0	31,1	31,5	56,3	58,5
6	122,3	115,2	42,0	41,6	30,8	31,7	52,3	51,4	31,4	30,4	58,4	62,1
7	101,6	147,6	41,3	44,0	32,0	33,5	48,8	54,1	29,7	32,8	60,6	64,1
8	115,3	119,6	45,6	46,7	33,0	33,5	52,1	53,2	30,7	30,9	64,9	63,8
9	106,0	109,1	45,1	46,8	32,6	33,6	52,2	52,6	27,1	27,4	71,6	71,4
10	119,8	123,0	56,0	58,1	38,8	40,2	66,2	67,2	28,8	29,0	82,2	81,4
11	138,6	133,6	70,5	69,4	48,8	47,0	87,3	86,5	29,4	29,8	95,2	94,2
12	183,7	184,8	89,8	89,2	66,6	68,1	111,0	112,5	31,7	31,4	233,0	223,2
13	247,4	235,7	98,3	99,3	92,3	89,1	123,2	121,6	36,2	33,3	372,4	371,2
14	326,8	327,7	112,2	112,7	121,3	124,6	131,3	133,3	46,2	47,5	449,4	450,0
15	238,0	236,9	107,3	107,5	180,8	174,3	123,6	125,3	183,5	170,0	377,0	406,7
16	428,0	413,8	149,3	145,2	237,2	232,9	185,1	178,8	267,0	267,5	375,0	365,1
17	143,0	132,7	77,1	74,3	46,8	46,9	90,0	87,8	42,5	43,8	105,0	110,7
18	180,5	174,1	80,6	83,4	63,2	63,2	99,5	102,9	50,5	51,5	130,0	132,8
19	174,0	265,4	77,3	94,0	84,0	135,0	102,6	123,1	98,0	90,4	363,0	292,3
20	477,0	485,4	164,2	165,6	260,0	268,9	205,0	209,2	252,0	258,5	511,0	571,2
22	222	314,5	110,0	113,8	128,0	219,7	120,0	162,5	125,0	268,0	430,0	503,4
22	384	385,9	123,4	124,7	173,7	178,1	144,8	145,4	101,0	90,7	493,0	499,1
23	212	234,3	104,3	106,0	171,0	167,1	116,9	121,4	93,0	154,8	354,0	410,6
24	137	129,8	36,1	36,2	31,9	30,7	57,5	57,0	34,8	34,8	57,1	54,9
R^2	0,932		0,990		0,924		0,958		0,851		0,979	

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται πως το προτεινόμενο νευρωνικό δίκτυο είναι σε μεγάλο βαθμό αποτελεσματικό για την εκτίμηση της τιμής της αντίστασης γείωσης. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού σημειώνεται για το ηλεκτρόδιο με σκυρόδεμα (G_2), κάτι που επιβεβαιώνει και τη σταθερότητα της απόδοσής του στον χρόνο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.17, ενώ ο χαμηλότερος για το ηλεκτρόδιο με το συνθετικό υλικό B (G_5). Αυτές οι αποκλίσεις μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών, ίσως, να οφείλονται και στο γεγονός ότι κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου στοχεύεται η ελαχιστοποίηση της G_{av} και όχι η μεγιστοποίηση του δείκτη R^2 για κάθε έξοδο. Επίσης, με εφαρμογή κάποιας άλλης εκδοχής ή παραλλαγής του αλγόριθμου BP, ίσως, να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων εκτίμησης προς τις πραγματικές τιμές.

4.2.7.3 Εκπαίδευση του προτεινόμενου ΤΝΔ με παραλλαγές του BP αλγόριθμου και με εφαρμογή δύο σεναρίων εκπαίδευσης

Σε συνέχεια της παραπάνω προτεινόμενης μεθοδολογίας, το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε μ' ένα μεγαλύτερο σύνολο δεδομένων και διερευνήθηκε η απόδοσή του με διάφορες παραλλαγές του BP αλγόριθμου εκπαίδευσης [16]. Η αρχιτεκτονική του παρέμεινε η ίδια μ' αυτήν που εικονίζεται στο Σχήμα 4.9.

Εξετάστηκαν δύο σενάκια για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Στο πρώτο σενάριο, το σύνολο δεδομένων απαρτίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της αντίστασης γείωσης των έξι εξεταζόμενων ράβδων γείωσης με βελτιωτικά υλικά και των τιμών του ύψους βροχόπτωσης. Το σύνολο δεδομένων περιελάμβανε 185 πρότυπα εισόδου-εξόδου, το οποίο χωρίστηκε σε τρία υποσύνολα, όπως και προηγουμένως. Οι μεταβλητές εισόδου ήταν οι δέκα, ίδιες, όπως και στην προηγούμενη ανάλυση.

Στο δεύτερο σενάριο το σύνολο δεδομένων απαρτίστηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διστρωματικού μοντέλου εδάφους στο λογισμικό πακέτο CYMGrd, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Το σενάριο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την ευρύτερη εκπαίδευση του δικτύου με περισσότερα δεδομένα. Το σύνολο δεδομένων περιελάμβανε 190 πρότυπα εισόδου-εξόδου και χωρίστηκε σε τρία υποσύνολα. Οι μεταβλητές εισόδου ήταν η μέση εβδομαδιαία ειδική αντίσταση

του εδάφους του ανώτερου στρώματος μία εβδομάδα πριν την ημέρα εκτίμησης της αντίστασης γείωσης, η αντίστοιχη του κατώτερου στρώματος, η μέση μηνιαία ειδική αντίσταση του εδάφους του ανώτερου στρώματος ένα μήνα πριν την ημέρα εκτίμησης της αντίστασης γείωσης, η αντίστοιχη του κατώτερου στρώματος και τα τρία ύψη βροχοπτώσης όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ανάλυση, άρα στο σύνολο επτά μεταβλητές. Οι μεταβλητές εξόδου ήταν πάλι οι αντιστάσεις γείωσης των έξι ηλεκτροδίων με τα βελτιωτικά υλικά.

Οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.2: Αλγόριθμοι εκπαίδευσης ΤΝΔ.

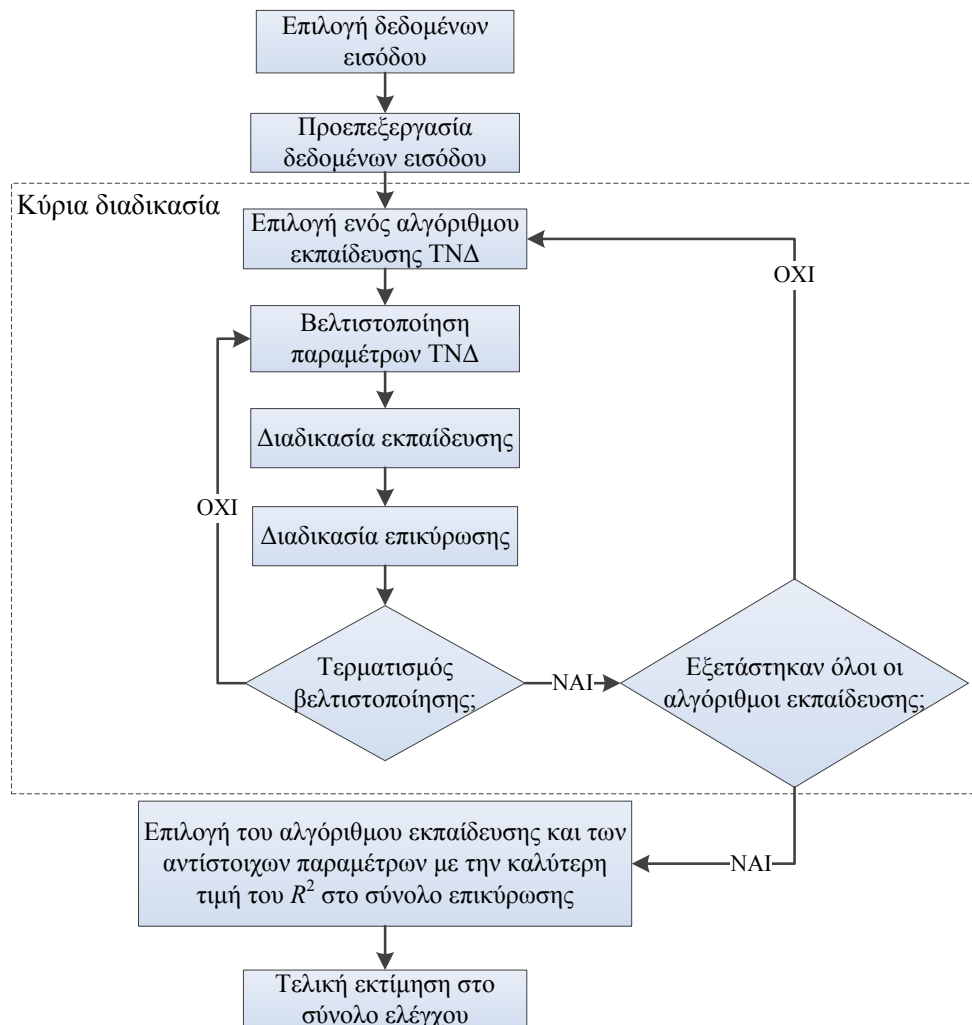
No	Περιγραφή των αλγόριθμων εκπαίδευσης
1	Stochastic training, constant learning rate
2	Batch mode, constant learning rate
3	Batch mode with momentum term and use of adaptive rules for the learning rate
4	Batch mode, quasi-Newton algorithm
5	Batch mode, Levenberg-Marquardt algorithm

Οι παράμετροι που είναι κοινές σ' όλους τους παραπάνω αλγόριθμους είναι το πλήθος των νευρώνων του κρυφού στρώματος, οι παράμετροι a και b των συναρτήσεων ενεργοποίησης και το μέγιστο πλήθος των εποχών. Για τους αλγόριθμους 1–3 οι επιπρόσθετες παράμετροι είναι η χρονική σταθερά και η αρχική τιμή τόσο του ρυθμού μάθησης, όσο και του όρου ορμής, ενώ για τον αλγόριθμο 5 είναι το $\lambda(0)$ και το β .

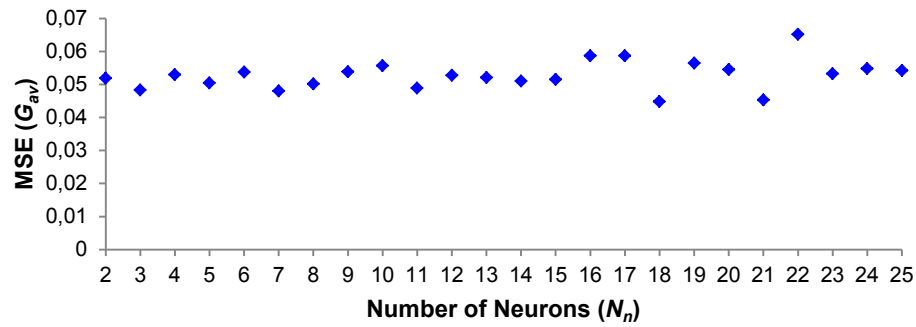
Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης που εξετάστηκαν ήταν οι ίδιες με τις αντίστοιχες της εκπαίδευσης του αρχικού ΤΝΔ. Όσον αφορά τα κριτήρια τερματισμού της εκπαίδευσης, αντί για τη σταθεροποίηση των βαρών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του πρώιμου τερματισμού της εκπαίδευσης, όπως αναλύεται διεξοδικά στο [4] και υπάρχει ως κριτήριο τερματισμού στο ANN Toolbox του MatLab.

Η διαδικασία προσδιορισμού των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων παρέμεινε η ίδια μ' αυτήν που περιγράφηκε αναλυτικά στις προηγούμενες παραγράφους, με διαφοροποίηση μόνο ως προς την εισαγωγή των προτύπων στο δίκτυο και τη ρύθμιση των βαρών, ανάλογα αν ο αλγόριθμος είναι stochastic training ή batch mode. Η διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά για κάθε αλγόριθμο του Πίνακα 4.2 και για καθένα από τα δύο σενάρια εκπαίδευσης.

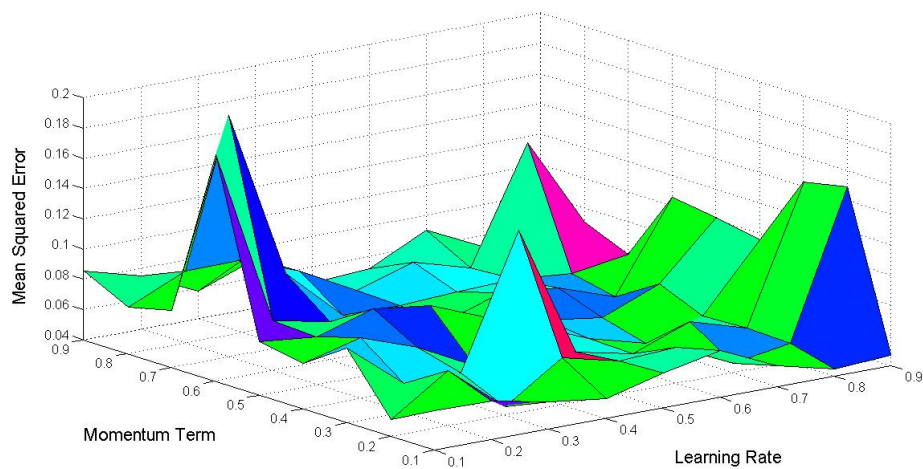
Συνοπτικά, τα βήματα εκτέλεσης της εκπαίδευσης του νευρωνικού δίνονται στο Σχήμα 4.15. Ενδεικτικά, δίνονται τα γραφήματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων του αλγόριθμου 3 (Πίνακας 4.2) κατά την εκτέλεση του πρώτου σεναρίου και ο Πίνακας 4.3 που περιέχει τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων για κάθε αλγόριθμο.



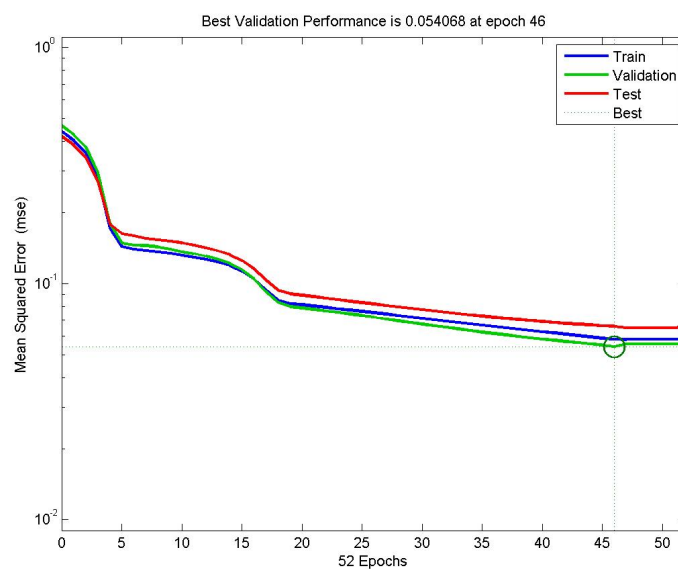
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα ροής της εκπαίδευσης του ΤΝΔ με διάφορους αλγόριθμους εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.16: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης ως προς το πλήθος των νευρώνων του κρυφού στρώματος.



Σχήμα 4.17: G_{av} στο σύνολο επικύρωσης για $a_0 \in [0,1, 0,9]$ και $\eta_0 \in [0,1, 0,9]$.

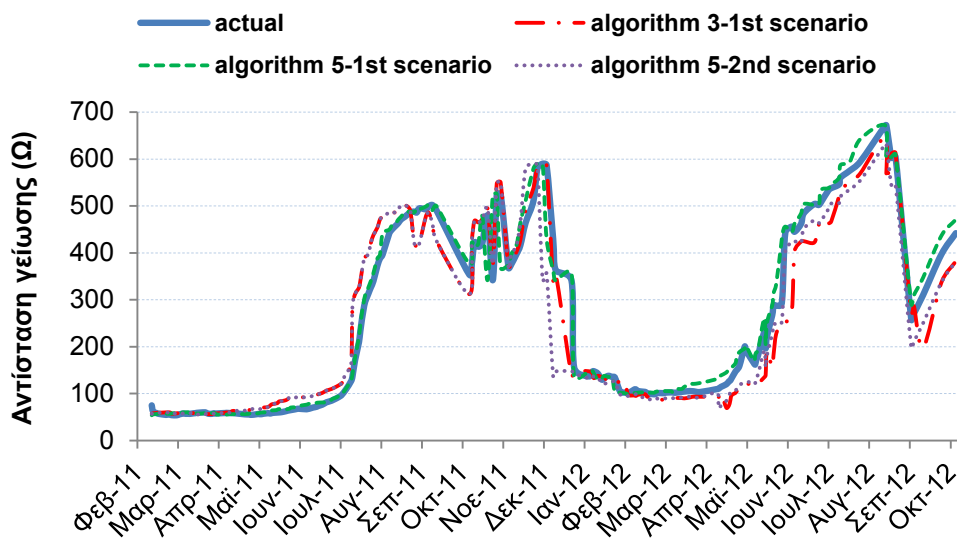


Σχήμα 4.18: G_{av} στα σύνολα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου 3 για το πρώτο σενάριο.

Μια γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων εκτίμησης του νευρωνικού δικτύου για την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου G_6 από την εκπαίδευσή του με δύο αλγόριθμους και για τα δύο σενάρια δίνεται στο Σχήμα 4.19. Γι' αυτήν την απεικόνιση επιλέχθηκε το ηλεκτρόδιο G_6 , διότι είναι εκείνο που εμφανίζει την πιο μεγάλη και απότομη διακύμανση στην τιμή της αντίστασης γείωσης, δηλαδή είναι η πιο δύσκολη περίπτωση συνάρτησης εισόδου-εξόδου που καλείται να προσεγγίσει το νευρωνικό δίκτυο. Παρ' όλα αυτά, το νευρωνικό εμφάνισε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στην πρόβλεψη της R_{g6} .

Πίνακας 4.3: Βελτιστοποιημένες παράμετροι των αλγόριθμων εκπαίδευσης.

Αλγόριθμος	N_n	Παράμετροι	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	G_{av} (σύνολο επικύρωσης)
1a	20		$f_1(x) = 2/(1 + \exp(-2x))-1$ $f_2(x) = x$	1,056
1b	20		$f_1(x) = 2/(1 + \exp(-2x))-1$ $f_2(x) = x$	1,229
2a	24		$f_1(x) = 2/(1 + \exp(-2x))-1$ $f_2(x) = x$	0,056
2b	17		$f_1(x) = 2/(1 + \exp(-2x))-1$ $f_2(x) = x$	0,065
3a	21	$\alpha_0 = 0.4$ $\eta_0 = 0.7 T_n = 2400$	$f_1(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ $f_2(x) = 2/(1 + \exp(-2x))-1$	0,054
3b	21	$\alpha_0 = 0.5$ $\eta_0 = 0.8 T_n = 2400$	$f_1(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ $f_2(x) = 2/(1 + \exp(-2x))-1$	0,063
4a	25		$f_1(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ $f_2(x) = x$	0,034
4b	23		$f_1(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ $f_2(x) = x$	0,035
5a	21		$f_1(x) = 2/(1 + \exp(-2x))-1$ $f_2(x) = x$	0,037
5b	21		$f_1(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ $f_2(x) = x$	0,049



Σχήμα 4.19: Πραγματικές και εκτιμώμενες τιμές της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_6 ως συνάρτηση του χρόνου (αλγόριθμος 3-1^ο σενάριο, αλγόριθμος 5-1^ο σενάριο και αλγόριθμος 5-2^ο σενάριο).

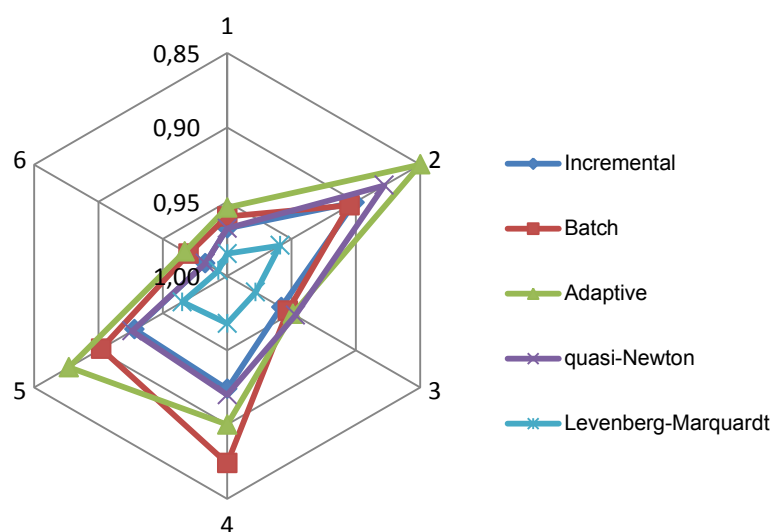
Για τον σχηματισμό μιας σαφούς εικόνας για την απόδοση του κάθε αλγόριθμου εκπαίδευσης παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 του συνόλου ελέγχου για κάθε αλγόριθμο και για τα δύο σενάρια στους δύο ακόλουθους πίνακες. Επίσης, στα Σχήματα 4.20 και 4.21 δίνεται μια γραφική απεικόνιση της σύγκλισης των εκτιμήσεων του νευρωνικού προς τις πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια, όταν εκπαιδεύεται με καθέναν από τους πέντε αλγόριθμους εκπαίδευσης.

Πίνακας 4.4: Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) στο σύνολο ελέγχου για τα έξι ηλεκτρόδια (1^ο σενάριο).

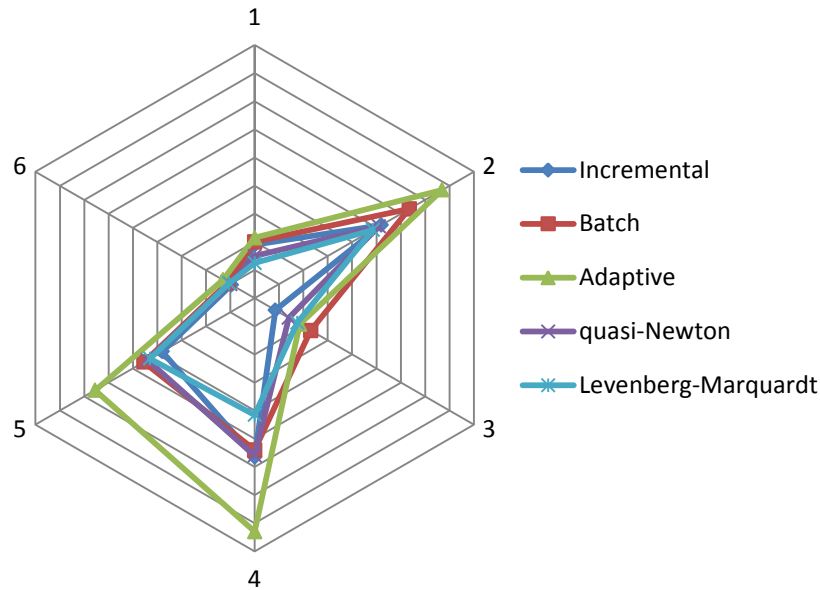
	Incremental	Batch	Adaptive	Quasi-Newton	Levenberg-Marquardt
R_{g1}	0,968	0,960	0,954	0,968	0,995
R_{g2}	0,901	0,905	0,850	0,878	0,998
R_{g3}	0,958	0,953	0,949	0,947	0,986
R_{g4}	0,924	0,874	0,900	0,920	0,988
R_{g5}	0,928	0,902	0,877	0,926	0,964
R_{g6}	0,983	0,970	0,967	0,983	0,996
R^2_{av}	0,944	0,927	0,916	0,937	0,988

Πίνακας 4.5: Συντελεστής προσδιορισμού (R^2) στο σύνολο ελέγχου για τα έξι ηλεκτρόδια (2^ο σενάριο).

	Incremental	Batch	Adaptive	Quasi-Newton	Levenberg-Marquardt
R_{g1}	0,962	0,960	0,957	0,970	0,979
R_{g2}	0,896	0,873	0,846	0,898	0,927
R_{g3}	0,983	0,954	0,963	0,972	0,957
R_{g4}	0,887	0,892	0,834	0,888	0,879
R_{g5}	0,924	0,909	0,869	0,912	0,951
R_{g6}	0,981	0,978	0,974	0,980	0,981
R^2_{av}	0,939	0,928	0,907	0,937	0,946



Σχήμα 4.20: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή προσδιορισμού (R^2) για κάθε ηλεκτρόδιο γείωσης από όλους του αλγόριθμους εκπαίδευσης (1^ο σενάριο).



Σχήμα 4.21: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή προσδιορισμού (R^2) για κάθε ηλεκτρόδιο γείωσης από όλους του αλγόριθμους εκπαίδευσης (2^ο σενάριο).

Από τους Πίνακες 4.4 και 4.5, καθώς και από τα Σχήματα 4.20 και 4.21, οδηγείται κανείς στο συμπέρασμα, ότι ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt προσφέρει την καλύτερη εκπαίδευση στο συγκεκριμένο νευρωνικό δίκτυο, καθώς εμφανίζεται ως αποτελεσματικότερος μεταξύ των άλλων αλγορίθμων, τόσο ως προς τη σύγκρισή τους ανά ηλεκτρόδιο ξεχωριστά, όσο και σαν συνολική απόδοση από τα έξι ηλεκτρόδια μέσω του R^2 . Αυτή η εικόνα είναι πιο ξεκάθαρη για το πρώτο σενάριο εκπαίδευσης, ενώ, για το δεύτερο σενάριο οι διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων φαίνονται να αμβλύνονται. Σ' αυτό, ίσως, να συμβάλλει και η απόκλιση των τιμών εκτίμησης της αντίστασης γείωσης, του δεύτερου σεναρίου, από τις πειραματικές τιμές. Σ' αυτά τα συμπεράσματα συντείνουν και τα γραφήματα στο Σχήμα 4.19, στα οποία φαίνεται η πολύ καλή σύγκλιση όλων των αποτελεσμάτων του αλγόριθμου Levenberg-Marquardt προς τις πραγματικές πειραματικές τιμές.

Επιπρόσθετα, παρατίθενται και οι πραγματικές με τις εκτιμώμενες τιμές του συνόλου ελέγχου από τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt για όλα τα ηλεκτρόδια και για τα δύο σενάρια. Στους πίνακες που ακολουθούν προστίθεται και ένας ακόμα δείκτης αξιολόγησης της σύγκλισης των αποτελεσμάτων, το MAPE το οποίο ορίζεται ως:

$$\text{MAPE}(\%) = 100 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4.17)$$

Πίνακας 4.6: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές του συνόλου ελέγχου για τον αλγόριθμο 5 (1^ο σενάριο).

	R_{g1}	\hat{R}_{g1}	R_{g2}	\hat{R}_{g2}	R_{g3}	\hat{R}_{g3}	R_{g4}	\hat{R}_{g4}	R_{g5}	\hat{R}_{g5}	R_{g6}	\hat{R}_{g6}
1	135,4	138,5	34,7	38,4	31,9	33,3	57,2	57,4	33,4	33,6	55,6	60,2
2	131,3	135,3	34,0	38,5	31,4	33,2	55,7	57,6	33,3	33,7	55,4	60,0
3	132,0	127,5	34,1	36,2	31,6	31,2	56,3	53,4	33,3	33,5	54,2	57,0
4	130,4	124,9	35,0	36,7	31,3	31,4	55,8	54,1	33,4	34,0	53,9	58,2
5	136,3	131,7	36,3	36,7	31,7	31,6	57,6	53,9	34,5	34,1	55,8	57,9
6	135,9	130,2	36,1	37,3	31,9	32,0	57,5	54,4	34,6	34,7	56,5	57,6
7	138,6	132,1	36,3	37,6	32,1	32,0	57,6	54,8	35,1	34,0	57,5	57,8
8	136,9	135,5	35,8	38,5	31,8	32,1	57,5	54,1	34,7	35,8	57,0	58,6
9	137,0	133,0	36,1	38,7	31,9	32,1	57,5	54,0	34,8	33,7	57,1	59,0
10	137,4	133,6	36,1	37,9	32,0	30,9	57,6	54,3	34,7	32,6	56,9	58,5
11	226,1	225,0	72,1	74,4	44,8	44,5	84,2	83,7	42,3	41,8	100,6	99,3
12	224,0	228,2	74,0	75,3	44,2	44,8	81,6	86,0	41,5	42,1	98,6	101,4
13	225,0	226,7	74,4	75,0	44,5	44,5	83,7	85,8	41,8	41,3	99,3	101,0
14	228,2	231,0	75,3	76,5	44,8	45,0	86,0	88,0	42,1	41,6	101,4	102,2
15	226,7	234,0	75,0	76,9	44,5	45,6	85,8	89,1	41,3	41,8	101,0	102,7
16	231,0	237,2	76,5	77,0	45,0	45,5	88,0	89,2	41,6	41,7	102,2	102,6
17	237,0	234,0	76,9	76,4	45,6	45,2	89,1	88,7	41,8	41,0	102,7	101,9
18	237,2	241,0	77,0	77,3	45,5	46,0	89,2	90,4	41,7	41,1	102,6	103,7
19	234,0	238,3	76,4	77,8	45,2	47,1	88,7	93,3	41,0	41,0	101,9	104,4
20	241,0	253,0	77,3	78,1	46,0	48,2	90,4	95,4	41,1	40,7	103,7	105,5
MAPE %	2,593		3,855		1,734		3,745		1,598		2,982	

Πίνακας 4.7: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές του συνόλου ελέγχου για τον αλγόριθμο 5 (2^ο σενάριο).

	R_{g1}	\hat{R}_{g1}	R_{g2}	\hat{R}_{g2}	R_{g3}	\hat{R}_{g3}	R_{g4}	\hat{R}_{g4}	R_{g5}	\hat{R}_{g5}	R_{g6}	\hat{R}_{g6}
1	121,4	118,5	46,7	47,8	32,1	34,2	51,9	52,6	31,0	30,7	59,8	66,4
2	122,2	119,3	45,3	48,3	32,3	34,4	52,1	53,1	30,9	30,7	60,0	67,0
3	101,6	120,5	41,3	49,0	32,0	34,6	48,8	53,3	29,7	30,6	60,6	67,6
4	106,4	120,9	43,0	49,2	32,6	34,7	49,6	53,5	30,3	30,6	62,4	67,8
5	110,2	94,3	43,7	40,8	32,8	29,2	50,5	46,5	30,5	25,9	63,2	66,7
6	115,4	96,7	44,3	41,3	32,6	29,8	51,1	46,9	30,6	26,2	63,9	67,5
7	113,5	98,3	45,0	41,6	32,8	30,2	51,7	47,3	30,5	26,5	64,4	67,8
8	115,3	102,2	45,6	43,1	33,0	32,2	52,1	51,2	30,7	26,8	64,9	70,4
9	118,5	104,6	47,8	43,6	34,2	32,4	52,6	51,7	30,7	26,9	66,4	70,9
10	119,3	106,0	48,3	45,1	34,4	32,6	53,1	52,2	30,7	27,1	67,0	71,6
11	211,2	338,0	91,1	116,3	75,4	71,7	119,5	201,0	45,0	76,0	179,3	302,0
12	245,7	353,0	93,4	116,6	77,1	99,2	123,5	155,2	46,9	75,7	230,7	336,0
13	254,4	352,0	95,2	108,8	79,0	99,2	126,9	146,8	47,6	89,8	196,3	314,0
14	259,7	392,0	97,1	93,2	84,0	150,2	131,0	101,7	47,9	85,0	222,0	334,0
15	266,0	398,0	97,7	118,5	87,6	70,9	131,6	155,5	49,6	90,0	267,0	438,0
16	271,2	401,0	99,8	120,2	94,5	112,6	134,7	158,5	51,2	98,0	288,2	446,0
17	298,0	403,0	64,3	97,4	59,2	100,7	124,6	162,5	54,0	102,0	407,0	560,0
18	302,3	412,0	104,5	123,0	99,2	188,0	122,3	160,7	59,1	106,9	289,9	392,0
19	312,0	467,0	105,0	108,2	108,9	197,0	118,1	163,2	79,8	138,0	118,3	162,0
20	330,0	476,0	106,2	132,2	115,3	207,0	143,7	173,4	60,1	105,6	443,0	603,0
MAPE %	28,560		14,657		28,212		16,928		43,634		28,532	

4.3 Wavelet νευρωνικά δίκτυα (WNN)

4.3.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση Wavelet έχει αναδειχθεί σ' ένα πολύτιμο μαθηματικό εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση πλειάδας χρονοσειρών και έχει, έως τώρα, εφαρμοστεί με επιτυχία στους τομείς της επεξεργασίας εικόνας, της αποθορυβοποίησης σημάτων, της εκτίμησης πυκνότητας, της συμπίεσης σημάτων και εικόνας και της αποσύνθεσης σημάτων στην κλίμακα του χρόνου. Θεωρείται, συχνά, ως ένα μικροσκόπιο στα μαθηματικά [17] και είναι ένα ισχυρότατο εργαλείο για την αναπαράσταση μη γραμμικότητας [18].

Για την εξεύρεση ενός εναλλακτικού, προς τα κλασικά νευρωνικά δίκτυα, εργαλείου που θα ήταν πιο ευέλικτο και λιγότερο χρονοβόρο στην εκπαίδευσή του, η έρευνα στράφηκε στην ανάπτυξη πιο ευέλικτων δικτύων, των λεγόμενων Wavelet νευρωνικών δικτύων, ή απλά Wavelet δικτύων (WNNs) όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Αυτά τα δίκτυα διατήρησαν αρκετά από τα χαρακτηριστικά των κλασικών νευρωνικών δικτύων, χρησιμοποιώντας όμως τις συναρτήσεις wavelet ως συναρτήσεις ενεργοποίησης.

4.3.2 Από τον μετασχηματισμό Fourier στην ανάλυση Wavelet

Ο φυσικός και τεχνητός κόσμος αποτελούνται από συστήματα, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω σημάτων. Ένα σήμα μπορεί να είναι συνεχούς χρόνου (ηλεκτρική τάση), ή διακριτού χρόνου (έξοδος ψηφιακού κυκλώματος) και να λαμβάνει, αντίστοιχα, συνεχείς ή διακριτές τιμές. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των σημάτων αποτελείται από σήματα μιας διάστασης, η οποία είναι ο *χρόνος*, η, δε, πιο συνηθισμένη αναπαράστασή τους είναι γνωστή ως αναπαράσταση πλάτους-χρόνου. Εν τούτοις, σε πολλές περιπτώσεις, η κύρια πληροφορία που περιέχει και μεταφέρει το σήμα, δεν είναι δυνατόν να αντληθεί από την αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο του χρόνου, αλλά από την αναπαράστασή του στο πεδίο της συχνότητας.

Ένα πολύ διαδεδομένο εργαλείο που αναπαριστά σχεδόν οποιοδήποτε σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας είναι ο μετασχηματισμός

Fourier (FT) και οι «παράγωγοι» μετασχηματισμοί συνημιτόνου (DCT) και τροποποιημένου συνημιτόνου (MDCT).

Αν $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ περιοδική συνάρτηση με περίοδο $T > 0$, που ικανοποιεί τη σχέση:

$$\|f\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |f|^2 dt < \infty \quad (4.18)$$

τότε ο μετασχηματισμός Fourier αυτής δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i \omega t} f(t) dt \quad (4.19)$$

και οι συντελεστές Fourier δίνονται από:

$$c_n = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i \omega_n t} f(t) dt \quad (4.20)$$

όπου $\omega_n = n/T$ και $e^{2\pi i \omega_n} = \cos(2\pi \omega_n) + i \sin(2\pi \omega_n)$

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι κατάλληλος για απλά προβλήματα και, μάλιστα, συνηθέστερα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας των συστημάτων. Τα πράγματα περιπλέκονται όταν, κατά την ομαλή λειτουργία του συστήματος, συμβαίνει κάποιο απότομο μεταβατικό φαινόμενο, χαρακτηριζόμενο, συνήθως, ως «ανωμαλία». Σ' αυτήν την περίπτωση, ενώ ο FT αναγνωρίζει και αναπαριστά το μεταβατικό φαινόμενο στο πλάτος του σήματος, ωστόσο, δεν μπορεί να τοποθετήσει με ακρίβεια αυτήν τη μεταβολή στο χρόνο. Αυτό έχει ως συνέπεια την αδυναμία διάκρισης και εντοπισμού της χρονικής στιγμής, ή περιόδου, στην οποία έλαβε χώρα το φαινόμενο. Επίσης, παρά την αλλαγή στο πλάτος του σήματος, οι φασματικές συνιστώσες που αντιστοιχούν σ' αυτό είναι σχετικά μικρές, καθώς η ενέργειά του έχει διαμοιραστεί σ' όλο το μήκος του σήματος.

Γίνεται κατανοητό ότι η δυνατότητα συσχέτισης ενός φαινομένου με τον χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική. Συνεπώς, η εξεύρεση ενός τρόπου για τον προσδιορισμό του περιεχομένου ενός σήματος στο πεδίο της συχνότητας και, ταυτόχρονα, της χρονικής στιγμής που αυτό μεταβάλλεται, είναι, πλέον, επιτακτική. Μια λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχει δώσει ο μετασχηματισμός Fourier βραχέως χρόνου (STFT). Κατά τη διαδικασία αυτού του μετασχηματισμού το αρχικό σήμα χωρίζεται σε μία σειρά από μικρότερα σήματα, ίσου μήκους, στο καθένα από τα οποία εκτελείται ο FT. Το μέγεθος, καθενός απ' αυτά τα μικρότερα σήματα, ονομάζεται παράθυρο ανάλυσης. Αν

θεωρηθεί ένα συμμετρικό παράθυρο, ως παράθυρο ανάλυσης, δηλαδή $g(u) = g(-u)$, για τον εντοπισμό σημάτων στον χρόνο, τότε για κάθε $t \in \mathbb{R}$ ορίζεται:

$$f_t(u) = \bar{g}(u-t)f(u) \quad (4.21)$$

Η εξίσωση (4.21) δείχνει ότι η $f_t(u)$ είναι μία τοπική εκδοχή της f , που εξαρτάται μόνο από τις τιμές της $f(u)$. Ο STFT της f δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tilde{f}(\omega, t) = \hat{f}_t(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i \omega u} \bar{g}(u-t)f(u) du \quad (4.22)$$

Είναι προφανές ότι, αν $g(u)=1$, τότε ο STFT εκφυλίζεται στον κλασικό FT.

Μολαταύτα, αυτή η τεχνική του διαχωρισμού του αρχικού σήματος σε μικρότερα δημιουργεί τεχνητές συνοριακές συνθήκες στα άκρα καθενός από τα παράθυρα ανάλυσης. Επιπροσθέτως, το καθένα από τα δύο στοιχεία, εκατέρωθεν του συνόρου, δέχεται ξεχωριστή επεξεργασία, οπότε, είναι πολύ πιθανόν, αν γίνει ανασύνθεση του αρχικού σήματος μέσω των αποτελεσμάτων του STFT να δημιουργηθούν τεχνητές ασυνέχειες στα σημεία τομής. Το πρόβλημα, λοιπόν, των τεχνητών συνόρων λύνεται με διάφορες τεχνικές, όπως π.χ. με επιλογή παραθύρων που αλληλοκαλύπτονται και απόρριψη των οριακών σημείων κατά την ανασύνθεση, όπως πραγματοποιείται στον τροποποιημένο διακριτό μετασχηματισμό συνημιτόνου (MDCT). Ωστόσο, ένα πρόβλημα που παραμένει, είναι ότι η επιλογή του παραθύρου αποτελεί έναν συμβιβασμό.

Μια πιο αξιόπιστη λύση στο πρόβλημα δόθηκε με τη χρήση παραθύρων μεταβαλλόμενης διάρκειας, αντί σταθερής που χρησιμοποιεί ο STFT. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν, ως παράθυρα, κυματομορφές μικρότερης διάρκειας στις υψηλότερες συχνότητες και κυματομορφές μεγαλύτερης διάρκειας στις χαμηλότερες συχνότητες. Αυτή η μέθοδος ονομάστηκε *ανάλυση Wavelet (WA)*.

Σ' αυτήν τη μεθοδολογία χρησιμοποιούνται ακολουθίες $\psi(n)$ οι οποίες, αν και ταλαντώνονται οι τιμές τους, είναι εντοπισμένες χρονικά και έχουν πεπερασμένη ενέργεια. Συνεπώς αυτές οι ακολουθίες μπορούν να ονομαστούν *wavelets (κυματίδια)* και οι οποίες είναι ουσιαστικά διακριτοποιημένες εκδοχές της πρώτης συνάρτησης wavelet που παρουσιάστηκε στα μαθηματικά. Το όνομα wavelet προέρχεται από τη μορφή μικρού, εντοπισμένου στο χρόνο, κύματος (δηλαδή λαμβάνουν τιμές πάνω και κάτω από το μηδέν) που έχουν οι περισσότερες απ' αυτές.

Ένα wavelet (κυματίδιο) ψ είναι μια κυματομορφή για την οποία ισχύει:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (4.23)$$

Η μέθοδος της ανάλυσης Wavelet υιοθετεί μία συγκεκριμένη συνάρτηση wavelet, η οποία καλείται *mother wavelet*. Μια οικογένεια wavelets, που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και αναπαράσταση ενός αρχικού σήματος, παράγονται από *διαστολή* (dilation) και *μετατόπιση* (translation) μίας συνάρτησης wavelet ψ (mother wavelet). Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα παραγόμενα wavelets, τα οποία είναι διεσταλμένες και μετατοπισμένες μορφές της mother wavelet, περιγράφονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.24)$$

όπου, a είναι η παράμετρος κλίμακας και b η παράμετρος μετατόπισης. Έτσι, λοιπόν, το αρχικό σήμα αναλύεται σε μία σειρά μετατοπισμένων και διεσταλμένων μορφών της αρχικής mother wavelet.

4.3.3 Δομή ενός wavelet δικτύου

Τα WNs έχουν χρησιμοποιηθεί, μέχρι τώρα, σε πλειάδα εφαρμογών όπως στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίων, στην πρόβλεψη χρονοσειρών, στην ταξινόμηση και συμπίεση σημάτων, στην αποθορυβοποίηση σήματος και στη μη γραμμική μοντελοποίηση. Τα WNs είναι μία γενίκευση των δικτύων συνάρτησης ακτινικής βάσης (RBFN). Είναι δίκτυα ενός κρυφού στρώματος, τα οποία χρησιμοποιούν ένα wavelet, ως συνάρτηση ενεργοποίησης, αντί της κλασικής σιγμοειδούς. Οι κόμβοι των WNs είναι οι συντελεστές wavelet της διευρυμένης συνάρτησης, οι οποίοι έχουν σημαντική τιμή [19].

Τα WNs συνήθως αποτελούνται από τρία στρώματα. Το πρώτο στρώμα είναι το στρώμα εισόδου, το μεσαίο στρώμα είναι το κρυφό στρώμα και το τελευταίο είναι το στρώμα εξόδου. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος εισάγονται στο WN από το στρώμα εισόδου. Το κρυφό στρώμα αποτελείται από τους κρυφούς νευρώνες ή αλλιώς *κρυφές μονάδες* (hidden units-Hus). Αυτού του είδους οι νευρώνες, συχνά, στην ορολογία των WNs καλούνται και ως *wavelons* και οι οποίοι είναι παρόμοιοι με τους νευρώνες του κρυφού στρώματος των κλασικών σιγμοειδών ANNs. Στο κρυφό στρώμα, ουσιαστικά, οι μεταβλητές

εισόδου μετασχηματίζονται σε διεσταλμένες και μετατοπισμένες εκδοχές της mother wavelet. Τέλος, από το στρώμα εξόδου λαμβάνεται η εκτίμηση, από το δίκτυο, της τιμής στόχου.

Η δομή ενός εμπρόσθιας τροφοδότησης WN μ' ένα κρυφό στρώμα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.22, ενώ η έξοδος του δικτύου δίνεται από την εξίσωση (4.25):

$$g_\lambda(\mathbf{x}; \mathbf{w}) = \hat{y}(\mathbf{x}) = w_{\lambda+1}^{[2]} + \sum_{j=1}^{\lambda} w_j^{[2]} \cdot \Psi_j(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m w_i^{[0]} \cdot x_i \quad (4.25)$$

όπου, $\Psi_j(x)$ είναι ένα πολυδιάστατο wavelet, το οποίο έχει κατασκευαστεί από το γινόμενο των m βαθμωτών wavelets, \mathbf{x} είναι το διάνυσμα εισόδου, m το πλήθος των εισόδων του δικτύου, λ το πλήθος των HUs και το w αναπαριστά τα βάρη του δικτύου. Τα πολυδιάστατα wavelets υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\Psi_j(x) = \prod_{i=1}^m \psi(z_{ij}) \quad (4.26)$$

όπου ψ είναι το mother wavelet και

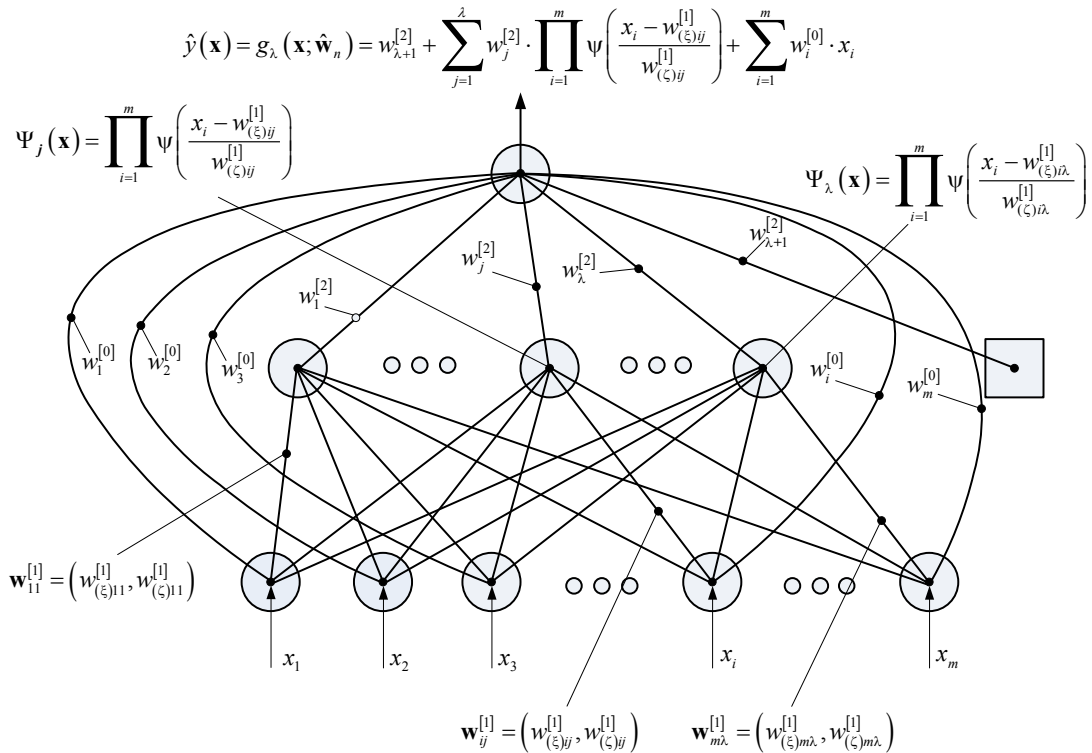
$$z_{ij} = \frac{x_i - w_{(\xi)ij}^{[1]}}{w_{(\zeta)ij}^{[1]}} \quad (4.27)$$

Στην εξίσωση (4.27) είναι $i=1, \dots, m$, $j=1, \dots, \lambda+1$ και τα βάρη w αντιστοιχούν στους συντελεστές μετατόπισης ($w_{(\xi)ij}^{[1]}$) και διαστολής $w_{(\zeta)ij}^{[1]}$. Το πλήρες διάνυσμα των παραμέτρων του δικτύου είναι το $w = (w_i^{[0]}, w_j^{[2]}, w_{\lambda+1}^{[2]}, w_{(\xi)ij}^{[1]}, w_{(\zeta)ij}^{[1]})$. Αυτές οι παράμετροι ρυθμίζονται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης του δικτύου. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη συνάρτηση wavelet, που χρησιμοποιείται και στο μοντέλο wavelet της παρούσας διατριβής, είναι η δεύτερη παράγωγος της Gaussian, που καλείται και *Μεξικάνικο καπέλο* (Mexican Hat) λόγω της κυματομορφής της:

$$\psi(z_{ij}) = (1 - z_{ij}^2) e^{-\frac{1}{2}z_{ij}^2} \quad (4.28)$$

Για λόγους πληρότητας, στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί, ότι η εξίσωση (4.28), που χρησιμοποιείται για το WN, διαφέρει ελαφρώς από την κανονική μαθηματική έκφραση που περιγράφει το «Μεξικάνικο καπέλο» και η οποία είναι:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{2}{\sqrt{3}\pi^{1/4}} e^{-\frac{z^2}{2}} (1 - z^2), \quad z = \frac{t-b}{a} \quad (4.29)$$



Σχήμα 4.22: Wavelet νευρωνικό δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης [19].

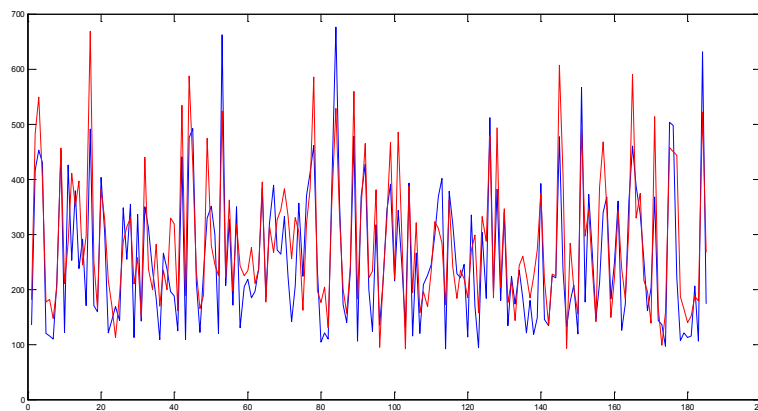
4.3.4 WN δίκτυο πρόβλεψης τιμών της αντίστασης γείωσης

4.3.4.1 Κατασκευή και αρχιτεκτονική του προτεινόμενου WN

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η πολυδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος της εκτίμησης και πρόβλεψης της αντίστασης συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά εδάφους. Στο πλαίσιο αυτής της προσέγγισης, προτείνεται ένα ακόμη μοντέλο εκτίμησης και πρόβλεψης της αντίστασης γείωσης των εξεταζόμενων ηλεκτροδίων, εναλλακτικό των ΤΝΔ, βασισμένο σε wavelet νευρωνικό δίκτυο (WN). Κατασκευάστηκε, για κάθε ένα ηλεκτρόδιο, πολυδιάστατο wavelet δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης τριών στρωμάτων (στρώμα εισόδου, κρυφό στρώμα, στρώμα εξόδου) με γραμμική σύνδεση μεταξύ των HUs και του στρώματος εξόδου, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 4.22. Επιπλέον, με στόχο την καλή απόδοση του δικτύου στην παρουσία τυχούσας γραμμικότητας, εγκαταστάθηκαν απευθείας συνδέσεις μεταξύ των στρωμάτων εισόδου και εξόδου. Η δε έξοδος του δικτύου δίνεται από την εξίσωση (4.25). Τα δίκτυα εκπαιδεύτηκαν με τις μετρήσεις, 45 μηνών, από τα 5 εξεταζόμενα κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης G_1, G_2, G_3, G_4 και G_5 [20].

Μια τυχαία αρχικοποίηση των παραμέτρων του δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε HUs μηδενικής τιμής. Αντιθέτως, μια αποτελεσματική αρχικοποίηση θα έχει ως αποτέλεσμα λιγότερες επαναλήψεις στη φάση της εκπαίδευσης του δικτύου και αποφυγή εγκλωβισμού των αλγορίθμων εκπαίδευσης σε τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης κόστους.

Στην παρούσα μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε η *Backward Elimination* μέθοδος για την αρχικοποίηση των παραμέτρων του δικτύου. Αυτή η μέθοδος ξεκινά την παλινδρόμηση επιλέγοντας όλα τα διαθέσιμα wavelets από τη βιβλιοθήκη wavelet. Κατόπιν, το wavelet που συνεισφέρει ελάχιστα στην προσαρμογή των δεδομένων εκπαίδευσης απαλείφεται επαναληπτικά. Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι χαρακτηρίζεται από μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, αλλά θεωρείται από τη βιβλιογραφία ως πολύ αποτελεσματική. Ένα δείγμα της μεθόδου αρχικοποίησης των βαρών για το ηλεκτρόδιο G_1 δίνεται στο Σχήμα 4.23. Από το συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται ότι η αρχικοποίηση είναι αρκετά καλή, αφού το wavelet ξεκινά πολύ κοντά στη συνάρτηση στόχο, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.23: Αρχικοποίηση των παραμέτρων του WN.

Το σύνολο των μεταβλητών εισόδου του δικτύου αποτελείται από: α) την ειδική αντίσταση του εδάφους ρ_{id} σε βάθος $i=1m, 2m, 4m, 6m$ και $8m$, την ημέρα της μέτρησης, ($\rho_{1d}, \rho_{2d}, \rho_{4d}, \rho_{6d}, \rho_{8d}$), β) τη μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ_{iw} , στα ίδια βάθη, η οποία είναι η μέση τιμή των τελευταίων 7 ημερών πριν την ημέρα μέτρησης της αντίστασης γείωσης, ($\rho_{1w}, \rho_{2w}, \rho_{4w}, \rho_{6w}, \rho_{8w}$), γ) τη μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ_{im} , σε βάθος $i=1m$ και $2m$, η οποία είναι η μέση τιμή των τελευταίων 30 ημερών πριν την ημέρα μέτρησης της αντίστασης γείωσης (ρ_{1m}, ρ_{2m}), δ) το συνολικό

ύψος βροχόπτωσης r_d την ημέρα μέτρησης, ε) το εβδομαδιαίο συνολικό ύψος βροχόπτωσης r_w , δηλαδή των τελευταίων 7 ημερών πριν την ημέρα της μέτρησης και στ) το μηνιαίο συνολικό ύψος βροχόπτωσης r_m , δηλαδή των τελευταίων 30 ημερών πριν την ημέρα της μέτρησης.

Η μεταβλητή εξόδου του εκάστοτε wavelet δικτύου είναι η επόμενη τιμή, από την ημέρα μέτρησης d , της αντίστασης γείωσης του εξεταζόμενου, κάθε φορά, ηλεκτροδίου (R_{g1} , R_{g2} , R_{g3} , R_{g4} και R_{g5}). Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι μετρήσεις, που είναι διαθέσιμες σήμερα, χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης σε επόμενη ημέρα. Υπενθυμίζεται ότι για κάθε κατακόρυφο ηλεκτρόδιο κατασκευάστηκε και ένα ξεχωριστό δίκτυο ίδιας δομής.

Το πειραματικό σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του WN αποτελείται από 337 πρότυπα εισόδου-εξόδου τα οποία καλύπτουν την περίοδο Φεβρουάριος 2011 – Νοέμβριος 2014. Περιλαμβάνει τις πειραματικές τιμές που απεικονίζονται στα Σχήματα 3.16 και 3.17, για τις οποίες έχουν υπολογιστεί ορισμένοι στατιστικοί δείκτες και οι οποίοι παρατίθενται στο Παράρτημα Π.2, Πίνακες Π.2.1 και Π.2.2, και διαιρείται, τυχαία, σε δύο σύνολα:

- Το σύνολο εκπαίδευσης (training set or in-sample set) που αποτελείται από 237 πρότυπα, δηλαδή το 70% του αρχικού συνόλου, χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου. Με άλλα λόγια, για την κατασκευή της αρχιτεκτονικής του δικτύου, που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του βέλτιστου πλήθους κρυφών νευρώνων (wavelons), τη βέλτιστη επιλογή των μεταβλητών εισόδου, καθώς επίσης και τη μάθηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου.
- Το σύνολο πρόβλεψης (forecasting set or out-of-sample set) που αποτελείται από 100 πρότυπα, δηλαδή το 30% του αρχικού συνόλου, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ικανότητας πρόβλεψης του δικτύου. Σημειώνεται ότι το σύνολο πρόβλεψης δε χρησιμοποιείται σε καμία φάση κατά τη διάρκεια εκπαίδευσης του δικτύου.

Μια κοινή πρακτική είναι η περαιτέρω διαίρεση του in-sample συνόλου σε ένα υποσύνολο εκπαίδευσης (training set) και ένα υποσύνολο επικύρωσης (validation set). Αντ' αυτού, ένα από τα πλεονεκτήματα του Model Identification αλγόριθμου [19], του οποίου το περίγραμμα δίνεται στο Σχήμα 4.24, είναι ότι δε χρειάζεται σύνολο επικύρωσης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την

καλύτερη εκπαίδευση του δικτύου, αφού για την εκπαίδευση χρησιμοποιείται το in-sample στο σύνολό του.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα πλεονεκτήματα του κλασικού αλγόριθμου της προς τα πίσω διάδοσης σφάλματος (back-propagation algorithm), το δίκτυο εκπαιδεύτηκε μ' αυτόν τον αλγόριθμο, με ρύθμιση των βαρών ανά εποχή (batch mode), με σταθερό ρυθμό μάθησης, ίσο με $\eta=0,1$ και μηδενικό όρο ορμής. Τα κριτήρια τερματισμού του αλγόριθμου εκπαίδευσης αναφέρονται στο Παράρτημα Π.2 (εξισώσεις Π.1.3 και Π.1.4). Τέλος, ως συνάρτηση ενεργοποίησης επιλέχθηκε, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην § 4.3.3, η δεύτερη παράγωγος της γκαουσιανής συνάρτησης (Mexican Hat) (4.28).

Για την επιλογή του μοντέλου, δηλαδή της αρχιτεκτονικής του δικτύου (βέλτιστου πλήθους HUs στο κρυφό στρώμα), εφαρμόζεται η αρχή του *ελαχίστου ρίσκου πρόβλεψης* (MPR) (Παράρτημα Π.2 εξίσωση Π.1.5). Μάλιστα, για τον υπολογισμό του ρίσκου πρόβλεψης, στο δίκτυο που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκε ένα από τα πληροφοριακά κριτήρια και πιο συγκεκριμένα το Bayesian Information Criterion (BIC). Σύμφωνα μ' αυτό το κριτήριο, η κατασκευή του δικτύου ξεκινά με μηδενικά HUs. Κατόπιν, υπολογίζεται το πληροφοριακό κριτήριο από τη σχέση (4.30). Στη συνέχεια, προστίθεται στο δίκτυο ένας κρυφός νευρώνας (HU) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, έως ότου το δίκτυο να περιλαμβάνει έναν προκαθορισμένο μέγιστο αριθμό κρυφών νευρώνων. Το πλήθος των κρυφών νευρώνων που θα παράγει το ελάχιστο ρίσκο πρόβλεψης, θα είναι και το τελικό επιλεχθέν πλήθος που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του WN.

$$J_{BIC} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n (y_p - \hat{y}_p)^2 + \frac{k\hat{\sigma}^2 \ln(n)}{n} \quad (4.30)$$

όπου k είναι το πλήθος των παραμέτρων του δικτύου, n το πλήθος των προτύπων εκπαίδευσης του δικτύου και $\hat{\sigma}^2$ η εκτιμήτρια της διακύμανσης του θορύβου. Επειδή, πρακτικά, η διακύμανση του θορύβου δεν είναι γνωστή, δίνεται μία εκτίμησή της από τον υπολογισμό του MSE μεταξύ των τιμών εξόδου του δικτύου και των τιμών στόχου (πραγματικών πειραματικών τιμών) [21].

Στη συνέχεια, για την εφαρμογή ή μη κάποιας μεθοδολογίας για την επιλογή των σημαντικών από τις μεταβλητές εισόδου, ελήφθησαν υπ' όψιν τα αποτελέσματα προγενέστερης εργασίας [22], στην οποία είχε κατασκευαστεί

WN και είχε εφαρμοστεί σε αρχικό στάδιο στα ηλεκτρόδια G_1 , G_2 , και G_4 . Στην εν λόγω εργασία το τρέξιμο του αλγόριθμου έγινε για δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο εφαρμόστηκε κριτήριο επιλογής των στατιστικών σημαντικών μεταβλητών εισόδου, συγκεκριμένα το Sensitivity-Based Pruning (SBP). Ως εκ τούτου, μόνο ένα υποσύνολο, από το σύνολο των διαθέσιμων εισόδων, χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά για την εκπαίδευση του δικτύου. Στο δεύτερο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν όλες οι διαθέσιμες μεταβλητές εισόδου που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η εφαρμογή του αλγόριθμου εκπαίδευσης φαίνεται εποπτικά στο διάγραμμα ροής που παρατίθεται στο Σχήμα 4.24. Τα δε αποτελέσματα της εκπαίδευσης του WN και στα δύο σενάρια εκπαίδευσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα στην [22] (Πίνακας 4.8) έδειξαν ότι, με την εφαρμογή του κριτηρίου επιλογής των σημαντικών μεταβλητών εισόδου, το δίκτυο παρουσίασε πολύ καλύτερη απόδοση και εμφάνισε πολύ υψηλές τιμές συσχέτισης.

Ο αλγόριθμος επιλογής των σημαντικών μεταβλητών εισόδου μπορεί να μειώσει την πολυπλοκότητα του δικτύου και τους χρόνους εκπαίδευσής του, καθώς και να βελτιώσει την ικανότητα πρόβλεψης. Αυτό, εξάλλου, αποδείχθηκε και κατά τη διαδικασία κατασκευής του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που παρουσιάστηκε σε προηγούμενες παραγράφους. Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα της [22], επιλέχθηκε το Sensitivity-Based Pruning κριτήριο για την επιλογή των σημαντικών μεταβλητών εισόδου των WNs στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Σημειώνεται ότι, για την καλύτερη αξιολόγηση της ακρίβειας του δικτύου, εκτός από τον κλασικό συντελεστή προσδιορισμού R^2 , χρησιμοποιήθηκαν και οι δείκτες: κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (NMSE), συμμετρικό μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (SMAPE) και ρυθμισμένος συντελεστής προσδιορισμού \bar{R}^2 (R^2 adjusted).

$$\text{SMAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{\frac{|y_i| + |\hat{y}_i|}{2}} \quad (4.31)$$

$$\text{NMSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{\hat{y}_{av} \cdot y_{av}} \quad (4.32)$$

$$\text{όπου } \hat{y}_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \text{ και } y_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

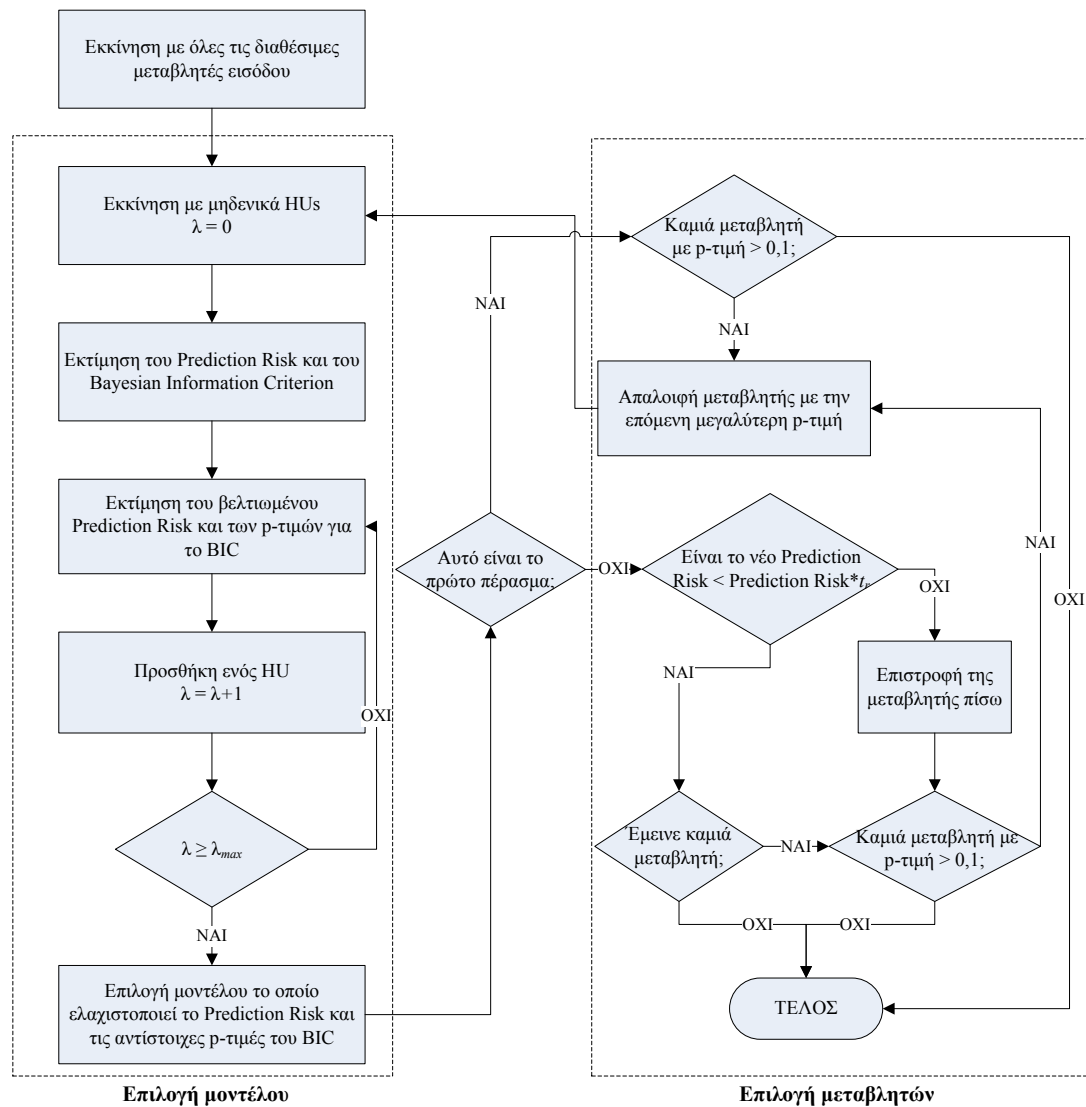
$$\bar{R}^2 = R^2 - (1 - R^2) \frac{p}{n - p - 1} \quad (4.33)$$

όπου p το πλήθος των μεταβλητών εισόδου και n το μέγεθος του δείγματος.

Πίνακας 4.8: Δείκτες αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του WN από τα δύο σενάρια εκπαίδευσης και για τα τρία ηλεκτρόδια γείωσης [22].

	In-sample	Out-of-sample	In-sample	Out-of-sample	
Rg ₁	Είσοδοι: r _d , r _m , ρ _{1d} , ρ _{8d} , ρ _{6w} HU: 11		Είσοδοι: All HU: 8		
	NMSE	0,0077	0,0846	0,0989	0,2554
	SMAPE %	2,00	5,65	5,07	7,77
	R ²	0,996	0,958	0,955	0,877
	R ² adjusted	0,992	0,916	0,912	0,770
Rg ₂	Είσοδοι: r _d , r _m , ρ _{1d} , ρ _{2d} , ρ _{4d} , ρ _{6d} , ρ _{2w} HU: 12		Είσοδοι: All HU: 1		
	NMSE	0,0085	0,0631	0,2864	0,3785
	SMAPE %	0,97	3,19	8,96	11,75
	R ²	0,996	0,971	0,845	0,793
	R ² adjusted	0,992	0,941	0,714	0,622
Rg ₄	Είσοδοι: r _d , r _m , ρ _{1d} , ρ _{2d} , ρ _{4d} , ρ _{6d} HU: 14		Είσοδοι: All HU: 3		
	NMSE	0,003	0,1155	0,053	0,0951
	SMAPE %	0,74	3,64	2,66	3,63
	R ²	0,999	0,942	0,973	0,952
	R ² adjusted	0,997	0,885	0,947	0,905

Συνοπτικά, η WN μεθοδολογία για την πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του ακόλουθου σχήματος (Σχήμα 4.24), ενώ στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των WNs που κατασκευάστηκαν για τα 5 πειραματικά συστήματα γείωσης, με τη βοήθεια των προαναφερθέντων στατιστικών μεγεθών.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα ροής της εκπαίδευσης του προτεινόμενου WN.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα της απόδοσης των WNs, για τα συστήματα γείωσης, στα in-sample και out-of-sample σύνολα.

		In-sample	Out-of-sample
R _{g1}		Είσοδοι: r _d , r _w , ρ _{1d} , ρ _{4d} , ρ _{1w} , ρ _{6w} , ρ _{8w} , ρ _{1m} , ρ _{2m} HU: 13	
	NMSE	0,0035	0,0768
	SMAPE %	1,17	4,04
	R ²	0,9983	0,9644
	R ² adjusted	0,9965	0,9232
R _{g2}		Είσοδοι: ρ _{2d} , ρ _{4d} , ρ _{8d} , ρ _{4w} , ρ _{1m} , ρ _{2m} HU: 16	
	NMSE	0,0188	0,0674
	SMAPE %	1,17	2,86
	R ²	0,9905	0,9665
	R ² adjusted	0,9812	0,9326

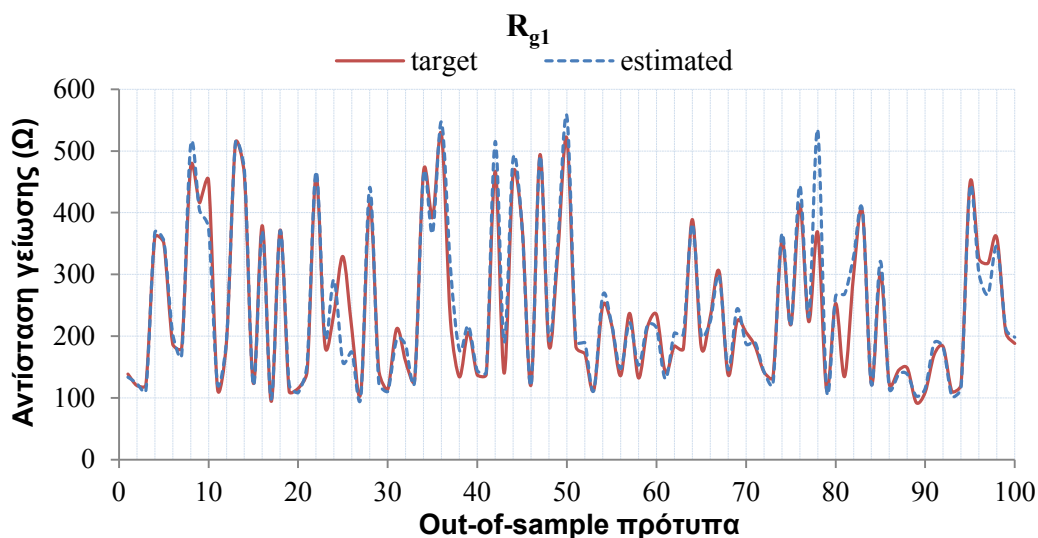
R _{g3}	Είσοδοι: $r_d, \Gamma_w, \Gamma_m, \rho_{1d}, \rho_{2d}, \rho_{4d}, \rho_{6d}, \rho_{1w}, \rho_{6w}, \rho_{8w}, \rho_{1m}$ HU: 12	
	NMSE	0,0037
	SMAPE %	2,25
	R ²	0,9981
	R ² adjusted	0,9963
R _{g4}	Είσοδοι: $\rho_{1d}, \rho_{8d}, \rho_{4w}, \rho_{1m}, \rho_{2m}$ HU: 15	
	NMSE	0,0105
	SMAPE %	1,33
	R ²	0,9948
	R ² adjusted	0,9895
R _{g5}	Είσοδοι: $\rho_{4d}, \rho_{6d}, \rho_{8d}, \rho_{2w}, \rho_{1m}$ HU: 12	
	NMSE	0,0031
	SMAPE %	2,35
	R ²	0,9985
	R ² adjusted	0,9969

NMSE: Normalized Mean Squared Error

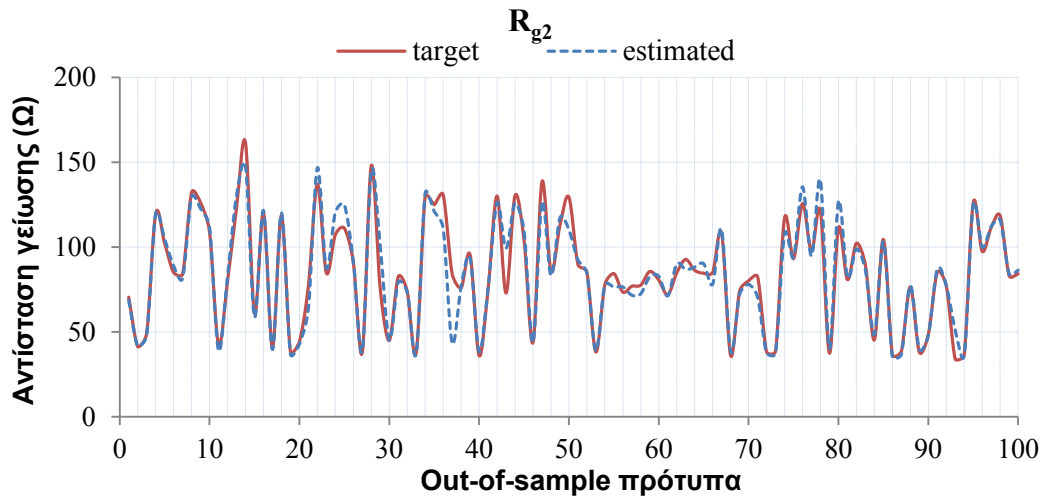
SMAPE: Symmetric Mean Absolute Percentage Error

R²: Coefficient of Determination

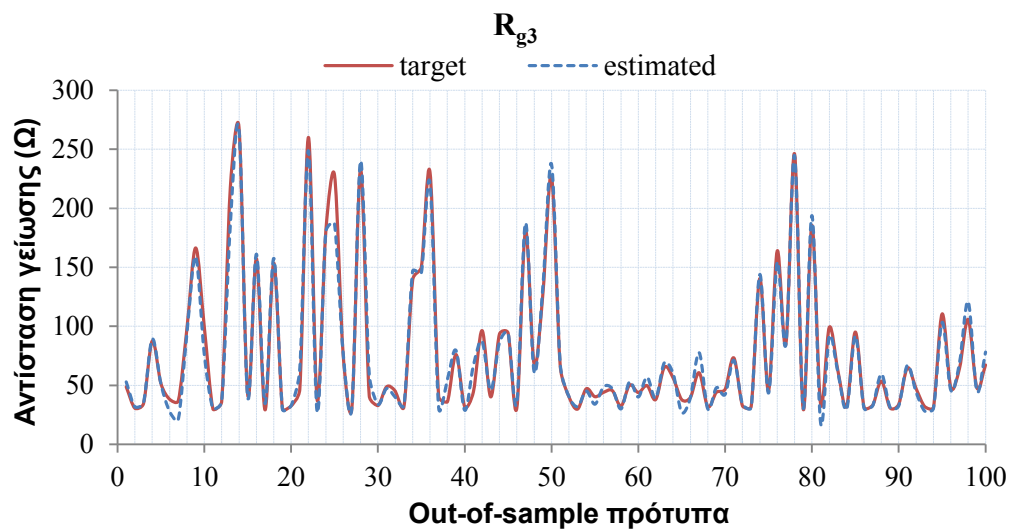
Η σύγκλιση των τιμών πρόβλεψης προς τις πραγματικές (πειραματικές) τιμές της αντίστασης γείωσης, στο σύνολο πρόβλεψης (out-of-sample set), για κάθε ηλεκτρόδιο, φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήματα 4.25–4.29). Ο οριζόντιος άξονας έχει βαθμονομηθεί με βάση τον αύξοντα αριθμό των προτύπων του out-of-sample συνόλου.



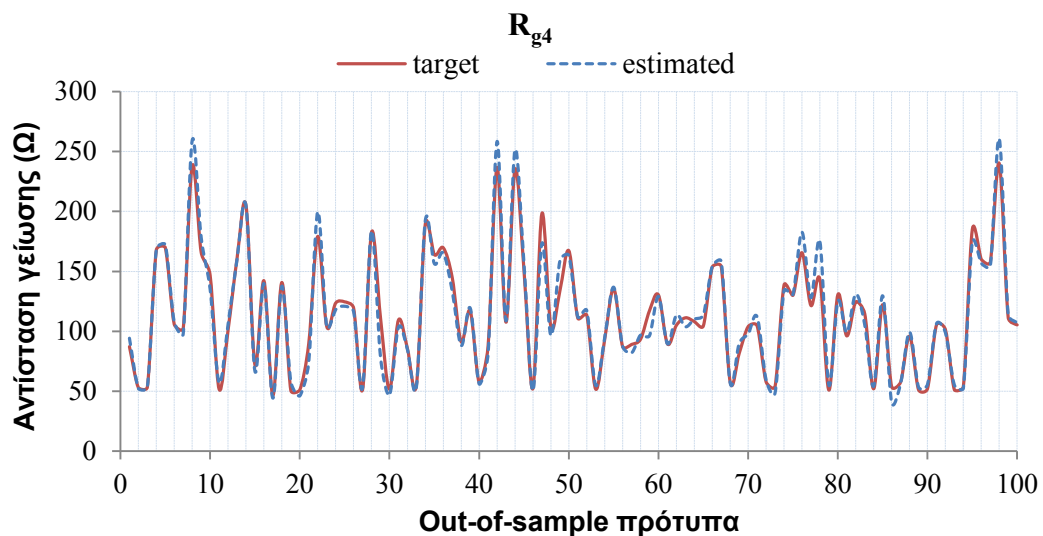
Σχήμα 4.25: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G₁.



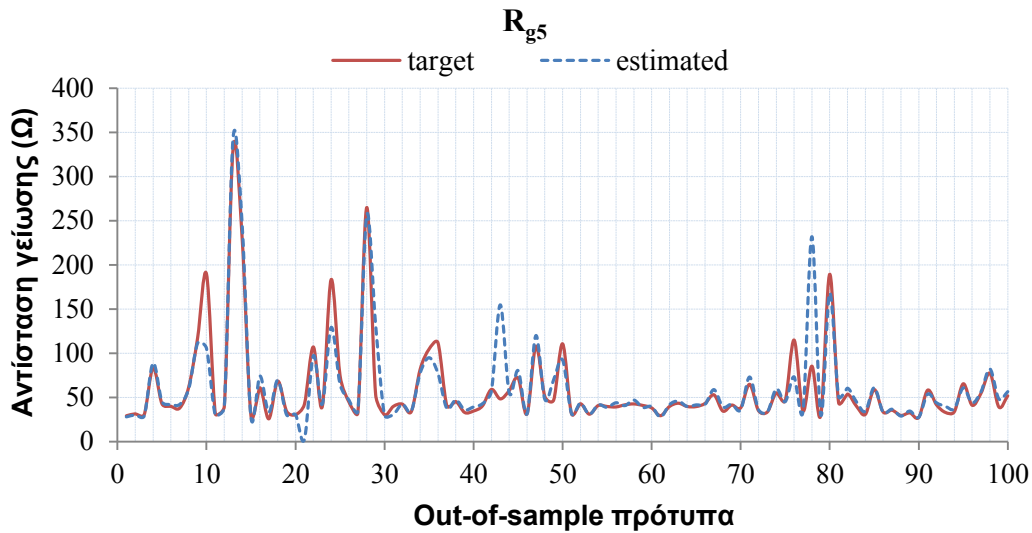
Σχήμα 4.26: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_2 .



Σχήμα 4.27: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_3 .



Σχήμα 4.28: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_4 .



Σχήμα 4.29: Πραγματικές και εκτιμήτριες τιμές της αντίστασης γείωσης για το G_5 .

4.3.4.2 Ανάλυση

Τα παραπάνω αποτελέσματα υποδεικνύουν την επιτυχία χρήσης των wavelet δικτύων για την εκτίμηση και πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης με μεγάλη ακρίβεια. Με την εφαρμογή του προτεινόμενου WN δικτύου επιτεύχθηκε μια πολύ καλή προσαρμογή στα δεδομένα και προσεγγίστηκε με ακρίβεια η δυναμική σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές εισόδου και εξόδου. Κατ' αυτόν τον τρόπο παράχθηκε και ένα ακριβές σύνολο πρόβλεψης της αντίστασης γείωσης. Όπως έχει γίνει αντιληπτό, από προηγούμενη ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, στην ενότητα 4.2.7.1, η παρουσία των βελτιωτικών υλικών στα συστήματα γείωσης καθιστά πολύπλοκη και σύνθετη τη σχέση ανάμεσα στα μεγέθη της βροχοπτώσης, της υγρασίας εδάφους, της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης. Μια σχέση που, σε καμία περίπτωση, δεν είναι εύκολο να προσεγγιστεί με τις γνωστές τεχνικές αριθμητικής ανάλυσης. Το WN αποδεικνύεται μία, εξίσου με το ΤΝΔ, πολύ καλή λύση για την προσέγγιση τέτοιων πολυσύνθετων σχέσεων μεταξύ μεταβλητών.

Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 4.9, οι τιμές του SMAPE, στα σύνολα πρόβλεψης (out-of-sample sets) για τις τιμές πρόβλεψης που παράγει το WN, βρίσκονται σε πολύ καλά επίπεδα. Ειδικότερα, τα δίκτυα για τα ηλεκτρόδια G_2 και G_4 απέδωσαν τις χαμηλότερες ποσοστιαίες τιμές, 2,86% και 2,79%, αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πιο σταθερή και, συνεπώς, πιο προβλέψιμη συμπεριφορά που επιδεικνύουν το σκυρόδεμα και το

συνθετικό υλικό A, σε σύγκριση με τα άλλα εξεταζόμενα υλικά, καθ' όλη τη διάρκεια των 45 μηνών παρατήρησης. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώνεται άμεσα και από τα διαγράμματα στο Σχήμα 3.17.

Επιπροσθέτως, το δίκτυο για το ηλεκτρόδιο G_3 εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα συσχέτισης, σημειώνοντας τις υψηλότερες τιμές για τους συντελεστές προσδιορισμού R^2 και $R^2(\text{adj})$, με τιμές 0,9898 και 0,9795, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές συσχέτισης επιβεβαιώνονται πλήρως και από το γράφημα στο Σχήμα 4.27, στο οποίο παρατηρείται σχεδόν απόλυτη ταύτιση των τιμών πρόβλεψης με τις πειραματικές τιμές. Μάλιστα, τα αποτελέσματα για το ηλεκτρόδιο G_3 δείχνουν ότι το WN μπορεί να αποδώσει πολύ καλά ακόμη και σε συνθήκες έντονης μεταβλητότητας των μεγεθών που προσπαθεί να συσχετίσει, όπως στην περίπτωση της αντίστασης γείωσης που εμφανίζει το σύστημα με μπεντονίτη. Η πολύ καλή απόδοση της προτεινόμενης WN μεθοδολογίας φαίνεται και στο Σχήμα 4.28, που αφορά το ηλεκτρόδιο G_4 , ενώ τα Σχήματα 4.25 και 4.26 υποδηλώνουν μια ελαφρώς χειρότερη πρόβλεψη (περίπου 2% χαμηλότερη) για τα ηλεκτρόδια G_1 και G_2 , από την αντίστοιχη του G_4 .

Στη συνολική αξιολόγηση της μεθοδολογίας, βεβαίως, δεν μπορούν να μη συμπεριληφθούν και τα αποτελέσματα του δικτύου για το ηλεκτρόδιο G_5 . Παρά το γεγονός ότι αυτό το ηλεκτρόδιο παρουσίασε πολύ υψηλούς δείκτες απόδοσης, κατά την 4ετή διάρκεια των μετρήσεων, εντούτοις, το αντίστοιχο WN δεν κατάφερε να φθάσει τα επίπεδα απόδοσης των άλλων δικτύων. Η ποσοστιαία τιμή 7,57% του SMAPE είναι υψηλότερη και από την αντίστοιχη 4,63% του μπεντονίτη, ο οποίος εμφανίζει και αυτός ένα βαθμό έντονης μεταβλητότητας. Οι δε τιμές συσχέτισης (0,8788 και 0,7464), αν και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν χαμηλές, είναι σαφώς χαμηλότερες των αντιστοίχων των υπόλοιπων ηλεκτροδίων.

Η περαιτέρω εξέταση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.9 αναδεικνύει και τη σπουδαιότητα του κριτηρίου της επιλογής των σημαντικών μεταβλητών εισόδου. Ειδικότερα, το κριτήριο ανέδειξε τις στατιστικώς σημαντικότερες από τις τιμές της ειδικής αντίστασης εδάφους σε διάφορα βάθη, για κάθε περίπτωση ηλεκτροδίου, από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη σημαντική επίδραση κάποιων στρωμάτων του εδάφους, ξεχωριστά, σε κάθε ηλεκτρόδιο γείωσης.

Για παράδειγμα, παρατηρείται ότι στην πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης του G_2 σημαντικότερη επίδραση έχουν οι τιμές της ρ την ημέρα της μέτρησης στα $2m$, $4m$ και $8m$, μόνο η μέση εβδομαδιαία τιμή της στα $4m$ και οι μέσες μηνιαίες τιμές στο $1m$ και $2m$. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά του σκυροδέματος επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την ειδική αντίσταση του εδάφους στα μέσα και κατώτερα στρώματα την ημέρα της μέτρησης, όσο και από τις μέσες μηνιαίες τιμές της ρ στα άνω στρώματα, δηλαδή και από τη συνολική συμπεριφορά του εδάφους μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα.

Η μελέτη, επίσης, των επιλεχθέντων εισόδων για κάθε δίκτυο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η σημασία της κάθε μεταβλητής ειδικής αντίστασης, στην πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη φύση και τη σύσταση του κάθε βελτιωτικού υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση των συνθετικών υλικών R_{g4} και R_{g5} . Παρατηρείται ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα την ημέρα της μέτρησης (ρ_{4d} , ρ_{6d} , ρ_{8d}) είναι πιο σημαντικές παράμετροι για το δίκτυο του R_{g5} απ' ό,τι για το αντίστοιχο του R_{g4} , παρά το γεγονός ότι πρόκειται για δύο συνθετικά βελτιωτικά υλικά της ίδιας περίπου βάσης. Το δε R_{g4} φαίνεται ότι επηρεάζεται περισσότερο από τις μέσες τιμές της ειδικής αντίστασης των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους.

Ομοίως, για τη σχέση αντίστασης γείωσης - ύψους βροχόπτωσης, το κριτήριο επιλογής εισόδων έχει συμπεριλάβει όλες τις στατιστικές μεταβλητές του ύψους βροχόπτωσης για τα ηλεκτρόδια G_1 και G_3 . Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η σωρευτική βροχόπτωση προηγούμενων χρονικών διαστημάτων (1 εβδομάδα και 1 μήνας) από την ημέρα πρόβλεψης συμβάλλει σημαντικά στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συστημάτων γείωσης. Μάλιστα, καταδεικνύεται, σε ορισμένες περιπτώσεις όπως αυτή του μπεντονίτη (G_3), ο βαθμός εξάρτησης της λειτουργίας του υλικού από την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων υγρασίας, όπως έχει αναλυθεί και στην παράγραφο 3.6.2.3.

4.3.4.3 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της προτεινόμενης WN μεθοδολογίας δείχνουν ότι και αυτά τα δίκτυα αποτελούν ένα χρήσιμο, ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των

συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά εδάφους. Τα αποτελέσματα σύγκλισης μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών στόχου της αντίστασης γείωσης, καθώς και οι πολύ χαμηλές τιμές SMAPE, καταδεικνύουν την πολύ υψηλή απόδοση αυτών των δικτύων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να προβλέψει με υψηλή ακρίβεια την τιμή της αντίστασης γείωσης όλων των κατακόρυφων ράβδων, που εξετάστηκαν. Μπορεί, επίσης, να μοντελοποιήσει την υποκείμενη σχέση μεταξύ μεγεθών και συντελεστών, όπως η βροχόπτωση, η ειδική αντίσταση του εδάφους, η σύσταση του βελτιωτικού υλικού και η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου, σχέση η οποία είναι δύσκολο να προσεγγιστεί με κλασικές αριθμητικές μεθόδους.

4.4 Επαγωγική Μηχανική Μάθηση (IML)

4.4.1 Εισαγωγή

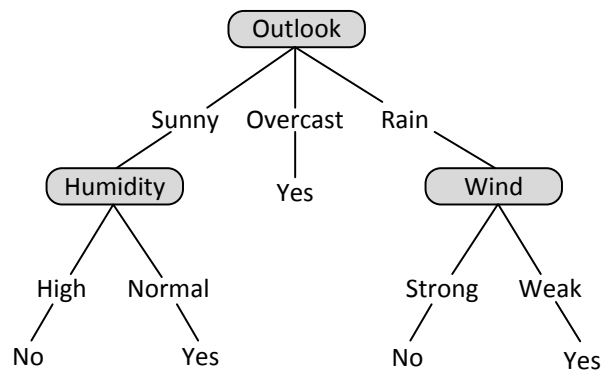
Η *επαγωγική μηχανική μάθηση* (IML) και πιο συγκεκριμένα η υλοποίησή της με τη χρήση των *δένδρων αποφάσεων* (decision trees) είναι από τις πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες πρακτικές μεθόδους για εξαγωγή επαγωγικών συμπερασμάτων. Είναι μία μέθοδος για την προσέγγιση συναρτήσεων διακριτών τιμών, η οποία παραμένει ανεπηρέαστη από θόρυβο και έχει την ικανότητα να μαθαίνει διαζευκτικές εκφράσεις [23].

Η μάθηση με δένδρα αποφάσεων είναι μία μέθοδος προσέγγισης των συναρτήσεων διακριτών τιμών, στις οποίες η προς μάθηση συνάρτηση αναπαριστάται από ένα δένδρο απόφασης. Τα μαθησιακά δένδρα αποφάσεων μπορούν επίσης να αναπαρασταθούν ξανά με κανόνες *if-then*, για να βελτιωθεί η κατανόηση της μεθόδου από τους ανθρώπους. Αυτές οι μέθοδοι συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο δημοφιλών αλγορίθμων επαγωγικής εξαγωγής συμπερασμάτων και έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σ' ένα ευρύ φάσμα εργασιών, από τη διάγνωση ιατρικών περιπτώσεων [24, 25] έως προβλήματα στον τομέα της μηχανικής [26, 27].

4.4.2 Γενική περιγραφή

Τα δένδρα αποφάσεων ταξινομούν παραδείγματα, διαλέγοντάς τα στο κάτω μέρος του δένδρου και κατατάσσοντας αυτά από τη ρίζα έως κάποιο κόμβο φύλλων, ο οποίος και παρέχει την ταξινόμηση του παραδείγματος. Κάθε κόμβος στο δένδρο καθορίζει μία δοκιμή, που θα διεξαχθεί σε κάποια χαρακτηριστικά του παραδείγματος και κάθε κατερχόμενος κλάδος από τον κόμβο αντιστοιχεί σε μία από τις πιθανές τιμές για το χαρακτηριστικό που εξετάζεται. Ένα παράδειγμα ταξινομείται, ξεκινώντας από τον κόμβο στη ρίζα του δένδρου, δοκιμάζοντας το χαρακτηριστικό που καθορίζεται απ' αυτόν τον κόμβο και κατόπιν μετακινούμενο προς τα κάτω κατά μήκος του κλάδου, που αντιστοιχεί στην τιμή του χαρακτηριστικού για το δεδομένο παράδειγμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το υποδένδρο που έχει τη ρίζα του στον νέο κόμβο [23].

Το Σχήμα 4.30 απεικονίζει ένα τυπικό δένδρο αποφάσεων. Αυτό το δένδρο αποφάσεων ταξινομεί τα πρωινά Σαββάτου, σύμφωνα με το εάν είναι κατάλληλα για παιχνίδια τένις ή όχι.



Σχήμα 4.30: Δένδρο απόφασης για το παιχνίδι τένις [23].

Π.χ., το παράδειγμα:

<Outlook = Sunny, Temperature = Hot, Humidity = High, Wind = Strong>

θα κατατασσόταν κάτω στον πιο αριστερό κλάδο αυτού του δένδρου απόφασης και, ως εκ τούτου, θα ταξινομούνταν ως ένα αρνητικό παράδειγμα (δηλαδή το δένδρο θα αποφάσιζε *Παιχνίδι Τένις=όχι*).

Γενικότερα, τα δένδρα αποφάσεων αναπαριστούν ένα διαχωρισμό των συνδυασμών των περιορισμών στις τιμές των χαρακτηριστικών των παραδειγμάτων. Κάθε διαδρομή από τη ρίζα του δένδρου προς ένα φύλλο αντιστοιχεί σ' ένα συνδυασμό δοκιμών των χαρακτηριστικών και το ίδιο το

δένδρο αντιστοιχεί σ' ένα διαχωρισμό αυτών των συνδυασμών. Π.χ. το δένδρο απόφασης που εικονίζεται στο Σχήμα 4.30, αντιστοιχεί στην καταφατική απάντηση όταν ισχύει η έκφραση [23]:

(Outlook = Sunny \wedge Humidity = Normal)

V **(Outlook = Overcast)**

V **(Outlook = Rain \wedge Wind = Weak)**

Παρ' όλο που έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων μάθησης με δένδρα αποφάσεων, με κάπως διαφορετικές δυνατότητες και απαιτήσεις, η μάθηση με δένδρα απόφασης, γενικότερα, είναι η πιο κατάλληλη για προβλήματα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τα παραδείγματα αναπαριστώνται με ζεύγη χαρακτηριστικού-τιμής. Τα παραδείγματα περιγράφονται από ένα καθορισμένο σύνολο χαρακτηριστικών (π.χ. Θερμοκρασία) με τις τιμές τους (π.χ. Ζέστη). Η πιο εύκολη κατάσταση για τη μάθηση με δένδρα αποφάσεων είναι όταν κάθε χαρακτηριστικό λαμβάνει ένα μικρό αριθμό ασύνδετων πιθανών τιμών (π.χ. Ζεστό, Χλιαρό, Κρύο). Παρ' όλα αυτά, οι επεκτάσεις του βασικού αλγόριθμου μάθησης επιτρέπουν τον χειρισμό χαρακτηριστικών με πραγματικές τιμές, όπως η θερμοκρασία, όταν δίνεται αριθμητικά.
- Η συνάρτηση στόχος έχει διακριτές τιμές εξόδου. Το δένδρο απόφασης στο Σχήμα 4.30 αναθέτει μία ταξινόμηση Boole σε κάθε παράδειγμα (π.χ. ναι ή όχι). Οι μέθοδοι των δένδρων αποφάσεων επεκτείνονται εύκολα και σε συναρτήσεις μάθησης με περισσότερες των δύο πιθανών τιμών εξόδου.
- Διαχωριστικές περιγραφές ενδέχεται να απαιτούνται. Όπως προαναφέρθηκε, τα δένδρα αποφάσεων κανονικά παριστάνουν διαχωριστικές εκφράσεις.
- Τα δεδομένα εκπαίδευσης μπορεί να περιέχουν σφάλματα. Οι μέθοδοι των δένδρων αποφάσεων είναι ανεπηρέαστες από σφάλματα, τόσο από σφάλματα στην ταξινόμηση των παραδειγμάτων εκπαίδευσης, όσο και από σφάλματα στις τιμές των χαρακτηριστικών που τα περιγράφουν.
- Από τα δεδομένα εκπαίδευσης μπορεί να λείπουν κάποιες τιμές των χαρακτηριστικών. Οι μέθοδοι των δένδρων αποφάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στις περιπτώσεις όπου τα παραδείγματα εκπαίδευσης έχουν άγνωστες τιμές (π.χ. η υγρασία ημέρας είναι γνωστή μόνο σε μερικά παραδείγματα εκπαίδευσης).

4.4.3 Κατασκευή δένδρων αποφάσεων

Θεμελιώδη αλγόριθμο εκμάθησης για τις μεθόδους με δένδρα αποφάσεων αποτέλεσε ο ID3, ο οποίος αναπτύχθηκε από τον Quinlan στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Μεταγενέστερη έκδοση αυτού του αλγόριθμου, η οποία χρησιμοποιείται σήμερα κατά κόρον στη δημιουργία δένδρων αποφάσεων, είναι ο αλγόριθμος C4.5 [28] και η νέα έκδοσή του C5.0. Ο αλγόριθμος C4.5 παράγει έναν ταξινομητή σε μορφή δένδρου απόφασης, μια δομή, η οποία είναι είτε ένα φύλλο που υποδεικνύει την κλάση-στόχο είτε ένας κόμβος απόφασης που καθορίζει κάποια δοκιμή που θα γίνει σε μία τιμή του χαρακτηριστικού, μ' έναν κλάδο και ένα υποδένδρο για κάθε πιθανό αποτέλεσμα της δοκιμής [28].

Ο αλγόριθμος μαθαίνει τα δένδρα απόφασης, κατασκευάζοντας τα από πάνω προς τα κάτω, ξεκινώντας με το βασικό ερώτημα «ποιο χαρακτηριστικό θα πρέπει να δοκιμαστεί στη ρίζα του δένδρου». Για να απαντηθεί το συγκεκριμένο ερώτημα, κάθε χαρακτηριστικό αξιολογείται με τη χρήση ενός στατιστικού ελέγχου, για να καθοριστεί το πόσο καλά ταξινομεί από μόνο του τα παραδείγματα εκπαίδευσης. Το καλύτερο χαρακτηριστικό επιλέγεται ως ο έλεγχος στον ριζικό κόμβο του δένδρου. Κατόπιν, δημιουργείται ένας απόγονος του ριζικού κόμβου για κάθε πιθανή τιμή αυτού του χαρακτηριστικού και τα παραδείγματα εκπαίδευσης κατατάσσονται στον κατάλληλο απόγονο κόμβο (δηλαδή κάτω από τον κλάδο που αντιστοιχεί στην τιμή του παραδείγματος για αυτό το χαρακτηριστικό). Στη συνέχεια, η διαδικασία αυτή στο σύνολό της, επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας τα παραδείγματα εκπαίδευσης, τα σχετιζόμενα με κάθε απόγονο κόμβο, για την επιλογή του καλύτερου χαρακτηριστικού για τον έλεγχο σ' εκείνο το σημείο του δένδρου.

Η κεντρική επιλογή του αλγόριθμου είναι να επιλέγει ποιο χαρακτηριστικό θα ελέγχεται σε κάθε κόμβο του δένδρου. Βέβαια, ο χρήστης του αλγόριθμου επιθυμεί να επιλέγεται εκείνο το χαρακτηριστικό που είναι πιο χρήσιμο για την ταξινόμηση των παραδειγμάτων σε κλάσεις. Για τον σκοπό αυτόν θα οριστεί μία στατιστική ιδιότητα, που καλείται *κέρδος πληροφορίας* (information gain) και η οποία μετρά το πόσο καλά διαχωρίζει ένα δεδομένο χαρακτηριστικό τα παραδείγματα εκπαίδευσης, σύμφωνα με την κλάση-στόχο τους. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί αυτό το μέτρο του κέρδους πληροφορίας για να κάνει την επιλογή

μεταξύ των υποψηφίων χαρακτηριστικών σε κάθε βήμα, καθώς μεγαλώνει το δένδρο [23].

Για να οριστεί με ακρίβεια το κέρδος πληροφορίας, ορίζεται ένα άλλο μέτρο που χρησιμοποιείται συχνά στη θεωρία της πληροφορίας και το οποίο καλείται *εντροπία*. Η εντροπία χαρακτηρίζει την καθαρότητα, ή μη, μιας αυθαίρετης συλλογής παραδειγμάτων. Επιλέγοντας τυχαία ένα παράδειγμα από ένα σύνολο παραδειγμάτων S και θεωρώντας ότι ανήκει σε κάποια κλάση C_j , αυτό το μήνυμα έχει πιθανότητα [28]:

$$p_j = \frac{\text{freq}(C_j, S)}{|S|} \quad (4.34)$$

όπου το S είναι οποιοδήποτε σύνολο παραδειγμάτων, το $\text{freq}(C_j, S)$ αντιπροσωπεύει το πλήθος των παραδειγμάτων του S που ανήκουν στην κλάση C_j και το $|S|$ αντιπροσωπεύει το πλήθος των παραδειγμάτων που περιέχει το σύνολο S . Έτσι, η πληροφορία που μεταφέρει το μήνυμα είναι [28]:

$$-\log_2 \left(\frac{\text{freq}(C_j, S)}{|S|} \right) \text{ bits} \quad (4.35)$$

Για την εύρεση της αναμενόμενης πληροφορίας από ένα τέτοιο μήνυμα, που αναφέρεται στην ιδιότητα μέλους της κλάσης, όλες οι κλάσεις αθροίζονται σε αναλογία των συχνοτήτων τους στο σύνολο S , δίνοντας την εντροπία ως:

$$\text{Entropy}(S) = - \sum_{j=1}^k \frac{\text{freq}(C_j, S)}{|S|} \times \log_2 \left(\frac{\text{freq}(C_j, S)}{|S|} \right) \quad (4.36)$$

Μια ερμηνεία της εντροπίας από τη θεωρία της πληροφορίας είναι ότι καθορίζει το ελάχιστο απαιτούμενο πλήθος των bits πληροφορίας για την κωδικοποίηση της ταξινόμησης ενός τυχαίου μέλους του S , δηλαδή ένα μέλος του S που επιλέγεται τυχαία με ομοιόμορφη πιθανότητα. Δοθείσης της εντροπίας ως μέτρο της καθαρότητας ή μη σ' ένα σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης, μπορεί πλέον να οριστεί ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας που έχει το εκάστοτε χαρακτηριστικό να ταξινομεί τα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτό το μέτρο, που καλείται *κέρδος πληροφορίας*, είναι απλά η αναμενόμενη μείωση στην εντροπία, που προκαλείται από τη διαμερισματοποίηση των παραδειγμάτων σύμφωνα με το χαρακτηριστικό. Για την ακρίβεια, το κέρδος πληροφορίας $\text{Gain}(S, A)$ ενός χαρακτηριστικού A , σχετιζόμενου με ένα σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης S , ορίζεται ως [23]:

$$\text{Gain}(S, A) \equiv \text{Entropy}(S) - \sum_{i=1}^n \frac{|S_i|}{|S|} \times \text{Entropy}(S_i) \quad (4.37)$$

όπου n το πλήθος των τιμών του χαρακτηριστικού A και S_i το υποσύνολο του S για το οποίο το χαρακτηριστικό A έχει τιμή i .

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρώτος όρος της εξίσωσης (4.37) είναι η εντροπία του αρχικού συνόλου εκπαίδευσης S , ενώ ο δεύτερος όρος είναι η αναμενόμενη τιμή της εντροπίας μετά τη διαμερισματοποίηση του S με χρήση του χαρακτηριστικού A . Η αναμενόμενη εντροπία που περιγράφεται από τον δεύτερο όρο της (4.37), είναι απλά το άθροισμα των εντροπιών του κάθε υποσυνόλου S_i , σταθμισμένο με το κλάσμα των παραδειγμάτων που ανήκουν στο S .

4.4.4 Προτεινόμενη IML μεθοδολογία ταξινόμησης στα συστήματα γείωσης

Εκτός των μοντέλων υπολογιστικής νοημοσύνης, που αναπτύχθηκαν και προτάθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος, για την εκτίμηση και πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης, δοκιμάστηκε και μια IML μεθοδολογία για ταξινόμηση των διαθέσιμων δεδομένων αντίστασης γείωσης σε δεδομένες κλάσεις τιμών. Σκοπός εφαρμογής της, εν λόγω, μεθοδολογίας, είναι μια γενική εκτίμηση του εύρους διακύμανσης των τιμών της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση με τις μεταβολές της ειδικής αντίστασης και όχι τόσο η ακριβής εκτίμηση και πρόβλεψη της τιμής, για την οποία, άλλωστε, χρησιμοποιήθηκαν καταλληλότερα μοντέλα υπολογιστικής νοημοσύνης.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, κατασκευάστηκε δένδρο απόφασης για την ταξινόμηση των τιμών R_g του συνόλου εκπαίδευσης σε προκαθορισμένες κλάσεις C_j , με χρήση του αλγόριθμου C5.0 και των παράγωγων κανόνων του.

Πιο συγκεκριμένα, τα 13 χαρακτηριστικά (παράμετροι) που καθορίζουν τις ταξινομημένες τιμές της αντίστασης γείωσης, που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο κατασκευασθέν δένδρο, είναι: α) η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ_{id} σε βάθος $i=1m, 2m, 4m, 6m$ και $8m$, την ημέρα της μέτρησης, ($\rho_{1d}, \rho_{2d}, \rho_{4d}, \rho_{6d}, \rho_{8d}$), β) η μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ_{iw} , στα ίδια βάθη, η οποία είναι η μέση τιμή των τελευταίων 7 ημερών πριν την ημέρα μέτρησης της αντίστασης γείωσης, ($\rho_{1w}, \rho_{2w}, \rho_{4w}, \rho_{6w}, \rho_{8w}$), γ) η μέση

μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ_{im} , σε βάθος $i=1m$ και $2m$ και δ) το εβδομαδιαίο συνολικό ύψος βροχόπτωσης r_w , δηλαδή των τελευταίων 7 ημερών πριν την ημέρα της μέτρησης. Η μεταβλητή ταξινόμησης είναι η αντίσταση γείωσης των εξεταζόμενων ράβδων γείωσης.

Το σύνολο εκπαίδευσης περιλαμβάνει 365 περιπτώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση και την επικύρωση του δένδρου απόφασης. Οι κλάσεις στις οποίες ταξινομούνται οι διάφορες τιμές R_g καθορίζονται εκ των προτέρων, με κριτήριο την απαιτούμενη ακρίβεια αλλά και το διαθέσιμο, κάθε φορά, πλήθος των δεδομένων εκπαίδευσης. Για τον καθορισμό κλάσεων μικρού εύρους, άρα και μεγάλης ακρίβειας στη διαδικασία ταξινόμησης, η μεθοδολογία επαγωγικής μάθησης, γενικά, απαιτεί πολύ μεγάλο πλήθος δεδομένων στο σύνολο εκπαίδευσης.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα εξετάστηκαν τρία σενάρια για τη διάκριση και οριοθέτηση των κλάσεων ταξινόμησης, τα οποία υποδεικνύονται με τους δείκτες a, b και c στον Πίνακα 4.10. Η επιλογή των κλάσεων έγινε με κριτήρια, τόσο την ομοιομορφία του εύρους τους, όσο και την ομοιόμορφη κατανομή των διαθέσιμων περιπτώσεων σ' αυτές. Στον ίδιο πίνακα, η στήλη «περιπτώσεις» περιλαμβάνει το πλήθος των περιπτώσεων που ταξινομούνται σε κάθε κλάση, κατά τη διαδικασία αξιολόγησης του μοντέλου.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, κατασκευάστηκε ένα δένδρο για κάθε ξεχωριστή υπόθεση εργασίας, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα 13 χαρακτηριστικά, κάθε φορά. Στη συνέχεια εκτελέστηκε ένας *10-fold cross validation* αλγόριθμος για την αξιολόγηση του καθενός δένδρου, ως ένα πιο στιβαρό εργαλείο εκτίμησης της ακρίβειας σε άγνωστα δεδομένα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτελέστηκε στο ηλεκτρόδιο G_5 (εγκιβωτισμένο στο συνθετικό υλικό B). Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4.31 εικονίζεται ένα μεγάλο τμήμα του δένδρου που κατασκευάστηκε για το εν λόγω ηλεκτρόδιο και για το σενάριο c. Η αναπαράσταση γίνεται σε δενδροειδή μορφή για την ευκολότερη ανάγνωση και κατανόηση των κανόνων ταξινόμησης, ενώ το δένδρο παρατίθεται αναλυτικά, μαζί με τους παραγόμενους κανόνες του, στην ενότητα Π.3 του Παραρτήματος. Το πλήθος των ταξινομημένων περιπτώσεων ανά κλάση φαίνεται στον Πίνακα 4.10, ενώ τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης και αξιολόγησης του δένδρου για τα τρία σενάρια διακριτοποίησης των κλάσεων παρατίθενται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.10: Τρία σενάρια διακριτοποίησης των κλάσεων και το πλήθος των περιπτώσεων ανά κλάση που προκύπτει από τη μεθοδολογία ταξινόμησης.

#	R_{G5a}		R_{G5b}		R_{G5c}	
	[Ω]	Περιπτώσεις	[Ω]	Περιπτώσεις	[Ω]	Περιπτώσεις
1	0-25	0	0-25	0	0-25	0
2	25-50	222	25-60	254	25-31	35
3	50-75	69	60-95	54	31-37	41
4	75-100	19	95-125	24	37-45	121
5	100-125	22	125-160	5	45-54	41
6	125-150	5	160-195	3	54-65	31
7	150-175	0	195-230	3	65-78	25
8	175-200	3	230-265	7	78-94	13
9	200-225	3	265-300	7	94-114	19
10	225-250	2	300-335	4	114-137	8
11	250-275	9	335-400	4	137-165	3
12	275-300	3	-	-	165-198	3
13	300-325	1	-	-	198-238	5
14	325-350	5	-	-	238-287	11
15	350-375	1	-	-	287-346	6
16	375-400	1	-	-	346-400	3

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα της IML μεθοδολογίας για το ηλεκτρόδιο G_5 .

	R_{G5a}	R_{G5b}	R_{G5c}
Κόμβοι	45	39	80
Σφάλμα Δένδρου (%)	0,3	0,3	0,8
Κανόνες	43	29	68
Σφάλμα Κανόνων (%)	0,3	0,5	1,1
Σφάλμα CV (%)	15,1	14,0	27,4
Διευρυμένο σφάλμα CV (%)	5,5	3,8	9,0

4.4.5 Συμπεράσματα

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία επαγωγικής μηχανικής μάθησης, η εφαρμογή της οποίας, σκοπό έχει την εξαγωγή κανόνων για τη γενικότερη εικόνα και συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, από ένα δείγμα μετρήσεων της αντίστασης γείωσης. Ένα επαγωγικό δένδρο απόφασης κατασκευάζεται από διαθέσιμα δεδομένα, που έχουν συλλεχθεί κατάλληλα για έναν χώρο εφαρμογής και αποτελούν μια αντιπροσωπευτική συλλογή για τον χώρο μελέτης. Το επαγωγικό δένδρο συνιστά έναν μηχανισμό γενίκευσης από τα δεδομένα αυτά, με σκοπό τη μελλοντική λήψη αποφάσεων με τρόπο ορθό σε άλλα άγνωστα περιστατικά. Γενικά, αυτές οι μέθοδοι μάθησης θεωρούνται μέθοδοι που αποδίδουν σχετικά καλά, μέσα από μικρές συλλογές δεδομένων. Το προκύπτον, βέβαια, μοντέλο καλύπτει μέρος του πραγματικού χώρου στον οποίο εκτείνεται το πρόβλημα και, άρα, σπανίως είναι απολύτως ακριβές.

Από τον Πίνακα 4.10 διαφαίνεται ότι οι κλάσεις έχουν φτιαχτεί σαν να ακολουθούν τα δεδομένα ομοιόμορφη κατανομή ως προς την κλάση που ανήκουν. Στην πραγματικότητα, βέβαια, σημειώνεται μια μεγάλη πυκνότητα δεδομένων σε μια σχετικά περιορισμένη περιοχή. Επομένως, σαν επόμενο βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας μπορεί να είναι μια ανομοιόμορφη διαμέριση των τιμών, έτσι ώστε να προκύπτουν κοντινοί αριθμοί παραδειγμάτων για όλες τις κλάσεις.

Επίσης, στο δένδρο που εικονίζεται στο Σχήμα 4.31, προκύπτουν συνολικά 22 κανόνες. Επιπροσθέτως, στην αναφορά κλάσης του κάθε κανόνα, ο μεν πρώτος αριθμός (πριν την κάθετο) υποδεικνύει το πλήθος των θετικών παραδειγμάτων (positive examples), δηλαδή εκείνων που επαληθεύουν τον αντίστοιχο κανόνα, ο δε δεύτερος το πλήθος των αρνητικών παραδειγμάτων (negative examples), δηλαδή εκείνων που τον διαψεύδουν. Όσο μεγαλύτερος ο πρώτος αριθμός και όσο μικρότερος ο δεύτερος, τόσο ισχυρότερος είναι ο κανόνας. Αυτό φαίνεται και από τα αναφερόμενα ποσοστιαία σφάλματα στον Πίνακα 4.11, όπου το διευρυμένο σφάλμα της cross validation κυμαίνεται από 5,5% έως 9,0%, ανάλογα με το θεωρούμενο εύρος κλάσεων.

Αν συνυπολογιστούν και οι αντίστοιχοι κανόνες που προκύπτουν από το δένδρο (rule sets) (Παράρτημα Π.3), τότε παράγεται και μια πιθανότητα ορθής

ταξινομήσης νέων (unseen) παραδειγμάτων (αριθμός εντός αγκύλης στα rule sets), στο μέλλον, που δεν έχουν εισαχθεί ποτέ στο μοντέλο κατά το στάδιο της μάθησης, με βάση τον συγκεκριμένο κανόνα. Αυτή η ένδειξη, μάλιστα, δείχνει πόσο ισχυρός και χρήσιμος είναι ένας παραγόμενος κανόνας. Αυτοί που είναι από 0,95 και άνω, μπορούν, επιπλέον, να χρησιμοποιηθούν για να γίνει αντίστοιχος στατιστικός έλεγχος υποθέσεων μεταξύ ενός συγκεκριμένου υποσυνόλου (subset), με ειδικά χαρακτηριστικά, και του γενικού συνόλου παραδειγμάτων. Τέλος, το πλήθος των παραδειγμάτων, που καλύπτονται από τον εκάστοτε κανόνα, δίνεται από την αντίστοιχη κάλυψη (cover) αυτού.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Κονταξής και Ν. Χατζηαργυρίου, «Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.
- [2] Π. Αργυράκης, «Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές», Ε.Α.Π., Πάτρα, 2001.
- [3] Σ. Τζαφέστας, «Υπολογιστική Νοημοσύνη», Τόμος Α: Μεθοδολογίες, Αθήνα, 2002.
- [4] S. Haykin, “Neural Networks and Learning Machines”, 3rd edition, Eastern Economy Edition, PHI, 2009.
- [5] A. N. Kolmogorov, “On the representation of continuous functions of several variables as superpositions of continuous functions of one variable and addition”, Dokladi Akademii Nauk USSR, Vol. 114, No. 5, pp. 953–956, 1957.
- [6] V. Kůrková, “Kolmogorov’s theorem and multilayer neural networks”, Neural Networks, Vol. 5, No. 3, pp. 501–506, 1992.
- [7] S. Trenn, “Multilayer perceptrons: approximation order and necessary number of hidden units”, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 19, No. 5, pp. 836–844, May 2008.
- [8] Ι. Κ. Χατζηλάου, Δ. Κουπατσιάρης και Γ. Τσεκούρας, «Εισαγωγή στα νευρωνικά δίκτυα», Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Χατζηκυριάκειο Πειραιά, Ιανουάριος 2008.
- [9] A. G. Bakirtzis, V. Petridis, S. J. Kiartzis, M. C. Alexiadis and A. H. Maissis, “A neural network short term load forecasting model for the greek power system”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 858–863, May 1996.
- [10] G. J. Tsekouras, N. D. Hatziargyriou and E. N. Dialynas, “An optimized adaptive neural network for annual midterm energy forecasting”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 1, pp. 385–391, February 2006.
- [11] C. J. Blattner, “Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5, pp. 1758–1763, September/October 1980.
- [12] M. A. Salam, S. M. Al-Alawi and A. A. Maqrashi, “An artificial neural networks approach to model and predict the relationship between the

- grounding resistance and length of buried electrode in the soil”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, No. 5, pp. 338–342, 2006.
- [13] F. E. Asimakopoulou, E. A. Kourni, V. T. Kontargyri, G. J. Tsekouras and I. A. Stathopoulos, “Artificial neural network methodology for the estimation of ground resistance”, *Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems*, Corfu Island, Greece, July 14th–16th, 2011, pp. 453–458.
- [14] F. E. Asimakopoulou, G. J. Tsekouras, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Estimation of seasonal variation of ground resistance using Artificial Neural Networks”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 94, No. 1, pp. 113–121, January 2013.
- [15] V. P. Androvitsaneas, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Estimation of ground enhancing compound performance using artificial neural network”, *Proceedings of the 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2012)*, Shanghai, China, September 17th–20th, 2012, pp. 145–149.
- [16] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Artificial neural network methodology for the estimation of ground enhancing compounds resistance”, *IET Science, Measurement and Technology*, Vol. 8, No. 6, pp. 552–570, November 2014.
- [17] L. Cao, Y. Hong, H. Fang and G. He, “Predicting chaotic time series with wavelet networks”, *Physica D*, Vol. 85, pp. 225–238, 1995.
- [18] Y. Fang and T. W. S. Chow, “Wavelets Based Neural Network for Function Approximation”, *Lecture Notes in Computer Science*, 3971, pp. 80–85, 2006.
- [19] A. K. Alexandridis and A. D. Zapranis, “Wavelet Neural Networks: With Applications in Financial Engineering, Chaos and Classification”, First Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014.
- [20] V. P. Androvitsaneas, A. K. Alexandridis, I. F. Gonos, G. D. Dounias and I. A. Stathopoulos, “Wavelet neural network methodology for ground resistance forecasting”, *Electric Power Systems Research*, 2016, DOI: 10.1016/j.epsr.2016.06.013 (in press).
- [21] Q. Zhang, “Using wavelet network in nonparametric estimation”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 8, No. 2, pp. 227–236, March 1997.
- [22] V. P. Androvitsaneas, A. K. Alexandridis, I. F. Gonos, G. D. Dounias and I. A. Stathopoulos, “Wavelet neural network for ground resistance estimation”,

-
- Proceedings of the 4th International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014), Poznan, Poland, September 8th–11th, 2014.
- [23] Tom M. Mitchell, “Machine Learning”, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997.
- [24] G. D. Dounias, S. Drivalou, V. S. Moustakis and E. P. Nikolakaki, “Medical diagnosis of cephalalgia using Inductive Machine Learning”, Proceedings of the 20th Anniversary Meeting of the Society for Medical Decision Making (SMDM'98), Hyatt Regency Cambridge, Massachusetts, USA, October 25th–28th, 1998.
- [25] I. Nomikos, G. D. Dounias and K. Vemmos, “Comparison of alternative criteria for the evaluation of machine learning in the medical diagnosis of stroke”, Proceedings of the 3rd International Data Analysis Symposium (IDAS-99), Aachen, Germany, September 16th–17th, 1999, pp. 63–66.
- [26] G. D. Dounias, G. Tselentis and V. S. Moustakis, “Feature extraction for quality control in a production line using Inductive Machine Learning”, Journal of Integrated Computer Aided Engineering (IOS Press), Vol. 8, No. 4, pp. 325–336, 2001.
- [27] G. D. Dounias, P. Vassilakis and V. S. Moustakis, “A model of fault diagnosis using Inductive Learning techniques”, Proceedings of the IEEE-NTUA Joint International Power Conference Athens Power Tech '93, 1993, Vol. 2, pp. 961–965.
- [28] J. R. Quinlan, “C4.5: programs for machine learning”, San Mateo, California, USA, Morgan Kaufmann Publishers, 1993.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα της διατριβής

Αὕτη δέ ἐστίν ἡ αἰώνιος ζωή, ἵνα γινώσκωσί σε τὸν μόνον ἀληθινὸν Θεὸν καὶ ὃν ἀπέστειλας Ἰησοῦν Χριστόν.

Ἰωάν. ιζ' 3

5.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται τεχνικές βελτίωσης της συμπεριφοράς και απόδοσης των συστημάτων γείωσης. Ειδικότερα, αντικείμενο μελέτης και διερεύνησης της διατριβής, είναι η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και των καιρικών συνθηκών, όπως η βροχόπτωση, στη, σε βάθος χρόνου, διαμόρφωση των τιμών της αντίστασης γείωσης των συστημάτων αυτών, καθώς και η αποτελεσματικότητα (ή μη) της προσθήκης βελτιωτικών ή «βελτιωτικών» υλικών γείωσης, στη συμπεριφορά και απόδοση των συστημάτων γείωσης.

Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι η διοχέτευση και διάχυση των υψηλών ρευμάτων σφάλματος στη γη, με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό και, εν γένει, για τις εγκαταστάσεις. Αυτό προϋποθέτει τη ροή του ρεύματος προς γη μέσω διαδρομής χαμηλής αντίστασης, με την ελάχιστη δυνατή πτώση δυναμικού, η οποία θα μειώνει σημαντικά την πιθανότητα ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων είτε / και τάσεων επαφής. Η διατριβή επικεντρώνεται στη μελέτη της βελτίωσης της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, η οποία ερμηνεύεται ως η μείωση και σταθεροποίηση της τιμής της αντίστασης γείωσης, με την προσθήκη βελτιωτικών υλικών γείωσης. Η συγκεκριμένη τεχνική βελτίωσης των συστημάτων γείωσης κερδίζει, συνεχώς, έδαφος στον τομέα μελέτης και κατασκευής γειώσεων των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, και τείνει να καθιερωθεί ως

η πλέον ενδεδειγμένη λύση στην αντιμετώπιση προβλημάτων, λόγω της υψηλής ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Το παρόν κείμενο περιλαμβάνει την παρουσίαση της σχετικής — με τις βασικές αρχές που διέπουν τη μελέτη, την κατασκευή και τον έλεγχο των συστημάτων γείωσης, καθώς και των βελτιωτικών υλικών για τη βελτίωση της απόδοσής τους — βιβλιογραφίας. Παραθέτει περιγραφή των πειραμάτων και των μετρήσεων, που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της διατριβής, μελέτη της επίδρασης των βελτιωτικών υλικών στο μέγεθος «αντίσταση γείωσης» και στην, εν γένει, κατάσταση και συμπεριφορά των κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης και σύγκριση των συντελεστών απόδοσης των εξετασθέντων γειωτών με διάφορα βελτιωτικά υλικά. Διατυπώνονται συμπεράσματα, σχετικά με τη σταθερότητα της απόδοσης των συστημάτων γείωσης, συναρτήσει του χρόνου και των διαρκώς μεταβαλλομένων κλιματικών συνθηκών, καθώς, επίσης, και για τον βαθμό αναγκαιότητας χρήσης και τα εξ αυτής οφέλη, των εν λόγω υλικών, μετά από μακροχρόνια παρατήρηση.

Επίσης, στο ανά χείρας κείμενο, περιλαμβάνονται ανάλυση και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων της διατριβής, με σκοπό τη δημιουργία μιας καλής και αξιοποιήσιμης βάσης δεδομένων: παρουσιάζεται η πρόταση και η ανάπτυξη μοντέλων και αλγορίθμων Υπολογιστικής Νοημοσύνης και, πιο συγκεκριμένα, Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, Wavelet Νευρωνικού Δικτύου και κανόνων ταξινόμησης Επαγωγικής Μηχανικής Μάθησης, για την, με βάση τα πειραματικά δεδομένα, εκτίμηση και πρόβλεψη των τιμών της αντίστασης γείωσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα των κρουστικών δοκιμών που διεξήχθησαν στα, εγκατεστημένα σε υπαίθριο χώρο του Ε.Μ.Π., κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης, διατυπώνονται τα σχετικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των βελτιωτικών υλικών στη μεταβατική συμπεριφορά αυτών και προτείνεται κυκλωματικό μοντέλο για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά, υπό κρουστικά ρεύματα κεραυνικής μορφής.

Συνοπτικά, οι κύριοι άξονες της παρούσας διατριβής είναι οι εξής:

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση και αναφορά σε δημοσιευμένες επιστημονικές εργασίες, σχετικές με τις βασικές αρχές και τη συμπεριφορά των συστημάτων

γείωσης στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας τους, καθώς και με τις μεθόδους μέτρησης των σχετικών, με τα συστήματα αυτά, μεγεθών. Συγκέντρωση και καταγραφή της διαθέσιμης βιβλιογραφίας, όσον αφορά στα βελτιωτικά υλικά γείωσης, στους τύπους και στη χρήση αυτών, ανά τον κόσμο, με σκοπό τη διαμόρφωση, μιας, όσον το δυνατόν, σαφέστερης και πληρέστερης εικόνας, για τη συγκεκριμένη τεχνική βελτίωσης των συστημάτων γείωσης.

- Προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης, των χρησιμοποιηθέντων για τους σκοπούς της διατριβής, βελτιωτικών υλικών, με εργαστηριακή πειραματική διάταξη.
- Υλοποίηση πειραματικής διάταξης, αποτελούμενης από κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης πραγματικού μεγέθους, εγκιβωτισμένα σε βελτιωτικά υλικά, σε υπαίθριο χώρο του Ε.Μ.Π. και διεξαγωγή μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων και του ύψους βροχόπτωσης επί τέσσερα (4) συναπτά έτη.
- Συλλογή των πειραματικών μετρήσεων, επεξεργασία αυτών και δημιουργία αξιοποιήσιμης βάσης δεδομένων.
- Παρατήρηση, καταγραφή και σύγκριση των διακυμάνσεων των τιμών της αντίστασης γείωσης των εγκατεστημένων κατακόρυφων ηλεκτροδίων και διατύπωση συμπερασμάτων, σχετικών με το όφελος και την αναγκαιότητα χρήσης των ως άνω υλικών, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.
- Ανάπτυξη Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (ΤΝΔ), για την εκτίμηση και πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης κατακόρυφου ηλεκτροδίου, εντός βελτιωτικού υλικού, στη μόνιμη κατάσταση. Οι παράμετροι του ΤΝΔ μεταβάλλονται αναλόγως του εξεταζόμενου βελτιωτικού υλικού, η δε εκπαίδευση και επικύρωση του ΤΝΔ έγινε με βάση τις πειραματικές μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των εξετασθέντων ηλεκτροδίων, της ειδικής αντίστασης του εδάφους, στον χώρο του πειράματος, και σε διάφορα βάθη αυτού, καθώς και του ύψους βροχόπτωσης στην ίδια θέση.
- Ανάπτυξη Wavelet Νευρωνικού Δικτύου, για την πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης στη μόνιμη κατάσταση, σε κάποια, και, πάντως, συγκεκριμένη, μελλοντική ημέρα, με βάση τις τιμές της ειδικής αντίστασης

του εδάφους σε διάφορα βάθη, στη θέση εγκατάστασης και με βάση δεδομένα βροχόπτωσης από προγενέστερες χρονικές περιόδους.

- Ανάπτυξη αλγόριθμου Επαγωγικής Μηχανικής Μάθησης, με σκοπό τη διατύπωση γενικών κανόνων ταξινόμησης των τιμών της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων, σε προκαθορισμένες κλάσεις τιμών. Οι κανόνες αυτοί δίνουν μια γενική εικόνα και γνώση της συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων εντός βελτιωτικών υλικών, ταξινομώντας σε ευρύτερες κατηγορίες τις τιμές της αντίστασης γείωσης, με βάση τις πειραματικές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και του ύψους βροχόπτωσης.
- Εκτίμηση της μεταβατικής κρουστικής σύνθετης αντίστασης των, εντός βελτιωτικών υλικών γείωσης, κατακόρυφων ηλεκτροδίων συναρτήσει του χρόνου, των καιρικών συνθηκών και του επιπέδου τάσης, με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων.
- Πρόταση και σχεδιασμός κυκλωματικού μοντέλου για την προσομοίωση και προσδιορισμό της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφου ηλεκτροδίου εγκιβωτισμένου σε βελτιωτικό υλικό.

Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα, σχετικά με τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων. Η τεχνική βελτίωσης της απόδοσης των συστημάτων γείωσης, με χρήση των εν θέματι υλικών, δεν ήταν ευρέως διαδεδομένη στον χώρο των Μηχανικών και των τεχνικών, εν γένει, Επιστημόνων, μέχρι πριν, περίπου, 15 χρόνια. Το γεγονός αυτό, από μόνο του, καθιστά δύσκολη τη συλλογή αρκετών και έγκυρων πληροφοριών, επιστημονικά αλλά και εμπειρικά τεκμηριωμένων, για τη μακροχρόνια συμπεριφορά των υλικών αυτών, μετά την έγχυσή τους γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης και, μάλιστα, υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και σε διαφορετικούς τύπους εδαφών. Από την πληθώρα των εργασιών που έχει εκπονηθεί στο γνωστικό αντικείμενο των συστημάτων γείωσης, λίγες μόνον, αναφέρονται στη χρήση βελτιωτικών υλικών στα συστήματα αυτά. Η επιστημονική έρευνα για τη σύνθεση, τον τύπο, τη χρήση και τη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών γείωσης αρχίζει, δειλά-δειλά, στις αρχές της δεκαετίας του 1940, με κορύφωση τα τελευταία 10–15 χρόνια, οπότε παρουσιάζονται εργασίες σχετικές με τα

βελτιωτικά υλικά σε κάθε, σχεδόν, Διεθνές Επιστημονικό Συνέδριο Υψηλών Τάσεων είτε/και Αντικεραυνικής Προστασίας.

Η έρευνα της βιβλιογραφίας καταδεικνύει την έλλειψη πληροφορίας σχετικά με την μακροχρόνια συμπεριφορά των υλικών: τούτο οφείλεται στη μικρή διάρκεια των αντιστοίχων μετρήσεων (συνήθως ολίγων μηνών), τις οποίες διεξάγουν οι ερευνητές, σε υπαίθριες πειραματικές διατάξεις, λόγω του μεγάλου, ομολογουμένως, χρονικού διαστήματος, που απαιτείται για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων και λόγω των αντίξοων καιρικών συνθηκών. Με την παρούσα διατριβή, ο συγγραφέας φιλοδοξεί να καλύψει αυτό το κενό, να παράσχει μια εμπειριστατωμένη μελέτη πάνω στα βελτιωτικά υλικά γείωσης, βασισμένη σε πειραματικά δεδομένα, ληφθέντα επί μακρά σειρά ετών, και να συμβάλει στην εξαγωγή χρήσιμων και ασφαλών συμπερασμάτων για το συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο.

Με βάση τα ευρήματα της παρούσας έρευνας, η συμπεριφορά και η απόδοση των βελτιωτικών υλικών γείωσης δεν είναι, επ' ουδενί, σταθερή κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, ούτε ίδια με την κατάσταση που διαμορφώνουν κατά το πρώτο χρονικό διάστημα, μετά την τοποθέτησή τους γύρω από τα ηλεκτρόδια. Τα εν λόγω υλικά αφενός συμβάλλουν στη μείωση της τιμής της αντίστασης γείωσης, αφετέρου εμφανίζουν έντονη μεταβλητότητα της απόδοσής τους, κατά τη διάρκεια του έτους, τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Η μεταβλητότητα της απόδοσής τους είναι εντονότερη στα βιομηχανικώς παραγόμενα συνθετικά υλικά, τα οποία, ενώ προκαλούν, εντυπωσιακή μείωση της τιμής της αντίστασης γείωσης R_g , κατά τις πρώτες εβδομάδες μετά την τοποθέτησή τους, στη συνέχεια, και συναρτήσει του χρόνου και της βροχόπτωσης, αναδεικνύουν και συμβάλουν σε τεράστια διακύμανση των τιμών της R_g . Οι ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες των βελτιωτικών υλικών αυτής της κατηγορίας, όπως δηλώνονται από τις παρασκευάστριες εταιρίες, μετά τις εργοστασιακές δοκιμές, μεταβάλλονται με την έγχυσή τους εντός του εδάφους, λόγω της άμεσης ανάμιξης και αλληλεπίδρασής τους με αυτό. Κάποια υλικά, μάλιστα, εμφάνισαν συρρίκνωση γύρω από το ηλεκτρόδιο και απορρόφησή τους από το περιβάλλον έδαφος.

Εξαίρεση φαίνεται να αποτελεί το σκυρόδεμα, το οποίο, παρά τη μικρότερη μείωση της R_g , που επιτυγχάνει σε σχέση με τα άλλα υλικά, παρουσιάζει αξιοσημείωτη σταθερότητα, άρα και ασφάλεια, κατά τη διάρκεια της τετραετούς

παρατήρησης. Ενδεχομένως, η χρήση, πλέον αγωγίμης, απ' ό,τι συνήθως, τσιμεντοκονίας για την παρασκευή του σκυροδέματος, μπορεί να βελτιώσει ακόμη περισσότερο τα χαρακτηριστικά του, ως βελτιωτικό υλικό.

Η επιλογή του καταλληλότερου, για κάθε περίπτωση εγκατάστασης γείωσης, υλικού, θα πρέπει να γίνεται ύστερα από προσεκτική μελέτη και αναφορά στη μακροχρόνια συμπεριφορά του και όχι μόνο με βάση το κριτήριο της άμεσης και ευκαιριακής ελάττωσης της τιμής της αντίστασης γείωσης, στα εκάστοτε θεσπισμένα όρια, όπως γίνεται συνήθως: τα υλικά αυτά συμβάλλουν, σημαντικά, στην ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και η επιλογή ενός ακατάλληλου υλικού μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για τους ανθρώπους και τον εξοπλισμό.

Παράλληλα με την παρατήρηση και μελέτη της συμπεριφοράς των βελτιωτικών υλικών, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν και μοντέλα υπολογιστικής νοημοσύνης, ως εργαλεία για την καλύτερη αξιολόγηση των υλικών αυτών και, κυρίως, για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους σε μελλοντικές χρονικές περιόδους. Με τα μοντέλα αυτά και έχοντας δεδομένα για την ειδική αντίσταση του εδάφους και τα ύψη βροχόπτωσης προγενέστερων χρονικών περιόδων, ο μελετητής είναι σε θέση να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης που σχεδιάζει, σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις στο μέλλον. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν παρέχουν μεγάλη ακρίβεια εκτίμησης και πρόβλεψης της τιμής της αντίστασης γείωσης, όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το ίδιο, κάλλιστα, μπορεί να υποστηριχθεί και για την εκτίμηση της μεταβατικής συμπεριφοράς των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, με τη χρήση του προτεινόμενου κυκλώματος, προς προσδιορισμό της τιμής του κρουστικού ρεύματος, που αναπτύσσεται στις μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας.

5.2 Συμβολή – Πρωτοτυπία

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στις τεχνικές βελτίωσης της απόδοσης των συστημάτων γείωσης, μέσω της χρήσης καταλλήλων υλικών, περιβαλλόντων τα ηλεκτρόδια γείωσης, και στην ανάπτυξη εργαλείων για την ακριβή εκτίμηση/πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης. Παρά την εκτεταμένη

έρευνα και βιβλιογραφία στον ευρύτερο τομέα των συστημάτων γείωσης, η διερεύνηση της συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων εντός βελτιωτικών υλικών έχει γίνει με τρόπο αποσπασματικό, έτσι ώστε να μην υπάρχει καθαρή και ολοκληρωμένη εικόνα για τα αποτελέσματα χρήσης των εν λόγω υλικών. Η συμβολή της διατριβής στη μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, με προσθήκη βελτιωτικών υλικών, και της διακύμανσης των σχετικών μεγεθών, έγκειται στα εξής:

- *Αναλυτική πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, εντός βελτιωτικών υλικών, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.*

Όπως έχει αναφερθεί, στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος κειμένου, η πειραματική διερεύνηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, όταν είναι εγκιβωτισμένα σε βελτιωτικά υλικά εδάφους, είναι, έως τώρα, αποσπασματική και, μερικές φορές, με συγκεχυμένα αποτελέσματα. Οι αναφορές, που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία, κυρίως από πρακτικά διεθνών συνεδρίων, μολονότι εξετάζουν μια μεγάλη γκάμα από βελτιωτικά υλικά, που χρησιμοποιούνται, σήμερα, σε ευρεία κλίμακα, βασίζονται σε, μικρής διάρκειας (από μερικές εβδομάδες έως και 8–10 μήνες, βλ. αναφορές §3.3) πειραματικές μετρήσεις στο ύπαιθρο. Υπάρχουν, μάλιστα, μελέτες, των οποίων τα συμπεράσματα βασίζονται σε μετρήσεις μίας μόνον ημέρας, δηλαδή κατά την ημέρα εγκατάστασης των ηλεκτροδίων και έγχυσης των βελτιωτικών υλικών γύρω από τα ηλεκτρόδια, με συνέπεια, τα αποτελέσματα ορισμένων, τουλάχιστον, εξ αυτών, να αντιφάσκουν πλήρως μεταξύ τους: χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των αναφορών των Ahmad και Gomes στο Διεθνές Συνέδριο Αντικεραυνικής Προστασίας του 2010 (ICLP 2010), οι οποίοι κατέληξαν σε, εντελώς, αντίθετα μεταξύ τους συμπεράσματα, όσον αφορά στη χρήση του NaCl στα συστήματα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας.

Η παρούσα διατριβή, μ' έναν τετραετή κύκλο πειραματικών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων, εντός των υπό εξέταση υλικών, και του ύψους βροχόπτωσης, σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές αξιολόγησης των βελτιωτικών υλικών, παρέχει ολοκληρωμένη εικόνα, με σαφή και ασφαλή συμπεράσματα, όσον αφορά στη συμπεριφορά και απόδοση των συστημάτων γείωσης, όταν προστίθενται σ' αυτά

βελτιωτικά υλικά εδάφους. Έγινε ενδελεχής μελέτη, μέσα από πειραματικά δεδομένα, του τρόπου επίδρασης διαφόρων παραγόντων, όπως η ειδική αντίσταση του εδάφους, η ειδική αντίσταση του υλικού, το ύψος βροχόπτωσης και η εποχικότητα στη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης γείωσης. Έγινε, επίσης, συλλογή και επεξεργασία όλων των πειραματικών τιμών των αναφερθέντων μεγεθών και σχηματίστηκε βάση δεδομένων, μέσω της οποίας προσδιορίστηκε και ποσοτικοποιήθηκε, με ιδιαίτερα ικανοποιητική ακρίβεια, η σχέση μεταξύ αυτών των μεγεθών, χρησιμοποιώντας εργαλεία Υπολογιστικής Νοημοσύνης.

Με τα εκτεθέντα αποτελέσματα, η διατριβή δεν έχει σκοπό να προτείνει ή να απορρίψει τη χρήση ενός υλικού ως βελτιωτικού. Σκοπός της είναι να παράσχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και αντικειμενικά επιστημονικά στοιχεία στον Μηχανικό και σε κάθε ενδιαφερόμενο, ώστε να είναι σε θέση να επιλέξει το καταλληλότερο, κατά περίπτωση, συστήματος γείωσης, υλικό.

- *Ανάπτυξη Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου για την εκτίμηση / πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης και την περιγραφή της μη γραμμικής σχέσης μεταξύ της αντίστασης γείωσης και των παραμέτρων που την επηρεάζουν.*

Η συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, η οποία εκφράζεται, κυρίως, με το μέγεθος της αντίστασης γείωσης, καθορίζεται, εν πολλοίς, από τον τύπο του εδάφους ή, γενικότερα, του υλικού που τα περιβάλλει. Παράμετροι, όπως η υγρασία του εδάφους, η βροχόπτωση, η θερμοκρασία του αέρα και, συνακόλουθα, του εδάφους, η εποχικότητα κ.α. συμβάλλουν, κατά το μάλλον ή ήττον, στη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης γείωσης.

Όπως φαίνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα της διατριβής, οι παράγοντες αυτοί μεταβάλλονται, συνεχώς, κατά τη διάρκεια του έτους και, μάλιστα, όχι με δεδομένο και μόνιμο τρόπο, καθώς οι καιρικές συνθήκες ενδέχεται να είναι διαφορετικές στις αντίστοιχες εποχές διαφορετικών ετών. Το γεγονός αυτό, όπως γίνεται αντιληπτό, έχει άμεσες συνέπειες και στη συνεχή διακύμανση της τιμής της αντίστασης γείωσης. Το πρόβλημα είναι, όχι μόνο πολυπαραμετρικό, αλλά και πολύπλοκο στην ποσοτικοποίηση των σχέσεων που το περιγράφουν, με εμφανείς τις μη γραμμικότητες στην εξάρτηση μεταξύ των εμπλεκόμενων μεγεθών, γίνεται, δε, ακόμη πιο δύσκολο με την προσθήκη των βελτιωτικών υλικών και τη μεταβολή της ειδικής αντίστασής τους, συναρτήσει

προαναφερθέντων παραγόντων. Παρά την έρευνα που έχει γίνει διεθνώς, έως σήμερα, επί των βελτιωτικών υλικών γείωσης, δεν έχει προταθεί κάποια μέθοδος για την εκτίμηση και πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης, σε μελλοντικές χρονικές περιόδους, πέραν των περιόδων της πειραματικής παρατήρησης.

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα έρχονται να αντιμετωπίσουν τις συγκεκριμένες προκλήσεις, δίνοντας λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα, όπου αδυνατούν να δώσουν λύση οι κλασικές αριθμητικές μέθοδοι και τα συνήθη μαθηματικά μοντέλα. Για τον λόγο αυτόν, στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε και προτείνεται, για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία των συστημάτων γείωσης με βελτιωτικά υλικά, ΤΝΔ, το οποίο, μέσω της εκπαίδευσής του μαθαίνει, χωρίς να χρειάζεται να αναλύσει, τη μη γραμμική σχέση μεταξύ των εμπλεκόμενων μεγεθών της ειδικής αντίστασης του εδάφους, του ύψους βροχόπτωσης και της αντίστασης γείωσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, η οποία εμπεριέχει και τον παράγοντα ειδική αντίσταση των βελτιωτικών υλικών. Το ΤΝΔ εκπαιδεύτηκε με τον κλασικό αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος και αρκετές παραλλαγές του. Τα σύνολα τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση, προήλθαν από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, σε διάφορα βάθη αυτού, και του ύψους βροχόπτωσης, σε προγενέστερες, από την ημέρα εκτίμησης / πρόβλεψης, χρονικές περιόδους και από προσομοιώσεις διστρωματικού μοντέλου εδάφους, μέσω κατάλληλου λογισμικού. Πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ΤΝΔ, κατά τη φάση της εκπαίδευσης, με αντίστοιχο σύνολο τιμών αξιολόγησης και τέλος το ΤΝΔ ελέγχθηκε, μέσω του συνόλου ελέγχου, ως προς την ικανότητα και την ακρίβεια πρόβλεψης της τιμής της R_g σε άγνωστα δεδομένα, με σκοπό την επιλογή του καταλληλότερου αλγόριθμου εκπαίδευσης και του καλύτερου δικτύου για την πρόβλεψη τιμών.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία απέφερε πολύ καλά αποτελέσματα και συμβάλλει στην αξιόπιστη και ακριβή πρόβλεψη των τιμών της αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων γείωσης, εγκαθιστώντας σε βελτιωτικά υλικά. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο και σημαντικό εργαλείο στα χέρια των Μηχανικών, οι οποίοι καλούνται να χρησιμοποιήσουν βελτιωτικά υλικά σε συστήματα γείωσης, τα οποία, αρχικώς, εμφανίζουν μη αποδεκτές τιμές αντίστασης: με την προτεινόμενη μεθοδολογία, οι ενδιαφερόμενοι θα είναι σε

θέση να εκτιμήσουν την απόδοση των, με χρήση βελτιωτικών υλικών νέων συστημάτων, πριν την κατασκευή τους, έχοντας κάνει, απλώς, την επιλογή του κατάλληλου υλικού και έχοντας στη διάθεσή τους δεδομένα βροχόπτωσης και ειδικής αντίστασης του εδάφους.

- *Ανάπτυξη Wavelet Νευρωνικού Δικτύου για την πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης.*

Μια εναλλακτική, προς τα ΤΝΔ, μεθοδολογία για την περιγραφή μη γραμμικών και πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ φυσικών μεγεθών είναι τα Wavelet Νευρωνικά Δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά, μέσω της χρήσης wavelet συναρτήσεων, αντί της κλασικής σιγμοειδούς που χρησιμοποιούν τα κλασικά ΤΝΔ, αποφεύγουν τον πιθανό εγκλωβισμό του αλγόριθμου εκπαίδευσης σε τοπικά ελάχιστα, μειώνοντας ταυτόχρονα και τον απαιτούμενο χρόνο εκπαίδευσης. Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε και προτείνεται, για πρώτη φορά στη διεθνή ερευνητική μελέτη των συστημάτων γείωσης, Wavelet Δίκτυο για την ακριβή πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης συστημάτων γείωσης, με ή χωρίς βελτιωτικά υλικά.

Το wavelet δίκτυο εκπαιδεύτηκε με τον κλασικό αλγόριθμο της προς τα πίσω διάδοσης σφάλματος, όπως ακριβώς και το ΤΝΔ. Το σύνολο εκπαίδευσης περιείχε αρχικά τις ίδιες μεταβλητές εισόδου με το ΤΝΔ, ήταν όμως αρκετά πιο εμπλουτισμένο, με περισσότερα δεδομένα μετρήσεων και κάλυπτε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους διακυμάνσεων της τιμής της αντίστασης γείωσης. Εφαρμόστηκε μέθοδος επιλογής των στατιστικώς σημαντικότερων μεταβλητών εισόδου, δηλαδή αυτών που εμφανίζουν τον μεγαλύτερο βαθμό συσχέτισης με τη μεταβλητή εξόδου, με στόχο τη μείωση του χρόνου εκπαίδευσης και την αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης. Το σύνολο των τελικώς επιλεγμένων μεταβλητών εισόδου χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του δικτύου. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και του ύψους βροχόπτωσης της προηγούμενης ημέρας και προγενέστερων χρονικών περιόδων, από την ημέρα μέτρησης της αντίστασης γείωσης, χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης της επόμενης, από την ημέρα μέτρησης, ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο εκπαιδεύεται σε ακριβή πρόβλεψη των τιμών της R_g σε μελλοντικές χρονικές περιόδους.

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας Wavelet Νευρωνικών Δικτύων (WN) δείχνουν ότι, και αυτά τα δίκτυα αποτελούν ένα χρήσιμο, ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, με βελτιωτικά υλικά εδάφους. Η σύγκλιση μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών στόχου της αντίστασης γείωσης, καθώς και οι πολύ χαμηλές τιμές του Symmetric Mean Absolute Percentage Error (SMAPE), καταδεικνύουν την πολύ υψηλή απόδοση αυτών των Δικτύων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να προβλέψει με υψηλή ακρίβεια την τιμή της αντίστασης γείωσης όλων των κατακόρυφων ράβδων, που εξετάστηκαν, ενώ μπορεί, επίσης, να μοντελοποιήσει την υποκείμενη σχέση μεταξύ μεγεθών και συντελεστών, όπως η βροχόπτωση, η ειδική αντίσταση του εδάφους, η σύσταση του βελτιωτικού υλικού και η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου, σχέση η οποία είναι δύσκολο να προσεγγιστεί με κλασικές αριθμητικές μεθόδους.

- *Εφαρμογή Μεθοδολογίας Επαγωγικής Μηχανικής Μάθησης, για την παραγωγή γενικότερων, σε σχέση με τα ανωτέρω αναπτυχθέντα Τεχνητά και Wavelet Νευρωνικά Δίκτυα, κανόνων αξιολόγησης της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης.*

Η Επαγωγική Μηχανική Μάθηση, με χρήση των *Δένδρων Αποφάσεων* (*Decision Trees*) είναι από τις πλέον διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες πρακτικές μεθόδους, για εξαγωγή επαγωγικών συμπερασμάτων: είναι μία μέθοδος για την προσέγγιση συναρτήσεων διακριτών τιμών, η οποία παραμένει ανεπηρέαστη από θόρυβο και έχει την ικανότητα να μαθαίνει διαζευκτικές εκφράσεις.

Στο πλαίσιο αυτής της διατριβής αναπτύχθηκε Μεθοδολογία Επαγωγικής Μηχανικής Μάθησης, με την οποία κατασκευάστηκαν Δένδρα Αποφάσεων, από τα οποία, στη συνέχεια, παρήχθησαν γενικευμένοι κανόνες ταξινόμησης των τιμών της αντίστασης γείωσης, σε προεπιλεγμένες κλάσεις. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται και προτείνεται, επίσης, για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία των συστημάτων γείωσης και σκοπό έχει την εξαγωγή κανόνων, για μια γενική εκτίμηση του εύρους διακύμανσης των τιμών της αντίστασης γείωσης, συναρτήσει των μεταβολών της ειδικής αντίστασης, από ένα δείγμα μετρήσεων της αντίστασης γείωσης, και όχι τόσο για την ακριβή εκτίμηση και πρόβλεψη της τιμής της R_g , για την οποία, άλλωστε, χρησιμοποιήθηκαν καταλληλότερα

μοντέλα υπολογιστικής νοημοσύνης. Ο λόγος που αναπτύχθηκε αυτή η μεθοδολογία είναι ότι, πολλές φορές, είναι χρήσιμη η γνώση της γενικότερης τάσης που παρουσιάζει, ή θα παρουσιάσει στο μέλλον, ένα φυσικό μέγεθος, ή ένα φαινόμενο. Συνεπώς, η ανάγκη των Μηχανικών και των Ερευνητών, που ασχολούνται με το γνωστικό αντικείμενο των συστημάτων γείωσης, είναι, πολλές φορές, η αξιολόγηση της γενικότερης συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων, όταν μεταβάλλονται, σημαντικά, κάποιες παράμετροι που την επηρεάζουν, όπως, άλλωστε, αναφέρθηκε παραπάνω.

Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για τρία (3) σενάρια διάκρισης και οριοθέτησης των κλάσεων ταξινόμησης, τα οποία επιλέχθηκαν με κριτήρια, τόσο την ομοιομορφία του εύρους τους, όσο και την ομοιόμορφη κατανομή των διαθέσιμων περιπτώσεων σ' αυτές. Έτσι κατασκευάστηκε ένα Δένδρο Αποφάσεων για κάθε ξεχωριστή υπόθεση εργασίας, λαμβάνοντας υπ' όψιν, κάθε φορά, όλες τις προαναφερόμενες μεταβλητές εισόδου, που χρησιμοποιήθηκαν και στα προηγούμενα μοντέλα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει μια καλή δυναμική ταξινόμησης, με το διευρυμένο σφάλμα της cross validation να κυμαίνεται από 5,5% έως 9,0%, ανάλογα με το θεωρούμενο εύρος κλάσεων.

- *Πρόταση, πειραματική διερεύνηση και σχεδιασμός κυκλωματικού μοντέλου προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης εντός βελτιωτικών υλικών.*

Για τη σφαιρική ολοκλήρωση της παρούσας ερευνητικής εργασίας επί των συστημάτων γείωσης, περιελήφθησαν εις αυτήν δοκιμές των ηλεκτροδίων υπό κρουστική καταπόνηση, με δεδομένο, μάλιστα, ότι εμπλέκονται και υλικά που αλλάζουν τη μόνιμη και μεταβατική συμπεριφορά των γειωτών. Οι σχετικές δοκιμές παρέχουν τα απαραίτητα στοιχεία και δεδομένα για τη διερεύνηση των μεταβατικών φαινομένων, που λαμβάνουν χώρα γύρω από το ηλεκτρόδιο, όταν αυτό διαρρέεται από ισχυρό κρουστικό ρεύμα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα έγκριτων επιστημονικών εργασιών που μελετούν τα εν λόγω φαινόμενα και έχουν προτείνει διάφορα μοντέλα για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ράβδων γείωσης, υπό κρουστικά κεραυνικά ρεύματα. Απ' αυτές, ελάχιστες αναφέρονται σε πειράματα με πραγματικώς εγκατεστημένα ηλεκτρόδια γείωσης,

δεδομένου ότι, στη συντριπτική πλειοψηφία αυτών, οι ερευνητές έχουν πειραματιστεί σε υπό κλίμακα μοντέλα στο εργαστήριο. Γενικώς, είναι λίγες οι αναφορές σε μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς ηλεκτροδίων με βελτιωτικά υλικά και, απ' αυτές, μόλις μία σε πραγματικού μεγέθους ηλεκτρόδια εντός βελτιωτικών υλικών εδάφους.

Στο πλαίσιο της διατριβής διεξήχθησαν δοκιμές των εξεταζόμενων ηλεκτροδίων με κρουστικά ρεύματα, παραγόμενα από γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων $25kA$, $10kV$. Οι δοκιμές έγιναν σε δύο διαφορετικές εποχές του έτους και από τις μετρήσεις της τάσεως και του ρεύματος προσδιορίστηκε η κρουστική σύνθετη αντίσταση των κατακόρυφων ηλεκτροδίων για κάθε κρούση. Με βάση τα αποτελέσματα των ως άνω δοκιμών, πραγματοποιήθηκε αναλυτική μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης και διερεύνηση της μεταβολής της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, συναρτήσει του επιπέδου τάσης, του ύψους βροχόπτωσης και της εποχικότητας.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αξιοποιήθηκαν, επίσης, για τη σχεδίαση και ανάπτυξη κυκλωματικού μοντέλου, το οποίο προτείνεται για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς των εν λόγω συστημάτων. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα οι αναπτυσσόμενες σύνθετες αντιστάσεις του περιβάλλοντος εδάφους και του υλικού, γύρω από τα ηλεκτρόδια, αναπαριστώνται με δύο ξεχωριστούς παράλληλους κλάδους σύνθετης αντίστασης, μεταβαλλόμενης τιμής. Βεβαίως, για κάθε ηλεκτρόδιο, με διαφορετικό υλικό, προσδιορίστηκαν και οι αντίστοιχες τιμές της σύνθετης αντίστασης στον κλάδο του υλικού.

Όπως προκύπτει και από τα διαγράμματα προσομοίωσης, τα αποτελέσματα υπολογισμών του μοντέλου και η παραχθείσα κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος προσεγγίζουν με πολύ υψηλή ακρίβεια τα πειραματικά ευρήματα. Το προτεινόμενο κύκλωμα μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό και ισχυρό εργαλείο στη μελέτη τέτοιων συστημάτων γείωσης αντικεραυνικής προστασίας κατά το στάδιο της σχεδίασης και διαστασιολόγησής τους.

5.3 Η επόμενη μέρα

Εν όψει μιας μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας, η οποία θα επεκτείνει τις μεθοδολογίες και τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής, υπάρχουν κάποια σημεία προς περαιτέρω διερεύνηση, δοκιμή και πειραματισμό. Αυτά μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

- Θα έχει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον η πραγματοποίηση μετρήσεων, αντιστοιχών με εκείνες της παρούσας διατριβής, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, σε συστήματα γείωσης εγκιβωτισμένα στα ίδια βελτιωτικά υλικά γείωσης και σε διαφορετικούς τύπους εδάφους. Οι προτεινόμενες μετρήσεις θα εμπλουτίσουν, με νέα στοιχεία, τη γνώση γύρω από τη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών και θα διευρύνουν την υφιστάμενη βάση δεδομένων.
- Όσον αφορά στο πειραματικό μέρος της παρούσας διατριβής, πρόκληση αποτελεί και προτείνεται, η διεξαγωγή δοκιμών κρουστικής καταπόνησης μεγαλύτερης κλίμακας, με χρήση συναρμολογούμενης γεννήτριας πολύ ισχυρών κρουστικών ρευμάτων, στη θέση εγκατάστασης των υφιστάμενων κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης. Η, ενδεχόμενη, εκδήλωση ιονισμού του εδάφους θα συμβάλει αποφασιστικά στη μελέτη της επίδρασης των βελτιωτικών υλικών στο φαινόμενο του ιονισμού. Επίσης, οι πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικό σύστημα γείωσης, υπό πραγματικές συνθήκες όγκου του εδάφους, αναμένεται να φέρουν στο φως νέα στοιχεία για τον ιονισμό και να φωτίσουν σκοτεινές, έως τώρα, πλευρές του φαινομένου, που μόνο με υποθέσεις μπορούν να προσεγγιστούν. Αυτό θα σημάνει ταυτόχρονα, και πιθανό επανασχεδιασμό των μοντέλων προσομοίωσης του φαινομένου.
- Η επιλογή του συνόλου των μεταβλητών εισόδου για την εκπαίδευση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων έγινε με εμπειρικό τρόπο, καθώς συμπεριέλαβε όλες τις διαθέσιμες μετρηθείσες παραμέτρους της αντίστασης γείωσης. Για τους λόγους που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (5.2) της παρούσας διατριβής, μιας και η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι χρονοβόρα και υψηλού κόστους διαδικασία, επόμενο βήμα στην ανάπτυξη αυτού του μοντέλου εκτίμησης/πρόβλεψης μπορεί να

αποτελέσει η εφαρμογή πρωτότυπου αλγόριθμου επιλογής των, στατιστικά, σημαντικότερων μεταβλητών εισόδου. Η εκπαίδευση του μοντέλου μπορεί, κατ' αρχήν, να αποδεσμευτεί πλήρως από το μέγεθος της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Έτσι, ως μόνες μεταβλητές εισόδου προτείνεται να χρησιμοποιηθούν χρονικά παράθυρα αθροιστικής βροχόπτωσης, τα οποία θα προσδιορισθούν μέσω αλγόριθμου επιλογής. Ο εν λόγω αλγόριθμος θα περιλαμβάνει ανάλυση συσχέτισης των χρονικών παραθύρων βροχόπτωσης με την αντίσταση γείωσης (μεταβλητή εξόδου), μέσω Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, ένα για κάθε μεταβλητή εισόδου ξεχωριστά. Τα χρονικά παράθυρα που θα εξετασθούν θα προεπιλεγούν μέσω γραφημάτων ανάλυσης συσχέτισης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο χρόνος εκπαίδευσης του Δικτύου θα μειωθεί σημαντικά, η ακρίβεια πρόβλεψης αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω και, τελικώς, θα προκύψει μοντέλο πρόβλεψης, η εφαρμογή του οποίου θα απαιτεί τη γνώση, αποκλειστικώς και μόνον, δεδομένων βροχόπτωσης στην τοποθεσία ενδιαφέροντος.

- Για τον καθορισμό κλάσεων μικρού εύρους, άρα και μεγάλης ακρίβειας στη διαδικασία ταξινόμησης, η Μεθοδολογία Επαγωγικής Μηχανικής Μάθησης, γενικά, απαιτεί πολύ μεγάλο πλήθος δεδομένων στο σύνολο εκπαίδευσης. Επομένως προτείνεται η δοκιμή ανομοιόμορφης διαμέρισης των τιμών, έτσι ώστε να προκύπτουν ισοπληθείς, κατά προσέγγιση, αριθμοί παραδειγμάτων για όλες τις κλάσεις. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η εύρεση κάποιων κανόνων απόφασης (άγνωστων μέχρι σήμερα για το συγκεκριμένο πρόβλημα) με υψηλή ακρίβεια, που θα μπορέσουν, στη συνέχεια, να επιβεβαιωθούν με στατιστικές μεθόδους. Τέλος προτείνεται να εφαρμοσθούν και κάποιες άλλες τεχνικές, που κάνουν ανάμειξη Δένδρων ή άλλων Ταξινομητών, όπως boosting, bagging κ.α..
- Κλείνοντας το κομμάτι της Υπολογιστικής Νοημοσύνης, σημειώνεται ότι, μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον έχει η εφαρμογή Γενετικού Προγραμματισμού, ή ακόμα και ενός υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού αλγόριθμου για την περιγραφή, ανάλυση και μαθηματική έκφραση της σχέσης των εμπλεκόμενων με την αντίσταση γείωσης μεταβλητών, μία

διαδικασία, η οποία δεν μπορεί να επιτελεστεί με τα ΤΝΔ ή τα Wavelet Δίκτυα, τα οποία μαθαίνουν τη σχέση, αλλά δεν την αναλύουν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Αποτελέσματα μετρήσεων των κρουστικών δοκιμών στα κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης

Από τις δοκιμές των εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά κατακόρυφων ηλεκτροδίων υπό κρουστικά ρεύματα προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές μετρήσεων για τις δύο κύριες περιόδους του πειράματος:

Ιούλιος

Έδαφος			Σκυρόδεμα			Μπεντονίτης			Υλικό Α			Υλικό Β		
$u(t_i-\hat{t}_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i-\hat{t}_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i-\hat{t}_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i-\hat{t}_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i-\hat{t}_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)
4240	10,800	392,6	4320	33,067	130,6	4400	27,099	162,4	4320	24,019	179,9	4288	32,072	133,7
4240	12,960	327,2	4352	33,208	131,1	4432	27,343	162,1	4304	24,120	178,4	4272	34,480	123,9
4240	12,960	327,2	4320	33,418	129,3	4464	27,092	164,8	4352	24,357	178,7	4320	32,696	132,1
4304	10,955	392,9	4288	33,127	129,4	4416	27,064	163,2	4320	24,492	176,4	4400	36,626	120,1
4336	10,645	407,3	4320	33,153	130,3	4400	26,968	163,2	4384	24,086	182,0	4336	32,607	133,0
6512	19,103	340,9	6544	53,669	121,9	6720	43,747	153,6	6480	39,273	165,0	6480	53,343	121,5
6544	18,992	344,6	6496	55,195	117,7	6720	44,767	150,1	6400	39,273	163,0	6560	58,226	112,7
6544	18,825	347,6	6512	55,434	117,5	6720	44,803	150,0	6512	37,931	171,7	6560	57,287	114,5
6528	18,696	349,2	6512	55,998	116,3	6680	44,963	148,6	6560	38,107	172,1	6560	54,470	120,4
6560	18,825	348,5	6528	54,896	118,9	6520	45,145	144,4	6400	39,273	163,0	6480	52,044	124,5
8760	26,867	326,0	8656	77,006	112,4	8752	61,618	142,0	8720	53,273	163,7	8560	75,506	113,4
8680	27,123	320,0	8720	76,904	113,4	8760	61,300	142,9	8720	52,626	165,7	8640	73,789	117,1
8680	26,836	323,4	8680	77,160	112,5	8920	61,256	145,6	8760	52,914	165,6	8720	73,850	118,1
8720	27,153	321,1	8720	76,904	113,4	8880	61,278	144,9	8720	52,410	166,4	8600	77,478	111,0
8800	26,990	326,0	8656	77,006	112,4	8880	61,500	144,4	8680	52,878	164,2	8800	74,718	117,8
10840	36,151	299,9	10760	101,746	105,8	11080	80,843	137,1	10800	69,521	155,3	10800	95,011	113,7
10800	37,500	288,0	10880	99,625	109,2	11160	80,821	138,1	10800	72,000	150,0	10880	94,437	115,2
10960	36,594	299,5	10840	100,254	108,1	11080	80,231	138,1	10880	70,409	154,5	10800	96,261	112,2
10840	36,399	297,8	10720	99,382	107,9	11160	80,522	138,6	10880	69,410	156,7	10933	97,044	112,7
10880	36,615	297,1	10800	102,774	105,1	11080	81,105	136,6	10920	69,780	156,5	11040	95,687	115,4
-4288	9,433	454,6	-4320	36,346	118,9	-4368	27,233	160,4	-4240	23,143	183,2	-4288	33,866	126,6
-4320	9,479	455,7	-4304	37,998	113,3	-4400	27,533	159,8	-4352	22,107	196,9	-4320	34,748	124,3
-4400	9,358	470,2	-4336	32,381	133,9	-4384	27,689	158,3	-4368	22,070	197,9	-4320	35,687	121,1
-4320	10,224	422,5	-4304	34,033	126,5	-4384	27,795	157,7	-4267	23,143	184,4	-4240	34,748	122,0
-4336	9,386	462,0	-4304	33,042	130,3	-4400	27,756	158,5	-4336	22,181	195,5	-4240	33,809	125,4
-6560	15,803	415,1	-6512	55,147	118,1	-6624	44,233	149,8	-6528	35,279	185,0	-6480	52,591	123,2
-6576	15,800	416,2	-6512	58,895	110,6	-6640	44,658	148,7	-6512	34,946	186,3	-6480	54,299	119,3
-6592	15,935	413,7	-6512	65,825	98,9	-6680	44,760	149,2	-6512	35,334	184,3	-6464	52,216	123,8
-6560	16,904	388,1	-6512	54,612	119,2	-6680	44,788	149,1	-6544	35,371	185,0	-6432	52,250	123,1
-6480	16,122	401,9	-6512	53,512	121,7	-6600	44,709	147,6	-6496	35,223	184,4	-6464	52,307	123,6

-8760	23,576	371,6	-8760	77,326	113,3	-8800	62,107	141,7	-8680	47,951	181,0	-8600	117,391	73,3
-8720	23,642	368,8	-8800	79,600	110,6	-8800	62,151	141,6	-8600	51,429	167,2	-8760	71,651	122,3
-8800	23,875	368,6	-8720	81,612	106,8	-8840	62,232	142,0	-8400	51,429	163,3	-8600	75,130	114,5
-8880	23,713	374,5	-8720	75,810	115,0	-8880	61,862	143,5	-8840	47,766	185,1	-8600	71,478	120,3
-8760	23,724	369,3	-8760	75,810	115,6	-8840	62,121	142,3	-8720	47,988	181,7	-8400	72,783	115,4
-10960	32,233	340,0	-11000	97,954	112,3	-11080	80,006	138,5	-10960	63,231	173,3	-10760	94,248	114,2
-11000	32,054	343,2	-11000	100,893	109,0	-11080	80,485	137,7	-10920	65,562	166,6	-10840	91,992	117,8
-11080	32,268	343,4	-11000	103,832	105,9	-11040	80,313	137,5	-10880	63,157	172,3	-10600	93,913	112,9
-10600	33,480	316,6	-11000	106,770	103,0	-11160	80,320	138,9	-11000	63,120	174,3	-10800	93,215	115,9
-11000	32,190	341,7	-11000	104,811	105,0	-11040	80,335	137,4	-10960	63,527	172,5	-10840	92,967	116,6

Νοέμβριος

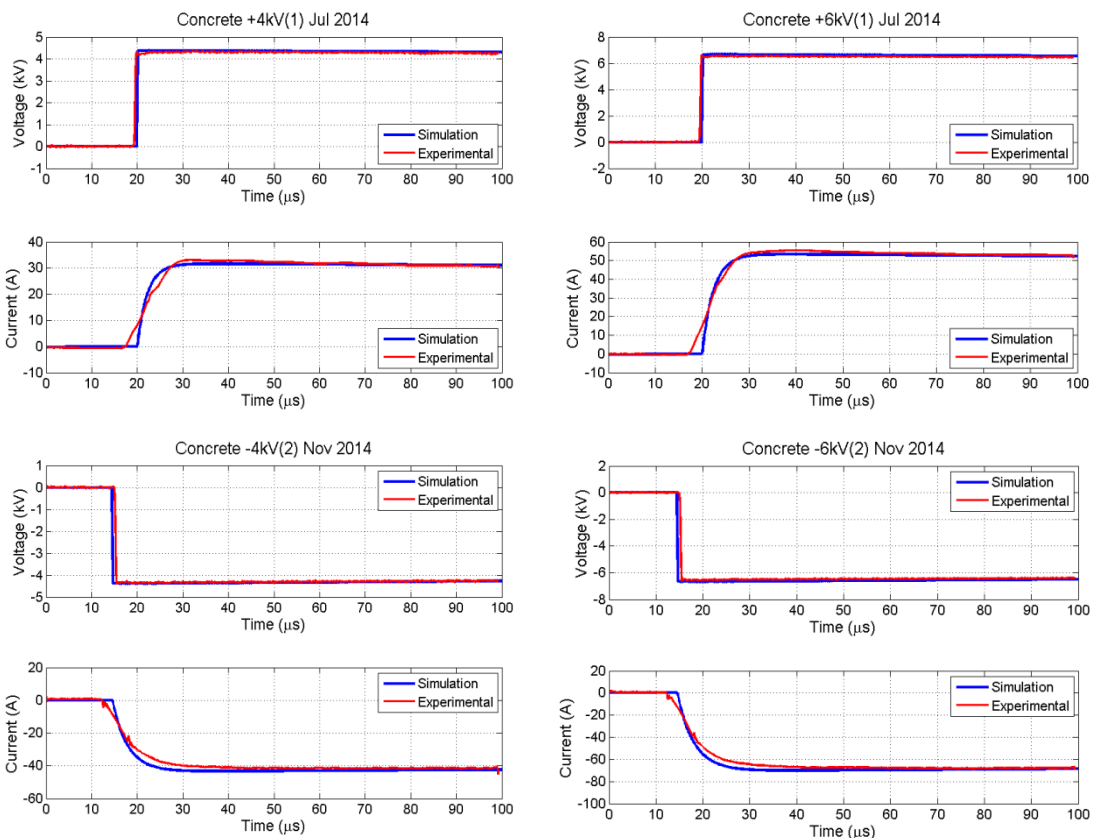
Εδαφος			Σκυρόδεμα			Μπεντονίτης			Υλικό Α			Υλικό Β		
$u(t_i=i_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i=i_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i=i_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i=i_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)	$u(t_i=i_p)$ (kV)	\hat{I}_p (A)	Z (Ω)
4240	21,492	197,3	4288	40,061	107,0	4240	43,740	96,9	4432	36,238	122,3	4208	53,650	78,4
4320	23,760	181,8	4288	40,061	107,0	4320	43,740	98,8	4384	37,023	118,4	4160	55,080	75,5
4288	22,572	190,0	4320	42,120	102,6	4336	43,495	99,7	4293	37,440	114,7	4160	54,000	77,0
4240	22,680	186,9	4208	41,688	100,9	4336	43,447	99,8	4336	37,633	115,2	4208	53,937	78,0
4240	24,840	170,7	4240	40,869	103,7	4304	43,978	97,9	4320	37,524	115,1	4192	53,383	78,5
6400	35,640	179,6	6368	69,552	91,6	6400	71,280	89,8	6400	60,189	106,3	6320	87,480	72,2
6512	34,754	187,4	6400	66,129	96,8	6416	72,038	89,1	6520	62,850	103,7	6280	85,860	73,1
6496	34,692	187,2	6400	66,144	96,8	6432	72,406	88,8	6520	64,015	101,9	6400	86,400	74,1
6432	35,038	183,6	6416	66,737	96,1	6416	73,224	87,6	6440	64,015	100,6	6360	84,144	75,6
6368	35,424	179,8	6400	67,114	95,4	6400	73,440	87,1	6400	65,016	98,4	6280	84,639	74,2
8400	51,840	162,0	8400	91,800	91,5	8528	103,680	82,3	8600	92,880	92,6	8200	121,500	67,5
8533	49,680	171,8	8533	94,500	90,3	8640	104,232	82,9	8600	95,040	90,5	8400	118,800	70,7
8600	50,184	171,4	8467	93,600	90,5	8600	113,400	75,8	8600	93,960	91,5	8440	118,260	71,4
8600	52,920	162,5	8533	98,100	87,0	8640	103,532	83,5	8800	99,900	88,1	8267	121,500	68,0
8640	50,076	172,5	8600	93,800	91,7	8600	106,200	81,0	8600	99,900	86,1	8480	120,027	70,7
10840	64,306	168,6	10720	123,120	87,1	10760	139,273	77,3	10680	126,803	84,2	10560	158,054	66,8
10880	64,940	167,5	10640	123,300	86,3	10720	139,143	77,0	10600	127,480	83,2	10600	164,700	64,4
10760	65,554	164,1	10720	124,200	86,3	10600	143,100	74,1	10720	127,502	84,1	10560	160,200	65,9
10600	68,040	155,8	10800	126,900	85,1	10800	143,100	75,5	10800	127,230	84,9	10400	162,000	64,2
10760	65,235	164,9	10600	124,200	85,3	10680	142,020	75,2	10720	130,680	82,0	10400	157,700	65,9
-4293	22,140	193,9	-4256	42,070	101,2	-4240	49,680	85,3	-4320	40,680	106,2	-4176	52,588	79,4
-4293	22,140	193,9	-4267	45,000	94,8	-4320	47,520	90,9	-4240	42,120	100,7	-4213	53,280	79,1
-4320	27,540	156,9	-4267	44,280	96,4	-4240	47,520	89,2	-4336	40,558	106,9	-4256	52,462	81,1
-4240	23,760	178,5	-4240	42,583	99,6	-4288	47,170	90,9	-4240	42,120	100,7	-4213	52,920	79,6
-4320	23,760	181,8	-4240	41,864	101,3	-4240	47,029	90,2	-4288	40,892	104,9	-4160	52,267	79,6
-6480	35,119	184,5	-6400	70,200	91,2	-6400	75,600	84,7	-6400	66,960	95,6	-6368	83,828	76,0
-6496	34,898	186,1	-6384	70,663	90,3	-6400	76,680	83,5	-6448	66,323	97,2	-6320	85,320	74,1
-6512	35,349	184,2	-6432	69,171	93,0	-6453	75,960	85,0	-6432	66,545	96,7	-6336	84,143	75,3
-6384	35,220	181,3	-6432	69,120	93,1	-6346	76,680	82,8	-6400	68,472	93,5	-6304	84,338	74,7

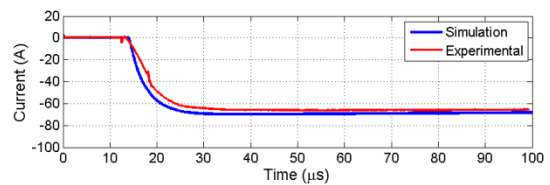
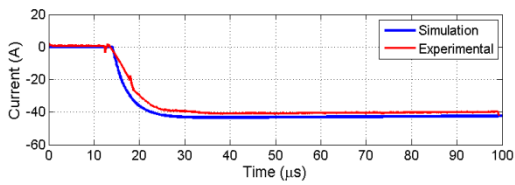
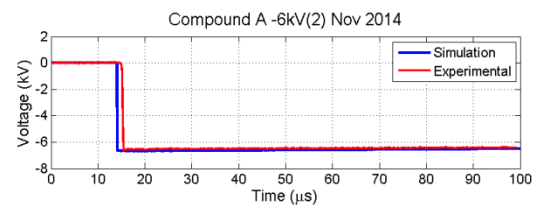
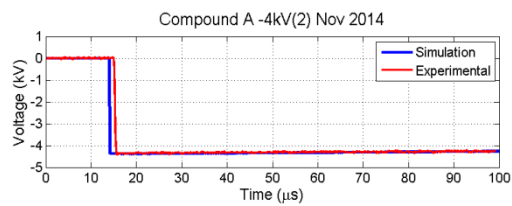
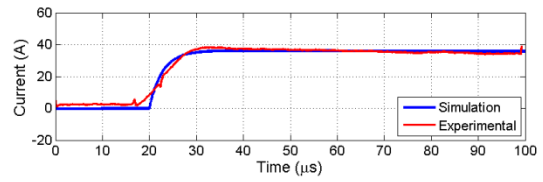
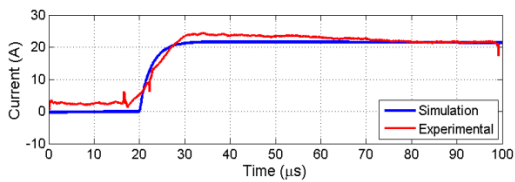
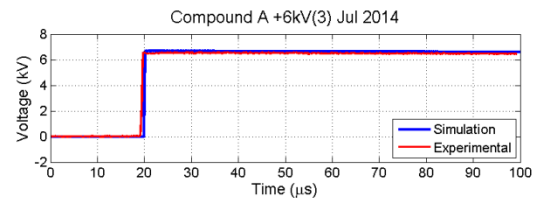
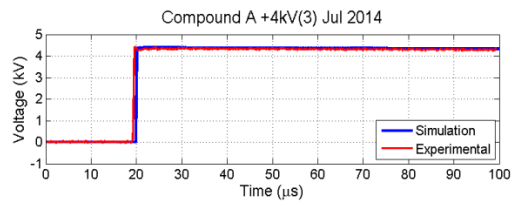
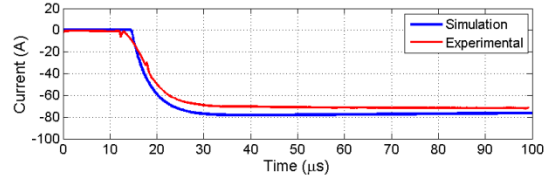
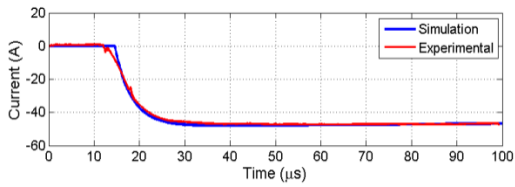
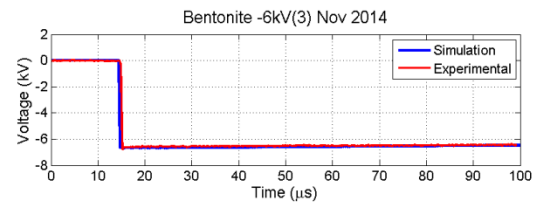
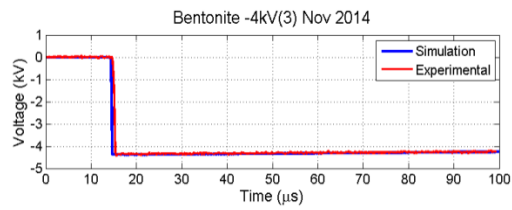
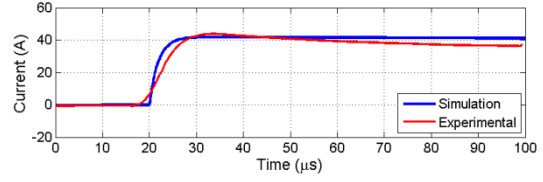
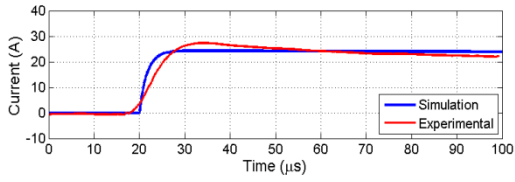
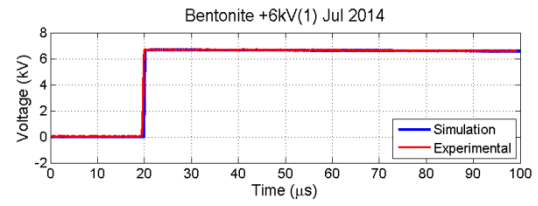
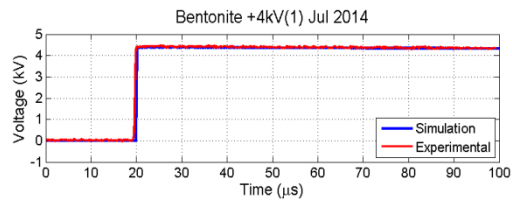


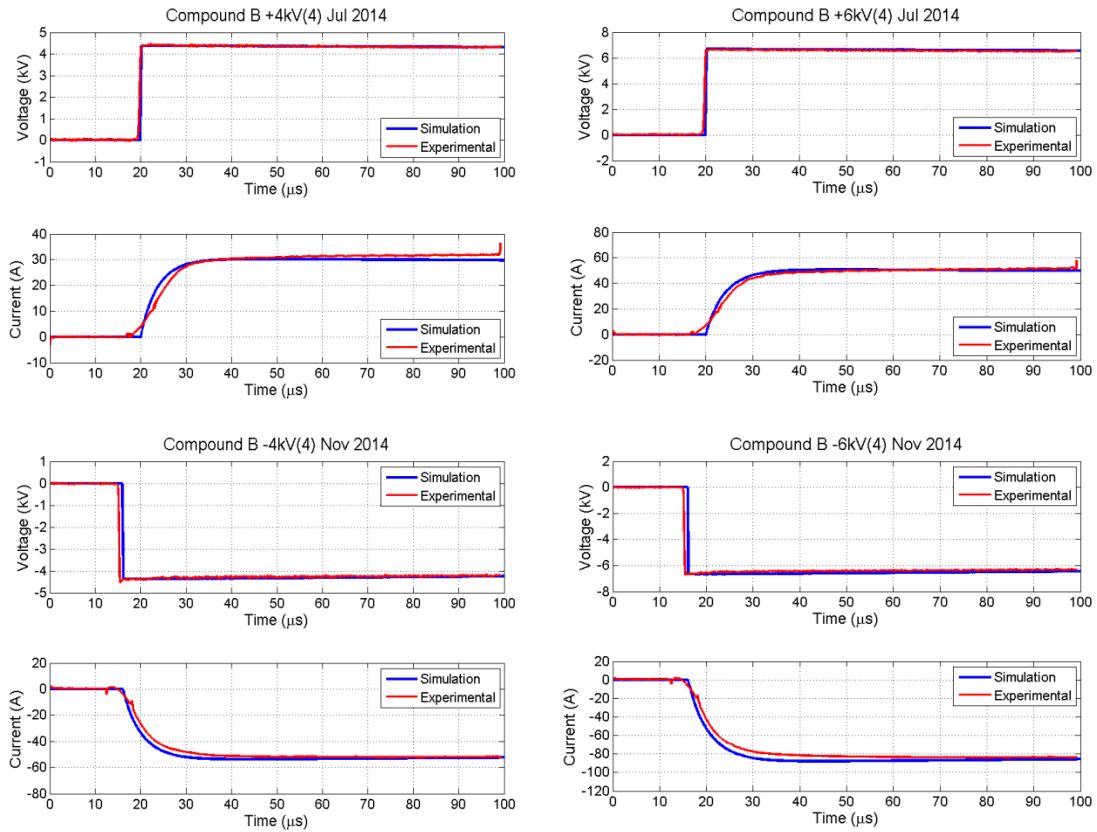
-6432	34,824	184,7	-6400	69,120	92,6	-6328	74,432	85,0	-6480	66,960	96,8	-6240	85,320	73,1
-8400	50,760	165,5	-8560	93,960	91,1	-8512	105,923	80,4	-8512	93,877	90,7	-8467	117,900	71,8
-8600	48,600	177,0	-8600	94,500	91,0	-8560	102,775	83,3	-8640	92,354	93,6	-8400	121,500	69,1
-8800	50,400	174,6	-8600	91,722	93,8	-8600	105,300	81,7	-8600	97,200	88,5	-8480	117,818	72,0
-8667	51,480	168,4	-8520	92,215	92,4	-8640	102,619	84,2	-8600	99,900	86,1	-8520	116,935	72,9
-8800	48,600	181,1	-8600	97,200	88,5	-8600	105,300	81,7	-8600	94,500	91,0	-8440	116,357	72,5
-10800	63,103	171,1	-10733	122,400	87,7	-10720	137,613	77,9	-10720	124,958	85,8	-10200	159,300	64,0
-10800	64,800	166,7	-10640	120,960	88,0	-10600	140,400	75,5	-10720	124,278	86,3	-10600	161,100	65,8
-10800	63,096	171,2	-10720	122,040	87,8	-10800	140,400	76,9	-10800	123,000	87,8	-10600	159,900	66,3
-10680	62,873	169,9	-10680	119,868	89,1	-10600	140,400	75,5	-10760	123,300	87,3	-10560	158,400	66,7
-10800	64,800	166,7	-10600	121,500	87,2	-10667	138,600	77,0	-10720	122,356	87,6	-10667	162,000	65,8

Διαγράμματα προσομοιώσεων για επίπεδα φόρτισης $\pm 4kV$ και $\pm 6kV$

Ακολούθως παρατίθενται κάποια ενδεικτικά διαγράμματα των $u(t)$ και $i(t)$ από τις προσομοιώσεις που έγιναν με το προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο για τα ηλεκτρόδια με βελτιωτικά υλικά.







Π.2 Στοιχεία για τον αλγόριθμο εκπαίδευσης του WNN

Αλγόριθμος της προς τα πίσω διάδοσης σφάλματος (back-propagation algorithm)

Μετά την αρχικοποίηση των παραμέτρων του δικτύου, το δίκτυο συνεχίζει να εκπαιδεύεται ώστε να προκύψει εκείνο το διάνυσμα των παραμέτρων $w = \hat{w}_n$, που θα ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους, με βάση τον BP αλγόριθμο. Η συνάρτηση κόστους που πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί είναι η ακόλουθη:

$$L_n = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n E_p = \frac{1}{2n} \sum_{p=1}^n e_p^2 = \frac{1}{2n} \sum_{p=1}^n (y_p - \hat{y}_p)^2 \quad (\text{Π.1.1})$$

όπου:

$$E_p = \frac{1}{2} (y_p - \hat{y}_p)^2 = \frac{1}{2} e_p^2 \quad (\text{Π.1.2})$$

y_p η τιμή στόχος (πραγματική τιμή του μεγέθους) και \hat{y}_p η έξοδος του δικτύου. Τα βάρη $w_i^{[0]}$, $w_j^{[2]}$ και οι παράμετροι $w_{(\xi)}^{[1]}$ και $w_{(\zeta)}^{[1]}$ ρυθμίζονται συνεχώς κατά το στάδιο μάθησης με σκοπό την προσέγγιση της συνάρτησης στόχου.



Κριτήρια τερματισμού

Τα κριτήρια τερματισμού του αλγόριθμου εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν στο προτεινόμενο μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

$$|L_n(ep) - L_n(ep-1)| \leq \text{limit}_1 \quad (\text{Π.1.3})$$

$$\left| \frac{\partial L_n(ep)}{\partial w_i} - \frac{\partial L_n(ep-1)}{\partial w_i} \right| \leq \text{limit}_2 \quad (\text{Π.1.4})$$

Ρίσκο πρόβλεψης

Το ρίσκο πρόβλεψης είναι ένα μέτρο της ικανότητας γενίκευσης του δικτύου και πιο συγκεκριμένα είναι η αναμενόμενη απόδοση του δικτύου σε νέα δεδομένα, που δεν έχουν εισαχθεί ποτέ ξανά στο δίκτυο, κατά το στάδιο εκπαίδευσης. Δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_\lambda = E \left[\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n (y_p^* - \hat{y}_p^*)^2 \right] \quad (\text{Π.1.5})$$

(\mathbf{x}_p^*, y_p^*) : τα νέα δεδομένα που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του δικτύου $g_\lambda(\mathbf{x}; \hat{\mathbf{w}}_n)$

\hat{y}_p^* : η έξοδος του δικτύου όταν χρησιμοποιεί τα νέα δεδομένα, δηλαδή $g_\lambda(\mathbf{x}^*; \mathbf{w})$

Μέθοδος Sensitivity-Based Pruning (SBP)

$$\text{SBP}(x_j) = L_n(\mathbf{x}; \hat{\mathbf{w}}_n) - L_n(\bar{\mathbf{x}}^{(j)}; \hat{\mathbf{w}}_n) \quad (\text{Π.1.6})$$

όπου
$$\bar{\mathbf{x}}^{(j)} = (x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, \bar{x}_j, \dots, x_{m,t}) \quad (\text{Π.1.7})$$

και
$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_{j,t} \quad (\text{Π.1.8})$$

Στατιστικοί δείκτες για τα σύνολα *in-sample* και *out-of-sample*

Πίνακας Π.2.1

In-sample											
Variable	Mean	St.Dev	Max	Median	Min	Skewness	Kurtosis	KS	<i>p</i> -value	LBQ	<i>p</i> -value
r_d	0.57	3.02	37.80	0.00	0.00	9.34	105.13	7.70	0.0000	7.16	0.9961
r_w	9.16	17.81	116.60	1.00	0.00	3.17	15.22	7.70	0.0000	28.29	0.1027
r_m	42.50	44.03	188.00	29.20	0.00	1.31	4.08	12.87	0.0000	18.76	0.5376
ρ_{1d}	231.98	68.26	458.67	205.59	133.83	1.28	4.04	15.40	0.0000	12.06	0.9141
ρ_{2d}	181.11	44.30	326.47	170.40	126.67	0.97	3.27	15.40	0.0000	11.60	0.9291
ρ_{4d}	129.36	15.37	193.52	126.17	106.56	0.93	3.76	15.40	0.0000	14.41	0.8089
ρ_{6d}	154.51	14.54	267.66	153.06	134.81	2.36	17.21	15.40	0.0000	12.33	0.9043
ρ_{8d}	187.96	18.40	241.94	185.98	150.19	0.04	2.32	15.40	0.0000	28.67	0.0945
ρ_{1w}	230.53	68.06	456.16	203.39	133.83	1.30	4.04	15.40	0.0000	10.81	0.9511
ρ_{2w}	180.42	44.14	326.47	170.23	126.92	0.98	3.27	15.40	0.0000	11.30	0.9379
ρ_{4w}	129.23	15.21	193.52	126.00	106.56	0.93	3.78	15.40	0.0000	15.06	0.7729
ρ_{6w}	154.42	14.49	267.66	153.25	135.57	2.36	17.43	15.40	0.0000	12.57	0.8950
ρ_{8w}	187.44	18.13	220.16	185.68	150.19	-0.02	2.16	15.40	0.0000	24.39	0.2258
ρ_{1m}	225.60	64.25	425.76	196.46	157.21	1.37	4.01	15.40	0.0000	13.54	0.8532
ρ_{2m}	177.93	42.46	297.99	168.35	130.05	1.00	3.16	15.40	0.0000	13.85	0.8381
R_{g1}	268.30	127.14	676.00	235.00	93.60	0.75	3.01	15.40	0.0000	28.583	0.0963
R_{g2}	91.55	29.45	166.30	87.50	36.20	-0.01	2.64	15.40	0.0000	18.883	0.5295
R_{g3}	83.82	61.16	281.00	60.80	29.10	1.49	4.39	15.40	0.0000	11.582	0.9297
R_{g4}	122.65	47.04	276.60	118.70	46.90	0.4	2.85	15.40	0.0000	28.759	0.0926
R_{g5}	74.93	72.80	376.00	44.60	26.20	2.5	8.56	15.40	0.0000	11.987	0.9165

Πίνακας Π.2.2

Out-of-sample											
Variable	Mean	St.Dev	Max	Median	Min	Skewness	Kurtosis	KS	<i>p</i> -value	LBQ	<i>p</i> -value
r_d	0.48	1.42	8.20	0.00	0.00	3.78	17.12	5.00	0.0000	15.00	0.7762
r_w	9.37	16.90	91.80	1.40	0.00	2.81	11.62	5.00	0.0000	22.96	0.2906
r_m	46.33	44.76	188.00	35.40	0.00	1.25	4.11	8.67	0.0000	26.04	0.1645
ρ_{1d}	220.12	63.38	447.36	191.89	156.33	1.56	4.96	10.00	0.0000	17.96	0.5901
ρ_{2d}	173.82	42.35	306.62	163.62	127.17	1.09	3.57	10.00	0.0000	18.08	0.5821
ρ_{4d}	127.85	13.75	165.88	124.41	112.09	0.76	2.67	10.00	0.0000	17.74	0.6045
ρ_{6d}	153.07	15.23	248.06	151.89	135.26	2.54	16.20	10.00	0.0000	20.68	0.4165
ρ_{8d}	185.19	18.84	220.16	184.12	151.20	0.15	1.85	10.00	0.0000	17.70	0.6075
ρ_{1w}	219.51	63.23	448.62	192.06	156.33	1.57	5.07	10.00	0.0000	18.82	0.5335
ρ_{2w}	173.42	41.97	310.39	164.53	127.49	1.13	3.74	10.00	0.0000	21.16	0.3881
ρ_{4w}	127.87	13.92	168.39	123.74	111.92	0.79	2.73	10.00	0.0000	18.54	0.5521
ρ_{6w}	153.03	15.27	248.06	150.77	135.98	2.52	16.07	10.00	0.0000	20.65	0.4181
ρ_{8w}	184.68	18.78	220.16	183.90	151.15	0.17	1.88	10.00	0.0000	18.20	0.5741

ρ_{1m}	215.95	59.13	420.00	191.27	157.72	1.55	4.76	10.00	0.0000	21.95	0.3432
ρ_{2m}	171.52	41.02	293.45	163.03	130.06	1.06	3.31	10.00	0.0000	25.98	0.1666
R_{g1}	242.32	125.10	527.00	198.25	92.40	0.76	2.26	10.00	0.0000	2.80	0.8859
R_{g2}	85.08	31.48	161.40	84.50	34.00	0.03	2.22	10.00	0.0000	10.51	0.9580
R_{g3}	77.60	62.23	268.00	47.65	29.20	1.58	4.44	10.00	0.0000	16.82	0.6646
R_{g4}	113.91	48.26	240.00	107.90	46.50	0.59	2.94	10.00	0.0000	15.53	0.7452
R_{g5}	59.92	50.38	332.90	41.60	25.90	3.2	14.33	10.00	0.0000	26.20	0.1592

- KS: Η απόσταση Kolmogorov Smirnov είναι ένα μέτρο της απόστασης μεταξύ της κατανομής των δεδομένων και της κανονικής κατανομής.
- LBQ: Ο στατιστικός δείκτης Ljung-Box Q είναι ένα μέτρο της πιθανής αυτοσυσχέτισης μεταξύ των δεδομένων.
- p-value: η p-value για καθέναν από τους δείκτες KS and LBQ.

Π.3 Δένδρο απόφασης και παραγόμενοι κανόνες

```
See5 INDUCTION SYSTEM [Release 1.10] Mon Mar 23 21:45:18 2015
-----
```

```
Options:
```

```

          Generating rules
          Pruning confidence level 0%
          Test requires two branches with >= 1 items
```

```
Read 365 cases (13 attributes) from RG5c.data
```

```
Decision tree:
```

```

P1w <= 229.96:
... P1m <= 203.89: "25-60" (194.0)
:   P1m > 203.89:
:     ... P4d > 117.12: "25-60" (23.0)
:     P4d <= 117.12:
:       ... P2m <= 148.74: "25-60" (3.0)
:       P2m > 148.74: "60-95" (7.0)
P1w > 229.96:
... P1w > 371.34:
:   ... P4w > 153.06:
:     ... P2m <= 266.57: "60-95" (1.0)
:     P2m > 266.57: "95-125" (3.0)
:     P4w <= 153.06:
:       ... P1w > 423.49: "230-265" (4.0)
:       P1w <= 423.49:
:         ... P4d > 142.75: "265-300" (4.0)
:         P4d <= 142.75:
:           ... P1w <= 376.99: "265-300" (1.0)
:           P1w > 376.99: "230-265" (3.0)
P1w <= 371.34:
... P8w > 216.644:
:   ... P6w > 175.301: "60-95" (3.0)
:   P6w <= 175.301:
:     ... P4d > 142.75:
:     P4d <= 142.75:
:       ... P4d <= 143.26: "300-335" (4.0)
:       P4d > 143.26: "335-380" (4.0)
```



```

:      P4d <= 142.75:
:      ....P6w <= 160.975: "265-300" (2.0)
:      P6w > 160.975:
:      ....P1d <= 258.11: "160-195" (1.0)
:      P1d > 258.11: "125-160" (3.0)
:
P8w <= 216.644:
....P1d > 325.47:
....P8w > 196.337:
:      ....P6d <= 186.234: "60-95" (12.0)
:      P6d > 186.234: "25-60" (2.0)
:      P8w <= 196.337:
:      ....P2m > 240.16: "195-230" (3.0)
:      P2m <= 240.16:
:      ....rw <= 20.2: "160-195" (2.0)
:      rw > 20.2: "60-95" (1.0)
:
P1d <= 325.47:
....P8d > 210.11:
....P1w <= 264.15: "60-95" (9.0)
:      P1w > 264.15:
:      ....P6w <= 182.087: "95-125" (6.0)
:      P6w > 182.087: "60-95" (2.0)
:
P8d <= 210.11:
....P6d <= 154.566:
....P8w > 202: "25-60" (8.0)
:      P8w <= 202:
:      ....P8d > 189.601:
:      ....P1m <= 272.39: "95-125" (12.0)
:      P1m > 272.39: "125-160" (1.0)
:      P8d <= 189.601:
:      ....rw > 2.4: "125-160" (1.0)
:      rw <= 2.4:
:      ..P8d <= 167.887: "95-125" (2.0)
:      P8d > 167.887:
:      :P6w<=143.533:"60-95"(9.0/1.0)
:      P6w > 143.533: "25-60" (2.0)
:
P6d > 154.566:
....P2d > 261.88: "95-125" (1.0)
P2d <= 261.88:
:      ....P6w > 166.63:
:      ....P1d <= 295.31: "25-60" (15.0)
:      P1d > 295.31:
:      ....P2d <= 239.01: "60-95" (3.0)
:      P2d > 239.01: "25-60" (1.0)
:      P6w <= 166.63:
:      ....P2w > 199.72: "60-95" (5.0)
:      P2w <= 199.72:
:      ....P2w > 185.81: "25-60" (3.0)
:      P2w <= 185.81:
:      ....rw <= 1: "60-95" (3.0)
:      rw > 1: "25-60" (2.0)

```

Extracted rules:

Rule 1: (cover 195)
P1m <= 203.89
-> class "25-60" [0.995]

Rule 2: (cover 120)
P2m <= 148.74
-> class "25-60" [0.992]

Rule 3: (cover 123)
P4d > 117.12
P2w <= 229.96
-> class "25-60" [0.992]

Rule 4: (cover 119)
P1d <= 325.47
P8d <= 189.601



```
P6w > 143.533
-> class "25-60" [0.967]

Rule 5: (cover 78)
P6d > 154.566
P8d <= 210.11
P2w <= 199.72
-> class "25-60" [0.950]

Rule 6: (cover 11)
P6d <= 154.566
P8w > 202
P8w <= 216.644
-> class "25-60" [0.923]

Rule 7: (cover 46)
P1d <= 325.47
P8d <= 210.11
P6w > 166.63
-> class "25-60" [0.875]

Rule 8: (cover 2)
P1d > 325.47
P6d > 186.234
P8w <= 216.644
-> class "25-60" [0.750]

Rule 9: (cover 7)
P4d <= 117.12
P1w <= 229.96
P1m > 203.89
P2m > 148.74
-> class "60-95" [0.889]

Rule 10: (cover 5)
P2d <= 261.88
P6d > 154.566
P8d <= 210.11
P1w > 229.96
P2w > 199.72
P6w <= 166.63
-> class "60-95" [0.857]

Rule 11: (cover 4)
rw <= 1
P6d > 154.566
P1w > 229.96
P2w <= 185.81
-> class "60-95" [0.833]

Rule 12: (cover 4)
P1d > 295.31
P2d <= 239.01
P6d > 154.566
P8d <= 210.11
-> class "60-95" [0.833]

Rule 13: (cover 138)
P1w > 229.96
-> class "60-95" [0.343]

Rule 14: (cover 12)
P6d <= 154.566
P8d > 189.601
P1w > 229.96
P8w <= 202
P1m <= 272.39
-> class "95-125" [0.929]
```

- Rule 15: (cover 6)
P1d <= 325.47
P8d > 210.11
P1w > 264.15
P6w <= 182.087
P8w <= 216.644
-> class "95-125" [0.875]
- Rule 16: (cover 4)
P4w > 153.06
P2m > 266.57
-> class "95-125" [0.833]
- Rule 17: (cover 2)
P8d <= 167.887
P1w > 229.96
P1w <= 371.34
-> class "95-125" [0.750]
- Rule 18: (cover 3)
P1d > 258.11
P4d <= 142.75
P6w > 160.975
P6w <= 175.301
P8w > 216.644
-> class "125-160" [0.800]
- Rule 19: (cover 1)
P6d <= 154.566
P8d > 189.601
P1w > 229.96
P1w <= 371.34
P1m > 272.39
-> class "125-160" [0.667]
- Rule 20: (cover 2)
rw <= 20.2
P1d > 325.47
P8w <= 196.337
P2m <= 240.16
-> class "160-195" [0.750]
- Rule 21: (cover 1)
P1d <= 258.11
P6w <= 175.301
P8w > 216.644
-> class "160-195" [0.667]
- Rule 22: (cover 3)
P1d > 325.47
P1w <= 371.34
P8w <= 196.337
P2m > 240.16
-> class "195-230" [0.800]
- Rule 23: (cover 4)
P1w > 423.49
P4w <= 153.06
-> class "230-265" [0.833]
- Rule 24: (cover 3)
P4d <= 142.75
P1w > 376.99
-> class "230-265" [0.800]
- Rule 25: (cover 4)
P4d > 142.75
P1w > 371.34
P1w <= 423.49

```

P4w <= 153.06
-> class "265-300" [0.833]

Rule 26: (cover 2)
P4d <= 142.75
P6w <= 160.975
P8w > 216.644
-> class "265-300" [0.750]

Rule 27: (cover 2)
P1w > 371.34
P1w <= 376.99
-> class "265-300" [0.750]

Rule 28: (cover 4)
P4d > 142.75
P4d <= 143.26
P1w <= 371.34
-> class "300-335" [0.833]

Rule 29: (cover 4)
P4d > 143.26
P6w <= 175.301
P8w > 216.644
-> class "335-380" [0.833]

```

Default class: "25-60"

Evaluation on training data (365 cases):

Decision Tree		Rules		
Size	Errors	No	Errors	
39	1(0.3%)	29	2(0.5%)	<<

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	←Classified as
											as
	253	1									(a): class "0-25"
		54									(b): class "25-60"
			24								(c): class "60-95"
	1			4							(d): class "95-125"
					3						(e): class "125-160"
						3					(f): class "160-195"
							3				(g): class "195-230"
								7			(h): class "230-265"
									7		(i): class "265-300"
										4	(j): class "300-335"
											(k): class "335-380"

Time: 0.2 secs

