



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

**Συμβολή των νευρωνικών δικτύων στη μελέτη της χρονικής  
μεταβολής της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του  
εδάφους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ευστράτιος Μαδούρογλου**

**Νικόλαος Φωτίου**

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Αθήνα, Απρίλιος 2013



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

181

**Συμβολή των νευρωνικών δικτύων στη μελέτη της χρονικής  
μεταβολής της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του  
εδάφους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ευστράτιος Μαδούρογλου**  
**Νικόλαος Φωτίου**

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Απριλίου 2013

.....  
Ι.Α. Σταθόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φ.Β. Τοπαλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γ.Ι. Τσεκούρας  
Λέκτορας Σ.Ν.Δ.

Αθήνα, Απρίλιος 2013

.....  
Ευστράτιος Μαδούρογλου

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

.....  
Νικόλαος Φωτίου

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

Copyright © Ευστράτιος Μαδούρογλου, Νικόλαος Φωτίου, 2013

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 τους συγγραφείς.

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

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	1
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ .....	1
1.1. Εισαγωγή .....	1
1.2. Ορολογία.....	1
1.3. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης .....	4
1.4. Είδη γείωσης .....	4
1.5. Συστήματα σύνδεσης γείωσης .....	6
1.6. Μέθοδοι γείωσης .....	9
1.7. Τύποι και μορφές ηλεκτροδίων γείωσης .....	10
1.7.1. Γειωτής ράβδου .....	10
1.7.2. Γειωτής ταινίας.....	11
1.7.3. Γειωτής πλάκας .....	11
1.7.4. Γειωτής ακτινικός.....	11
1.7.5. Γειωτής πλέγματος .....	11
1.7.6. Γειωτής τύπου «Ε» .....	11
1.7.7. Δίκτυο ύδρευσης.....	12
1.8. Συστήματα Γείωσης.....	12
1.8.1. Πολυγωνική διάταξη .....	12
1.8.2. Γείωση με πλάκες .....	12
1.8.3. Περιμετρική γείωση.....	12
1.8.4. Θεμελιακή Γείωση.....	13
1.8.5. Γείωση με γειωτή τύπου «Ε».....	13
1.8.6. Συνδυασμός γειώσεων.....	13
1.9. Αντίσταση γείωσης .....	13
1.10. Ειδική Αντίσταση Εδάφους .....	16
1.10.1. Τύπος εδάφους .....	18
1.10.2. Επίδραση μεγέθους κόκκων.....	18
1.10.3. Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία .....	19
1.10.4. Διαλυμένα άλατα .....	20
1.10.5. Θερμοκρασία και Πίεση .....	20
1.10.6. Επίδραση της έντασης του πεδίου (voltage gradient).....	21
1.10.7. Επίδραση της μορφής της τάσης.....	21

1.11.	Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους.....	22
1.11.1.	Η μέθοδος των δύο σημείων (Two-Point Method).....	22
1.11.2.	Η μέθοδος των τριών σημείων (Three-Point method or Variation of Depth Method) .....	23
1.11.3.	Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (Four-Point Method) .....	24
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	28
	ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΕΩΝ.....	28
2.1	Εισαγωγή .....	28
2.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τη χρήση βελτιωτικών υλικών .....	28
2.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ειδική αντίσταση του εδάφους.....	35
2.4	Σχολιασμός .....	39
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	41
	ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ .....	41
3.1	Εισαγωγή .....	41
3.2	Βιολογικά νευρωνικά δίκτυα .....	41
3.3	Ιστορική αναδρομή .....	43
3.4	Τα νευρωνικά δίκτυα και οι υπολογιστές .....	44
3.5	Μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων .....	46
3.5.1.	Μοντέλο McCulloch-Pitts .....	46
3.5.2.	Το βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα.....	47
3.5.3.	Το απλό Perceptron .....	48
3.5.4.	Γραμμικός νευρώνας κατά Wiener-Hopf .....	49
3.5.5.	Μηχανές ADALINE/MADALINE .....	51
3.5.6.	Το πολυεπίπεδο Perceptron (MLP) .....	51
3.6	Κατηγοριοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων .....	52
3.7	Εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	54
3.8	Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης.....	54
3.8.1.	Συνάρτηση ενεργοποίησης και κορεσμός .....	59
3.8.2.	Αρχικοποίηση βαρών .....	62
3.8.3.	Προσθήκη ρυθμού μάθησης.....	62
3.8.1.	Προσθήκη όρου ορμής .....	63
3.8.2.	Τρόποι εκπαίδευσης .....	64
3.8.3.	Κριτήρια τερματισμού .....	65
3.9	Παραλλαγές αλγόριθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος.....	66

3.9.1.	Προσαρμοστικός αλγόριθμος (Adaptive Back Propagation Algorithm) ..	66
3.9.2.	Ευπροσάρμοστος αλγόριθμος (Resilient algorithm) .....	67
3.9.3.	Μέθοδος συζευγμένης μεταβολής της κλίσης (Conjugate gradient algorithm).....	67
3.9.4.	Μέθοδος βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης (Scaled conjugate gradient algorithm).....	68
3.9.5.	Μέθοδος Newton.....	69
3.10	Διαστήματα Εμπιστοσύνης στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα .....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....		74
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ .....		74
4.1	Εισαγωγή .....	74
4.2	Τοποθεσία .....	74
4.3	Σύσταση εδάφους: .....	75
4.4	Θέση των ηλεκτροδίων:.....	75
4.5	Λήψη μετρήσεων .....	78
4.6	Αποτελέσματα – Επεξεργασία και αξιολόγηση.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....		87
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ .....		87
5.1	Εισαγωγή .....	87
5.2	Εκπαίδευση .....	87
5.3	Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για το 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	94
5.3.1.	Εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης.....	94
5.3.2.	Εκπαίδευση ανά εποχή .....	98
5.3.3.	Εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής 102	
5.3.4.	Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.....	106
5.3.5.	Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.....	109
5.3.6.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	113
5.4	Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	114
5.4.1.	Εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης.....	114
5.4.2.	Εκπαίδευση ανά εποχή .....	117
5.4.3.	Εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής 120	
5.4.4.	Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.....	124

5.4.5.	Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt .....	128
5.4.6.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	131
5.5	Σχολιασμός .....	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	.....	134
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ	.....	134
Βιβλιογραφία	.....	137

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 4.1: Φωτογραφία της τοποθεσίας [2] .....	74
Εικόνα 4.2: Κάτοψη τοποθεσίας [58] .....	75
Εικόνα 4.3: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε μπετονίτη και σκυρόδεμα [2].....	78
Εικόνα 4.4: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε βελτιωτικά υλικά [2] .....	78
Εικόνα 4.5: Γειωσόμετρο (Megger) [2] .....	79
Εικόνα 4.6: Θερμο-υγρόμετρο [2] .....	79
Εικόνα 4.7: Μετεωρολογικός σταθμός Ε.Μ.Π. [2] .....	80
Εικόνα 4.8: Συρρίκνωση του βελτιωτικού υλικού .....	86
Εικόνα 4.9: Οριστική απώλεια του βελτιωτικού υλικού .....	80



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Υπολογισμός αντίστασης γείωσης για διάφορους τύπους γειωτών [6].	15
Πίνακας 1.2: Ειδική αντίσταση διαφόρων τύπων εδάφους [6] [11] [13] .....	18
Πίνακας 1.3: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει της θερμοκρασίας [14].....	19
Πίνακας 2.1: Πληροφορίες ηλεκτροδίων [25] .....	32
Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα μέτρησης της αντίστασης γείωσης για τις αντίστοιχες ράβδους γείωσης, όπου Β συμβολίζεται ο μπετονίτης, C η σκόνη κοκοφοίνικα και R οι φλοιοί ρυζιού ως βελτιωτικά υλικά [28].....	34
Πίνακας 3.1: Ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των νευρωνικών δικτύων και του υπολογιστή με τη φιλοσοφία του von Neumann .....	45
Πίνακας 5.1: Αλγόριθμοι που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο .....	92
Πίνακας 5.2: Δυνατοί συνδυασμοί των συναρτήσεων ενεργοποίησης για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης .....	95
Πίνακας 5.3: Συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις εκτιμώμενες και τις πραγματικές τιμές για κάθε αλγόριθμο εκπαίδευσης για το πρώτο σενάριο .....	113
Πίνακας 5.4: Συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις εκτιμώμενες και τις πραγματικές τιμές για κάθε αλγόριθμο εκπαίδευσης για το δεύτερο σενάριο .....	132
Πίνακας Π.1: Μετρήσεις αντίστασης γείωσης( $\Omega$ ), ειδικής αντίστασης εδάφους( $\Omega m$ ), υγρασίας αέρα (%) και θερμοκρασίας ( $^{\circ}C$ ) για το χρονικό διάστημα από 17/02/11 μέχρι 28/02/13.....	143
Πίνακας Π.2: Μετρήσεις ύψους βροχόπτωσης (mm) για το χρονικό διάστημα από 17/02/2011 μέχρι 28/02/2013 .....	152
Πίνακας Π.3: Είσοδοι του νευρωνικού δικτύου (1ο σενάριο).....	1957
Πίνακας Π.4: Έξοδος νευρωνικού δικτύου για το 1ο σενάριο .....	165
Πίνακας Π.5: Είσοδος νευρωνικού δικτύου (2ο σενάριο).....	170
Πίνακας Π.6: Έξοδος νευρωνικού δικτύου (2ο σενάριο).....	176

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Βηματική τάση και τάση επαφής [6].....	3
Σχήμα 1.2: Είδη γειώσεων [6] .....	6
Σχήμα 1.3: Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TN-S: (α) Χωριστοί ουδέτερος και αγωγός προστασίας σε ολόκληρο το σύστημα , (β) Χωριστοί γειωμένος αγωγός φάσης και αγωγός προστασίας σε ολόκληρο το σύστημα [9].....	7
Σχήμα 1.4: Σύστημα σύνδεσης γειώσεων TN-C-S: Η γείωση ουδετέρου και προστασίας συνδυάζονται σε ένα μόνο αγωγό σε ένα μέρος του συστήματος [9] .....	7
Σχήμα 1.5: Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TN-C: Οι λειτουργίες ουδετέρου και προστασίας συνδυάζονται σε ένα μόνο αγωγό σε ολόκληρο το σύστημα [9].....	7
Σχήμα 1.6: Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TT: Ο ουδέτερος μπορεί (α) να διανέμεται ή (β) να μη διανέμεται [9].....	8
Σχήμα 1.7: Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων IT: Ο ουδέτερος μπορεί να (α) διανέμεται ή (β) να μη διανέμεται [9].....	8
Σχήμα 1.8: Πολυγωνική διάταξη γείωσης [62] .....	12
Σχήμα 1.9: Γείωση με πλάκες [62] .....	12
Σχήμα 1.10: Χοάνη δυναμικού ενός γειωτή [6].....	14
Σχήμα 1.11: Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους.....	17
Σχήμα 1.12: Γραφική απεικόνιση της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της υγρασίας του εδάφους [13].....	19
Σχήμα 1.13: Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας αλάτων [13].....	20
Σχήμα 1.14: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει της θερμοκρασίας [13].....	20
Σχήμα 1.15: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει περιεκτικότητας (Curve 1) αλάτων, (Curve 2) υγρασίας και (Curve 3) θερμοκρασίας [13] .....	21
Σχήμα 1.16: Διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο των δύο σημείων [15].....	22
Σχήμα 1.17: Διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο των τριών σημείων [16].....	24
Σχήμα 1.18: Διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων [16].....	25
Σχήμα 1.19: Υπολογισμός ειδικής αντίστασης εδάφους με διάταξη Wenner [16] .....	26
Σχήμα 1.20: Παράδειγμα μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους, στο οποίο παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις στην τιμή της ειδικής αντίστασης ανάλογα με το βάθος. Συμπεραίνεται επομένως, ότι το έδαφος σε αυτή την περίπτωση είναι πολυστρωματικό .....	26
Σχήμα 1.21: Υπολογισμός ειδικής αντίστασης εδάφους με τη διάταξη Schlumberger-Palmer [16].....	27
Σχήμα 2.1: Πειραματικές διατάξεις για τη χρήση (α) συμπαγούς και (β) διάτρητου σωλήνα [20] .....	30
Σχήμα 2.2: Ράβδος γείωσης καλυμμένη πλήρως με το βελτιωτικό υλικό [23] .....	30
Σχήμα 2.3: Αποτελέσματα μετρήσεων [25].....	31
Σχήμα 2.4: Ειδική αντίσταση συναρτήσει του βάθους των ηλεκτροδίων σε (α) κανονικές συνθήκες (β) συνθήκες ψύχους και (γ) συνθήκες ψύχους και μόλυνσης από πετρέλαιο [1].....	36

Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού νευρώνα [46] .....	42
Σχήμα 3.2: Μοντέλο νευρώνα McCulloch-Pitts [47] .....	46
Σχήμα 3.3: Βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα [47].....	47
Σχήμα 3.4: Το βασικό μοντέλο του νευρώνα με το κατώφλι ή την πόλωση συμπεριλαμβανόμενα στο σύνολο των κανονικών εισόδων [47].....	48
Σχήμα 3.5: Μοντέλο απλού Perceptron με την πόλωση συμπεριλαμβανόμενη στο σύνολο των κανονικών εισόδων [47] .....	49
Σχήμα 3.6: Γραμμικός νευρώνας κατά Wiener-Hopf [47] .....	50
Σχήμα 3.7: Τοπολογία (α) ADALINE και (β) MADALINE [47] .....	51
Σχήμα 3.8: Πολυεπίπεδο Perceptron με δύο κρυμμένα επίπεδα [47].....	51
Σχήμα 3.9: Δομή επιβλεπόμενης μάθησης [47].....	53
Σχήμα 3.10: Συναρτήσεις ενεργοποίησης.....	61
Σχήμα 3.11: Συμπεριφορά αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος για διάφορες τιμές του ρυθμού μάθησης [48] .....	63
Σχήμα 4.1: Ηλεκτρόδιο γείωσης [60] .....	76
Σχήμα 4.2: Κάτοψη ηλεκτροδίου γείωσης [60].....	76
Σχήμα 4.3: Κάτοψη τοποθεσίας και διάταξης ηλεκτροδίων για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους [2] .....	77
Σχήμα 4.4: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους και της βροχόπτωσης με το χρόνο για αποστάσεις $a = 2, 4, 8, 12, 16$ m .....	82
Σχήμα 4.5: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους και της βροχόπτωσης με το χρόνο για αποστάσεις $a = 4$ και $12$ m .....	83
Σχήμα 4.6: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του G1 και της βροχόπτωσης με το χρόνο .....	84
Σχήμα 4.7: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης των G2,G3,G4,G5,G6 και της βροχόπτωσης με το χρόνο [60].....	84
Σχήμα 4.8: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του G6 και της βροχόπτωσης με το χρόνο .....	84
Σχήμα 4.9: Συντελεστής απόδοσης των βελτιωτικών υλικών .....	84
Σχήμα 5.1: Τιμές της ειδικής αντίστασης εδάφους κατά την περίοδο των μετρήσεων	89
Σχήμα 5.2: Αντίσταση γείωσης για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια του εδάφους κατά την περίοδο των μετρήσεων.....	90
Σχήμα 5.3: Ύψος βροχόπτωσης κατά την περίοδο των μετρήσεων .....	91
Σχήμα 5.4: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το πλήθος των νευρώνων για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης .....	94
Σχήμα 5.5: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης .....	95
Σχήμα 5.6-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).....	96

Σχήμα 5.6-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).....	96
Σχήμα 5.6-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).....	97
Σχήμα 5.6-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).....	97
Σχήμα 5.6-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).....	97
Σχήμα 5.6-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).....	98
Σχήμα 5.7: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή .....	98
Σχήμα 5.8: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε) το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή .....	99
Σχήμα 5.9-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο) .....	100
Σχήμα 5.9-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο) .....	100
Σχήμα 5.9-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο) .....	100
Σχήμα 5.9-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).....	101
Σχήμα 5.9-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο) .....	101
Σχήμα 5.9-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο) .....	101
Σχήμα 5.10: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής .....	102
Σχήμα 5.11: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον όρο ορμής και το ρυθμό μάθησης για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής .....	103
Σχήμα 5.12: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής .....	103
Σχήμα 5.13-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).....	104

Σχήμα 5.13-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).....	104
Σχήμα 5.13-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).....	104
Σχήμα 5.13-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).....	105
Σχήμα 5.13-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).....	105
Σχήμα 5.13-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).....	105
Σχήμα 5.14: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton	106
Σχήμα 5.15: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.....	107
Σχήμα 5.16-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	107
Σχήμα 5.16-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	108
Σχήμα 5.16-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	108
Σχήμα 5.16-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	108
Σχήμα 5.16-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	109
Σχήμα 5.16-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	109
Σχήμα 5.17: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.....	110
Σχήμα 5.18: Μεταβολή σφάλματος του συνόλου εκπαίδευσης (μπλε), του συνόλου αξιολόγησης (πράσινο) και του συνόλου ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt .....	110

Σχήμα 5.19-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1 <sup>ο</sup> σενάριο) .....	111
Σχήμα 5.19-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	111
Σχήμα 5.19-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1 <sup>ο</sup> σενάριο).....	111
Σχήμα 5.19-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1 <sup>ο</sup> σενάριο) .....	112
Σχήμα 5.19-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1 <sup>ο</sup> σενάριο) .....	112
Σχήμα 5.19-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1 <sup>ο</sup> σενάριο) .....	112
Σχήμα 5.20: Γραφική απεικόνιση των συντελεστών συσχέτισης για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια για όλους τους αλγόριθμους .....	113
Σχήμα 5.21: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης .....	114
Σχήμα 5.22-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).....	115
Σχήμα 5.22-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).....	115
Σχήμα 5.22-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).....	115
Σχήμα 5.22-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).....	116
Σχήμα 5.22-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).....	116
Σχήμα 5.22-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).....	116
Σχήμα 5.23: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το πλήθος των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή.....	117

Σχήμα 5.24: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή .....	118
Σχήμα 5.25-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο) .....	118
Σχήμα 5.25-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο) .....	119
Σχήμα 5.25-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο) .....	119
Σχήμα 5.25-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο) .....	119
Σχήμα 5.25-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο) .....	120
Σχήμα 5.25-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο) .....	120
Σχήμα 5.26: Μέση τιμή τετραγωνικού σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το πλήθος των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής .....	121
Σχήμα 5.27: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το ρυθμό μάθησης και τον όρο ορμής για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής .....	121
Σχήμα 5.28: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής .....	122
Σχήμα 5.29-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο) .....	122
Σχήμα 5.29-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο) .....	123
Σχήμα 5.29-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο) .....	123
Σχήμα 5.29-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο) .....	123
Σχήμα 5.29-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο) .....	124
Σχήμα 5.29-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο) .....	124
Σχήμα 5.30: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton	125

Σχήμα 5.31: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.....	125
Σχήμα 5.32-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	126
Σχήμα 5.32-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	126
Σχήμα 5.32-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	126
Σχήμα 5.32-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	127
Σχήμα 5.32-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	127
Σχήμα 5.32-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	127
Σχήμα 5.33: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.....	128
Σχήμα 5.34: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.....	129
Σχήμα 5.35-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	129
Σχήμα 5.35-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	130
Σχήμα 5.35-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	130
Σχήμα 5.35-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	130
Σχήμα 5.35-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2 <sup>ο</sup> σενάριο).....	131



Σχήμα 5.35-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2 <sup>ο</sup> σενάριο) .....	131
Σχήμα 5.36: Γραφική απεικόνιση των συντελεστών συσχέτισης για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια για όλους τους αλγορίθμους για το δεύτερο σενάριο .....	132

## Περίληψη

Τα βελτιωτικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα γείωσης, με σκοπό τη διατήρηση της αντίστασης του εδάφους σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, η απόδοσή τους εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων, όπως οι καιρικές συνθήκες. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξήχθησαν μετρήσεις της αντίστασης γείωσης έξι ηλεκτροδίων τοποθετημένα σε χωμάτινο έδαφος. Το ένα από αυτά τα ηλεκτρόδια τοποθετείται απευθείας στο έδαφος (ηλεκτρόδιο αναφοράς), ενώ στα άλλα πέντε έχουν τοποθετηθεί βελτιωτικά υλικά. Με βάση τις μετρήσεις αυτές μελετάται η συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών σε συνάρτηση με το ύψος βροχόπτωσης. Επίσης, οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να εκπαιδευτεί ένα νευρωνικό δίκτυο με σκοπό την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης και κατ' επέκταση της απόδοσης των βελτιωτικών υλικών. Το νευρωνικό δίκτυο έχει εκπαιδευτεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό “Matlab” με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος και όλες τις παραλλαγές του. Από τους αλγόριθμους αυτούς παρουσιάζονται πέντε αλγόριθμοι, που είχαν πολύ καλή απόδοση. Επίσης, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια εκπαίδευσης για κάθε αλγόριθμο. Κατά την εφαρμογή του ενός σεναρίου επιχειρήθηκε η προσομοίωση του εδάφους μέσω του προγράμματος CYMgrid με ένα διστρωματικό τύπο εδάφους. Στο τέλος της εργασίας αυτής παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του νευρωνικού δικτύου σε σύγκριση με τις τιμές, που μετρήθηκαν και γίνεται μία αξιολόγηση των αλγορίθμων εκπαίδευσης και κατά πόσο εξάγονται ακριβείς τιμές.

## Λέξεις κλειδιά

Αντίσταση γείωσης, Ειδική αντίσταση εδάφους, Βελτιωτικά υλικά γείωσης, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, Αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος

## **Abstract**

Ground enhancing compounds are widely used in grounding systems, in order to keep the grounding resistance down. However, their efficiency depends on some factors such as the weather conditions. In this diploma thesis measurements of the grounding resistance of six grounding electrodes in soil ground have been conducted. One of them is straight to the ground (reference electrode), whereas the other five are in various enhancing compounds. Based on these measurements, the efficiency of the enhancing compounds according to rainfall height is studied. In addition, these measurements were used to train an Artificial Neural Network (ANN), so that the grounding resistance and consequently the efficiency of the enhancing compounds could be estimated. The neural network has been trained by using “Matlab” software with the back propagation error algorithm and all its variations. Five of these algorithms, which had a very good performance, are presented. In addition, two different training scenarios for each algorithm were implemented. During the implementation of one of the scenarios, the ground was simulated by a two layer ground by using the CYMgrid software. At the end of this thesis the results of the ANN are presented in comparison with the measurements and the training algorithms are evaluated, if they can produce accurate results.

## **Key Words**

Grounding resistance, Ground resistivity, Grounding enhancing compounds, Artificial Neural Networks (ANN), Back propagation error algorithm

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τους φοιτητές Ευστράτιο Μαδούρογλου και Νικόλαο Φωτίου για την απόκτηση του διπλώματος Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της αντίστασης γείωσης του εδάφους και της απόδοσης βελτιωτικών υλικών ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Παράλληλα κατασκευάστηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, το οποίο ύστερα από κατάλληλη εκπαίδευση εκτιμά τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης για το έδαφος και τα βελτιωτικά υλικά. Για την περάτωση της εργασίας αυτής τα καθήκοντα μοιράστηκαν στους δύο φοιτητές. Αφενός ο Ν. Φωτίου ανέλαβε τη διεξαγωγή όλων των μετρήσεων από τον Απρίλιο του 2012 μέχρι και την ημέρα πριν την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας. Συνεπώς, έχει πραγματοποιηθεί από τον ίδιο και η μελέτη των μετρήσεων και εξαγωγή των αντίστοιχων συμπερασμάτων. Αφετέρου ο Ε. Μαδούρογλου ανέλαβε την κατασκευή και εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab και επομένως τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του νευρωνικού δικτύου με τις μετρήσεις.

Στη συνέχεια παρατίθεται μία συνοπτική περιγραφή του περιεχομένου του κάθε κεφαλαίου.

Στο **Κεφάλαιο 1** δίνεται η ορολογία, που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί η κατανόηση του κειμένου. Μεταξύ άλλων ορίζεται η γείωση, το σύστημα γείωσης, η αντίσταση γείωσης και άλλοι όροι, που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή. Έπειτα, αφού παρουσιάζονται τα διάφορα είδη γειωτών και συστημάτων γείωσης, μελετάται η ειδική αντίσταση του εδάφους και οι παράγοντες, οι οποίοι την επηρεάζουν. Τέλος, παρατίθενται οι σημαντικότεροι τρόποι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης.

Το **Κεφάλαιο 2** επικεντρώνεται στα βελτιωτικά υλικά του εδάφους, παρουσιάζοντας μία βιβλιογραφική ανασκόπηση και από τους δύο φοιτητές. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αφορά αρχικά στη χρήση των βελτιωτικών υλικών, παρουσιάζοντας διάφορες μελέτες και δημοσιεύσεις, που έχουν γίνει σχετικά με αυτό το θέμα. Έπειτα, η ανασκόπηση αφορά σε δημοσιεύσεις, που σχετίζονται με μελέτες μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης.

Το **Κεφάλαιο 3** ολοκληρώνει το κομμάτι της θεωρίας, παρουσιάζοντας τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) σε θεωρητικό επίπεδο. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ΤΝΔ ξεκινώντας από το πιο απλό μοντέλο ΤΝΔ. Έπειτα παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης των ΤΝΔ δίνοντας βάση στον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος και στις παραλλαγές του, τα οποία εφαρμόζονται στο τελευταίο κεφάλαιο.

Το **Κεφάλαιο 4** αποτελεί το πρώτο μέρος της παρουσίασης των αποτελεσμάτων από το Ν. Φωτίου. Παρουσιάζεται η τοπολογία της διάταξης, τα όργανα, που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η διαδικασία λήψης των μετρήσεων. Τέλος,

παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο και το ύψος της βροχόπτωσης.

Το **Κεφάλαιο 5** αποτελεί το δεύτερο μέρος της παρουσίασης των αποτελεσμάτων από τον Ε. Μαδούρογλου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης των ΤΝΔ. Παρουσιάζεται η διαδικασία καθορισμού όλων των παραμέτρων του νευρωνικού δικτύου, καθώς και η απόκρισή του για κάθε ηλεκτρόδιο. Τέλος, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε σενάριο και ένας σχολιασμός, ώστε να αναδειχθούν οι αλγόριθμοι με τα ακριβέστερα αποτελέσματα.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται ένας γενικός σχολιασμός όλης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και οι δυνατότητες αξιοποίησης των αποτελεσμάτων στο μέλλον.

Τέλος, στο **Παράρτημα** παρατίθενται όλες οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της αντίστασης γείωσης, της θερμοκρασίας και του ύψους της βροχόπτωσης, που έχουν ληφθεί μέχρι και την ημέρα της παρουσίασης. Επίσης παρατίθενται όλες οι είσοδοι του νευρωνικού δικτύου για τα δύο σενάρια, καθώς και ο κώδικας που φτιάχτηκε για την εκπαίδευσή τους.

Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την αμέριστη συμπαράστασή του.

Τον κ. Βασίλειο Π. Ανδροβιτσανέα, υποψήφιο διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για το άριστο κλίμα συνεργασίας που διατήρησε και την πολύτιμη καθοδήγησή του. Χωρίς τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και τις συμβουλές του η εργασία αυτή θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να πραγματοποιηθεί.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις χρήσιμες συμβουλές του και την πολύτιμη βοήθειά του στις δυσκολίες που παρουσιάζονταν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Γεώργιο Ι. Τσεκούρα, Λέκτορα της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων, για τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και τις χρήσιμες συμβουλές του. Η βοήθειά του ιδιαίτερα στην εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και οι συμβουλές του ήταν ιδιαίτερα καταλυτικές.

Τον κ. Αριστείδη Γιάννακα, τεχνικό του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, για την πρακτική βοήθεια στη διεξαγωγή των μετρήσεων που προσέφερε καθώς και όλο το προσωπικό του εργαστηρίου για τη βοήθειά τους στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μας εργασίας.

Τέλος θα ήταν σημαντική παράλειψη αν δεν ευχαριστούσαμε ιδιαίτερα τις οικογένειές μας και τους φίλους μας για τη συμπαράστασή τους στην εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

### 1.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται ο ορισμός της γείωσης, καθώς και όλοι οι χρήσιμοι ορισμοί για την κατανόηση του κειμένου. Επίσης, παρουσιάζονται τα είδη της γείωσης, τα συστήματα γείωσης, καθώς και η αντίσταση γείωσης. Στη συνέχεια μελετάται η ειδική αντίσταση του εδάφους και οι παράγοντες που την επηρεάζουν και τέλος παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

### 1.2. Ορολογία

*Η Γείωση* είναι η αγωγήμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, ενός σημείου ηλεκτρικού κυκλώματος ή συσκευής με τη γη ή με ένα αγωγίμο σώμα τέτοιο ώστε να μπορεί να θεωρηθεί γη. Κατά σύμβαση, το δυναμικό της γης θεωρείται μηδέν και έτσι η γείωση καθορίζει ένα δυναμικό αναφοράς [3].

*Διάταξη/Σύστημα γείωσης (Grounding system)*: Το σύστημα που περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής. Το ηλεκτρόδιο γείωσης, ο αγωγός γείωσης και ο κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης αποτελούν τα βασικά στοιχεία μίας διάταξης γείωσης [4].

*Ηλεκτρόδιο γείωσης (Ground electrode) ή γειωτής*: Το τοποθετημένο μέσα στο έδαφος ηλεκτρόδιο μέσω του οποίου γίνεται συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη γη [4].

*Αγωγός γείωσης* είναι ο αγωγός που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με έναν ακροδέκτη ή ζυγό γείωσης [4].

*Κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης* είναι ένας ακροδέκτης ή ζυγός στον οποίο συνδέονται οι αγωγοί γείωσης, οι αγωγοί προστασίας και, αν υπάρχουν, οι αγωγοί της γείωσης λειτουργίας [4].

*Αντίσταση γείωσης*: Για μία συγκεκριμένη εκφόρτιση ρεύματος η αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και της άπειρης γης προς την εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή  $R=U/I$ . Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι επομένως μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [5].

Εξαρτάται από την ειδική αντίσταση  $\rho$  του εδάφους όπου είναι εγκατεστημένη η γείωση, την επιφάνεια  $A$ , που η γείωση καταλαμβάνει, καθώς και το βάθος  $h$  όπου είναι τοποθετημένη. Ένα καλό σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση με στόχο τη μείωση του μέγιστου δυναμικού γείωσης. Συνήθεις τιμές για

μεγάλους υποσταθμούς είναι μικρότερες του  $1\Omega$  και για υποσταθμούς διανομής από  $1$  έως  $5\Omega$ .

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

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

Ως  $Z$  ορίζεται η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γείωσης, όπως αυτή φαίνεται από τον αγωγό που διοχετεύει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Η σύνθετη αντίσταση  $Z$  συνίσταται από τις αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις των αγωγών που αποτελούν τη γείωση και την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περικλείει το δίκτυο γείωσης. Σε χαμηλές συχνότητες και για δίκτυα γείωσης που είναι σχετικά μικρού μεγέθους, η αντίσταση του όγκου του εδάφους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αγωγών του δικτύου. Σ' αυτήν την περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση των αγωγών μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό του  $Z$  [4].

Ρεύμα γης (Ground current): Το ρεύμα που ρέει από ή προς τη γη ή το ισοδύναμο γης.

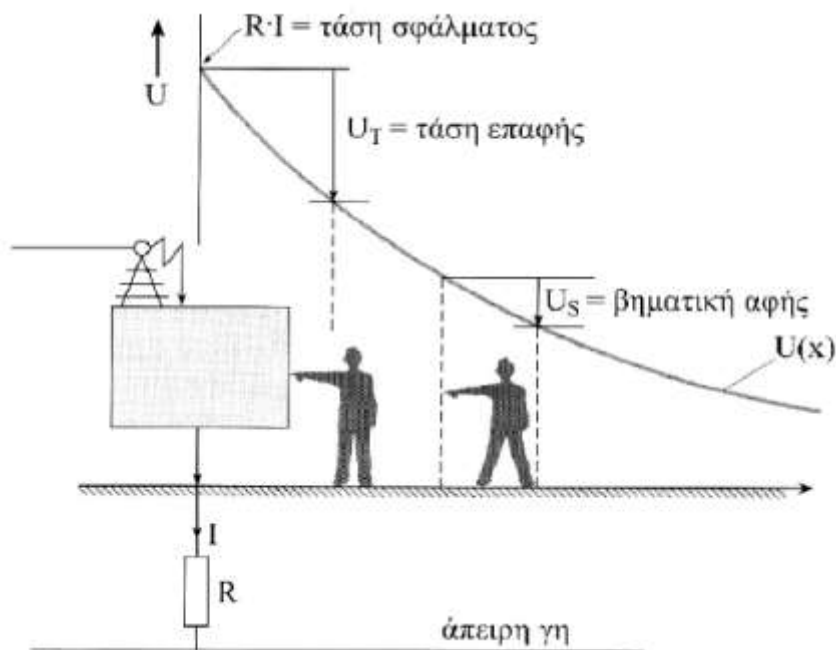
Αγωγός προστασίας (PE): Χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μέτρων προστασίας και προορίζεται για την ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών, που περιλαμβάνονται σε μια εγκατάσταση, με σημεία όπως: τον κύριο ακροδέκτη γείωσης, ξένα αγωγίμα στοιχεία, το ηλεκτροδίο γείωσης, το γειωμένο σημείο της πηγής τροφοδοσίας ή ένα γειωμένο τεχνητό ουδέτερο κόμβο [4].

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

Τάση επαφής (Touch voltage): Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφάνειας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή. Στο σχήμα (1.1) το άτομο στα αριστερά χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της τάσης επαφής. Η διαφορά δυναμικού  $U_T$  που «βλέπει» το σώμα είναι το αποτέλεσμα επαφής ενός χεριού με τα δύο πόδια. Το υψηλότερο δυναμικό προκύπτει, όταν υπάρχει μια μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού δυναμικού και το άτομο στέκεται σε απόσταση  $1m$  ακουμπώντας σ' αυτήν τη δομή. Ο κίνδυνος από αυτόν τον τύπο της επαφής είναι μεγαλύτερος από τον κίνδυνο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, διότι η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος του σώματος και δύναται να επηρεάσει τους μύες της καρδιάς [4].

Βηματική τάση (Step voltage): 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. Στο σχήμα (1.1) το άτομο στα δεξιά χρησιμοποιείται για την επεξήγηση της βηματικής τάσης. Η

διαφορά δυναμικού  $U_S$  που «βλέπει» το σώμα περιορίζεται από την τομή ανάμεσα στα δύο σημεία της γης, που απέχουν μεταξύ τους  $1m$ . Εφόσον το δυναμικό στη γη είναι μεγαλύτερο στην περιοχή που γειτνιάζει με το ηλεκτρόδιο, συνεπάγεται ότι το μέγιστο βηματικό δυναμικό, υπό συνθήκες σφάλματος προς γη, θα προκύπτει όταν το άτομο έχει ένα πόδι στην περιοχή της μέγιστης δυναμικής ανύψωσης και το άλλο πόδι κατά ένα βήμα απομακρυσμένο από το μέγιστο δυναμικό [4].



Σχήμα 1.1: Βηματική τάση και τάση επαφής [6].

Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage): Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που περικλείονται στην τοποθεσία του υποσταθμού που μπορεί να γεφυρωθεί με άμεση επαφή χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι. Η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο πλέγμα γείωσης, θεωρείται ότι είναι αμελητέα σε συμβατικούς υποσταθμούς. Ωστόσο, η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο μεταλλικό πλέγμα και σε μεταλλικά αντικείμενα που υπάρχουν στην τοποθεσία του υποσταθμού, όπως ένας μονωμένος φράκτης, αλλά μη συνδεδεμένα στο πλέγμα γείωσης, μπορεί να είναι ουσιαστική. Σε έναν τυπικό υποσταθμό, η χειρότερη τάση επαφής συνήθως είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε ένα χέρι και τα πόδια ενός ατόμου, όταν αυτά απέχουν τη μέγιστη δυνατή απόσταση [4].

Υλικό επιφανείας (surface material): Είναι ένα υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και αποτελείται από πέτρα, χαλίκι, άσφαλτο ή τεχνητά υλικά. Το υλικό επιφανείας, ανάλογα με την ειδική αντίστασή του, μπορεί να επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα για την τάση επαφής και τη βηματική τάση που αφορούν τα πόδια του ανθρώπου [4].



Ενεργό μήκος (effective length): Το μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή του δε συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η τιμή του ενεργού μήκους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού, μειώνεται δε τόσο περισσότερο όσο μικρότερο είναι το μέτωπο της κυματομορφής. Το ενεργό μήκος ενός αγωγού δίνεται από την ακόλουθη σχέση [7]:

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

Όπου:  $\rho$  η ειδική αντίσταση του εδάφους σε  $\Omega m$

$T$  ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής σε  $\mu s$

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

### 1.3. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης

Ένα σύστημα γείωσης παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη και σκοπός του είναι [8]:

- Η προστασία του ανθρώπου από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής,
- Η προστασία της κατασκευής και του εξοπλισμού από κεραυνοπληξίες ή ρεύματα σφαλμάτων,
- Η μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, η εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και ο περιορισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

### 1.4. Είδη γείωσης

Υπάρχουν τριών ειδών γειώσεις ανάλογα με τη χρήση τους.

Γείωση λειτουργίας είναι η γείωση ενός σημείου ενός ενεργού κυκλώματος, π.χ. η γείωση του ουδετέρου ενός ΜΣ και η γείωση του ουδετέρου αγωγού του συστήματος. Η γραμμή γείωσης μπορεί γενικά να έχει αυτεπαγωγές ή αντιστάσεις στα δίκτυα IT<sup>1</sup> ή να είναι ένας συνεχής αγωγός στα δίκτυα TN<sup>1</sup>. Η γείωση

<sup>1</sup> Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ HD384 [9] ο κώδικας, που χρησιμοποιείται για τα συστήματα σύνδεσης των γειώσεων είναι ο ακόλουθος:

Το πρώτο γράμμα αφορά τη σχέση του συστήματος τροφοδότησης με τη Γη,

T = άμεση σύνδεση του ουδετέρου με τη γη

I = όλα τα ενεργά μέρη απομονωμένα από τη γη ή ένα σημείο συνδεδεμένο με τη γη μέσω μιας σύνθετης αντίστασης σημαντικής τιμής.

Το δεύτερο γράμμα αφορά στη σχέση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών της εγκατάστασης προς τη γη:

T = άμεση ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών με τη γη, ανεξάρτητα από τη γείωση του ουδετέρου του συστήματος τροφοδότησης.

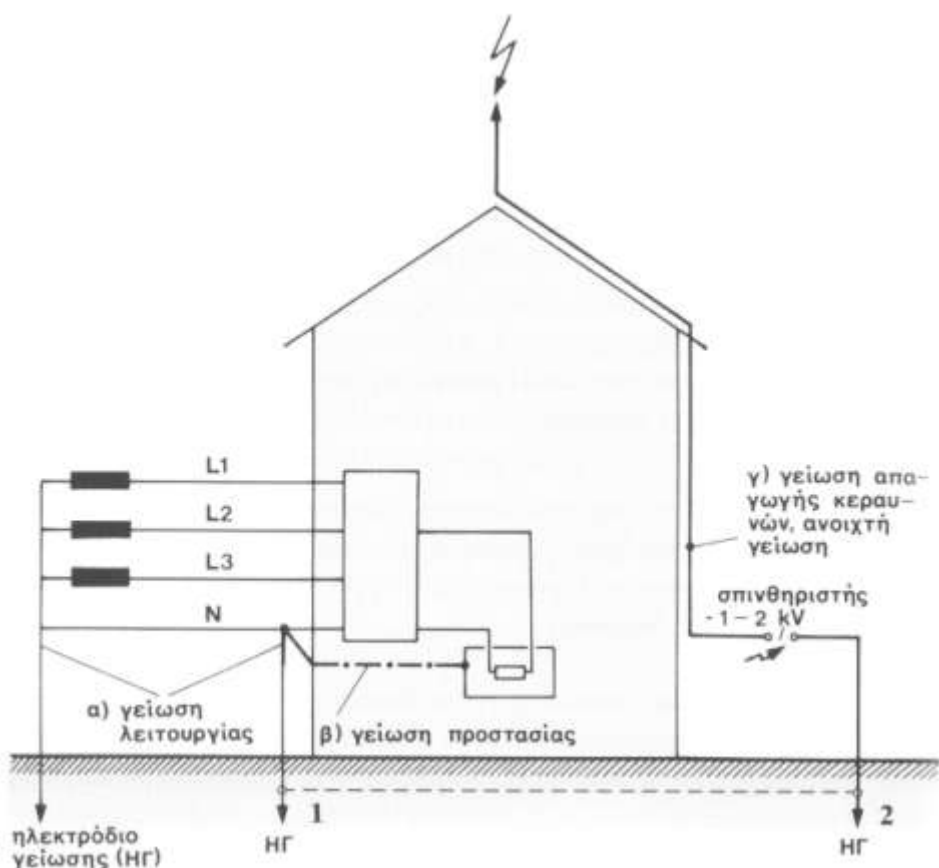
N = άμεση ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών με τον ουδέτερο του συστήματος τροφοδότησης.

λειτουργίας διακρίνεται σε: άμεση, αν δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης και έμμεση, αν εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις. Τέλος, η γείωση χαρακτηρίζεται ανοιχτή, όταν στη γραμμή γείωσης έχουν παρεμβληθεί διάκενα σπινθηριστών ή ασφάλειες διασπάσεως, ωστόσο οι ανοιχτές γειώσεις δε θεωρούνται γειώσεις λειτουργίας.

Γείωση προστασίας είναι η γείωση ενός μεταλλικού μέρους που δεν είναι στοιχείο ενεργού κυκλώματος π.χ. η γείωση του κελύφους μιας ηλεκτρικής συσκευής. Η γείωση προστασίας μειώνει τις τάσεις επαφής εξασφαλίζοντας την προστασία των ανθρώπων, που ενδέχεται να έρθουν σε επαφή με τη συσκευή αυτή. Είναι επίσης πάντα συνεχής, δηλαδή δεν παρεμβάλλονται αντιστάσεις ή διάκενα. Παράδειγμα είναι επίσης οι γειώσεις των μεταλλικών μερών ενός υποσταθμού μέσης τάσης. Τέτοιου είδους γείωση εφαρμόζεται υποχρεωτικά σε κάθε εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την προστασία των ανθρώπων από την ανάπτυξη επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών, τα οποία σε κανονική λειτουργία δεν είναι υπό τάση. Τα υλικά κατασκευής της επιβάλλεται να εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια και συνεχή λειτουργία της, τη διέλευση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ή διαρροών προς τη γη, την αντοχή της σε φαινόμενα διάβρωσης και σε μηχανικές καταπονήσεις. Μια διάταξη γείωσης προστασίας ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση αντικεραυνικής προστασίας, όταν βέβαια πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 62305-3. Η γείωση προστασίας γίνεται είτε με άμεση γείωση (απευθείας αγωγή συνδεση στο σύστημα γείωσης), είτε με ουδετέρωση (αγωγή συνδεση με ουδέτερο αγωγό).

Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοιχτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη και χρησιμεύουν στην ασφάλεια των ευρισκόμενων στο περιβάλλον που έχει κατασκευαστεί. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής ανάγκης και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.

Συνήθως στις εγκαταστάσεις συνυπάρχουν και τα τρία είδη γειώσεων. Μπορεί τα δίκτυα γειώσεων, που χρησιμοποιούνται, να είναι ταυτόσημα, δηλαδή κοινά και για τους τρεις τύπους γειώσεων.



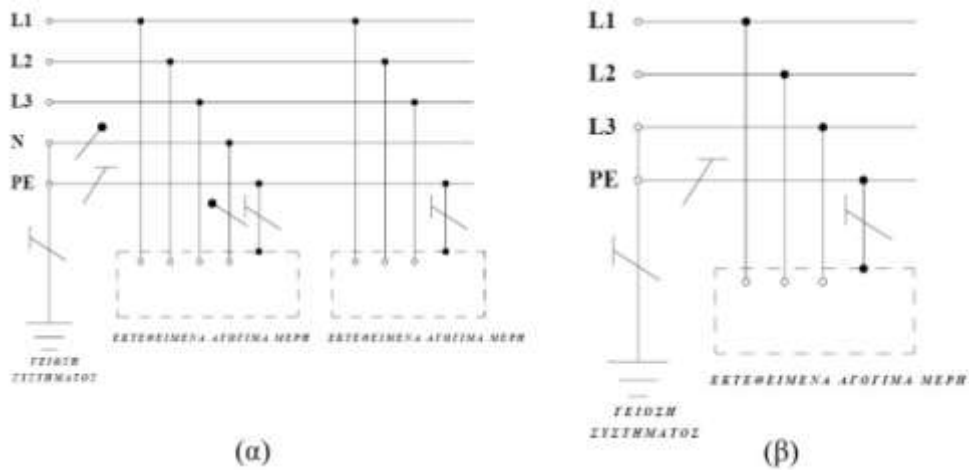
Σχήμα 1.2: Είδη γειώσεων [6].

### 1.5. Συστήματα σύνδεσης γείωσης

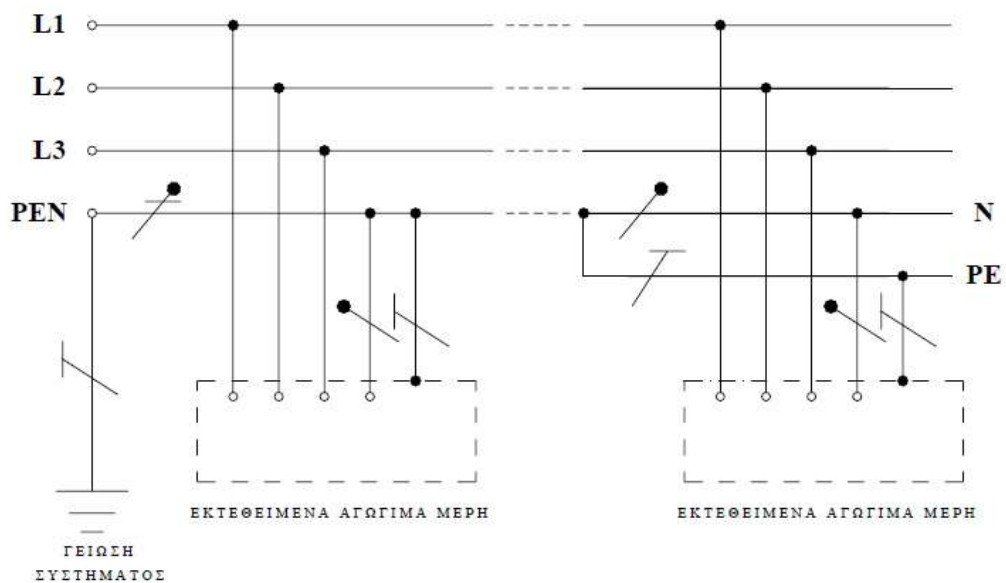
Τα συστήματα σύνδεσης των γειώσεων που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 (Έκδοση 2<sup>η</sup>) είναι τα παρακάτω:

- Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TN

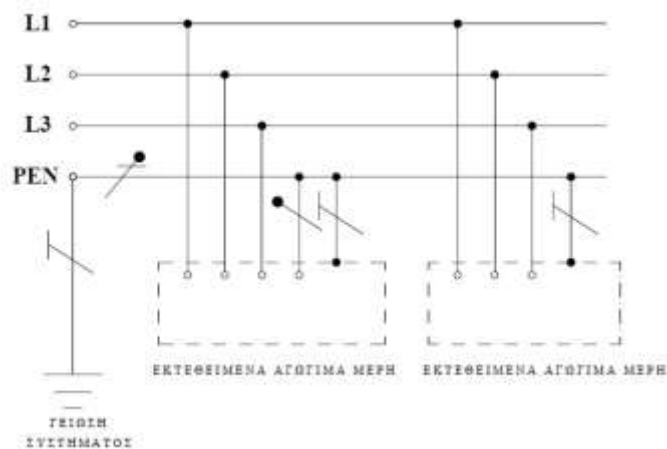
Τα συστήματα τροφοδότησης, στα οποία εφαρμόζεται το σύστημα αυτό, έχουν τον ουδέτερο άμεσα γειωμένο (χωρίς να παρεμβάλλεται σκόπιμα κάποια αντίσταση), ενώ τα εκτεθειμένα αγωγιμα μέρη της εγκατάστασης συνδέονται με τον ουδέτερο μέσω αγωγών προστασίας. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τη σχέση του ουδετέρου και του αγωγού προστασίας ως εξής: *Σύστημα TN-S*, στο οποίο ο ουδέτερος και αγωγός προστασίας είναι χωριστοί σε ολόκληρο το σύστημα, *Σύστημα TN-C-S*, στο οποίο οι λειτουργίες ουδετέρου και αγωγού προστασίας συνδυάζονται σε ένα μόνο αγωγό σε ένα μέρος του συστήματος και σε *Σύστημα TN-C*, στο οποίο οι λειτουργίες ουδετέρου και αγωγού προστασίας συνδυάζονται σε ένα μόνο αγωγό σε ολόκληρο το σύστημα.



Σχήμα 1.3: Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TN-S: (α) Χωριστοί ουδέτερος και αγωγός προστασίας σε ολόκληρο το σύστημα , (β) Χωριστοί γειωμένος αγωγός φάσης και αγωγός προστασίας σε ολόκληρο το σύστημα [9].



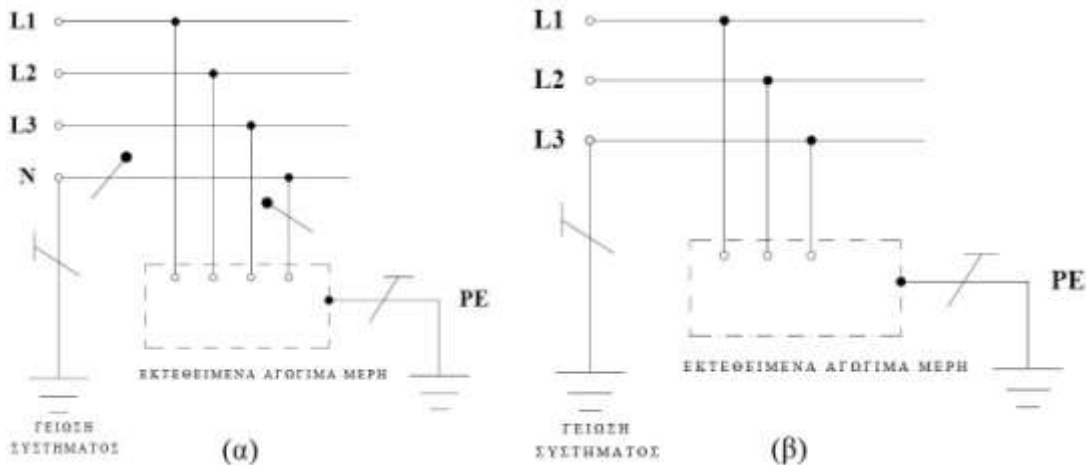
Σχήμα 1.4: Σύστημα σύνδεσης γειώσεων TN-C-S: Η γείωση ουδετέρου και προστασίας συνδυάζονται σε ένα μόνο αγωγό σε ένα μέρος του συστήματος [9].



Σχήμα 1.5: Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TN-C: Οι λειτουργίες ουδετέρου και προστασίας συνδυάζονται σε ένα μόνο αγωγό σε ολόκληρο το σύστημα [9].

- Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TT

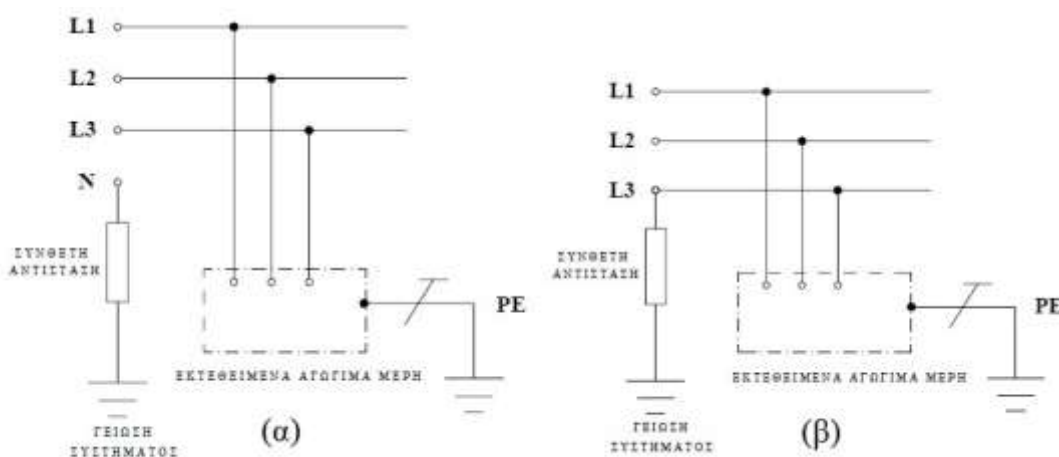
Τα συστήματα τροφοδότησης, στα οποία εφαρμόζεται η εν λόγω συνδεσμολογία γείωσης, έχουν τον ουδέτερο άμεσα συνδεδεμένο προς τη γη, ενώ τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη της εγκατάστασης συνδέονται με ηλεκτρόδια γείωσης ηλεκτρικά ανεξάρτητα από τη γείωση του συστήματος τροφοδότησης.



**Σχήμα 1.6:** Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TT: Ο ουδέτερος μπορεί (α) να διανέμεται ή (β) να μη διανέμεται [9].

- Συστήματα σύνδεσης των γειώσεων IT

Στα συστήματα αυτού του τύπου όλα τα ενεργά μέρη είναι μονωμένα προς τη γη, ή ένα σημείο συνδέεται με τη γη μέσω μιας σύνθετης αντίστασης μεγάλης τιμής, ενώ τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη της εγκατάστασης είναι γειωμένα. Αν γειώνεται ένα σημείο του συστήματος τροφοδότησης, αυτό μπορεί να είναι είτε ο ουδέτερος, είτε μία φάση, είτε ένας τεχνητός ουδέτερος.



**Σχήμα 1.7:** Σύστημα σύνδεσης των γειώσεων IT: Ο ουδέτερος μπορεί να (α) διανέμεται ή (β) να μη διανέμεται [9].

Για τα παραπάνω συστήματα σύνδεσης γειώσεων αναφέρεται, ότι σε περίπτωση σφάλματος της μόνωσης μεταξύ μιας φάσης και ενός εκτεθειμένου αγωγίμου μέρους ή του αγωγού προστασίας για συστήματα με συνδεσμολογία TN, ο βρόχος σφάλματος αποτελείται αποκλειστικά από αγωγούς. Έτσι κάθε ρεύμα σφάλματος μεταξύ φάσης και ενός εκτεθειμένου αγωγίμου μέρους ή ενός αγωγού προστασίας γίνεται ρεύμα στερεού βραχυκυκλώματος μεταξύ φάσης και ουδετέρου. Αντίθετα, όταν υπάρχει συνδεσμολογία TT, ο βρόχος σφάλματος εκτός από τους αγωγούς περιλαμβάνει και ένα μέρος διαδρομής εντός της γης. Επειδή παρεμβάλλονται οι αντιστάσεις γείωσης το ρεύμα σφάλματος μεταξύ φάσης και εκτεθειμένων αγωγίμων μερών είναι μικρότερο από το ρεύμα ενός στερεού βραχυκυκλώματος, αλλά μπορεί να έχει τέτοια τιμή, ώστε να είναι δυνατή η εμφάνιση επικίνδυνων τάσεων επαφής. Τέλος, στη συνδεσμολογία IT το ρεύμα σφάλματος κυκλοφορεί μέσω των χωρητικοτήτων των αγωγών του συστήματος τροφοδότησης και της εγκατάστασης προς τη γη αν το σύστημα είναι πλήρως μονωμένο προς τη γη, ή και μέσω της σύνθετης αντίστασης αν το σύστημα συνδέεται με τη γη με μια τέτοια αντίσταση. Χάρη, είτε στην απουσία γείωσης του συστήματος, είτε στη μεγάλη τιμή της αντίστασης γείωσης, το ρεύμα σφάλματος είναι τόσο μικρό, ώστε να μην προκαλεί την εμφάνιση επικίνδυνης τάσης επαφής [9].

## 1.6. Μέθοδοι γείωσης

Οι μέθοδοι γείωσης, που εφαρμόζονται στις εγκαταστάσεις είναι οι εξής:

- Άμεση γείωση, δηλαδή η απευθείας αγωγή με το σύστημα γείωσης (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο κλπ.)
- Ουδετέρωση είναι η σύνδεση των μεταλλικών μερών των συσκευών με αγωγό προστασίας που συνδέεται με τον ουδέτερο ενός μετρητή. Ο ουδέτερος συνδέεται και με το ηλεκτρόδιο γείωσης στο σημείο παροχέτευσης πριν από το μετρητή. Η μέθοδος αυτή απαιτεί μικρότερη αντίσταση γείωσης και χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, ειδικά σε αστικές περιοχές.
- Με διακόπτη διαφυγής έντασης για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης.

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

## 1.7. Τύποι και μορφές ηλεκτροδίων γείωσης

Ως ηλεκτρόδιο γείωσης ορίζεται ένα αγωγίμο σώμα ή ένα σύνολο αγωγίμων σωμάτων σε στενή επαφή με τη γη, το οποίο εξασφαλίζει την ηλεκτρική σύνδεση με αυτή. Υπάρχουν διάφορα είδη ηλεκτροδίων γείωσης τα οποία αναλύονται παρακάτω [3] [9] [6] [2]:

### 1.7.1. Γειωτής ράβδου

Πρόκειται για ένα σωλήνα ονομαστικής κυκλικής διατομής ή διατομής σταυρού με διάμετρο μεγαλύτερη της μίας ίντσας ή μια ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα. Καρφώνεται κατακόρυφα στο έδαφος ή λοξά με μικρή γωνία ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος. Το κάτω μέρος της ράβδου διαμορφώνεται ως ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος, ενώ το άνω μέρος της ράβδου, περίπου 25cm, μπαίνει συνήθως σε φρεάτιο ώστε το σημείο σύνδεσής της με τον αγωγό γείωσης να είναι επισκέψιμο. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάρους έμπηξης της ράβδου, ενώ δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρό της. Υπάρχουν δύο είδη του εν λόγω ηλεκτροδίου.

Αρχικά υπάρχει ο ραβδοειδής γειωτής κυκλικής διατομής, ο οποίος κατασκευάζεται από χάλυβα ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένο με πάχος επιχάλκωσης τουλάχιστον 250μm, έτσι ώστε να εμπήγνυται και στα πιο σκληρά εδάφη χωρίς να απογυμνώνεται η χαλύβδινη ψυχή, που θα έχει σαν αποτέλεσμα τη γρήγορη διάβρωσή της. Ράβδοι με μικρότερο πάχος ηλεκτρολυτικής επιχάλκωσης ή επιχαλκωμένες μηχανικά με μανδύα χαλκού πρέπει να αποφεύγονται. Οι πρώτες για το λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω και οι δεύτερες διότι κατά την έμπηξη, ο χάλκινος μανδύας αποκολλάται και συγκεντρώνεται προς το άνω μέρος της ράβδου με αποτέλεσμα την αποκάλυψη της χαλύβδινης ψυχής και τη γρήγορη διάβρωσή της. Οι συνήθεις διαστάσεις των ραβδοειδών γειωτών κυκλικής διατομής κυμαίνονται από 12mm έως 23mm σε διάμετρο και 1,2m έως 3m σε μήκος. Οι ράβδοι κυκλικής διατομής συνήθως φέρουν σπείρωμα στο άνω και κάτω άκρο το οποίο πρέπει να δημιουργείται με διαμόρφωση και όχι με κοπή, αποφεύγοντας έτσι τον κίνδυνο αποκάλυψης της χαλύβδινης ψυχής της ράβδου με αποτέλεσμα τη διάβρωσή της. Με τον τρόπο αυτό, εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν, οι ράβδοι μπορούν με τη χρήση ορειχάλκινων συνδέσμων επιμήκυνσης να επιμηκυνθούν στο διπλάσιο, τριπλάσιο, κ.ο.κ του μήκους τους. Οι σύνδεσμοι αυτοί επιτρέπεται να κατασκευάζονται μόνο από υλικό όπως αλουμίνιο ή χάλυβας, ώστε να έχουν την κατάλληλη μηχανική αντοχή στη διάβρωση και πολύ μικρή αντίσταση διάβασης του ρεύματος σφάλματος αντίστοιχα.

Το άλλο είδος είναι ο ραβδοειδής γειωτής διατομής σταυρού που κατασκευάζεται από χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο με πάχος επιψευδαργύρωσης τουλάχιστον 50μm. Όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος της επιψευδαργύρωσης του γειωτή τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του στη διάβρωση. Οι διαστάσεις του γειωτή είναι 5cm διάμετρος και μήκη 1,5m, 2m και 2,5m. Το πάχος των ελασμάτων που δημιουργούν τη σταυροειδή διατομή είναι 3mm. Ο γειωτής πρέπει να φέρει στο άνω

σημείο του συγκολλημένο διάτρητο έλασμα για την προσαρμογή του αγωγού γείωσης.

### **1.7.2. Γειωτής ταινίας**

Ταινία που τοποθετείται σε όρυγμα βάθους τουλάχιστον 0,5m. Το βάθος που προτιμάται είναι 0,7-1m, για να υπάρχει σταθερή υγρασία κατά τη διάρκεια του έτους. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμη ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η κυκλική γείωση ονομάζεται διαφορετικά και γειωτής βρόχου. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Ως ηλεκτρόδιο γείωσης δεν προτείνεται η χρήση συρματοσχοινου, παρόλο που το επιτρέπει το ΕΛΟΤ HD 384, διότι διαβρώνεται εύκολα. Γι' αυτό το λόγο δεν το επιτρέπουν και οι κανονισμοί VDE 100.

### **1.7.3. Γειωτής πλάκας**

Πλάκα μορφής παραλληλογράμμου ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνειά της κατακόρυφη και το πάνω μέρος να βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1m. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι είτε χάλυβας γαλβανισμένος, επιχαλκωμένος ή επιμολυβδωμένος με πάχος μεγαλύτερο των 3mm είτε χαλκός ή μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2mm. Η τιμή της αντίστασης της γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις της πλάκας και όσο βαθύτερα τοποθετείται στο έδαφος.

### **1.7.4. Γειωτής ακτινικός**

Ταινίες ή ράβδοι διαμορφώνονται σε σχήμα αστέρα με πολλές ακτίνες. Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, τοποθετημένος σε βάθος τουλάχιστον 80cm. Τα υλικά είναι όμοια με το γειωτή ταινίας.

### **1.7.5. Γειωτής πλέγματος**

Πλέγμα από ταινίες ή αγωγός κυκλικής ή άλλης διατομής με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 70cm-2m τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0,5-1m. Το βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει ο γειωτής πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις επάνω στο έδαφος είναι αμελητέες.

### **1.7.6. Γειωτής τύπου «Ε»**

Ο γειωτής «Ε» κατασκευάζεται από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό ή χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο και αποτελείται ουσιαστικά από δύο στοιχεία. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία αποτελούνται από πλάκες όπου αφού συναρμολογηθούν κατάλληλα μεταξύ τους, το πρώτο παίρνει τη μορφή «Π» και το δεύτερο τη μορφή



«Γ». Χρησιμοποιώντας περισσότερα στοιχεία «Γ» μειώνεται η τιμή της αντίστασης γείωσης.

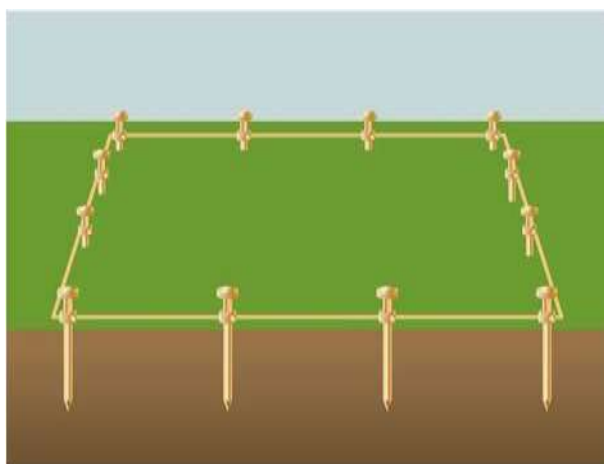
### 1.7.7. Δίκτυο ύδρευσης

Σύμφωνα με τη νομοθεσία από το 2009 και μετά «απαγορεύεται η γείωση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων των ακινήτων επί των υδραυλικών εγκαταστάσεων έστω και αν γεφυρώνεται η θέση του μετρητή. Το δίκτυο της Ε.ΥΔ.Α.Π. δεν εξασφαλίζει μεταλλική συνέχεια δεδομένου ότι οι αγωγοί και άλλα εξαρτήματά τους κατά μεγάλο ποσοστό δεν είναι από αγωγίμο υλικό» [10].

## 1.8. Συστήματα Γείωσης

### 1.8.1. Πολυγωνική διάταξη

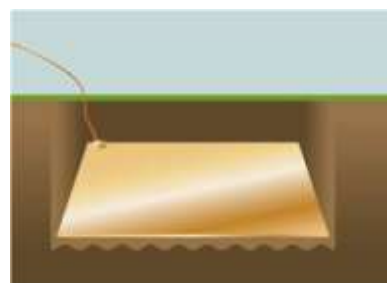
Κατασκευάζεται από ραβδοειδείς γειωτές οι οποίοι τοποθετούνται στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου, συνήθως τριγώνου (τριγωνική γείωση). Οι ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης ανάλογης διατομής με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης (συνήθως  $50\text{mm}^2$  Cu) και η απόστασή τους πρέπει να είναι τουλάχιστον μιάμιση φορά το βάθος έμπηξης. Σε αρκετές περιπτώσεις ελλείπει χώρου ή για λόγους ευκολίας οι ράβδοι τοποθετούνται σε ευθεία διάταξη, διάταξη «Γ», κυκλική διάταξη κλπ. διατηρώντας ωστόσο πάντα την προαναφερθείσα απόσταση [3].



Σχήμα 1.8: Πολυγωνική διάταξη γείωσης [62].

### 1.8.2. Γείωση με πλάκες

Κατασκευάζεται από πλάκες οι οποίες τοποθετούνται σε τυχαία διάταξη με απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον  $3\text{m}$ . Οι πλάκες συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης διατομής ανάλογης με τις απαιτήσεις της διάταξης (συνήθως  $50\text{mm}^2$  Cu) [3].



Σχήμα 1.9: Γείωση με πλάκες [62].

### 1.8.3. Περιμετρική γείωση

Κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας ο οποίος τοποθετείται σε όρυγμα βάθους  $50\text{-}70\text{cm}$  για να υπάρχει υγρό έδαφος περιμετρικά του κτιρίου και σε απόσταση από

το κτίριο περίπου  $2m$ , διότι τα τοιχώματα κοντά στο κτίριο συνήθως δεν είναι αγώγιμα (μπάζα) [3].

#### **1.8.4. Θεμελιακή Γείωση**

Μία ειδική περίπτωση γείωσης είναι η θεμελιακή γείωση, η οποία προτείνεται και προτεινόταν ανέκαθεν από όλους τους κανονισμούς. Στη Γερμανία εφαρμόζεται ήδη από το 1976 με βάση τον κανονισμό VDE 18015/Teil 1, ενώ στην Ελλάδα εφαρμόζεται σύμφωνα με την ΚΥΑ ΦΕΚ Α' 50/12081. Η θεμελιακή γείωση είναι ένας γειωτής ταινίας, ο οποίος τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων μέσα στο σκυρόδεμα. Η αντίσταση γείωσης διατηρεί χαμηλή τιμή, διότι το έδαφος και τα θεμέλια είναι υγρά σε όλη τη διάρκεια του έτους. Ο γειωτής τοποθετείται περιμετρικά στο κτίριο, ενώ για μεγάλες διαστάσεις συνιστώνται και εγκάρσιες συνδέσεις, ώστε κανένα σημείο να μην απέχει περισσότερο από  $10m$  από το γειωτή [3].

#### **1.8.5. Γείωση με γειωτή τύπου «E»**

Κατασκευάζεται από ένα στοιχείο «Π» και ένα ή παραπάνω στοιχεία «Γ» και τοποθετείται μέσα σε σκάμμα βάθους τουλάχιστον  $1m$ , πλάτους τουλάχιστον  $75cm$  και μήκος αναλόγως του αριθμού των στοιχείων «Γ» που θα τοποθετηθούν [3].

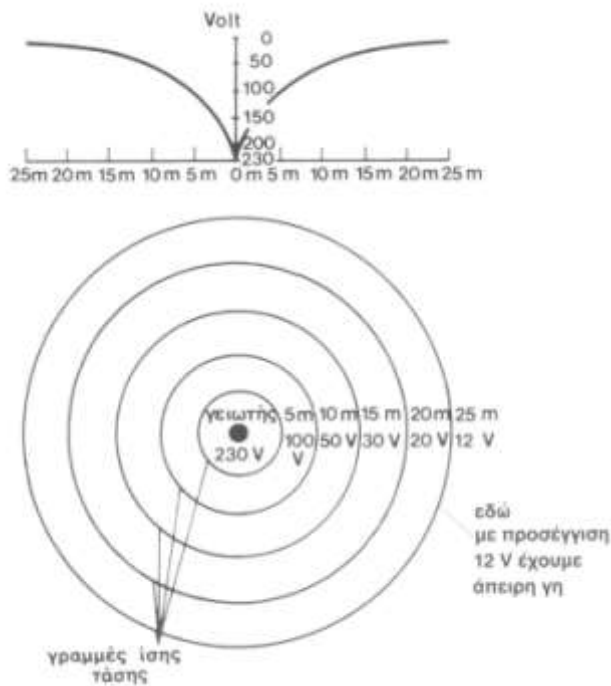
#### **1.8.6. Συνδυασμός γειώσεων**

Η τιμή της αντίστασης εξαρτάται από το μήκος και την επιφάνεια του ηλεκτροδίου που έρχεται σε επαφή με το υπέδαφος. Πολλές φορές λόγω μεγάλης ειδικής αντίστασης του υπεδάφους (βραχώδες, ξηρή άμμος κλπ.) αλλά και περιορισμένου διαθέσιμου για γείωση χώρου, απαιτείται να γίνει κάποιος συνδυασμός από τα παραπάνω είδη γείωσης τέτοιος ώστε να επιτυγχάνεται «αύξηση» του μήκους του γειωτή χωρίς να απαιτείται επιπλέον χώρος. Το συνηθέστερο παράδειγμα είναι της περιμετρικής γείωσης, η οποία συντάσσεται με ράβδους γείωσης κατά μήκος αυτής. Τονίζεται, ότι σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιούνται υλικά από τα ίδια ή συγγενή μέταλλα, έτσι ώστε να μην παρουσιάζονται φαινόμενα ηλεκτροχημικής διάβρωσης [3].

### **1.9. Αντίσταση γείωσης**

Αντίσταση γείωσης είναι η αντίσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Άπειρη γη είναι ένα σημείο στην επιφάνεια, το οποίο βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από το γειωτή. Πρακτικά η άπειρη απόσταση λαμβάνεται ίση με 5-10 φορές επί τη μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή. Παραδείγματος χάρη για γειωτή ράβδου με  $3m$  βάθος, η άπειρη γη λαμβάνεται σε απόσταση  $20m$  από το γειωτή. Δυνητικά θεωρείται ότι το δυναμικό στην άπειρη γη είναι μηδενικό.

Αν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση  $U$  ως προς την άπειρη γη, τότε δημιουργείται ένα πεδίο ροής και δυναμικού γύρω από το γειωτή. Όσο απομακρύνεται κανείς από το γειωτή, η τάση μειώνεται. Το

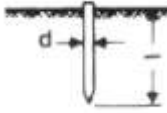
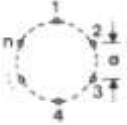
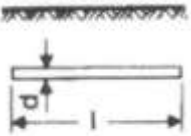
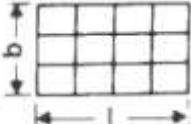

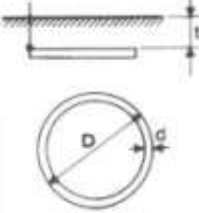
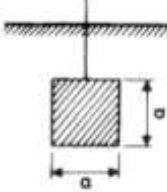


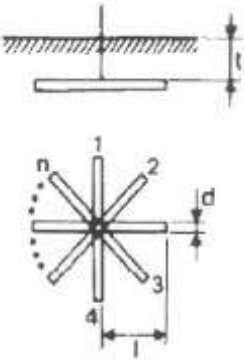
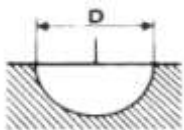
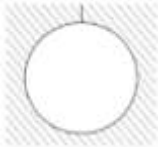
Σχήμα 1.10: Χοάνη δυναμικού ενός γειωτή [6].

εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους, αλλά μόνο από τη γεωμετρία του γειωτή [6].

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι αναλυτικοί και προσεγγιστικοί τύποι υπολογισμού της αντίστασης γείωσης διάφορων τύπων ηλεκτροδίων γείωσης.

Πίνακας 1.1: Υπολογισμός αντίστασης γείωσης για διάφορους τύπους γειωτών [6].

a/a		Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός Τύπος
1		Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2\pi l_{eff}} * \ln\left(\frac{4l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} = l - 0,5m$	$R_{A1} \cong \frac{\rho}{l_{eff}}$
2		Πολύγωνο πασάλων $a \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \frac{l}{n} R_{A1}$ $\frac{a}{l} = 3 : n = 5 : k \cong 1,2$ $R_{A1}$ αντίσταση ενός πασάλου	Μπορεί να τεθεί $k=(1 \dots 1,5)$ Ειδικά για $n=10:k=1,25$
3		Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h=0,5 \dots 1m$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$	$R_A = \frac{2\rho}{l}$
4		Πλέγμα σε βάθος 0,5-1,0m	$R_A \approx \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{lg}$ $lg = \text{συνολικό μήκος}$ $\text{αγωγού}$	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$
5		Θεμελιακή γείωση, $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} * S}$	-	$R_A = \frac{2\rho}{\pi D}$
6		Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{2\pi^2 D} * \ln\frac{8D}{d} * \left(1 + \frac{\ln(2D)/t}{\ln(8D)/d}\right)$	$R_A = \frac{2\rho}{\pi D} *$
7		Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m <sup>2</sup> ]	-	$R_A = \frac{\rho}{4,5\alpha} **$

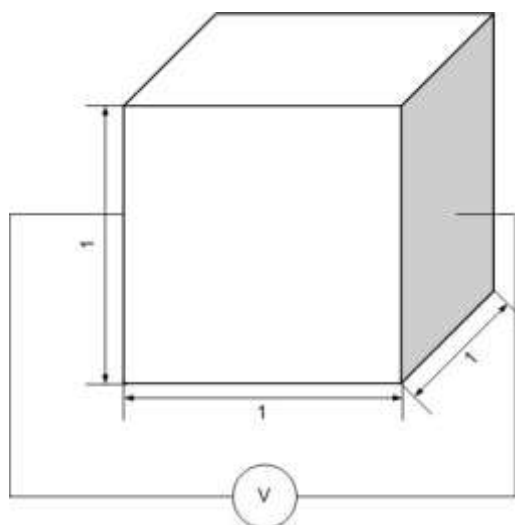
8		n=5	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0.27td}$	-
		n=4	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0.25td}$	-
		n=3	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0.22td}$	-
		n=2	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0.09td}$	-
9		Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D}$ ***	
10		Σφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	
<p>*Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος <math>D=0,33*U</math>, όπου <math>U</math>=μήκος αγωγού</p> <p>**Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνα θέτουμε: <math>a = \sqrt{S}</math>, όπου <math>S</math> = επιφάνεια</p> <p>***Για ένα γειωτή όγκου <math>V</math>, ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με <math>D = 1,57 \sqrt[3]{V}</math></p>				

### 1.10. Ειδική Αντίσταση Εδάφους

Ένα καλό σύστημα γείωσης είναι απαραίτητο για την ασφαλή και απρόσκοπτη λειτουργία ενός συστήματος. Μάλιστα για να θεωρείται το σύστημα γείωσης σωστό και κυρίως αποδοτικό, πρέπει η αντίσταση γείωσης να διατηρείται ελάχιστη. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες, οι οποίοι συμβάλλουν στο κατά πόσο ένα σύστημα γείωσης είναι καλό. Ένας από τους παράγοντες αυτούς είναι και η ειδική αντίσταση του εδάφους. Πέρα από αυτό αξιοσημείωτο ρόλο παίζουν η αντίσταση και οι φυσικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται τόσο για την κατασκευή του ηλεκτροδίου όσο και για το υλικό στο οποίο τοποθετείται το ηλεκτρόδιο. Επίσης η σύνδεση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εδάφους όπως και οι ιδιότητες του εδάφους παίζουν σημαντικό ρόλο.

Ως ειδική αντίσταση του εδάφους ορίζεται η αντίσταση μεταξύ δύο αντιμέτωπων πλευρών ενός κύβου διαστάσεων  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$  και μετράται σε  $\Omega\text{-m}$  ή  $\Omega\text{-cm}$ . Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση του συστήματος γείωσης. Η σωστή εκτίμηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι σημαντική, διότι με αυτόν τον τρόπο καθορίζεται η τοποθεσία, το βάθος και το

μέγεθος των ηλεκτροδίων ενός συστήματος γείωσης. Επίσης η εκτίμηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρίσκει και άλλες εφαρμογές εκτός από την αντίσταση γείωσης ενός συστήματος, όπως παραδείγματος χάρη στον υπολογισμό του βαθμού διάβρωσης του εδάφους [11].



Σχήμα 1.11: Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους.

Υπάρχει μία σειρά παραγόντων, οι οποίοι ασκούν άμεση επίδραση στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Πρώτος και κύριος παράγοντας είναι ο τύπος του εδάφους. Η αντίσταση του εδάφους κυμαίνεται από  $1\Omega m$  μέχρι και περισσότερο από  $1M\Omega m$ . Η υγρασία είναι και αυτή με τη σειρά της ένας σημαντικός παράγοντας, καθώς εδάφη με μικρό ποσοστό υγρασίας εμφανίζουν μεγάλη ειδική αντίσταση. Λόγου χάρη αν η υγρασία του εδάφους είναι περισσότερο από 15% κατά βάρος, τότε η ειδική αντίσταση παραμένει χαμηλή και λίγο πολύ σταθερή, ενώ για μικρότερο ποσοστό υγρασίας η ειδική αντίσταση αυξάνεται απότομα. Η περιεκτικότητα αλάτων, μεταλλικών και χημικών στοιχείων δεν πρέπει να αμελείται, αφού για περιεκτικότητα αλάτων κατά 1% κατά βάρος η ειδική αντίσταση παραμένει χαμηλή και δε μεταβάλλεται σημαντικά, ενώ για μικρότερο ποσοστό αυξάνεται σημαντικά. Τέλος, παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η πυκνότητα του εδάφους επηρεάζουν την ειδική αντίσταση. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες η αντίσταση του εδάφους αυξάνεται, οπότε εύκολα γίνεται αντιληπτό, πως κατά τη διάρκεια του έτους, που οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται αισθητά, η ειδική αντίσταση δεν παραμένει σταθερή. Κατά το πέρασμα του χρόνου καθίσταται εύλογο, ότι οι παράγοντες αυτοί δε διατηρούνται σταθεροί, συνεπώς και η αντίσταση γείωσης μεταβάλλεται αισθητά [11].

Αναλυτικότερα για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους έχουμε [12]:

### 1.10.1. Τύπος εδάφους

Ο τύπος του εδάφους είναι ο σημαντικότερος παράγοντας, που επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Ωστόσο ακόμη δεν υπάρχει ακριβής μαθηματικός τύπος, ο οποίος να υπολογίζει την ειδική αντίσταση του εδάφους ανάλογα με τον τύπο του. Μετά από μία σειρά μετρήσεων για διάφορους τύπους εδαφών λαμβάνοντας δείγμα από το έδαφος και μετρώντας σε ειδική συσκευή την αντίσταση ή μετρώντας την αντίσταση in situ προκύπτει ο παρακάτω πίνακας, στον οποίο παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διάφορους τύπους εδαφών.

**Πίνακας 1.2: Ειδική αντίσταση διαφόρων τύπων εδάφους [6] [11] [13].**

Τύπος Εδάφους	Ειδική Αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )
Θαλασσινό νερό	0,1-0,5
Νερό πηγής	10-150
Νερό λίμνης/ποταμιού	100-400
Νερό βροχής	800-1300
Αποσταγμένο νερό	1000-4000
Χημικά καθαρό νερό	250000
Ελώδες, αργιλώδες έδαφος	25-70
Άμμος και άργιλος	40-300
Οργωμένο χώμα	50-250
Μπετόν	150-500
Ασβέστης	500-1000
Στεγνό Χαλίκι	1000-2000
Πετρώδες Έδαφος	1000-3000
Στεγνό έδαφος, άμμος	1000-3000
Σχιστόλιθος	$10^7$
Αμμόλιθος	$10^8$

### 1.10.2. Επίδραση μεγέθους κόκκων

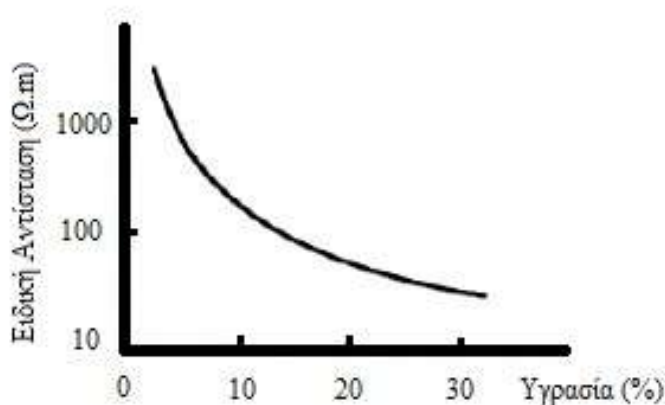
Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος των κόκκων του εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης. Ακόμα, το μέγεθος των κόκκων αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο συγκρατείται η υγρασία. Όταν το έδαφος αποτελείται από κόκκους μεγάλου μεγέθους, τότε η υγρασία κατακρατείται λόγω της επιφανειακής τάσης. Στην περίπτωση που οι κόκκοι είναι διαφόρων μεγεθών τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται, διότι δημιουργούνται μεγάλα κενά μεταξύ των κόκκων.

### 1.10.3. Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

Δεδομένου ότι η αγωγιμότητα είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, συνεπάγεται, ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του όπως επίσης και η ποσότητα των διαλυμένων αλάτων επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό είναι μια μεταβλητή ποσότητα και εξαρτάται κυρίως από την εποχή του έτους και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, αλλά και από τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία. Σημειώνεται ότι απόλυτα ξηρό έδαφος σπάνια συναντάται στη φύση, με χαρακτηριστικό παράδειγμα ξηρού εδάφους να είναι η άμμος της ερήμου. Αντίθετα, η υγρασία του εδάφους συνήθως περιορίζεται μέχρι το 40%.

Πίνακας 1.3: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει της θερμοκρασίας [14].

Περιεκτικότητα σε υγρασία (% κατά βάρος)	Ειδική αντίσταση σε Ωm	
	Top Soil	Sandy Loam
0	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>
2.5	2500	1500
5	1650	430
10	530	220
15	210	130
20	120	100
30	100	80

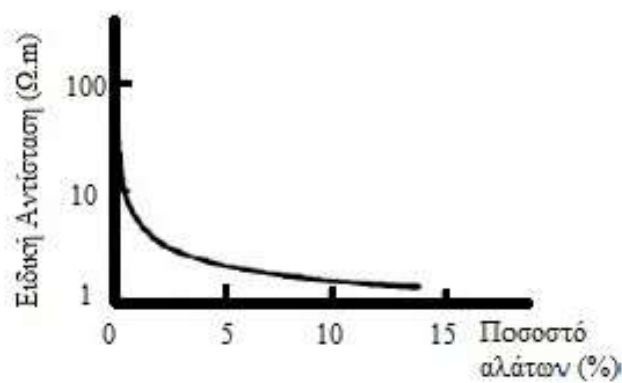


Σχήμα 1.12: Γραφική απεικόνιση της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της υγρασίας του εδάφους [13].



#### 1.10.4. Διαλυμένα άλατα

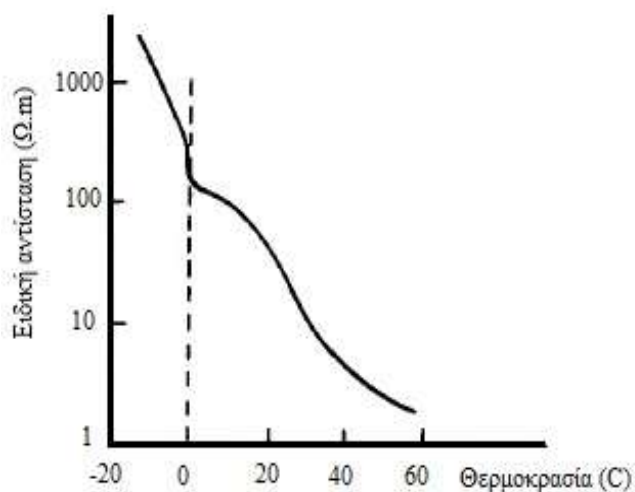
Πέρα από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η περιεκτικότητα αλάτων στο ίδιο το νερό. Ακόμα και μία μικρή ποσότητα αλάτων να διαλυθεί στο απιονισμένο νερό, που τοποθετείται στο χώμα, μπορεί να μειώσει σημαντικά την αντίστασή του. Ωστόσο σημειώνεται, ότι το είδος των αλάτων επηρεάζει ακόμα περισσότερο το πόσο μειώνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους. Γι' αυτόν το λόγο συνήθως πρακτική μείωσης της αντίστασης του εδάφους είναι η προσθήκη διαλυμάτων αλάτων στο χώμα όπως παραδείγματος χάρη χλωριούχο νάτριο ( $\text{NaCl}$ ), χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), θειικός χαλκός ( $\text{CuSO}_4$ ) ή θειικό μαγνήσιο ( $\text{MgSO}_4$ ). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα αλάτων στο έδαφος.



Σχήμα 1.13: Γραφική παράσταση της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας αλάτων [13].

#### 1.10.5. Θερμοκρασία και Πίεση

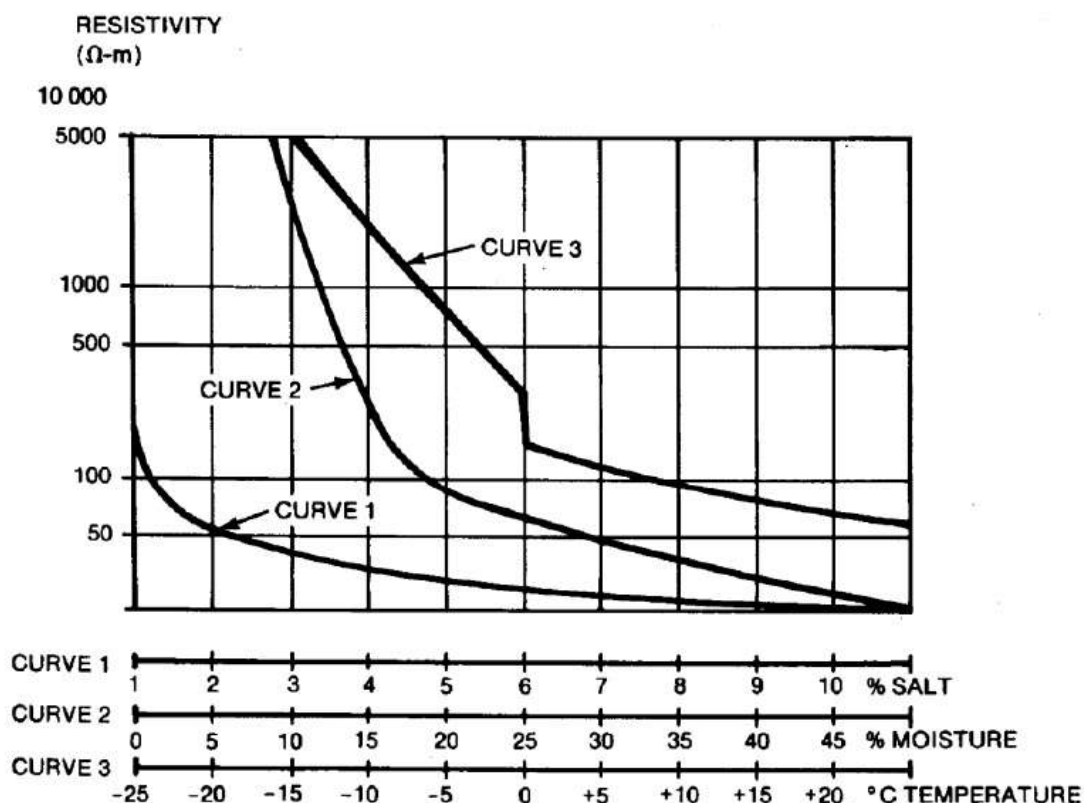
Η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους από την περιεκτικότητα σε



Σχήμα 1.14: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει της θερμοκρασίας [13].

νερό έχει ως επακόλουθο την εξάρτηση της ειδικής αντίστασης και από τη θερμοκρασία. Στο σχήμα (1.14) παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για διάφορες θερμοκρασίες. Εξετάζοντας τις τιμές αυτές παρατηρείται, ότι η αντίσταση μεταβάλλεται σε μικρό βαθμό για θερμοκρασίες μεγαλύτερες του μηδενός, ενώ η μεταβολή είναι απότομη για αρνητικές θερμοκρασίες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αναφορικά με την

πίεση καθίσταται φανερό, ότι για υψηλές τιμές της πίεσης το έδαφος είναι συμπαγές. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ειδική αντίσταση είναι χαμηλή. Παρακάτω παρατίθεται ένα γράφημα, στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.15: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει περιεκτικότητας (Curve 1) αλάτων, (Curve 2) υγρασίας και (Curve 3) θερμοκρασίας [13].

#### 1.10.6. Επίδραση της έντασης του πεδίου (voltage gradient)

Η ειδική αντίσταση σε γενικές γραμμές δεν επηρεάζεται από την ένταση του πεδίου. Η επίδραση αυτή λαμβάνει χώρα στην περίπτωση και μόνο, όπου η τιμή του πεδίου υπερβεί μία οριακή τιμή, η οποία εξαρτάται από το είδος του εδάφους. Αυτό που έχει παρατηρηθεί ωστόσο είναι, ότι η τιμή αυτή είναι της τάξεως των μερικών  $kV/cm$  και όταν ξεπεραστεί εκδηλώνονται τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου μειώνοντας έτσι την ειδική αντίσταση στην περιοχή αυτή.

#### 1.10.7. Επίδραση της μορφής της τάσης

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από  $10m$  έχει παρατηρηθεί αύξηση της τιμής της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις  $0,3/30\mu s$  η μεταβατική αντίσταση θεμελιακού γειωτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $3\Omega$  και  $26\Omega$ . Η αύξηση της τιμής της αντίστασης σημειώνεται στο μέτωπο της κρουστικής τάσης και χαρακτηρίζεται σαν κρουστική αντίσταση.

## 1.11. Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους

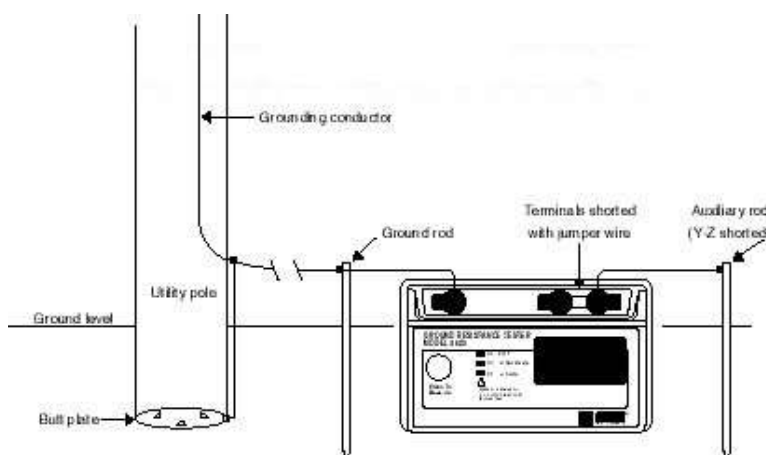
Για να είναι εφικτή η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, είναι αναγκαία η ροή ρεύματος μέσω αυτού. Ως εκ τούτου τοποθετούνται δύο ηλεκτρόδια στη γη και τροφοδοτούνται με ρεύμα. Ωστόσο με αυτή τη διάταξη υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να λάβουμε εσφαλμένα αποτελέσματα από τις μετρήσεις, διότι τα ηλεκτρόδια έχουν και αυτά ωμική αντίσταση, η οποία μπορεί να είναι συγκρίσιμη με αυτή της γης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε για πρώτη φορά το 1915 από τον Wenner, ο οποίος εφάρμοσε τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων. Έκτοτε, έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές της μεθόδου αυτής, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι κυριότερες μέθοδοι σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 81-1983 είναι:

- Η μέθοδος των δύο σημείων (Two-Point Method)
- Η μέθοδος των τριών σημείων (Three-Point method or Variation of Depth Method)
- Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (Four-Point Method)

### 1.11.1. Η μέθοδος των δύο σημείων (Two-Point Method)

Η μέθοδος αυτή είναι απλοποιημένη και όχι ακριβής και για το λόγο αυτό δεν ενδείκνυται για τη διερεύνηση της δομής του εδάφους και γι' αυτό χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις που έχουμε περιορισμένο χώρο και όπου ήδη ξέρουμε, ότι το έδαφος είναι κατάλληλο. Σε αυτήν τη μέθοδο το όργανο μετρά την ολική αντίσταση του ηλεκτροδίου (του οποίου ψάχνουμε την αντίσταση) και ενός βοηθητικού ηλεκτροδίου. Η αντίσταση του βοηθητικού ηλεκτροδίου θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με του άλλου και έτσι η μέτρηση μας δίνει την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης.



Σχήμα 1.16: Διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο των δύο σημείων [15].

### 1.11.2. Η μέθοδος των τριών σημείων (Three-Point method or Variation of Depth Method)

Κατά τη μέθοδο των τριών σημείων η μέτρηση της αντίστασης γείωσης διεξάγεται αρκετές φορές για διάφορα βάθη διείσδυσης του ηλεκτροδίου γείωσης. Στόχος αυτής της μέτρησης είναι να ρέει ρεύμα σε διάφορα βάθη του εδάφους. Αποτέλεσμα αυτού είναι, ότι διαπιστώνεται η ποικιλομορφία του εδάφους στο εσωτερικό του. Για την εκτέλεση της μεθόδου προτιμάται η ράβδος για ηλεκτρόδιο γείωσης, διότι αφενός μπορεί εύκολα να διεισδύσει σε μεγάλο βάθος, αφετέρου ο θεωρητικός τύπος υπολογισμού της αντίστασης είναι απλός και με μεγάλη ακρίβεια, επομένως είναι εύκολη η επεξεργασία των μετρήσεων. Η μέθοδος των τριών σημείων δίνει πληροφορίες για το έδαφος σε απόσταση περίπου 5-10 φορές το μήκος του ηλεκτροδίου. Επομένως αν η έκταση του εδάφους, που πρόκειται να μελετηθεί, είναι μεγάλη, τότε είναι προτιμότερο να εφαρμοστεί η μέθοδος των τεσσάρων σημείων, η οποία θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Για την εκτέλεση της μεθόδου των τριών σημείων προτείνεται η μέθοδος πτώσης δυναμικού ως η καταλληλότερη για την εξασφάλιση ακριβών αποτελεσμάτων. Πρόκειται για μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο, η οποία ενδείκνυται για μικρά συστήματα γείωσης, τα οποία δεν εκτείνονται σε μεγάλη επιφάνεια. Το ένα ηλεκτρόδιο τοποθετείται σε απόσταση 30-50m μακριά από το σύστημα γείωσης, ανάλογα και με το μέγεθος του συστήματος που μελετάται, ενώ το άλλο ηλεκτρόδιο τοποθετείται στο μέσο της παραπάνω απόστασης και στην ίδια ευθεία με τα άλλα ηλεκτρόδια. Πριν την εκτέλεση των μετρήσεων πρέπει να επαληθευτεί, ότι τα ηλεκτρόδια έχουν τοποθετηθεί αρκετά μακριά από το σύστημα γείωσης, ώστε οι μετρήσεις, που θα ληφθούν να είναι σωστές και ακριβείς. Μεταξύ των ηλεκτροδίων X και Y, όπως φαίνονται στο σχήμα, μετριέται η διαφορά δυναμικού  $U$ , ενώ μ' ένα αμπερόμετρο μετριέται η ένταση ρεύματος  $I$  στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο Z. Μέσω του νόμου του Ohm υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης από τη σχέση:

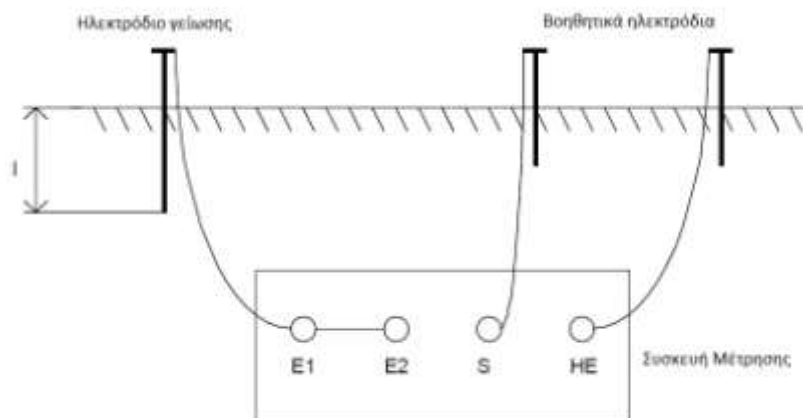
$$R = \frac{U}{I} \quad (1.3)$$

Γνωρίζοντας την αντίσταση  $R$ , το μήκος διείσδυσης του ηλεκτροδίου γείωσης  $l$  και την ακτίνα του  $r$  υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του ομοιογενούς εδάφους  $\rho$  ως εξής:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (1.4)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (1.5)$$

Ανάλογα με την προσέγγιση στις τιμές των αποτελεσμάτων μπορεί να εφαρμοστεί οποιαδήποτε από τις δύο σχέσεις. Μεταβάλλοντας το μήκος διείσδυσης του ηλεκτροδίου και μετρώντας τη φαινόμενη αντίσταση  $R$  παίρνουμε διάφορες τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους [13].



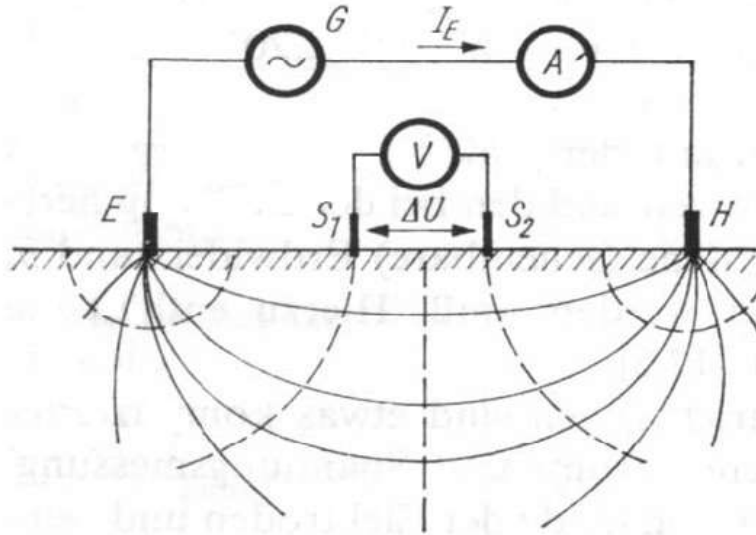
Σχήμα 1.17: Διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο των τριών σημείων [16].

### 1.11.3. Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (Four-Point Method)

Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων είναι η πιο δημοφιλής και ακριβής όταν είναι επιθυμητό να εξαχθούν συμπεράσματα για μεγάλο όγκο εδάφους. Το ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται στο υπέδαφος από το θετικό ηλεκτρόδιο και εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί ηλεκτρικό πεδίο εξαρτώμενο από τη δομή του υπεδάφους. Με τη βοήθεια δύο ακόμα ηλεκτροδίων μετριέται η διαφορά δυναμικού  $\Delta U$ . 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 ανάλογα με το βάθος, οι μετρήσεις πιθανόν να πρέπει να επαναλαμβάνονται για διαφορετικούς άξονες μέτρησης ή να πρέπει να γίνουν για διαφορετικές αποστάσεις των ηλεκτροδίων ράβδων από το κέντρο της διάταξης, ώστε να ερευνηθεί η μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε οριζόντια επίπεδα. Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων πρέπει να εξασφαλίζουμε, ότι τα ηλεκτρόδια έχουν τοποθετηθεί αρκετά μακριά από τυχόν θαμμένα αντικείμενα και κυρίως μεταλλικά [13].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η γενική διάταξη μέτρησης με τη διάταξη των τεσσάρων σημείων:



Σχήμα 1.18: Διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων [16].

Κατά καιρούς έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων, οι σημαντικότεροι από τους οποίους παρατίθενται παρακάτω.

#### ➤ Διάταξη Wenner

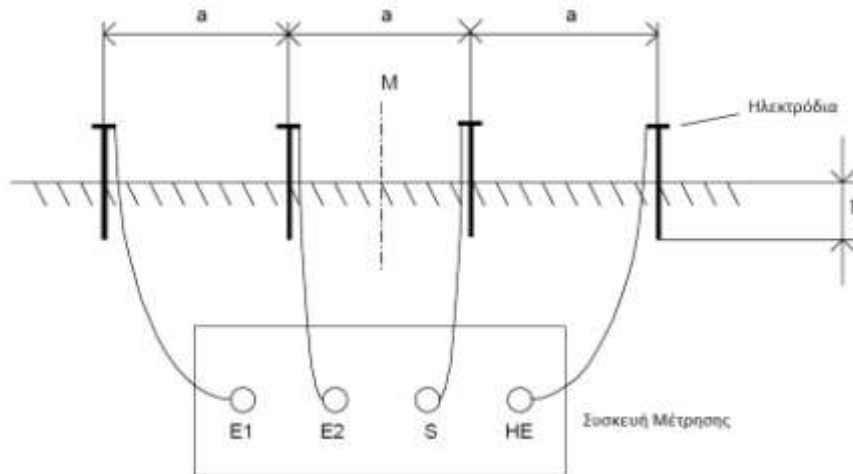
Τα τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή σε σταθερή απόσταση  $a$  μεταξύ τους και σε βάθος  $b$  ( $b < 0,1a$ ). Το ρεύμα εγχύεται στα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια και η διαφορά δυναμικού μετριέται ανάμεσα στα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια. Υπολογίζεται η φαινόμενη αντίσταση από το λόγο της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ( $U/I$ ) και στη συνέχεια η φαινόμενη ειδική αντίσταση από την παρακάτω σχέση:

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

Σε αυτό το σημείο σημειώνεται ότι, η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται για μικρά ηλεκτρόδια, που έχουν τοποθετηθεί σε βάθος  $b$  και συνδέονται με μονωμένους αγωγούς. Δεν εφαρμόζεται για ραβδοειδείς γειωτές. Συνήθως το βάθος των ράβδων είναι αρκετά μικρότερο του  $0,1a$ , επομένως προσεγγιστικά θεωρείται ότι  $b=0$ , άρα ισχύει:

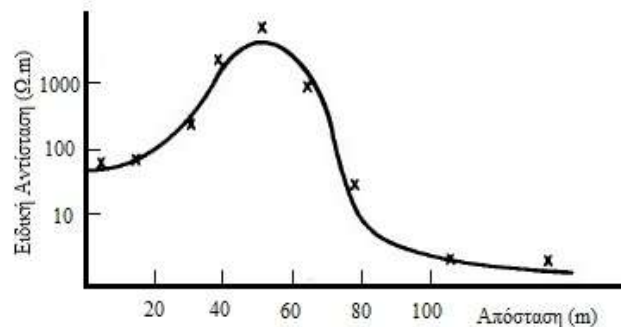
$$\rho = 2\pi a R \quad (1.7)$$

Οπότε λαμβάνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους για βάθος  $a$ .



Σχήμα 1.19: Υπολογισμός ειδικής αντίστασης εδάφους με διάταξη Wenner [16].

Επομένως, αν χρειάζεται να μελετηθεί η ειδική αντίσταση του εδάφους συναρτήσει του βάθους, αρκεί να επαναληφθούν οι μετρήσεις μεταβάλλοντας την απόσταση των ράβδων ως προς το κέντρο της διάταξης. Ως εκ τούτου διαπιστώνεται αν το έδαφος είναι πολυστρωματικό ή όχι. Παραδείγματος χάρη παρακάτω παρατίθεται ένα γράφημα, το οποίο προκύπτει από τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους για διάφορες αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

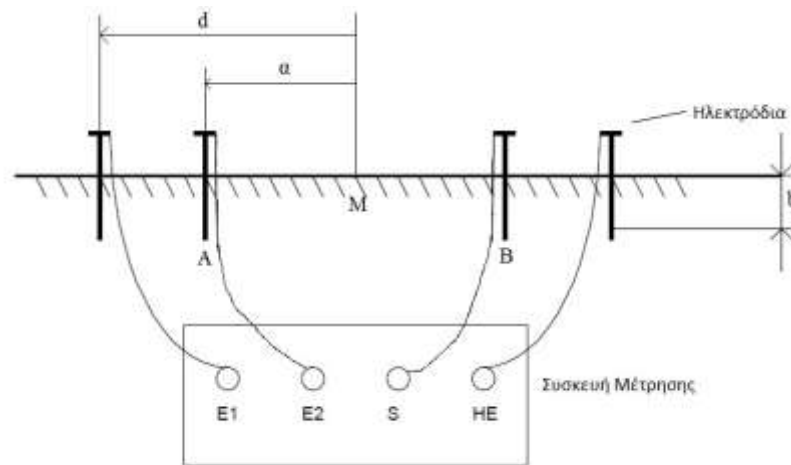


Σχήμα 1.20: Παράδειγμα μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους, στο οποίο παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις στην τιμή της ειδικής αντίστασης ανάλογα με το βάθος. Συμπεραίνεται επομένως, ότι το έδαφος σε αυτή την περίπτωση είναι πολυστρωματικό.

### ➤ Διάταξη Schlumberger-Palmer

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου Wenner είναι η πολύ απότομη μείωση του δυναμικού μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων όταν η απόσταση  $a$  μεταξύ των ηλεκτροδίων γίνει αρκετά μεγάλη. Συχνά τα όργανα δεν είναι επαρκή για να μετρήσουν τόσο χαμηλές τιμές. Γι' αυτές τις περιπτώσεις λοιπόν προτάθηκε η διάταξη Schlumberger-Palmer. Έχει διατυπωθεί η άποψη, ότι αν τα ηλεκτρόδια, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού, τοποθετούνταν πιο κοντά

στα ηλεκτρόδια ρεύματος, ωστόσο ακόμα συνευθειακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο, τότε το δυναμικό αυξάνεται διευκολύνοντας τη μέτρηση.



**Σχήμα 1.21:** Υπολογισμός ειδικής αντίστασης εδάφους με τη διάταξη Schlumberger-Palmer [16].

Το δυναμικό στο ηλεκτρόδιο δυναμικού A θα είναι:

$$U_A = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{d - \alpha} - \frac{1}{d + \alpha} \right) \quad (1.8)$$

Εξαιτίας της συμμετρίας, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού θα είναι το διπλάσιο του παραπάνω δυναμικού. Επομένως αυτό, που τελικά μετρείται είναι:

$$U_{AB} = \frac{2\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{d - \alpha} - \frac{1}{d + \alpha} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{4\alpha}{d^2 - \alpha^2} \right) \quad (1.9)$$

Από τη σχέση  $R=U/I$  προκύπτει η σχέση

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{4\alpha}{d^2 - \alpha^2} \right) = \frac{\rho}{2\pi\alpha} \left( \frac{4}{\left(\frac{d}{\alpha}\right)^2 - 1} \right) \quad (1.10)$$

Αν οριστεί  $d/\alpha=A$ , τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = 2\pi\alpha R \left( \frac{A^2 - 1}{4} \right) \quad (1.11)$$

Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η μελέτη της μεταβολής της αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος, τότε τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά και τα ηλεκτρόδια ρεύματος μετακινούνται συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, έχουν παρουσιαστεί όλες οι τεχνικές μέτρησης της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πτώσης δυναμικού για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης και η μέθοδος Wenner για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΕΩΝ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Οι στόχοι της κατασκευής ενός συστήματος γείωσης είναι αρκετοί και καθέννας υπακούει σε διαφορετικούς κανόνες. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι η προστασία του ανθρώπου και η εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών. Αφενός, για την προστασία του ανθρώπου, πρέπει να αποφευχθεί σε κάθε περίπτωση η έκθεση σε μεγάλη διαφορά δυναμικού, η οποία θα είχε δυσμενή αποτελέσματα. Αφετέρου, αναφορικά με την προστασία των ηλεκτρικών συσκευών πρέπει ένα σύστημα να πληροί τις εξής προϋποθέσεις:

- διατήρηση σταθερής έντασης ανάμεσα στις φάσεις και τη γείωση, όταν συμβαίνει κάποιο σφάλμα στις φάσεις του συστήματος,
- διατήρηση μικρής τιμής της αντίστασης γείωσης σε περίπτωση σφάλματος προς γη,
- σε περίπτωση ατμοσφαιρικής εκκένωσης διασφάλιση διόδου διέλευσης του ρεύματος στο έδαφος,
- διατήρηση ενός επιπέδου τάσης αναφοράς.

Πολλές φορές υπάρχουν παράγοντες, οι οποίοι καθιστούν δύσκολη μέχρι και αδύνατη την επίτευξη μικρής αντίστασης γείωσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι παραδείγματος χάρι η μεγάλη ειδική αντίσταση του εδάφους, ο περιορισμένος χώρος εγκατάστασης, το ιδιαίτερα διαβρωτικό έδαφος, οι ασταθείς καιρικές συνθήκες, που σαν αποτέλεσμα έχουν την αστάθεια της ειδικής αντίστασης του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους ή ακόμα και η επιτακτική μείωση του κόστους. Τότε απαιτείται η χρήση υλικών, φυσικών ή χημικών, τα οποία καλύπτουν το χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο.

Παλαιότερα ήταν ευρέως διαδεδομένη η χρήση του χλωριούχου νατρίου (NaCl) ως βελτιωτικό, το οποίο ενώ πρόσκαιρα βελτίωνε την αντίσταση γείωσης, σε βάθος χρόνου προκαλούσε τα αντίθετα αποτελέσματα. Η χρήση του αλατιού προς συγκράτηση της υγρασίας του εδάφους διαβρώνει το ηλεκτρόδιο μεγάλωνοντας την αντίσταση διάχυσης, δηλαδή τη δυσκολία με την οποία το ρεύμα σφάλματος θα διαχέεται προς τη γη. Το βρόχινο νερό, που θα διαπεράσει το έδαφος, θα παρασύρει το αλάτι με αποτέλεσμα στο μέλλον να μην υπάρχει πια. Επομένως, προέκυψε η ανάγκη χρήσης άλλων υλικών, τα οποία θα εμφάνιζαν καλύτερη απόδοση σε βάθος χρόνου, τόσο αναφορικά με τη μείωση της αντίστασης γείωσης, όσο και σε σχέση με την αντοχή τους.

#### **2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τη χρήση βελτιωτικών υλικών**

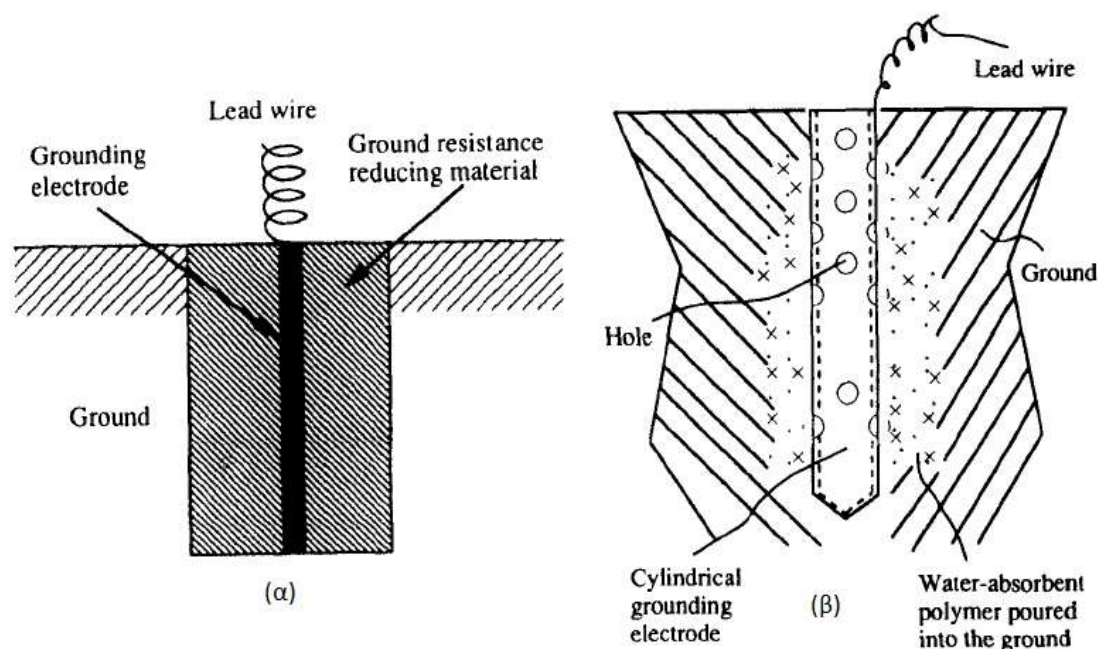
Το πρόβλημα της βελτίωσης της αντίστασης του εδάφους έχει απασχολήσει ερευνητικά τον επιστημονικό κόσμο ήδη από τη δεκαετία του 1960. Πρώτοι οι Kutter and Lange [17] και ο Mc Gowan [18] μελέτησαν τις ιδιότητες του μπετονίτη ως

βελτιωτικό εδάφους, συγκρίνοντας την ειδική αντίσταση που επιτυγχάνεται με τη χρήση αυτού του υλικού σε διάφορους τύπους εδαφών, κάτω από πύργους του Συστήματος Μεταφοράς, με την ειδική αντίσταση του φυσικού εδάφους.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ο Warren R. Jones [19] πρότεινε μία μέθοδο εγκατάστασης ηλεκτροδίου ράβδου χρησιμοποιώντας ράβδο μπετονίτη. Κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες ράβδοι μπετονίτη και κανονικές μεταλλικές ράβδοι και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων σε καθεμία περίπτωση. Στην πρώτη τοποθεσία η σύσταση του εδάφους ήταν πολύ πυκνή και σκληρή λάσπη, στη δεύτερη τοποθεσία το έδαφος ήταν αργιλώδες χώμα με κροκάλες και χαλίκι και τέλος στην τρίτη ήταν ένα μίγμα χώματος, που αποτελείτο από άμμο, ένα στρώμα λάσπης κάτω από την άμμο και ψαμμόλιθο. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι με τη χρήση ράβδου μπετονίτη σημειώθηκε σημαντική μείωση της αντίστασης γείωσης έως και 36%, συγκριτικά με τις κανονικές ράβδους. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν μάλιστα σταθερό για όλο το έτος.

Το 1994 Ιάπωνες ερευνητές εντόπισαν αρκετά μειονεκτήματα στις μεθόδους και τα υλικά, που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε, και προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν πολυμερή, τα οποία θα εμφάνιζαν και μεγαλύτερη σταθερότητα ως υλικά. Σύμφωνα με τους Hiroshi Yamane et al. [20] η μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους περιοριζόταν με τη χρήση χημικών ουσιών όπως π.χ. ενός ηλεκτρολυτικού gel που περιείχε κυανιούχο σίδηρο, ενός συμπιεσμένου μίγματος από νερό, γραφίτη και άλατος πυριτίου ή και το μίγμα νερού, μπετονίτη και χλωριούχου νατρίου. Για εδάφη με συστήματα γείωσης με τιμή αντίστασης 20-500Ω η μείωση ήταν αισθητή και έφτανε ακόμα και το 50%. Ωστόσο η εκτεταμένη χρήση αλάτων μπορεί να επιφέρει δυσμενή αποτελέσματα στην αντίσταση γείωσης εξαιτίας του γεγονότος ότι, με την πάροδο του χρόνου τα άλατα αυτά διαλύονται στο έδαφος. Επίσης ο μπετονίτης είχε το μειονέκτημα ότι, μετά από περιόδους ξηρασίας έχανε την ικανότητά του να κατακρατά το νερό και απόρροια αυτού ήταν η αντίσταση γείωσης να αυξάνεται. Στη μελέτη αυτή προτείνεται η χρήση πολυμερών, που βασίζονται σε ουσίες, που μπορούν να απορροφούν το νερό. Διεξήχθη μία σειρά μετρήσεων και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν και με τη βελτίωση, που επιτυγχάνεται με τη χρήση του μπετονίτη. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε αρχικά μίγμα από νερό, μπετονίτη, τσιμέντο και χλωριούχο νάτριο σε αναλογία 1:1:0,1:0,1. Σε άλλο ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε το μίγμα του πολυμερούς. Και στις δύο περιπτώσεις το ηλεκτρόδιο ήταν μία ράβδος τοποθετημένη στο έδαφος και το βελτιωτικό υλικό είχε τοποθετηθεί γύρω από αυτήν. Σε εδάφη με πολύ υψηλή αντίσταση η αντίσταση γείωσης μειώθηκε στο 40% και στο 20% αντίστοιχα. Στη συνέχεια εξετάστηκε ένα ακόμα μίγμα πολυμερούς με εποξική ρητίνη σε αναλογία 1:2. Η μείωση εδώ ήταν στο 35% της αρχικής, οπότε πάλι υπάρχουν καλύτερα αποτελέσματα από το μπετονίτη. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν και σε βραχώδη εδάφη παρουσιάζοντας παρεμφερή αποτελέσματα. Τέλος, έγινε η απόπειρα μίξης του πολυμερούς με το χώμα, που υπήρχε στο έδαφος σε αναλογία 1:100 και τότε η αντίσταση μειώθηκε στο 40%, όσο δηλαδή και με τη χρήση του μπετονίτη. Κρίνοντας από την υφή του βελτιωτικού υλικού, οι ερευνητές θεώρησαν, πως είναι αρκετά εύκολη η έγχυση του υλικού στο

έδαφος. Γι' αυτόν το λόγο εκτέλεσαν μία ακόμα σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας διάτρητους σωλήνες. Έτσι, εγχύοντας το βελτιωτικό υλικό στο σωλήνα αυτό, το βελτιωτικό αναμιγνυόταν μέσω των οπών με το έδαφος. Το αποτέλεσμα ήταν να υπάρχει μικρότερη αντίσταση γείωσης σε σύγκριση με την προηγούμενη διάταξη. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το ηλεκτρόδιο με το βελτιωτικό υλικό για καθεμία πειραματική διάταξη:



Σχήμα 2.1: Πειραματικές διατάξεις για τη χρήση (α) συμπαγούς και (β) διάτρητου σωλήνα [20].

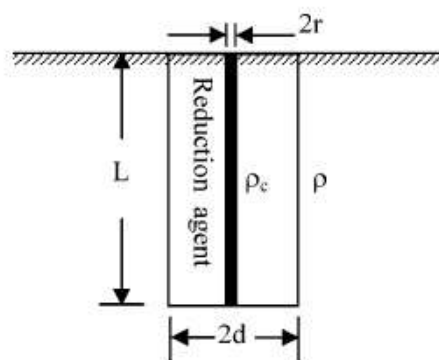
Για να είναι η μελέτη πλήρης, αξιολογήθηκαν στη συνέχεια οι ιδιότητες των υλικών αναφορικά με τη δυνατότητα απορρόφησης νερού, τη διάβρωση, αλλά και τη διαλυτότητά τους, αφού μέχρι εκείνη την περίοδο δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές. Τα υλικά αυτά έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν νερό. Με δεδομένο ότι, στην πράξη είναι επιθυμητό η διάταξη να καταλαμβάνει το μικρότερο δυνατό όγκο, ως ιδανικό υλικό κρίνεται αυτό που έχει τη μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό ήταν η αντοχή στο χρόνο και κατά πόσο τα υλικά αυτά αποσυντίθενται ή όχι, όπου τα συνθετικά υλικά παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αντοχή. Τέλος, το άνυδρο μηλεϊνικό οξύ εμφανίζει την καλύτερη επίδοση για διάφορες θερμοκρασίες.

Το 1997 ο Kostic et al [21] παρουσίασε τα αποτελέσματα της βελτίωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των βρόχων γείωσης, χρησιμοποιώντας χαλίκια, μπετονίτη, πούδρα μπετονίτη και λάσπη ως βελτιωτικά εδάφους. Επιλέχθηκαν δύο τοποθεσίες στην ύπαιθρο, όπου η ειδική αντίσταση έφτανε μέχρι και τα  $675\Omega m$  και τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι η αντίσταση στα ηλεκτρόδια με το βελτιωτικό υλικό εμφάνιζε μικρότερη διακύμανση στην τιμή της συγκριτικά με τα ηλεκτρόδια χωρίς βελτιωτικό υλικό.

Το ίδιο έτος ο Qingbo Meng et al [22] εξέτασαν τη δυνατότητα μείωσης της αντίστασης γείωσης με τη χρήση βελτιωτικών υλικών, ωστόσο η μελέτη τους εστίασε κυρίως στη διαστασιολόγηση και τη δομή των διατάξεων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αντίσταση γείωσης, χωρίς να εξετάζονται διάφορα βελτιωτικά υλικά.

Το 2004 οι Chen et al [23] χρησιμοποίησαν σαν βελτιωτικό υλικό «σκωρία υψικαμίνου» (granulated blast furnace slag). Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν πέντε ράβδοι, οι οποίες τοποθετήθηκαν στη νότια Ταϊβάν. Στις τρεις ράβδους τοποθετήθηκε μίγμα του εν λόγω βελτιωτικού μαζί με τσιμέντο, νερό και αλάτι και μελετήθηκε τόσο η βελτίωση της ειδικής αντίστασης, όσο και η σταθερότητα του μίγματος. Κάθε μίγμα είχε διαφορετική αναλογία υλικών, επομένως με βάση τα αποτελέσματα καθορίστηκε η βέλτιστη σύσταση του μίγματος. Αναφορικά με την αντίσταση γείωσης διαπιστώθηκε μετά από μακροχρόνιες μετρήσεις, ότι η αντίσταση γείωσης με το βελτιωτικό ήταν πάνω από 40% μικρότερη συγκριτικά με την αντίσταση γείωσης χωρίς το βελτιωτικό. Επιπροσθέτως μετρήθηκε και η ειδική αντίσταση του εδάφους χρησιμοποιώντας το βελτιωτικό υλικό και ήταν  $1-2\Omega m$ , η οποία κρίνεται πολύ ικανοποιητική.

Η επόμενη μελέτη διεξήχθη στη Χιλή λίγο μετά από το 2000 και δημοσιεύθηκε το 2004 από τους Hugo E. Martinez et al [24]. Το βελτιωτικό υλικό, που χρησιμοποιήθηκε τότε αποτελείται κυρίως από ανόργανα άλατα, που ήταν υπολείμματα από εγκαταστάσεις εξόρυξης μεταλλευμάτων στη Χιλή. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μίγματα αλάτων, τα οποία αποτελούνταν κυρίως από μαγνήσιο, ασβέστιο, θείο και άλλα στοιχεία σε διάφορες αναλογίες. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων κατασκευάστηκαν τρία μίγματα, τα οποία στη συνέχεια διαλύθηκαν σε νερό. Με βάση αυτά τα μίγματα εκτελέστηκε μία σειρά μετρήσεων, ώστε να διαπιστωθεί αφενός μεν πόσο μειώνεται η αντίσταση γείωσης αφετέρου δε αν διαλύεται με το πέρασμα του χρόνου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών διαπιστώθηκε, ότι τα άλατα αυτά δε διαλύονται, αφού το ποσοστό που διαλύεται είναι λιγότερο από 1 γραμμάρια για κάθε μήνα, χωρίς να το διαρρέει ρεύμα. Επίσης διαπιστώθηκε σε εδάφη, που χρησιμοποιήθηκε διάλυμα του αλάτος με νερό για χρονικό διάστημα περισσότερο από ένα χρόνο, ότι η αντίσταση γείωσης μειώνεται αισθητά. Αντίστοιχα για μετρήσεις, που ελήφθησαν για κρουστικά ρεύματα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση μειώνεται κατά 34% σε σχέση με την αντίσταση που εμφανίζει στη βιομηχανική συχνότητα. Τέλος, σε εδάφη, τα οποία δε διαρρέονται από ρεύμα η αντίσταση γείωσης διατηρείται σταθερή, χωρίς να χρειαστεί να προστεθεί νερό, για διάστημα περισσότερο από ένα χρόνο.

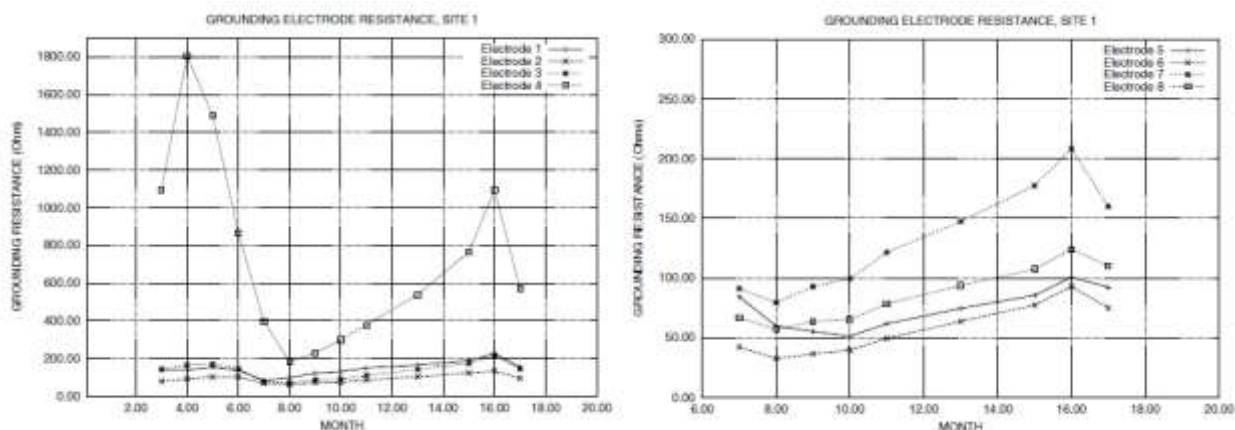


Σχήμα 2.2: Ράβδος γείωσης καλυμμένη πλήρως με το βελτιωτικό υλικό [23].

Το 2006 οι Romualdo-Torres et al [25] παρουσίασαν τα αποτελέσματα ενός πειράματος, που διεξήγαγαν σε έδαφος με πολύ υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης το 1999 και 2000. Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος εγκατέστησαν στο έδαφος οκτώ ηλεκτρόδια. Τα πέντε από αυτά περιελάμβαναν στο εσωτερικό τους χημικά βελτιωτικά, για τα οποία ο κατασκευαστής προσδιόριζε το κατάλληλο υλικό μέσα στο οποίο αυτά θα τοποθετηθούν. Σε δύο από αυτά τοποθετήθηκε χημικό βελτιωτικό σε ακτίνα περίπου δέκα εκατοστών γύρω από το ηλεκτρόδιο. Τέλος το όγδοο ηλεκτρόδιο ήταν χωρίς κάποιο βελτιωτικό, ώστε να μετριέται η αντίσταση του εδάφους, η οποία και ήταν η αντίσταση αναφοράς. Διεξάγοντας μετρήσεις της αντίστασης γείωσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση των ηλεκτροδίων με τα χημικά βελτιωτικά ήταν αρκετά μικρότερη, ενώ γενικότερα τους μήνες με αυξημένη βροχόπτωση, όπου και η υγρασία του εδάφους ήταν υψηλότερη, όπως αναμενόταν, η αντίσταση ήταν συγκριτικά μικρότερη. Παρακάτω εμφανίζονται τόσο τα στοιχεία για κάθε ηλεκτρόδιο, όσο και οι γραφικές παραστάσεις με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 2.1: Στοιχεία ηλεκτροδίων [25].

No.	Τύπος ηλεκτροδίου	Μήκος (m)	Διάμετρος (mm)	Διάμετρος βελτιωτικού (mm)
1	Χημικό βελτιωτικό	1,80	62,5	152
2	Χημικό βελτιωτικό	1,80	62,5	152
3	Χημικό βελτιωτικό	1,80	62,5	305
4	Ράβδος	1,00	16	0
5	Χημικό	1,20	62,5	152
6	Χημικό	1,20	160	305
7	Ράβδος	1,50	16	102
8	Μπετονίτης	1,50	16	102



Σχήμα 2.3: Αποτελέσματα μετρήσεων [25].

Επίσης, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι το πάχος του στρώματος του βελτιωτικού υλικού δε διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη μείωση της αντίστασης γείωσης. Στο συμπέρασμα αυτό κατέληξαν, αφού χρησιμοποίησαν ίδιο βελτιωτικό υλικό με πάχος δέκα εκατοστών στο ένα ηλεκτρόδιο και τριάντα εκατοστών σε ένα άλλο. Σύμφωνα με τις μετρήσεις η αντίσταση γείωσης δεν παρουσίαζε ιδιαίτερη μεταβολή. Τέλος, ένα ακόμα συμπέρασμα αφορούσε συγκεκριμένα στη χρήση μπετονίτη, ο οποίος παρότι στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κατά κόρον, οι συγγραφείς δεν τον προτιμούσαν στο πείραμά τους, διότι το έδαφος ήταν αρκετά ξηρό. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους λοιπόν, ο μπετονίτης εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλα εμπορικά χημικά βελτιωτικά, όταν η υγρασία στο έδαφος είναι υψηλή. Αντίθετα, σε συνθήκες ξηρασίας αυξάνεται η πιθανότητα, ο μπετονίτης να σπάσει, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται επαφή ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το υλικό, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της αντίστασης γείωσης.

Το 2006 δημοσιεύτηκε από τον Mohamad Nor [26] μία μελέτη, η οποία αφορούσε κυρίως στη δοκιμή βελτιωτικών υλικών σε συνθήκες κρουστικών ρευμάτων. Τα υλικά, τα οποία αξιολογήθηκαν, ήταν ο θειικός χαλκός ( $\text{CuSO}_4$ ) και το χλωριούχο νάτριο ( $\text{NaCl}$ ). Οι ουσίες αυτές αναμίχθηκαν με άμμο και νερό σε συγκεκριμένες αναλογίες απαρτίζοντας έτσι μίγματα δύο διαφορετικών συστάσεων και με διάφορες αναλογίες. Το αποτέλεσμα της μελέτης ήταν ότι η ιδανική σύσταση του μίγματος θειικού χαλκού ήταν 5% νερό και 2,5% θειικός χαλκός. Για κρουστικά ρεύματα παρόλα αυτά, το διάλυμα χλωριούχου νατρίου εμφάνιζε μεγαλύτερη αγωγιμότητα. Την ίδια περίοδο οι Yurping Tu et al [27] παρουσίασαν τα αποτελέσματα της δικιάς τους μελέτης με το ίδιο θέμα. Οι εν λόγω ερευνητές κατάφεραν να ποσοτικοποιήσουν τη μείωση αυτή, αναφέροντας ότι για κρουστικά ρεύματα και ειδική αντίσταση εδάφους  $100\text{-}5103\Omega\text{m}$ , η αντίσταση γείωσης μειώνεται χάρη στα βελτιωτικά υλικά κατά 25%-45%.

Το 2008 ο Nuwan Kumarasinghe [28] παρουσίασε μία μελέτη για την εγκατάσταση συστήματος γείωσης σε ένα χωριό στη Σρι Λάνκα. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής κλήθηκε ο εν λόγω ερευνητής να εγκαταστήσει ηλεκτρόδια στο έδαφος, ώστε να απάγεται το ρεύμα προς τη γη. Ωστόσο σε μετρήσεις, όπου διεξήγαγε πριν την εγκατάστασή τους, διαπίστωσε ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους είχε αρκετά μεγάλη τιμή, που έφτανε τα  $1000\Omega\text{m}$ . Επομένως, ήταν απαραίτητη η χρήση κάποιου βελτιωτικού υλικού, ώστε να εξασφαλιστεί η αποδοτική λειτουργία του συστήματος γείωσης. Το υλικό, το οποίο θεωρήθηκε κατάλληλο ήταν ο μπετονίτης, καθώς από πειράματα έχει αποδειχθεί ιδανικό τόσο για τη μείωση της αντίστασης, όσο και για την ανθεκτικότητά του στο χρόνο. Ωστόσο, εξαιτίας του υψηλού κόστους του, έπρεπε να χρησιμοποιηθούν αντί αυτού άλλα φθηνότερα υλικά, τα οποία ήταν διαθέσιμα σε εκείνη την περιοχή. Τέτοια ήταν η σκόνη κοκοφοίνικα, η οποία είναι παραπροϊόν της διαδικασίας αφαίρεσης ινών από τη φλούδα του καρπού. Η σκόνη αυτή έχει την ικανότητα να απορροφήσει 8-9 φορές το βάρος της σε νερό και αποσυντίθεται μετά από 10 χρόνια. Επομένως, η χρήση του υλικού αυτού είναι εφικτή. Ένα ακόμα υλικό, το οποίο είναι άφθονο στην περιοχή και ενδείκνυται για

αυτήν τη χρήση είναι οι φλοιοί ρυζιού, το πίτουρο ρυζιού ή και το ρύζι ζυθοποιίας. Πρακτικά πρόκειται για παραπροϊόντα της άλεσης του ρυζιού. Εγκαθιστώντας τα παραπάνω υλικά γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης, μετρήθηκε η αντίσταση και διαπιστώθηκε, ότι με το πέρασμα του χρόνου η αντίσταση μειωνόταν αισθητά, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα. Τονίζεται, ότι εν τέλει χρησιμοποιήθηκε μπετονίτης, σκόνη κοκοφοίνικα και φλοιοί ρυζιού ως βελτιωτικά υλικά.

**Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα μέτρησης της αντίστασης γείωσης για τις αντίστοιχες ράβδους γείωσης, όπου B συμβολίζεται ο μπετονίτης, C η σκόνη κοκοφοίνικα και R οι φλοιοί ρυζιού ως βελτιωτικά υλικά.**

No.	Βελτιωτικό Υλικό	Αντίσταση γείωσης (Ω)		
		Ιούλιος 2001	Ιανουάριος 2002	Σεπτέμβριος 2007
1	B1	1200	1100	125
2	B2	1500	900	35
3	B3	980	750	400
4	C1	1500	1200	70
5	C2	1100	660	38
6	C3	580	500	45
7	R1	760	700	100
8	R2	1250	1100	55
9	R3	1400	980	60

Με παρεμφερή υλικά ασχολήθηκαν και οι Eduful and Cole [29] σε μία μελέτη, όπου ασχολήθηκαν με υπόλειμμα από πυρηνέλαιο φοίνικα, το οποίο είναι ένα παράγωγο από τον πυρήνα του καρπού του φοίνικα, αφότου όμως επεξεργαστεί και παραχθεί από αυτόν ένα είδος λαδιού, ως ένας παράγοντας μείωσης της αντίστασης γείωσης. Οι δοκιμές έγιναν σε τρεις διαφορετικές, κοντινές τοποθεσίες και μετά την πάροδο έξι ετών, τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι η αντίσταση γείωσης είχε βελτιωθεί κατά 50% και το υλικό διατηρούσε συνεχώς την ιδιότητα αυτή, αφού δε διαλυόταν με την πάροδο του χρόνου.

Το 2009 δημοσιεύτηκε από τους Galvan et al [30] μία μελέτη την οποία διεξήγαγαν χρησιμοποιώντας βελτιωτικά σε δύο διαφορετικά είδη εδάφους, σε ασβεστολιθική πέτρα και σε ηφαιστειογενή πέτρα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατήρησαν ότι για μικρές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, η μείωση που επιτεύχθηκε ήταν οριακή, αφού περιορίστηκε στο 25%-30%, όταν αποδεκτή τιμή για βελτίωση της αντίστασης είναι πάνω από 40%. Επομένως αν δεν υφίσταται ζήτημα διάβρωσης, δε συνιστάται, σύμφωνα με τους ερευνητές, η χρήση των υλικών. Αντίθετα, για εδάφη με μεγαλύτερη ειδική αντίσταση η βελτίωση είναι

αξιοσημείωτη. Επίσης σε σχέση με την υγρασία διαπίστωσαν οι ερευνητές, ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους αυξάνεται αρκετά σε μικρό βάθος, όπου το έδαφος δεν είναι πολύ υγρό. Αντίθετα, σε μεγαλύτερο βάθος η υγρασία διατηρείται και η αντίσταση είναι μικρότερη.

Σε άλλη μελέτη του ο ίδιος ερευνητής [31] εκτέλεσε μετρήσεις στα ίδια είδη εδαφών και παρουσίασε τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τα οποία τα σκληρότερα υλικά εμφάνιζαν σταθερότητα της ειδικής αντίστασης του εδάφους ως προς το χρόνο και τα μαλακότερα υλικά εμφάνιζαν μεγάλες διακυμάνσεις στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Οι διακυμάνσεις αυτές αποτελούν σημαντικό μειονέκτημα στη χρήση των βελτιωτικών, διότι σε πραγματικές εγκαταστάσεις γειώσεων μπορεί να εμφανιστεί σημαντική αύξηση στην αντίσταση γείωσης. Επίσης στην έρευνα αυτή αναφέρεται, ότι η συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών ήταν σε εξάρτηση και από τον τύπο του εδάφους στο οποίο τοποθετούνταν, κυρίως σε εδάφη με υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης, όπου άλλα παρουσίαζαν πολύ καλή συμπεριφορά ως προς την αγωγιμότητα και άλλα ακριβώς το αντίθετο.

Το 2010 οι Jasni et al [32] μελέτησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες φυσικών βελτιωτικών εδάφους. Τα υλικά ήταν μπετονίτης, τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, κηπευτικό αργιλώδες χώμα και σκόνη ρυζιού. Οι μετρήσεις διήρκεσαν περίπου τρεισήμισι μήνες και σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε, ότι με τα βελτιωτικά η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώθηκε και χρειάστηκε πολύ λίγο χρόνο για να σταθεροποιηθεί. Επίσης τα υλικά καταφέρνουν να διατηρούν αποτελεσματικά την υγρασία του εδάφους σε υψηλά επίπεδα και να μειώνουν την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων, εξασφαλίζοντας την καλύτερη διάχυση του ρεύματος μέσα στο έδαφος. Ειδικά, το αργιλώδες κηπευτικό χώμα παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές από τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά σε βάθος χρόνου και εμφάνισε την καλύτερη ικανότητα διατήρησης της υγρασίας του εδάφους, ιδιότητες που το καθιστούν το πιο αποτελεσματικό βελτιωτικό συγκριτικά με τα άλλα.

### **2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ειδική αντίσταση του εδάφους**

Η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ο βαθμός στον οποίο αντιστέκεται το έδαφος στη ροή ηλεκτρικών φορτίων, με μονάδα μέτρησης το Ohm-Meter ( $\Omega\text{m}$ ) και πιο συνηθισμένη τεχνική μετρήσεων τη μέθοδο Wenner-Schlumberger, καθότι πρόκειται για μια τεχνική που δεν επεμβαίνει στη δομή του εδάφους και εξασφαλίζεται έτσι το αναλλοίωτο των φυσικών του χαρακτηριστικών. Η ειδική αντίσταση είναι μέγεθος, του οποίου οι τιμές εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις εξαιτίας επιδράσεων από την υγρασία, τη θερμοκρασία και τη χημική σύσταση του εδάφους. Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχει αποτελέσει στο παρελθόν και αποτελεί ακόμα ένα σημαντικότατο εργαλείο για εξαγωγή αποτελεσμάτων προς ανάλυση σε πολυάριθμες εργασίες και πειράματα με εφαρμογές σε τομείς όπως αγρονομία, γεωλογία, εδαφολογία, αρχαιολογία και σε μελέτες πολιτικών μηχανικών και μηχανικών περιβάλλοντος.



Το 1974 ο F. Dawalibi [33] κατάστρωσε το θεωρητικό υπολογισμό για την καταλληλότερη θέση των ηλεκτροδίων σε μη ομογενές έδαφος με στόχο τη μέτρηση της αντίστασής του. Για τα αποτελέσματα που προέκυψαν πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα σε μοντέλο εδάφους δύο στρωμάτων.

Σε επόμενη μελέτη του το 1984 ο ίδιος [34] παρουσίασε κάποιες τεχνικές ερμηνείας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σε πειράματα μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στις τεχνικές αυτές περιλαμβάνονταν η μελέτη της γραφικής απεικόνισης των δεδομένων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων με τη χρήση ενός προηγμένου υπολογιστικού προγράμματος. Για απόσταση των ηλεκτροδίων από 2,5m και άνω, η ταύτιση των τιμών που μετρήθηκαν με αυτές που υπολογίστηκαν κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων βρέθηκε ικανοποιητική.

Με την ερμηνεία των αποτελεσμάτων από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους ασχολήθηκε το 1986 και ο A. P. Melioroulos [35] παρουσιάζοντας μια τεχνική και το αντίστοιχο υπολογιστικό πρόγραμμα (SOMIP) για την ερμηνεία και την επεξεργασία δεδομένων από μετρήσεις της αντίστασης εδάφους. Η τεχνική αυτή είναι βασισμένη σε στατιστική εκτίμηση των παραμέτρων του εδάφους βάσει μετρήσεων με τη μέθοδο Wenner. Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψαν συμπεράσματα για την καλύτερη εκτίμηση των παραμέτρων του εδάφους, για το συσχετισμό σφάλματος των παραμέτρων αυτών με το βαθμό εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων, για το κατά πόσο συμπίπτει το εκτιμώμενο μοντέλο εδάφους με το μοντέλο που προκύπτει από τις τιμές αντίστασης που μετρήθηκαν καθώς και για το ποιες από τις μετρήσεις είναι ανακριβείς.

Ένα ακόμα αντικείμενο μελέτης που απασχόλησε τους ερευνητές ήταν τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους και η συμπεριφορά τους κατά τους χειρισμούς αλλά και σε αστάθμητους παράγοντες. Το 1983 ο C. Mazzetti [36] πειραματίστηκε με ηλεκτρόδια και μελέτησε τη συμπεριφορά τους σε ρεύμα οφειλόμενο σε υπερτάσεις λόγω κεραυνοπληξίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για την κατάστρωση θεωρητικού προτύπου αναφορικά με την επίδραση των χαρακτηριστικών του εδάφους, το μέγεθος των ηλεκτροδίων και την ένταση του ρεύματος υπέρτασης.

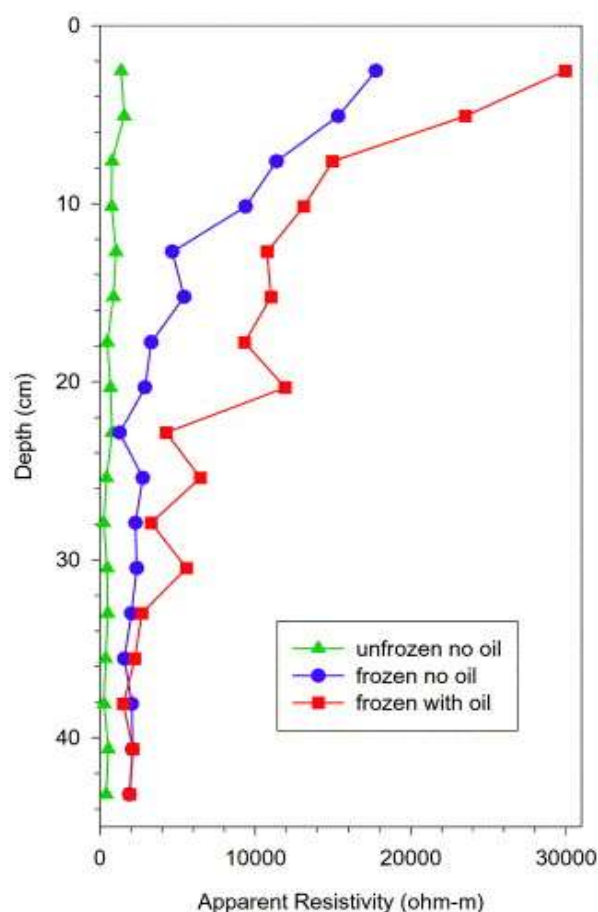
Οι αποκλίσεις στις τιμές της ειδικής αντίστασης λόγω της δομής, της σύστασης και των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές. Το επιστημονικό ενδιαφέρον αφορά τόσο την ανάλυση των αποτελεσμάτων σε συσχετισμό με τις ιδιότητες του εδάφους όσο και τη χρήση αποτελεσμάτων για την αντίστροφη ανακατασκευή/απεικόνιση ενός τύπου εδάφους.

Το 1990 ο T. Takahashi [37] χρησιμοποίησε τη μέθοδο Wenner με διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης σε πολυστρωματικό έδαφος. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ως επέκταση υπάρχουσας μελέτης σε μοντέλο διστρωματικού εδάφους και γενίκευση των γραφικών παραστάσεων της

ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της απόστασης των βοηθητικών ηλεκτροδίων από τα δύο στρώματα σε πολλαπλά, πάντα για τον ίδιο τύπο εδάφους.

Επτά χρόνια αργότερα οι O. Banton et al. [38] μελέτησαν το συσχετισμό των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους με την ηλεκτρική του αντίσταση. Πραγματοποίησαν μετρήσεις σε καλλιεργήσιμη περιοχή περιορισμένης έκτασης υπό συνθήκες υψηλής και χαμηλής υγρασίας. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους που μετρήθηκαν συσχετίστηκαν με τις φυσικές ιδιότητες του επιφανειακού στρώματος εδάφους και ειδικά με την περιεκτικότητά του σε άμμο, ίλη, άργιλο και οργανική ύλη ενώ δεν έγινε συσχετισμός της ηλεκτρικής αντίστασης με το πορώδες του εδάφους, την πυκνότητα και την υδραυλική αγωγιμότητά του. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από τη σύσταση του εδάφους και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των συνιστωσών του και λιγότερο από τη δομή του.

Το 2001 οι Allan J. Delaney et al. [39] έκαναν χρήση της μεθόδου Wenner για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης εδάφους σε μολυσμένο από πετρέλαιο έδαφος και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα υπό κανονικές συνθήκες. Πραγματοποίησαν μετρήσεις σε δείγματα λεπτόκοκκου εδάφους μολυσμένου από πετρέλαιο αλλά και σε έκταση όπου βρίσκονταν αποθήκες πετρελαίου και επιβεβαιώθηκε η μόλυνση του εδάφους. Επίσης μελετήθηκε η συμπεριφορά της αντίστασης του μολυσμένου εδάφους συναρτήσει και της θερμοκρασίας. Τα τελικά αποτελέσματα της μελέτης των δειγμάτων έδειξαν ότι η μόλυνση του εδάφους από πετρέλαιο συνεπάγεται και αύξηση της αντίστασής του, φαινόμενο που είναι ακόμα πιο έντονο όσο το μολυσμένο έδαφος ψύχεται. Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και από την ανάλυση των μετρήσεων στη μολυσμένη έκταση, σημειώνοντας ότι η επίδραση της πτώσης της θερμοκρασίας στην αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους εξαρτάται από την εκάστοτε σύσταση του εδάφους.



Σχήμα 2.4: Ειδική αντίσταση συναρτήσει του βάθους των ηλεκτροδίων σε (α) κανονικές συνθήκες (β) συνθήκες ψύχους και (γ) συνθήκες ψύχους και μόλυνσης από πετρέλαιο [1].

Το 2000 οι Alain Tabbagh et al [40] χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα μέτρησης της ειδικής αντίστασης για την τρισδιάστατη απεικόνιση της δομής του εδάφους σε δύο διαφορετικά παραδείγματα αμμώδους εδάφους σε περιοχή με ξηρασία στο Lagadgé του βορείου Καμερούν και σε παραποτάμια περιοχή στο Loiret της κεντρικής και βόρειας Γαλλίας.

Το 2005 οι A. Samouëlian et al. [41] μελέτησαν την ειδική αντίσταση του εδάφους ως μέσο χαρακτηρισμού του εδάφους βάσει των φυσικών ιδιοτήτων του. Ανέφεραν ως κυριότερο πλεονέκτημα το ότι πρόκειται για μια τεχνική χαρτογράφησης του εδάφους που δεν επεμβαίνει στη μορφολογία και τη λειτουργικότητά του καθώς επίσης και ότι προσφέρει τη δυνατότητα χρονικής παρακολούθησης των αποτελεσμάτων, επιτρέπει τη χρήση περισσότερων κλιμάκων μέτρησης από άλλες επεμβατικές μεθόδους και προσφέρει εύκολη εξαγωγή αποτελεσμάτων με χαμηλό κόστος, υψηλή ακρίβεια και δυνατότητα κατασκευής μοντέλων. Όσον αφορά στους περιοριστικούς παράγοντες, αναφέρθηκαν στα πιθανά σφάλματα λόγω κακής επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος, τη μη γενίκευση των αποτελεσμάτων για διαφορετικό τύπο εδάφους από αυτόν που πραγματοποιούνται οι εκάστοτε μετρήσεις της αντίστασης, τη χρονική διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης, την επίδραση της ανομοιογένειας του εδάφους στα αποτελέσματα καθώς και αποκλίσεις των μοντέλων από τις μετρήσεις της αντίστασης και τις πραγματικές συνθήκες λόγω σφαλμάτων/θορύβου των δεδομένων κατασκευής τους.

Εκτός από τη μέθοδο Wenner-Schlumberger που είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους, τα τελευταία χρόνια βρίσκει αρκετές εφαρμογές και η μέθοδος τομογραφίας του εδάφους μέσω της ηλεκτρικής του αντίστασης ή αλλιώς ηλεκτροτομογραφία (ERT). Πρόκειται για ακόμα μια τεχνική μέτρησης της ειδικής αντίστασης η οποία δεν επεμβαίνει στη δομή και τη σύσταση του εδάφους και τα αποτελέσματά της παρέχουν μια πολύ λεπτομερή εικόνα για την κατανομή των τιμών αντίστασης στο υπέδαφος ανά στρώμα και βάθος. Με χρήση πολλαπλών ηλεκτροδίων εδάφους σε διάταξη Schlumberger-Wenner και των κατάλληλων οργάνων μέτρησης, γίνεται λήψη μεγάλου αριθμού μετρήσεων οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε άξονες και μετά από ανάλυση δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής ενός γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους. Η διαδικασία της αντίστροφης κατασκευής του γεωηλεκτρικού μοντέλου βάσει των μετρήσεων αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας για τους M.H. Loke και R.D. Barker [42] [43] [44] και η προσέγγισή τους χρησιμοποιείται ευρέως κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροτομογραφίας.

Το 2009 οι Kumari Sudha et.al. [45] χρησιμοποίησαν τη μέθοδο τομογραφίας εδάφους μέσω της ειδικής του αντίστασης (ERT) σε σύγκριση με τις επεμβατικές μεθόδους γεωτεχνικής ανάλυσης Standard Penetration Test (SPT) και Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) με σκοπό τη διεξαγωγή γεωτεχνικής μελέτης σε δύο τοποθεσίες προτεινόμενες για κατασκευή θερμοηλεκτρικών σταθμών, στο Uttar Pradesh της βόρειας Ινδίας. Για την εφαρμογή της ηλεκτροτομογραφίας πραγματοποίησαν λήψη μετρήσεων για άξονες των 355m όπου χρησιμοποιήθηκαν 72

ηλεκτρόδια σε διάταξη Schlumberger-Wenner με απόσταση 5m μεταξύ τους. Ύστερα από την ανάλυση των μετρήσεων της τεχνικής ERT και την κατασκευή του γεωηλεκτρικού μοντέλου κάθε τοποθεσίας οι ερευνητές προχώρησαν σε σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα των τεχνικών SPT, DCPT και το συμπέρασμα της σύγκρισης ήταν πως η μέθοδος τομογραφίας εδάφους μέσω της ηλεκτρικής του αντίστασης αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική, πιο οικονομική και λιγότερο χρονοβόρα από τις επεμβατικές μεθόδους.

## 2.4 Σχολιασμός

Εξετάζοντας τις δημοσιεύσεις που γίνονται συμπεραίνει κανείς, πως ο τομέας της χρήσης βελτιωτικών υλικών απασχολεί πλέον αρκετά την επιστημονική κοινότητα. Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχουν επεκταθεί αρκετά και είναι αδήριτη ανάγκη να εγκαθίστανται αποτελεσματικά συστήματα γείωσης ακόμα και σε περιορισμένες εκτάσεις. Ήδη από τη δεκαετία του 1960 εξετάστηκε η απόδοση του μπετονίτη, ενός από τα πλέον διαδεδομένα βελτιωτικά υλικά. Για αρκετά χρόνια οι μελέτες ήταν λίγες και περιορίζονταν μόνο γύρω από τη χρήση του μπετονίτη ως βελτιωτικό υλικό. Στα μέσα περίπου της δεκαετίας του 1990 άρχισαν να γίνονται οι πρώτες εκτεταμένες μελέτες και πέρα από τη δυνατότητα μείωσης της αντίστασης, τέθηκε στο επίκεντρο της προσοχής και η αντοχή των υλικών στο χρόνο. Ουσιαστικά, η ιδέα χρήσης χημικών υλικών άνοιξε νέους ορίζοντες εξέλιξης, αφού σε διάφορες χώρες πολλές είναι οι ουσίες με χημική σύσταση, οι οποίες μέχρι πρότινος αποτελούσαν απόβλητα βιομηχανικών διεργασιών. Ως εκ τούτου έγιναν πολλές απόπειρες αυτές οι ουσίες να αποτελέσουν το βασικό υλικό μιγμάτων, που χρησιμοποιούνταν ως βελτιωτικά. Έτσι θα ήταν δυνατόν με ένα πολύ φθηνό υλικό να εκπληρώνεται ο βασικός σκοπός, που είναι η μείωση της αντίστασης γείωσης. Σ' αυτές τις περιπτώσεις λοιπόν, όπου εξετάζονταν χημικές ουσίες, έπρεπε να εξασφαλιστεί ότι οι ουσίες αυτές δε θα αντιδρούσαν χημικά με το έδαφος, ώστε σύντομα να έχουν διαλυθεί, αλλά θα μπορούσαν μεταξύ άλλων να απορροφούν και το νερό του εδάφους, ώστε να διατηρείται η υγρασία και κατ' επέκταση η αντίσταση γείωσης να είναι μικρή.

Στη συνέχεια οι έρευνες στράφηκαν και προς τα φυσικά υλικά. Ουσιαστικά πρόκειται για ουσίες που προέρχονται κατευθείαν από τη φύση, χωρίς να απαιτείται κάποια κατεργασία. Έτσι σε κάθε τόπο μπορούσαν να χρησιμοποιούνται και διαφορετικά υλικά, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα. Η πληθώρα των ερευνών που έχουν γίνει, έχει ως αποτέλεσμα την απόκτηση γνώσεων σχετικά με τα βελτιωτικά υλικά και εν τέλει αν και κατά πόσο ενδείκνυνται να χρησιμοποιούνται για διάφορους τύπους εδαφών.

Πρόσφατα έχουν γίνει βήματα για ακόμα μεγαλύτερη εμβάθυνση της έρευνας στον τομέα των βελτιωτικών υλικών. Πέρα από τη γνώση της συμπεριφοράς τους, εμφανίζεται πλέον η ανάγκη για πρόβλεψη των χαρακτηριστικών τους και της ικανότητάς τους για επίτευξη και διατήρηση χαμηλής αντίστασης γείωσης, με την πάροδο του χρόνου. Η προσπάθεια προσομοίωσης της λειτουργίας τους για μελλοντική πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους είναι πολύ σημαντική, αφού τα υλικά

τοποθετούνται σε τέτοια σημεία των κατασκευών (π.χ. θεμελιακές γειώσεις), όπου η πρόσβαση σ'αυτά για εποπτικό έλεγχο μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα είναι αδύνατη. Πλέον χρησιμοποιούνται τεχνικές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λαμβάνονται, αφενός να χρησιμοποιούνται για να αξιολογούνται τα βελτιωτικά υλικά, αφετέρου για να μπορέσει να εξαχθεί μία μη γραμμική σχέση μεταξύ των παραγόντων, που επηρεάζουν την αντίσταση γείωσης, και την απόδοση των βελτιωτικών υλικών.

Κλείνοντας ο τομέας των βελτιωτικών υλικών φαίνεται να έχει μέλλον καθώς απασχολεί όλο και περισσότερους ερευνητές. Άλλωστε όλο και περισσότερες εκτάσεις χρησιμοποιούνται για εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική αύξηση της έκτασης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, ανεξάρτητα του τύπου του εδάφους, που μπορεί να είναι ακόμα και βραχώδες, πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές ώστε τα συστήματα γείωσης να είναι αποτελεσματικά και να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και η ασφάλεια των ανθρώπων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

#### **3.1 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 δει 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 συμβάλει 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 ζώντων οργανισμών, αλλά η μελέτη και η χρήση τους έχει προχωρήσει πολύ πέρα από τους βιολογικούς οργανισμούς. Ουσιαστικά δημιουργήθηκε μία νέα περιοχή η οποία 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. Αλλά βέβαια μπορούν και χρησιμοποιούν επιπλέον και περίπλοκες μαθηματικές συναρτήσεις και κάθε είδους εργαλεία από τη μαθηματική ανάλυση [46].

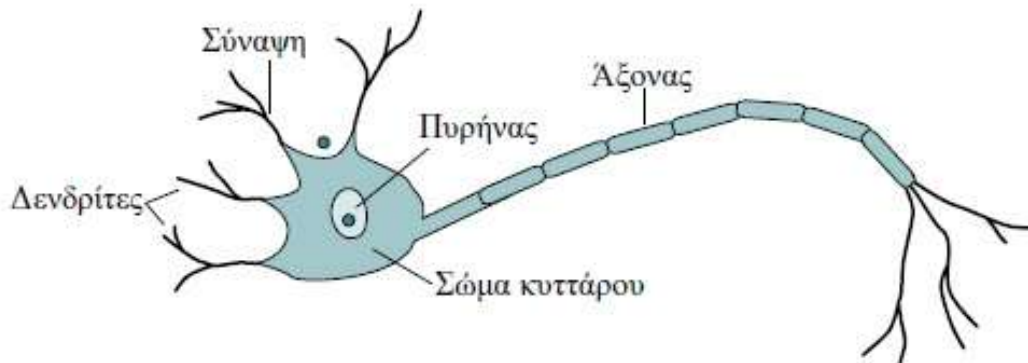
#### **3.2 Βιολογικά νευρωνικά δίκτυα**

Με τον όρο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ) εννοείται κάθε αρχιτεκτονική υπολογισμού, η οποία περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων απλών «νευρωνικών» επεξεργαστών. Με προσεκτική απομίμηση της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν εξοπλισθεί με χαρακτηριστικές ιδιότητες, ανάλογες του εγκεφάλου, όπως είναι η ικανότητα να μαθαίνει από εμπειρίες, να γενικεύει την υπάρχουσα γνώση και να εκτελεί λογικές αφαιρέσεις.

Για να διευκολυνθεί η κατανόηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι χρήσιμη αρχικά η παρουσίαση της δομής των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Ο νευρώνας (ή νευρώνας) είναι το θεμελιώδες δομικό στοιχείο του ανθρώπινου νευρικού συστήματος. Οι νευρώνες είναι ζώντα κύτταρα. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος έχει περίπου  $1,5 \times 10^{10}$  νευρώνες διαφόρων μορφών. Κάθε νευρώνας λαμβάνει σήματα

μέσω περίπου  $10^4$  συνάψεων. Ο εγκέφαλος αποτελείται ουσιαστικά από έναν αριθμό μικρότερων λειτουργικών περιοχών, όπως είναι ο φλοιός κίνησης (motor cortex), ο φλοιός όρασης (visual cortex), ο φλοιός ακοής (auditory cortex), η παρεγκεφαλίδα (cerebellum) κ.α.

Όλοι οι νευρώνες, ανεξάρτητα από το είδος, το σχήμα και το μέγεθός τους, αποτελούνται από τα ίδια βασικά μέρη, τα οποία είναι: το κυτταρικό σώμα, τους δενδρίτες και τον άξονα, όπως φαίνεται και στο σχήμα (3.1).



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού νευρώνα [46].

Το κυτταρικό σώμα είναι το κεντρικό μέρος του νευρώνα και το σχήμα του μπορεί να είναι στρογγυλό, τριγωνικό, σταγονοειδές, μυτερό στα δύο άκρα κλπ., ανάλογα με το είδος του νευρώνα: οπτικό, ακουστικό, αφής, μυϊκό (κίνησης) κ.α. Το μέγεθος του σώματος είναι περίπου  $10-80\mu m$ . Το σώμα περιέχει τον πυρήνα και το αντίστοιχο συνδετικό πρωτόπλασμα. Ο ρυθμός μεταβολισμού του νευρώνα είναι πολύ υψηλός. Η σύνδεση του νευρώνα με τους πολυάριθμους γειτονικούς νευρώνες γίνεται μέσω του άξονα και των συνάψεων. Οι δενδρίτες συνθέτουν την εξωτερική επιφάνεια του νευρώνα και μεταφέρουν πληροφορίες στο σώμα του κυττάρου. Ο άξονας, που αποτελεί το τμήμα εξόδου του νευρικού κυττάρου, είναι μία λεπτή κυλινδρική ίνα, η οποία μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες ηλεκτροχημικά με βάση την κατάσταση του κυττάρου. Οι δενδρίτες και οι άξονες έχουν διάμετρο ολίγων  $\mu m$ . Η δομή αυτή μπορεί να υποστεί σημαντική δένδροποίηση, καθώς τελειώνει στους καταληκτικούς βολβούς (endbulbs) κοντά στους δενδρίτες άλλων νευρώνων. Οι διασυνδέσεις (δηλαδή ο τύπος αλληλεπίδρασης) ενός καταληκτικού βολβού με το κύτταρο, στο οποίο εισβάλλει, είναι αυτό που ονομάστηκε από τον Sherrington «συνάψεις» (synapses) και αποτέλεσε το θεμέλιο της καλούμενης «συναπτολογίας». Ένας παλμός που ταξιδεύει κατά μήκος του άξονα, τερματίζεται στους καταληκτικούς βολβούς και, εάν το επιτρέπουν οι συνθήκες, αναπαράγεται από τον επόμενο νευρώνα της αλυσίδας. Η ταχύτητα της παραγωγής του παλμού κατά μήκος της ίνας του άξονα ισούται προσεγγιστικά με το γινόμενο της συχνότητας με τη διάμετρο και μπορεί σε ορισμένους μυϊκούς νευρώνες να φθάσει μέχρι  $10m/s$ .

Ένας νευρώνας παράγει έξοδο μόνο όταν εμφανιστούν αρκετοί παλμοί στην περιοχή των δενδριτών για ένα μικρό χρονικό διάστημα που ονομάζεται «λανθάνουσα περίοδος άθροισης». Στην πραγματικότητα, κάποιες είσοδοι εμποδίζουν την ενεργοποίηση του κυττάρου, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί, ότι ένας νευρώνας ενεργοποιείται εάν οι ενεργές είσοδοι διέγερσης ξεπερνούν τις ενεργές απαγορευτικές εισόδους κατά μία ποσότητα ίση με την «τιμή κατωφλίου» του κυττάρου. Ένα τμήμα του σώματος, ονομαζόμενο «εκκινητής κορυφής», πραγματοποιεί την πρόσθεση αυτή και τη σύγκριση με το κατώφλι, παράγοντας ένα παλμικό σήμα εξόδου για τις υπάρχουσες καταστάσεις εισόδου. Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής παλμών μέσα σε ένα νευρικό κύτταρο είναι περίπου 500 παλμοί ανά δευτερόλεπτο, ενώ το τυπικό πλάτος ενός νευρικού παλμού είναι περίπου  $100\mu V$  με αποτέλεσμα ο παλμός να πλησιάζει τα  $+30mV$ . Ο χρόνος καθυστέρησης ανάμεσα στη διέγερση του νευρώνα και την παραγωγή του παλμού κυμαίνεται από  $0,1ms$  μέχρι  $1ms$ . Η τιμή του κατωφλίου ενός νευρώνα είναι συνάρτηση του χρόνου. Έτσι π.χ. ύστερα από μια ενεργοποίηση, ο νευρώνας εισέρχεται σε μια απαγορευτική περίοδο κατά τη διάρκεια της οποίας δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί ξανά. Επαναλαμβανόμενες ενεργοποιήσεις αυξάνουν την τιμή του κατωφλίου με αποτέλεσμα το κύτταρο να οδηγείται σε «κόπωση» [47].

### 3.3 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.

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 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).

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. [47].

### **3.4 Τα νευρωνικά δίκτυα και οι υπολογιστές**

Η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων είναι πολύ διαφορετική από αυτή των παραδοσιακών υπολογιστών που περιέχουν έναν επεξεργαστή. Οι γνωστοί υπολογιστές δουλεύουν σειριακά, σύμφωνα με τις πρώτες ιδέες του von Neumann και έχουν την ικανότητα να επιτελούν μερικές εκατοντάδες εντολών που είναι πολύ γνωστές, όπως είναι οι αριθμητικές πράξεις κτλ. Στη διαδικασία εκτέλεσης των εντολών ακολουθούν πιστά ένα εσωτερικό ρολόι.

Από τη φύση τους τα νευρωνικά δίκτυα δε λειτουργούν σειριακά, αλλά με τρόπο που μοιάζει πιο πολύ σε παράλληλο τρόπο λειτουργίας, διότι μία εργασία μοιράζεται στα διάφορα τμήματα του δικτύου, μοιράζεται σε όλους τους επιμέρους νευρώνες. Έτσι λέγεται ότι τα νευρωνικά δίκτυα είναι συστήματα «παράλληλων κατανεμημένων διεργασιών» (“parallel distributed processing”). Αυτό παρέχει μεγάλες ταχύτητες, διότι είναι σαν να υπάρχουν ταυτόχρονα πολλοί επεξεργαστές. Ωστόσο τονίζεται, ότι η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων διαφέρει από αυτήν των παράλληλων επεξεργαστών. Οι απλοί επεξεργαστές των νευρωνικών δικτύων έχουν μεγάλο αριθμό διασυνδέσεων, ο οποίος συνολικά είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των νευρώνων, αφού κάθε νευρώνας έχει πολλές συνδέσεις. Αντίθετα, στους παράλληλους υπολογιστές, οι επεξεργαστές είναι συνήθως περισσότεροι από τις διασυνδέσεις μεταξύ τους και ως προς την πολυπλοκότητά τους ακολουθούν τη μηχανή von Neumann. Τα νευρωνικά δίκτυα διαφέρουν από αυτό, διότι οι μονάδες

τους είναι πολύ πιο απλές και επιτελούν πολύ απλούστερες λειτουργίες, δηλαδή ξέρουν μόνο να αθροίζουν τα σήματα εισόδου και να τροποποιούν τα βάρη των διασυνδέσεων. Επίσης, οι νευρώνες λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο και δε χρειάζονται συγχρονισμό. Αυτό δίνει στα νευρωνικά δίκτυα την ευρωστία και ανοχή σε σφάλματα.

Η λεγόμενη «ανοχή στα σφάλματα» είναι μία νέα ιδιότητα για τα νευρωνικά δίκτυα. Αυτό σημαίνει ότι, αν ένα μικρό τμήμα του δικτύου χαλάσει, το υπόλοιπο δίκτυο συνεχίζει να λειτουργεί, έστω και με ένα μικρό σφάλμα. Πρακτικά, αν τα δεδομένα ενός προβλήματος σε ένα μικρό μέρος τους είναι εσφαλμένα, το δίκτυο βγάζει τα σωστά αποτελέσματα με ένα μικρό σφάλμα. Αντιθέτως, οι υπολογιστές δουλεύουν τελείως διαφορετικά. Παραδείγματος χάρη αν από λάθος σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα ζητηθεί να γίνει μια διαίρεση μιας ποσότητας δια του μηδενός, τότε ο υπολογιστής σταματά αμέσως την εκτέλεση του προγράμματος και δίνει μήνυμα σφάλματος, έστω και αν δεν υπάρχει κανένα άλλο σφάλμα στο πρόγραμμα. Αντίθετα ένα νευρωνικό δίκτυο καταλαβαίνει ότι μια τέτοια διαίρεση είναι αδύνατη, την ξεπερνά με κάποιο σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα και συνεχίζει τη λύση του προβλήματος. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι μία ιδέα που δεν συναντάται σε άλλες συνήθειες υπολογιστικές μηχανές. Μερικές φορές το στοιχείο αυτό είναι επιθυμητό και λύνει το πρόβλημα σχετικά εύκολα, ενώ με άλλες μεθόδους μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρο.

**Πίνακας 3.1: Ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των νευρωνικών δικτύων και του υπολογιστή με τη φιλοσοφία του von Neumann.**

	Νευρωνικά δίκτυα	Υπολογιστής
1	Εργάζονται με σύγχρονο τρόπο λειτουργίας	Εργάζεται με ασύγχρονο τρόπο λειτουργίας
2	Παράλληλη επεξεργασία	Σειριακή επεξεργασία
3	Εκπαιδεύονται με παραδείγματα αλλάζοντας τα βάρη των συνδέσεών τους	Προγραμματίζεται με εντολές λογικού χαρακτήρα (if-then)
4	Η μνήμη, τα δίκτυα και οι μονάδες λειτουργίας συνυπάρχουν	Η μνήμη και επεξεργασία πληροφορίας χωρίζονται
5	Ανοχή στα σφάλματα	Καμία ανοχή στα σφάλματα
6	Αυτό-οργάνωση κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης	Εξαρτάται εξολοκλήρου από το προσφερόμενο λογισμικό
7	Η πληροφορία αποθηκεύεται στα βάρη των συνδέσεων	Η πληροφορία αποθηκεύεται σε συγκεκριμένες διευθύνσεις μνήμης
8	Ο χρόνος ενός κύκλου είναι της τάξης των ms.	Ο χρόνος ενός κύκλου είναι της τάξης του ns.

Ακόμα, οι πληροφορίες που αποθηκεύονται σ' ένα νευρωνικό δίκτυο μοιράζονται σ' ένα μεγάλο αριθμό μονάδων, δηλαδή σε πολλούς νευρώνες. Αντίθετα,

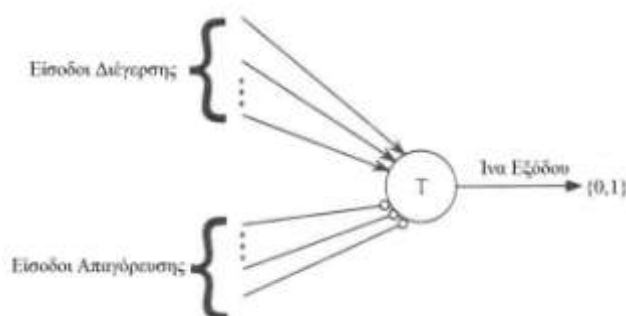
όταν αποθηκεύονται στοιχεία στη μνήμη του υπολογιστή, κάθε πληροφορία σε δυαδική μορφή τοποθετείται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία.

Εντέλει, όταν ένα νευρωνικό δίκτυο λύνει επιτυχώς ένα πρόβλημα, είναι δύσκολη η κατανόηση του ακριβούς τρόπου επίλυσης, παρόλο που η μαθηματική διαδικασία είναι αντιληπτή. Το νευρωνικό δίκτυο δε «σπάει» το πρόβλημα σε πολλά μικρά λογικά κομμάτια, αλλά το λύνει με μία «ολιστική» μέθοδο, πράγμα που είναι δύσκολο για το ανθρώπινο μυαλό να το κατανοήσει με απλή λογική. Ωστόσο, η λύση επαληθεύεται εύκολα και μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία η μέθοδος αυτή [46].

### 3.5 Μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων

#### 3.5.1. 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 μία απλή παρουσίαση δύο καταστάσεων της λογικής διαδικασίας που λαμβάνει χώρα σ' αυτό. Το βασικό μοντέλο νευρώνα McCullochPitts έχει τη μορφή του ακόλουθου σχήματος.

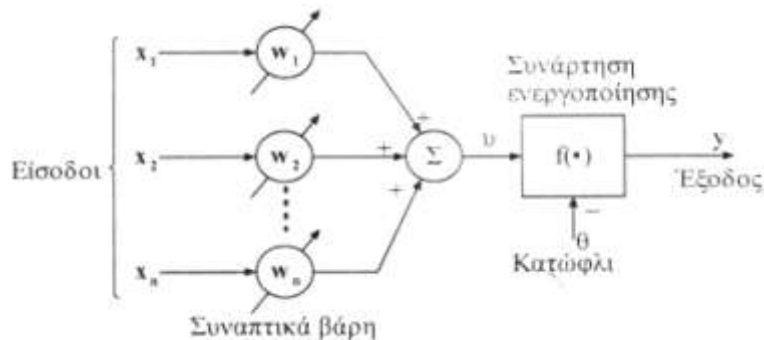


Σχήμα 3.2: Μοντέλο νευρώνα McCulloch-Pitts [47].

Η ίνα 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 μια 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 [47].

### 3.5.2. Το βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα

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



Σχήμα 3.3: Βασικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα [47].

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

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

Κάθε κλάδος διασύνδεσης έχει ένα βάρος (weight, strength) 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 πολλαπλασιαζόμενα με τα αντίστοιχα βάρη των συνάψεων. Συνεπώς ο κόμβος άθροισης είναι μια μονάδα γραμμικού συνδυασμού. Τέλος, η συνάρτηση ενεργοποίησης (η οποία ονομάζεται 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  $\theta$  που εφαρμόζεται εξωτερικά και πρακτικά υποβιβάζει την καθαρή είσοδο στη συνάρτηση ενεργοποίησης. Φυσικά, αν ο όρος πόλωσης  $\theta$  είναι αρνητικός, το σήμα εισόδου ενισχύεται. Από το παραπάνω σχήμα ο νευρώνας περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (3.1)$$

$$y = f(u - \theta), \theta > 0 \quad (3.2)$$

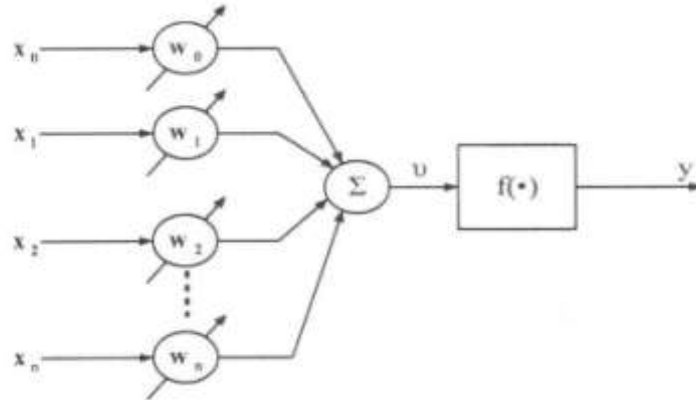
Όπου  $x_i$  είναι τα σήματα εισόδου,  $w_i$  είναι τα συναπτικά βάρη του νευρώνα, ( $i=1,2,\dots,n$ ),  $u$  είναι η είσοδος του γραμμικού συνδυαστή,  $\theta$  είναι το «κατώφλι»,  $f(\dots)$  είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης και  $y$  είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα.

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

$$u = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (3.3)$$

$$y = f(u) \quad (3.4)$$

Το μοντέλο του νευρώνα παίρνει πλέον την παρακάτω μορφή:



**Σχήμα 3.4:** Το βασικό μοντέλο του νευρώνα με το κατώφλι ή την πόλωση συμπεριλαμβανόμενα στο σύνολο των κανονικών εισόδων [47].

Ο νευρώνας που παρίσταται από το μοντέλο των προηγούμενων σχημάτων ονομάζεται στατικό, 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 [47] [48].

### 3.5.3. Το απλό Perceptron

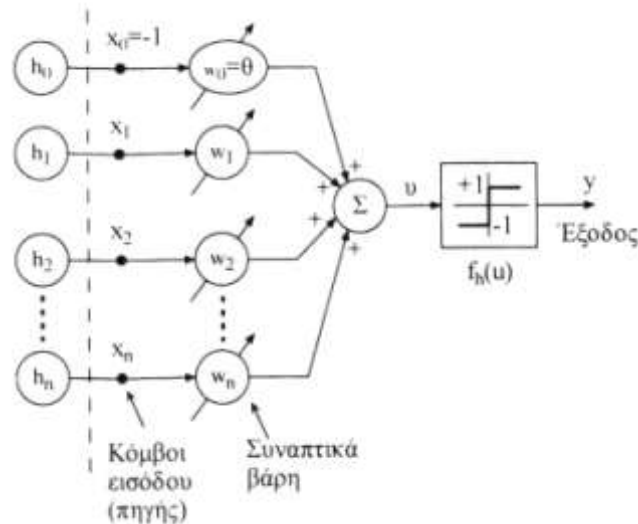
Το νευρωνικό δίκτυο Perceptron αναπτύχθηκε από τον Rosenblatt και αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες σχεδίασης και κατασκευής ευφυών συστημάτων με δυνατότητες αυτομάθησης. Είναι το απλούστερο νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση γραμμικά διαχωρίσιμων προτύπων, τα οποία διαχωρίζονται 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 (3.5) 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:

$$y(t) = f_h(v(t)) \quad (3.5)$$

$$v(t) = \sum_{i=0}^n w_i x_i = \mathbf{w}^T(t) \mathbf{x}(t) \quad (3.6)$$

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



Σχήμα 3.5: Μοντέλο απλού Perceptron με την πόλωση συμπεριλαμβανόμενη στο σύνολο των κανονικών εισόδων [47].

### 3.5.4. Γραμμικός νευρώνας κατά Wiener-Hopf

Πρόκειται για έναν απλό γραμμικό νευρώνα, ο οποίος εν αντιθέσει με το απλό Perceptron δεν έχει τη βηματική συνάρτηση.

Σ' αυτόν τον απλό νευρώνα απαιτείται να βρεθεί το βέλτιστο σύνολο βαρών  $w$  ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά ανάμεσα στην έξοδο του συστήματος  $y$  και την επιθυμητή έξοδο  $d$  με βάση τη μέση τετραγωνική απόσταση:

$$J = \frac{1}{2} E[e^2] \quad (3.7)$$

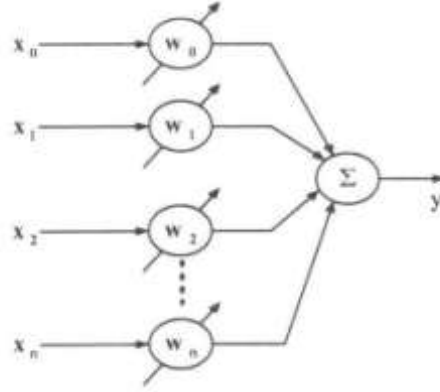
Όπου  $E$  είναι ο τελεστής της στατιστικής αναμενόμενης τιμής και  $e$  το σφάλμα  $d-y$ .

Η λύση στο πρόβλημα αυτό παρέχεται από ένα σύστημα εξισώσεων, που ονομάζεται σύστημα εξισώσεων Wiener-Hopf. Σύμφωνα με τις μελέτες των Wiener και Hopf τα βέλτιστα βάρη του γραμμικού νευρώνα ορίζονται από το σύνολο των εξισώσεων:

$$r_{dx}(k) = \sum_{j=1}^n w_{oj} \cdot r_x(j, k) \quad \text{για } k = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

Με  $w_{ok}$  τη βέλτιστη τιμή του βάρους  $w_k$ ,  $r_{dx}(k)$  τη συνάρτηση συσχέτισης ανάμεσα στην επιθυμητή απόκριση  $d$  και στο σήμα εξόδου  $y$  και  $r_x(j, k)$  τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του συνόλου των σημάτων εισόδου.

$$r_{dx} = \frac{\sum_i (d_i - \bar{d})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_i (d_i - \bar{d})^2 \sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.6: Γραμμικός νευρώνας κατά Wiener-Hopf [47].

Για να επιλυθεί το σύστημα αυτό, απαιτείται ο υπολογισμός του αντιστρόφου ενός πίνακα διαστάσεων  $n \times n$  που περιέχει τις διαφορετικές τιμές της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Η αντιστροφή αυτή μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή της μεθόδου της απότομης καθόδου (steepest descent). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή τα βάρη μεταβάλλονται χρονικά και οι τιμές τους ρυθμίζονται με επαναληπτικό τρόπο με βάση την κλίση της επιφάνειας σφάλματος, έτσι ώστε σταδιακά να μετακινηθούν προς τη βέλτιστη λύση. Συνεχώς κατά τη διαδικασία αυτή αναζητείται το ελάχιστο σημείο της επιφάνειας σφάλματος. Η μεταβολή στο βάρος  $w_k(n)$  στην επανάληψη  $n$  είναι:

$$\Delta w_k(n) = -\eta \cdot \nabla_{w_k} J(n) \quad \text{για } k = 1, 2, \dots, n \quad (3.10)$$

Όπου  $\eta$  είναι μια θετική σταθερά που λέγεται ρυθμός μάθησης.

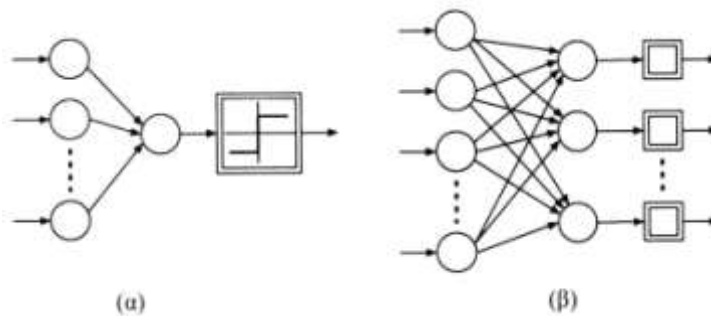
Επομένως η νέα τιμή του βάρους θα είναι:

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \Delta w_k(n) = w_k(n) - \eta \cdot \nabla_{w_k} J(n) \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (3.11)$$

Η μέθοδος της απότομης καθόδου έχει ένα σημαντικό περιορισμό, ο οποίος έγκειται στο ότι είναι απαραίτητη η γνώση των συσχετιστικών συναρτήσεων  $r_{dx}(k)$ . Όταν ο νευρώνας λειτουργεί σε άγνωστο περιβάλλον, αυτές δεν είναι γνωστές και ως εκ τούτου η λύση περιορίζεται στη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων, όπως ο αλγόριθμος των ελαχίστων τετραγώνων ή κανόνας δέλτα.

### 3.5.5. Μηχανές ADALINE / MADALINE

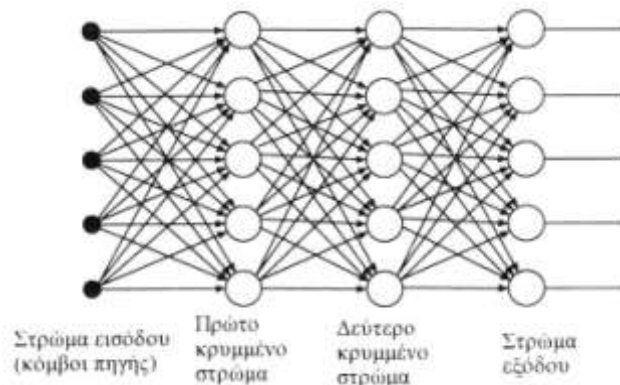
Τα δύο αυτά πρότυπα παρουσιάστηκαν το 1959 από τον Widrow. Το adaline προέρχεται από το adaptive linear neuron, ενώ το madaline από το multilayer adaline. Το πρότυπο adaline έχει πολλές εισόδους και μία έξοδο με κάθε είσοδο να έχει το δικό της βάρος. Επειδή η επιθυμητή απόκριση είναι γνωστή, στην έξοδο 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  $\theta$ , 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 3.7: Τοπολογία (α) ADALINE και (β) MADALINE [47].

### 3.5.6. 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 χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, ο οποίος στηρίζεται στον κανόνα μάθησης διόρθωσης σφάλματος.



Σχήμα 3.8: Πολυεπίπεδο Perceptron με δύο κρυμμένα επίπεδα [47].



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) σύμφωνα με το οποίο:

«Δοθείσης οποιασδήποτε συνεχούς συνάρτησης:

$$F : [0,1]^n \rightarrow \mathbb{R}^m, F(x) = y$$

Όπου  $I=[0,1]^n$  είναι ο μοναδιαίος  $n$ -διάστατος κύβος, η  $F$  μπορεί να προσεγγιστεί επακριβώς με ένα νευρωνικό δίκτυο προστροφοδότησης (perceptron) τριών στρωμάτων που έχει  $n$  κόμβους στο επίπεδο εισόδου  $x$ ,  $2n+1$  κόμβους στο μεσαίο (κρυμμένο) επίπεδο και  $m$  κόμβους στο επίπεδο εξόδου» [47].

### 3.6 Κατηγοριοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Τα ΤΝΔ με βάση την επιθυμητή συμπεριφορά που χρειάζεται να παρουσιάσουν διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες [49].

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

**Μοντέλο μνήμης συμφραζομένων:** Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι το δίκτυο Hopfield.

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

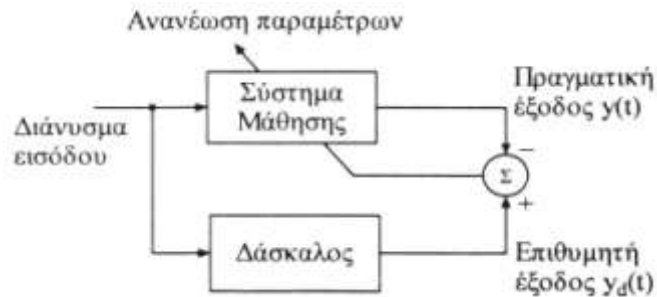
Ανάλογα με την τοπολογία και τη δομή των ΤΝΔ μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

- 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 αυτή ως δάσκαλος ή επόπτης, για να διορθώσει το δίκτυο, όταν αυτό αποτυγχάνει να δώσει τη σωστή απάντηση σε μία κατάλληλη είσοδο.



Σχήμα 3.9: Δομή επιβλεπόμενης μάθησης [47].

Η εκμάθηση με επίβλεψη είναι μία προσέγγιση μάθησης μίας απεικόνισης του χώρου εισόδου  $n$  διαστάσεων στο χώρο εξόδου  $m$  διαστάσεων. Η απεικόνιση είναι μία συναρτησιακή προσέγγιση ανάμεσα στο 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.

- **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.

### 3.7 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.

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 υπόψη, ότι μεγάλος αριθμός νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο μπορεί να οδηγήσει σε απομνημόνευση των συνόλων εκπαίδευσης με αποτέλεσμα την ανικανότητα του δικτύου να κάνει επαρκή γενίκευση του προβλήματος. Αντίθετα, ένα πολύ μικρός αριθμός νευρώνων εμποδίζει την αποτελεσματική ταξινόμηση προτύπων. Τέλος όσον αφορά στο χρόνο εκπαίδευσης του δικτύου 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 [50].

### 3.8 Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης

Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης (BP) είναι επέκταση του κανόνα δέλτα που χρησιμοποιείται στο απλό perceptron ή το νευρωνικό δίκτυο ADALINE. Δηλαδή είναι αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης, ο οποίος ανανεώνει τα συναπτικά βάρη,

ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των επιθυμητών και πραγματικών αποκρίσεων μετά από την παρουσίαση κάθε προτύπου στην είσοδο του δικτύου. Η επέκταση συνίσταται στη χρήση της πραγματικής εξόδου κάθε νευρώνα μετά την εφαρμογή της συνάρτησης ενεργοποίησης. Η διαδικασία απαρτίζεται από δύο περάσματα σε όλα τα επίπεδα του δικτύου, τα οποία καλούνται ευθύ και ανάστροφο πέρασμα και τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα παρακάτω [47].

Έστω λοιπόν ότι υπάρχει ένα σύνολο εκπαίδευσης (training set) που αποτελείται από  $N$  ζεύγη  $[\tilde{x}, \tilde{d}]$ , όπου  $\tilde{x}$  είναι το διάνυσμα εισόδου (πρότυπο) και  $\tilde{d}$  το διάνυσμα των επιθυμητών εξόδων για το συγκεκριμένο πρότυπο.

Το σφάλμα στην έξοδο ενός νευρώνα εξόδου  $j$  για τη  $n$ -οστή επανάληψη όπου εφαρμόζεται η είσοδος  $\tilde{x}(n)$  δίνεται από τη σχέση:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (3.12)$$

Όπου  $d$  είναι η επιθυμητή έξοδος και  $y$  η πραγματική έξοδος για το νευρώνα  $j$  και τη  $n$ -οστή επανάληψη.

Το τετραγωνικό σφάλμα γι' αυτήν την περίπτωση ορίζεται ως:

$$\frac{1}{2} e_j^2(n) \quad (3.13)$$

Και το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων όλων των νευρώνων εξόδου για τη  $n$ -οστή επανάληψη ισούται με:

$$G(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (3.14)$$

Όπου το σύνολο όλων των νευρώνων συμβολίζεται με  $C$ . Επομένως, αφού για τη  $n$ -οστή επανάληψη το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων δίνεται από την παραπάνω σχέση, για όλα τα  $N$  πρότυπα το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων θα είναι:

$$G_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N G(n) = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (3.15)$$

Οι δύο ποσότητες  $G$  και  $G_{av}$  εξαρτώνται από τα βάρη μεταξύ των συνδέσεων των νευρώνων και τις πολώσεις. Η διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής των σφαλμάτων  $G_{av}$  μέσω της κατάλληλης προσαρμογής των ελεύθερων παραμέτρων του δικτύου (συναπτικά βάρη και πολώσεις). Η προσαρμογή των παραμέτρων πραγματοποιείται σύμφωνα με τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την εισαγωγή του εκάστοτε προτύπου στο δίκτυο. Ουσιαστικά η μέση τιμή των μεταβολών όλων των βαρών είναι μια προσεκτική εκτίμηση της πραγματικής μεταβολής των βαρών, που προκύπτει από τη διαδικασία ελαχιστοποίησης του  $G_{av}$ . Η παρουσίαση όλων των προτύπων στο ΤΝΔ κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης αποτελεί μία εποχή.

Κάθε νευρώνας εξόδου  $j$  τροφοδοτείται από τα σήματα εξόδου όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου, άρα το σήμα  $u_j(n)$  δίνεται από τη σχέση:

$$u_j(n) = \sum_{i=0}^k w_{ji}(n) y_i(n) \quad (3.16)$$

Όπου  $k$  είναι το σύνολο όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου και  $y_i(n)$  η έξοδος του  $i$ -οστού νευρώνα του προηγούμενου επιπέδου.

Το βάρος  $w_{j0}$  ( $i=0$ ) είναι η πόλωση και αντιστοιχεί σε εξωτερική είσοδο  $y_0 = -1$ .

Ως εκ τούτου το σήμα εξόδου  $y_j(n)$  του νευρώνα εξόδου κατά τη  $n$ -οστή επανάληψη θα δίνεται από τη σχέση:

$$y_j(n) = \varphi(u_j(n)) \quad (3.17)$$

Σε κάθε επανάληψη πραγματοποιείται σύμφωνα με τον αλγόριθμο μία διόρθωση  $\Delta w_{ji}(n)$  στο βάρος  $w_{ji}(n)$  η οποία είναι ανάλογη της κλίσης  $\frac{\partial G(n)}{\partial w_{ji}(n)}$ .

Σύμφωνα με τον κανόνα της αλυσίδας η παραπάνω μερική παράγωγος ισούται με:

$$\frac{\partial G(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial G(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial u_j(n)} \frac{\partial u_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.18)$$

Διαφορίζοντας την εξίσωση (3.14) ως προς  $e_j(n)$  προκύπτει:

$$\frac{\partial G(n)}{\partial e_j(n)} = e_j(n) \quad (3.19)$$

Διαφορίζοντας την εξίσωση (3.12) ως προς  $y_j(n)$  προκύπτει:

$$\frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} = -1 \quad (3.20)$$

Ομοίως η εξίσωση (3.17) γίνεται με διαφύριση ως προς  $u_j(n)$ :

$$\frac{\partial y_j(n)}{\partial u_j(n)} = \varphi'(u_j(n)) \quad (3.21)$$

Τέλος η εξίσωση (3.16) γίνεται με διαφύριση ως προς  $w_{ji}(n)$ :

$$\frac{\partial u_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} = y_i(n) \quad (3.22)$$

Με δεδομένο αυτές τις σχέσεις ο κανόνας δέλτα που περιγράφεται στη σχέση (3.18) γίνεται:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial G(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.23)$$

Οπότε λαμβάνεται τελικά η εξής σχέση για τη διόρθωση των βαρών:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (3.24)$$

Όπου η τοπική κλίση  $\delta_j(n)$  ορίζεται ως:

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial G(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial u_j(n)} = e_j(n) * \varphi'(u_j(n)) \quad (3.25)$$

Ο σημαντικότερος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η αναπροσαρμογή των βαρών  $\Delta w_{ji}(n)$  είναι το σφάλμα  $e_j(n)$  του νευρώνα  $j$ . Επομένως, προκύπτουν δύο περιπτώσεις:

➤ Έστω ότι ο νευρώνας  $j$  είναι νευρώνας εξόδου: η έξοδος του νευρώνα είναι γνωστή, επομένως αρκεί να υπολογιστεί μόνο το σφάλμα  $e_j(n)$ .

➤ Έστω ότι ο νευρώνας  $j$  αποτελεί εσωτερικό κόμβο του νευρωνικού δικτύου: σ' αυτήν την περίπτωση τα σφάλματα εξόδου υπολογίζονται με έμμεσο τρόπο με τον αλγόριθμο της αντίστροφης προώθησης των σημάτων σφάλματος διαμέσου του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει τη συμμετοχή κάθε νευρώνα στο σφάλμα εξόδου και κατ' επέκταση υπολογίζει την αναπροσαρμογή του βάρους που πρέπει να γίνει. Εξαιτίας του ότι το σφάλμα για κάθε νευρώνα καθορίζεται αναδρομικά σε σχέση με τα σφάλματα όλων των νευρώνων με τους οποίους αυτός συνδέεται ο αλγόριθμος είναι αρκετά περίπλοκος. Πιο συγκεκριμένα, για έναν νευρώνα  $i$  του πρώτου κρυμμένου επιπέδου από το επίπεδο εξόδου η διόρθωση  $\Delta w_{i1}(n)$  δίνεται με βάση τον κανόνα δέλτα από την εξής σχέση:

$$\Delta w_{i1}(n) = -\eta \frac{\partial G(n)}{\partial w_{i1}(n)} = -\eta \frac{\partial G(n)}{\partial y_i(n)} \frac{\partial y_i(n)}{\partial u_i(n)} \frac{\partial u_i(n)}{\partial w_{i1}(n)} \quad (3.26)$$

Για το νευρώνα  $i$  ορίζεται η τοπική κλίση από τη σχέση:

$$\delta_i(n) = \frac{\partial G(n)}{\partial y_i(n)} \frac{\partial y_i(n)}{\partial u_i(n)} \quad (3.27)$$

Με βάση τη σχέση (3.14) έπεται ότι:

$$\frac{\partial G(n)}{\partial y_i(n)} = \sum_j e_j(n) \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_i(n)} = \sum_j e_j(n) \frac{\partial e_j(n)}{\partial u_j(n)} \frac{\partial u_j(n)}{\partial y_i(n)} \quad (3.28)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial e_j(n)}{\partial u_j(n)} = -\varphi'(u_j(n)) \quad (3.29)$$

Με παραγωγή της (3.16) ως προς  $y_j(n)$  προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial u_j(n)}{\partial y_i(n)} = w_{ji}(n) \quad (3.30)$$

Από αντικατάσταση των (3.25) και (3.29)-(3.30) στην (3.28) προκύπτει η εξής σχέση:

$$\frac{\partial G(n)}{\partial y_i(n)} = -\sum_j e_j(n) * \varphi'(u_j(n)) * w_{ji}(n) = -\sum_j \delta_j(n) * w_{ji}(n) \quad (3.31)$$

Για το νευρώνα  $i$  αυτού του κρυμμένου επιπέδου ισχύουν τα εξής:

$$y_i(n) = \varphi_i(u_i(n)) \quad (3.32)$$

$$u_i(n) = \sum_{s=0}^q w_{is}(n) y_s(n) \quad (3.33)$$

όπου  $q$  είναι το σύνολο όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου και  $y_s$  η έξοδος του  $s$ -οστού νευρώνα του προηγούμενου επιπέδου.

Με παραγωγή των σχέσεων (3.32) και (3.33) ως προς  $u_i(n)$  και ως προς  $w_{is}(n)$  αντίστοιχα προκύπτουν ότι:

$$\frac{\partial y_i(n)}{\partial u_i(n)} = \varphi'(u_i(n)) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial u_i(n)}{\partial w_{is}(n)} = y_s(n) \quad (3.35)$$

Με βάση τις σχέσεις (3.34) και (3.35) σε συνδυασμό με τη σχέση (3.31) η σχέση (3.27) γίνεται:

$$\delta_i(n) = \varphi'(u_i(n)) * \sum_j \delta_j(n) w_{ji}(n) \quad (3.36)$$

Δηλαδή η κλίση  $\delta_i(n)$  εξαρτάται από τη συνάρτηση ενεργοποίησης μόνο του νευρώνα  $i$  και από το άθροισμα των γινομένων των τοπικών κλίσεων  $\delta$  του επόμενου επιπέδου με τα αντίστοιχα βάρη που συνδέουν το νευρώνα  $i$  με το επίπεδο αυτό.

Τέλος, η διόρθωση του σφάλματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta w_{is}(n) = \eta \delta_i(n) y_s(n) \quad (3.37)$$

Σε κάθε περίπτωση η διόρθωση του βάρους που συνδέει το νευρώνα  $i$  με το νευρώνα  $j$  του επόμενου επιπέδου μετά από την εφαρμογή στην είσοδο του  $n$ -οστού προτύπου εκπαίδευσης δίνεται από τη σχέση (3.13), από την οποία η τοπική κλίση  $\delta$  εξαρτάται από το αν ο νευρώνας  $j$  είναι νευρώνας εξόδου ή ανήκει σε κρυμμένο επίπεδο.

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου οπίσθιας τροφοδότησης σφάλματος (back-propagation) αρχικά αρχικοποιούνται τα βάρη και οι πολώσεις σε μικρές τυχαίες τιμές στο διάστημα  $[-1,1]$ . Ακολουθούν δύο είδη περασμάτων όσον αφορά στην εκτέλεση των υπολογισμών: το πέρασμα προς τα εμπρός (forward pass) και το πέρασμα αντίστροφης φοράς (reverse pass).

Στη διαδικασία του ευθέως περάσματος όλα τα βάρη των συνδέσεων παραμένουν αναλλοίωτα και υπολογίζονται οι εξοδοί όλων των νευρώνων. Το σήμα εξόδου του κάθε νευρώνα υπολογίζεται από τις σχέσεις (3.32) και (3.33), ενώ όταν ο νευρώνας ανήκει στο πρώτο επίπεδο, ισχύει ότι:

$$y(n) = x(n) \quad (3.38)$$

Για κάθε είσοδο του διανύσματος εισόδου  $\tilde{x}$ .

Πρακτικά το πέρασμα αυτό ξεκινάει από το πρώτο επίπεδο, όπου εισάγεται το διάνυσμα εισόδου, υπολογίζοντας όλα τα σήματα εξόδου των νευρώνων με βάση τις ως άνω σχέσεις και συνεχίζει στα επόμενα επίπεδα του δικτύου, μέχρι να φτάσει τελικά στο επίπεδο εξόδου και να υπολογίσει τελικά την έξοδο του δικτύου μαζί με το σφάλμα του κάθε νευρώνα.

Αντιθέτως, το αντίστροφο πέρασμα ξεκινά από το επίπεδο εξόδου περνώντας τα σήματα σφάλματος προς τα πίσω και υπολογίζοντας αναδρομικά την τιμή της τοπικής κλίσης για κάθε νευρώνα. Έτσι αναπροσαρμόζονται τα βάρη μεταξύ των συνδέσεων σύμφωνα με τον κανόνα δέλτα. Στη συνέχεια, μέσω των τοπικών κλίσεων υπολογίζονται οι αντίστοιχες τοπικές κλίσεις για τους νευρώνες του προτελευταίου επιπέδου και έτσι συνεχίζεται η διαδικασία και για τα υπόλοιπα επίπεδα φτάνοντας στο πρώτο επίπεδο του δικτύου.

Η διαδικασία αυτή με το ευθύ και αντίστροφο πέρασμα πραγματοποιείται για κάθε πρότυπο του συνόλου εκπαίδευσης και όταν εκτελεστεί για όλα τα πρότυπα εκπαίδευσης, τότε λέγεται ότι έχει πραγματοποιηθεί μία εποχή.

### 3.8.1. Συνάρτηση ενεργοποίησης και κορεσμός

Για να υπολογιστεί η τοπική κλίση κάθε νευρώνα, πρέπει όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εξισώσεις να μπορεί να οριστεί και να είναι γνωστή η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης ενεργοποίησης, επομένως πρέπει να επιλεγεί μία συνεχής και παραγωγίσιμη συνάρτηση. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Σημειώνεται όμως ότι μερικές από αυτές δεν πληρούν το κριτήριο της συνέχειας και παραγωγισιμότητας. Επίσης σε γενικές γραμμές οι συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι γνησίως αύξουσες όπου ισχύει (με εξαίρεση τη γραμμική συνάρτηση)<sup>2</sup> [48] [47]:

$$\lim_{v \rightarrow -\infty} f(v) = 0 \quad \text{ή} \quad \lim_{v \rightarrow -\infty} f(v) = -1$$

$$\lim_{v \rightarrow \infty} f(v) = 1$$

Οι πιο συνήθεις συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι οι:

Γραμμική συνάρτηση

$$f(v) = \lambda v \tag{3.39}$$

Όπου  $\lambda$  είναι η κλίση της συνάρτησης.

Βηματική συνάρτηση

$$f(v) = \begin{cases} 1 & \text{αν } v \geq 0 \\ 0 & \text{αν } v < 0 \end{cases} \tag{3.40}$$

<sup>2</sup> Θεωρείται ακόμα ότι  $v = u - \theta$



Ο αντίστοιχος νευρώνας παράγει στην έξοδό του μία εκ των δύο τιμών ανάλογα με την τιμή του κατωφλίου  $\theta$ . Τότε ο νευρώνας έχει τις εξισώσεις:

$$v = \sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta \quad (3.41)$$

$$y = \begin{cases} 1, & v \geq 0 \\ 0, & v < 0 \end{cases} \quad (3.42)$$

Αυτό είναι το γνωστό μοντέλο McCulloch-Pitts που έχει αναφερθεί παραπάνω.

#### Κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση

$$f(v) = \begin{cases} 0, & v \leq 0 \\ v, & 0 < v < 1 \\ 1, & v \geq 1 \end{cases} \quad (3.43)$$

Η συνάρτηση αυτή παριστά ένα γραμμικό ενισχυτή με κορεσμό και μεταπίπτει στη συνάρτηση κατωφλίου εάν η απολαβή (ενίσχυση) γίνει πάρα πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη).

#### Σιγμοειδής συνάρτηση

Αυτή η συνάρτηση είναι η πιο ευρύτατα χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποίησης και μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι με τη λογιστική συνάρτηση:

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda v}} \quad (3.44)$$

Όπου  $\lambda$  είναι η «παράμετρος κλίσης» της σιγμοειδούς συνάρτησης.

Οι παραπάνω συναρτήσεις ενεργοποίησης παίρνουν τιμές μεταξύ 0 και 1, δηλαδή  $0 \leq f(v) \leq 1$ . Αν είναι επιθυμητό οι τιμές να βρίσκονται στο διάστημα  $[-1, +1]$ , τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής συναρτήσεις:

#### Συνάρτηση κατωφλίου (συνάρτηση προσήμου)

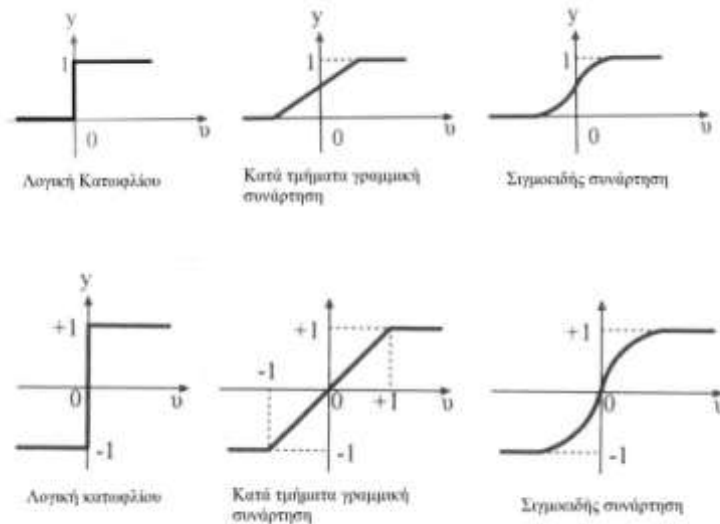
$$f(v) = \begin{cases} -1, & v \leq 0 \\ v, & v = 0 \\ 1, & v > 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

#### Κατά τμήματα γραμμική

$$f(v) = \begin{cases} -1, & v \leq -1 \\ v, & -1 < v < 1 \\ 1, & v \geq 1 \end{cases} \quad (3.46)$$

Σιγμοειδής συνάρτηση (υπερβολική εφαπτομένη).

$$f(v) = \tanh\left(\frac{v}{2}\right) = \frac{1 - e^{-v}}{1 + e^{-v}} \quad (3.47)$$



**Σχήμα 3.10:** Συναρτήσεις ενεργοποίησης.

Προτείνεται να χρησιμοποιούνται μη γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποίησης, ώστε να είναι εφικτή η επίλυση προβλημάτων μη γραμμικής συμπεριφοράς. Ωστόσο με τη χρήση αυτών των συναρτήσεων υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης κορεσμού των τιμών της συνάρτησης ενεργοποίησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι παρόλο που το πεδίο ορισμού είναι όλο το σύνολο των πραγματικών αριθμών ή ένα υποσύνολο αυτού, το πεδίο τιμών είναι πολύ μικρότερο. Παραδείγματος χάρη κατά τη χρήση σιγμοειδών συναρτήσεων διαπιστώνεται, ότι το πεδίο ορισμού της συνάρτησης είναι όλο το  $\mathbb{R}$ , ενώ το πεδίο τιμών είναι ο  $[-1,1]$ . Εκτός του διαστήματος  $[-1,1]$  η συνάρτηση συμπεριφέρεται έντονα μη γραμμικά. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, γίνεται κανονικοποίηση των τιμών των μεταβλητών εισόδου, ώστε η είσοδος να λαμβάνει μία τιμή μεταξύ δύο ορίων  $a$  και  $b$ . Για να γίνει η κανονικοποίηση ορίζονται αρχικά οι ακραίες τιμές  $x_{min}$  και  $x_{max}$  της μεταβλητής εισόδου. Έπειτα ορίζοντας τις δύο επιθυμητές ακραίες τιμές  $a$  και  $b$ , τότε οι τιμές  $x$  της μεταβλητής εισόδου μετασχηματίζονται στις κανονικοποιημένες τιμές  $\hat{x}$  ως εξής:

$$\hat{x} = a + \frac{b - a}{x_{max} - x_{min}} * (x - x_{min}) \quad (3.48)$$

Διαφορετικά οι μεταβλητές εισόδου μπορούν να κανονικοποιηθούν μέσω της μέσης τιμής  $\mu$  και της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ , ωστόσο δεν εξασφαλίζεται ότι δεν υπάρχουν τιμές στην έντονα μη γραμμική περιοχή. Οι κανονικοποιημένες τιμές είναι:

$$\hat{x} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.49)$$

### 3.8.2. Αρχικοποίηση βαρών

Οι μέθοδοι που βασίζονται στον υπολογισμό της τοπικής κλίσης είναι πολύ ευαίσθητες όσον αφορά στην επιλογή των αρχικών τιμών των συναπτικών βαρών μεταξύ των νευρώνων. Παραδείγματος χάρη αν οι τιμές βρίσκονται κοντά σε ένα τοπικό ελάχιστο, τότε θα υπάρχει πολύ γρήγορη σύγκλιση, ενώ, αν βρίσκονται σε «επίπεδη» περιοχή, τότε αντίθετα η σύγκλιση θα είναι πολύ αργή.

Μία ασφαλής μέθοδος επιλογής των αρχικών βαρών είναι επιλογή μικρών τυχαίων τιμών γύρω από το 0. Ως εκ τούτου οι είσοδοι στο νευρωνικό δίκτυο θα είναι κοντά στο 0, με αποτέλεσμα οι έξοδοι να είναι επίσης μικρές τιμές. Ουσιαστικά αυτό που αποφεύγεται είναι οι έξοδοι να λαμβάνουν πολύ μεγάλες τιμές, οπότε να εμφανίζεται ο κορεσμός. Μάλιστα έχει πραγματοποιηθεί και μελέτη από τους Wessels και Barnard σχετικά με την κατάλληλη επιλογή αρχικών τιμών και κατέληξαν [51] ότι καλή επιλογή είναι οι τυχαίες αρχικές τιμές να βρίσκονται στο διάστημα:

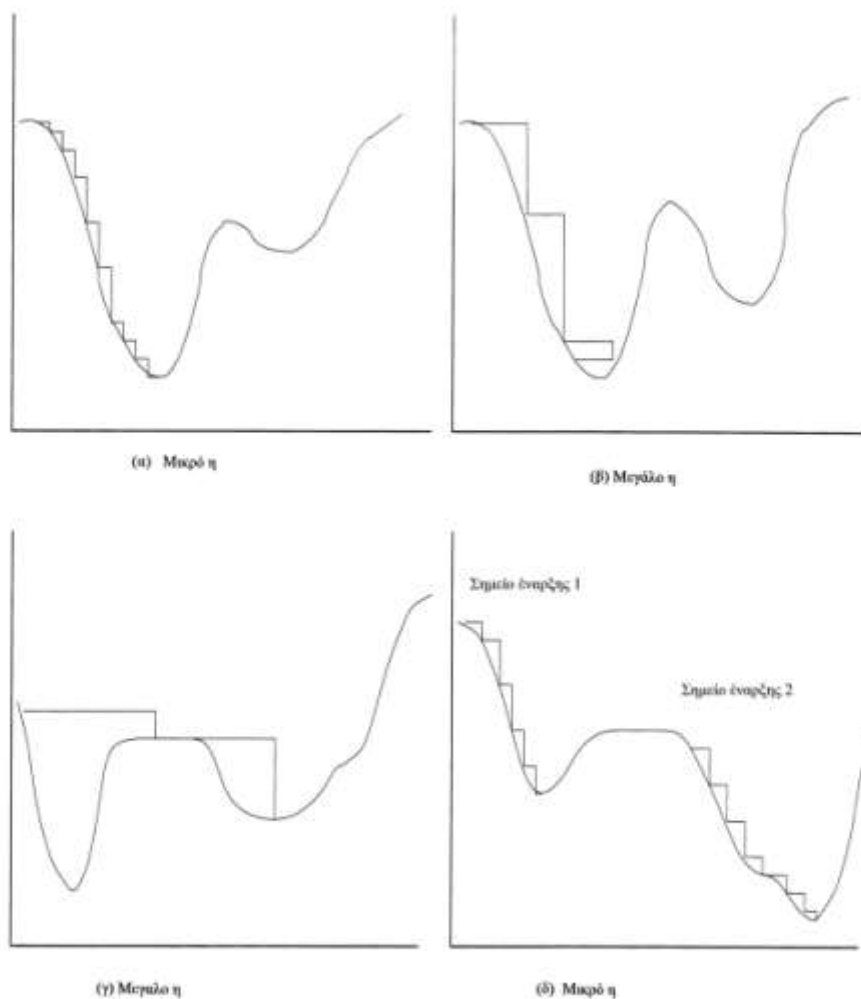
$$\left[ -\frac{1}{\sqrt{\zeta}}, \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \right]$$

Όπου με  $\zeta$  ορίζεται ο αριθμός των συνδέσεων, που οδηγεί σε ένα νευρώνα [48].

### 3.8.3. Προσθήκη ρυθμού μάθησης

Ο ρυθμός μάθησης ( $\eta$ ) καθορίζει το κάθε «βήμα» που θα γίνεται για να προσεγγιστεί το τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης. Αν η τιμή του ρυθμού μάθησης είναι πολύ μικρή, τότε η προσαρμογή των βαρών θα γίνεται με πολύ αργό ρυθμό και οι αλλαγές θα είναι μικρές, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολύ περισσότερες επαναλήψεις. Αντίθετα, επιλέγοντας μεγάλο ρυθμό μάθησης τότε αρχικά θα υπάρχει γρήγορη σύγκλιση, ωστόσο στο τέλος θα παρατηρούνται ταλαντώσεις γύρω από το τοπικό ελάχιστο, χωρίς να το προσεγγίζει ακριβώς στο τέλος. Επίσης ένας άλλος κίνδυνος που προέρχεται από την επιλογή υψηλού ρυθμού μάθησης είναι να μην προσεγγιστεί ποτέ ένα «καλό» τοπικό ελάχιστο και να προκύψει ένα άλλο τοπικό και όχι τόσο «καλό» ελάχιστο.

Θα αναρωτηθεί κανείς ποιος είναι εντέλει ο βέλτιστος τρόπος επιλογής του ρυθμού μάθησης. Ένας τρόπος είναι να δοκιμάζονται συνεχώς πολλές τιμές και να εξετάζεται η ταχύτητα σύγκλισης, ωστόσο αποτελεί αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Ένας άλλος τρόπος που έχει προταθεί είναι να επιλεγεί η τιμή 0,1 και αν η σύγκλιση είναι αργή να αυξηθεί η τιμή αυτή, διαφορετικά να μειωθεί. Τέλος έχει διαπιστωθεί από τους Plaut et al. [52], ότι ο ρυθμός μάθησης πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού  $\zeta$  που αναφέρθηκε παραπάνω [48].



Σχήμα 3.11: Συμπεριφορά αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος για διάφορες τιμές του ρυθμού μάθησης [48].

### 3.8.1. Προσθήκη όρου ορμής

Ο στοχαστικός τρόπος μάθησης, όπου τα βάρη ανανεώνονται με το πέρασμα κάθε προτύπου έχει το μειονέκτημα, ότι οδηγεί σε σημαντικές διακυμάνσεις στην παράγωγο της συνάρτησης σφάλματος. Το δίκτυο σπαταλάει κατά κάποιο τρόπο χρόνο με το να κάνει άλματα στη συνάρτηση σφάλματος, χωρίς να αξιοποιεί τη γνώση που απέκτησε από τα προηγούμενα πρότυπα. Μία λύση σ' αυτό το πρόβλημα είναι να πραγματοποιηθεί η εκπαίδευση ανά εποχή και όχι ανά πρότυπο. Μία άλλη λύση είναι να διατηρηθεί ο ίδιος τρόπος εκπαίδευσης και να προστεθεί ένας όρος ορμής, έστω  $a$ . Η ιδέα του όρου ορμής είναι να μετριάσει τις αλλαγές των συναπτικών βαρών, ώστε να αποφεύγονται άλματα κατά την προσέγγιση του επιθυμητού ελαχίστου. Αν θεωρηθεί  $a=0$  τότε οι αλλαγές στα συναπτικά βάρη δεν

επηρεάζονται καθόλου από τις προηγούμενες. Μια τιμή της σταθεράς  $\alpha$  που προτιμάται συνήθως είναι 0,9 [48].

### 3.8.2. Τρόποι εκπαίδευσης

Η διαδικασία εκπαίδευσης κατά τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος συντελείται με την παρουσίαση και εφαρμογή στο δίκτυο του συνόλου των διανυσμάτων εκπαίδευσης. Η παρουσίαση όλων των προτύπων μία φορά το καθένα στο δίκτυο ονομάζεται εποχή (epoch). Κατά την εκπαίδευση εκτελούνται επαναλήψεις των εποχών μέχρι τα βάρη να σταθεροποιηθούν σε συγκεκριμένες τιμές [50]. Σε κάθε εποχή τα δεδομένα παρουσιάζονται με τους εξής δύο τρόπους:

#### *Εκπαίδευση ανά πρότυπο (stochastic training)*

Εδώ τα βάρη αναπροσαρμόζονται μετά την παρουσίαση κάθε προτύπου εκπαίδευσης στο δίκτυο. Έστω ότι υπάρχουν  $N$  πρότυπα εκπαίδευσης που παρουσιάζονται με τυχαία σειρά σε κάθε εποχή. Για κάθε πρότυπο εκτελείται το ευθύ και το ανάστροφο πέρασμα και μεταβάλλονται τα βάρη. Με το πέρας μίας εποχής, δηλαδή την παρουσίαση και των  $N$  προτύπων, η μέση μεταβολή του τυχαίου βάρους  $w_{ji}$  για όλο το σύνολο προτύπων είναι:

$$\Delta \hat{w}_{ji}(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta w_{ji}(n) = -\frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\partial G(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -\frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N e_j(n) \frac{\partial e_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.50)$$

#### *Εκπαίδευση ανά εποχή (batch mode)*

Σε αυτή την περίπτωση τα βάρη ενημερώνονται μετά την παρουσίαση στο δίκτυο όλου του συνόλου των προτύπων μίας εποχής. Η μέση τιμή των τετραγωνικών σφαλμάτων δίνεται από τη σχέση (3.4) όπως έχει ήδη περιγραφεί, ενώ η αναπροσαρμογή των βαρών γίνεται μία φορά στο τέλος κάθε εποχής. Σύμφωνα με τον κανόνα δέλτα η ενημέρωση θα είναι:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ji}} = -\frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N e_j(n) \frac{\partial e_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.51)$$

Από τις δύο μεθόδους προτιμάται συνήθως ο τρόπος εκπαίδευσης ανά πρότυπο, διότι ενισχύει το στοχαστικό χαρακτήρα της μάθησης και είναι πιο ικανή στην αποτροπή παγίδευσης του αλγορίθμου σε τοπικά ελάχιστα. Όμως το μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι συνεχείς και μη αμελητέες ταλαντώσεις των σφαλμάτων εκπαίδευσης και αξιολόγησης, ώσπου να καταλήξει στο τελικό αποτέλεσμα. Η εκπαίδευση ανά εποχή όμως υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το διάνυμα κλίσης, δίνει συνήθως χαμηλότερο σφάλμα εκπαίδευσης και μεγαλύτερη δυνατότητα ελέγχου του σφάλματος αυτού. Ωστόσο υπάρχει ο κίνδυνος

«αποστήθισης» των προτύπων, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, με αποτέλεσμα να υπάρχει σφάλμα στην αξιολόγηση.

Τέλος, υπάρχει και ένας τρίτος τρόπος εκπαίδευσης, ο οποίος ονομάζεται τρόπος *συνεχόμενης εκπαίδευσης (online training)*. Αυτός εφαρμόζεται, όταν το πλήθος των διανυσμάτων είναι εξαιρετικά μεγάλο και δεν υπάρχει αρκετός χώρος αποθήκευσης των δεδομένων, οπότε αναγκαστικά το κάθε διάνυσμα πρέπει να παρουσιαστεί μία φορά στο νευρωνικό δίκτυο.

### 3.8.3. Κριτήρια τερματισμού

Ο αλγόριθμος ανάστροφης τροφοδότησης γενικά δε συγκλίνει και δεν υφίστανται απόλυτα ορισμένα κριτήρια τερματισμού της λειτουργίας του. Βέβαια υπάρχουν κάποια λογικά κριτήρια που οδηγούν στον τερματισμό της διαδικασίας εκπαίδευσης, τα οποία βασίζονται κυρίως στις ιδιότητες των τοπικών και των ολικών ελαχίστων της επιφάνειας σφάλματος [50]. Συνήθως θεωρείται ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει όταν:

- Η ευκλείδια νόρμα του διανύσματος κλίσης λαμβάνει τιμές κάτω από ένα πολύ μικρό κατώφλι κλίσης.
- Όταν η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του σφάλματος ανά εποχή είναι ικανοποιητικά μικρή.
- Όταν η μέση τιμή του σφάλματος ανά εποχή είναι ικανοποιητικά μικρή.

Τα τρία αυτά κριτήρια δε χρησιμοποιούνται ωστόσο συγχρόνως, καθώς βασίζονται στην ίδια βασική ιδιότητα του τοπικού ή ολικού ελαχίστου. Στην πράξη χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά και άλλα δύο κριτήρια:

- Ένας μέγιστος αριθμός εποχών, ώστε ο αλγόριθμος να τελειώσει σ' ένα εύλογο χρονικό διάστημα.
- Η μεταβολή των βαρών να είναι μικρότερη από ένα συγκεκριμένο όριο.

Διαφορετικά μπορεί να εφαρμοστεί μία άλλη, ολοκληρωμένη τεχνική αξιολόγησης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Πρακτικά ορίζεται ένα σύνολο, το οποίο ονομάζεται *σύνολο επικύρωσης ή αξιολόγησης (validation/evaluation set)* και με βάση το μέγεθος των σφαλμάτων σ' αυτό το σύνολο, υπολογίζεται το συνολικό σφάλμα του μοντέλου. Επομένως, αν διατεθεί ένα σύνολο αλγορίθμων που έχουν εκπαιδευτεί με το ίδιο σύνολο εκπαίδευσης, υπολογίζεται το σφάλμα καθενός για τα δεδομένα του συνόλου αξιολόγησης και ως καλύτερο θεωρείται αυτό με το μικρότερο σφάλμα. Επίσης χρησιμοποιείται συνήθως ένα ακόμα σύνολο δεδομένων που ονομάζεται *σύνολο ελέγχου (test set)*, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της γενίκευσης των αποτελεσμάτων.

Η παραπάνω τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί γενικά για την εκπαίδευση ενός δικτύου με ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος. Ο αλγόριθμος της εκπαίδευσης λειτουργεί ενημερώνοντας τις παραμέτρους του δικτύου στην κατεύθυνση ελαχιστοποίησης του σφάλματος, αλλά συγχρόνως ανά ένα αριθμό

εποχών πραγματοποιείται υπολογισμός του σφάλματος αξιολόγησης. Γενικά, με την πάροδο της εκπαίδευσης το σφάλμα εκπαίδευσης μειώνεται, όπως και το σφάλμα επικύρωσης. Όμως υπάρχει ένα όριο πέρα από το οποίο το σφάλμα επικύρωσης αυξάνεται, παρόλο που το σφάλμα εκπαίδευσης μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της υπερεκπαίδευσης, οπότε και θα υπάρχει πρόωρη διακοπή στην εκπαίδευση του δικτύου (early stopping). Αυτό αποτελεί και το πιο αποδοτικό κριτήριο τερματισμού σε σύγκριση με τον τερματισμό σε τοπικό ελάχιστο του σφάλματος εκπαίδευσης. Εναλλακτικά, η διαδικασία μπορεί να ολοκληρωθεί με το κριτήριο της σταθεροποίησης των βαρών ή του μέγιστου αριθμού εποχών.

### 3.9 Παραλλαγές αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν δύο αλγόριθμοι εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων, ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος και ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης με προσθήκη όρου ορμής και/ή ρυθμού μάθησης. Για την περίπτωση του απλού αλγορίθμου η διόρθωση των βαρών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \vec{w}(ep) = -\eta \cdot \nabla G(\vec{w}(ep)) \quad (3.52)$$

Με την προσθήκη του όρου ορμής μετασχηματίζεται η παραπάνω εξίσωση στην:

$$\Delta \vec{w}(ep) = -\eta \cdot \nabla G(\vec{w}(ep)) + \alpha \cdot \Delta \vec{w}(ep - 1) \quad (3.53)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί ακόμα αλγόριθμοι, οι οποίοι είναι αρκετά γρηγορότεροι, έως και εκατό φορές μάλιστα [53].

#### 3.9.1. Προσαρμοστικός αλγόριθμος (Adaptive Back Propagation Algorithm)

Ο ρυθμός μάθησης και ο όρος ορμής μπορούν να μεταβληθούν σύμφωνα με τις εξής εξισώσεις:

$$\eta(ep) = \begin{cases} \eta(ep - 1) & G_{av}(ep) > G_{av}(ep - 1) \\ \eta(ep - 1) \cdot \exp\left(-\frac{1}{T_\eta}\right) & G_{av}(ep) \leq G_{av}(ep - 1) \end{cases} \quad (3.54)$$

$$\alpha(ep) = \begin{cases} \alpha(ep - 1) & G_{av}(ep) \leq G_{av}(ep - 1) \\ \alpha(ep - 1) \cdot \exp\left(-\frac{1}{T_\alpha}\right) & G_{av}(ep) > G_{av}(ep - 1) \end{cases} \quad (3.55)$$

Όπου  $\eta_0 = \eta(\mathbf{0})$  και  $T_\eta$  είναι η αρχική τιμή και η χρονική παράμετρος του ρυθμού μάθησης αντίστοιχα,  $\alpha_0 = \alpha(\mathbf{0})$  και  $T_\alpha$  είναι η αρχική τιμή και η χρονική παράμετρος του όρου ορμής αντίστοιχα και  $G_{av}$  η συνάρτηση σφάλματος του συνόλου (είτε εκπαίδευσης είτε επικύρωσης). Αν η συνάρτηση σφάλματος μειώνεται με το πέρασμα των εποχών, τότε ο όρος ορμής μένει σταθερός ή αυξάνεται [54], ενώ ο ρυθμός μάθησης μειώνεται ενισχύοντας την επίδραση της μεταβολής των βαρών.

Ενώ, αν η συνάρτηση σφάλματος αυξηθεί με τις εποχές, πρέπει η επίδραση των προηγούμενων σφαλμάτων να μειωθεί μειώνοντας τον όρο ορμής και διατηρώντας σταθερό το ρυθμό μάθησης, για να ληφθεί υπόψη η τρέχουσα κλίση της συνάρτησης σφάλματος.

### 3.9.2. Ευπροσάρμοστος αλγόριθμος (Resilient algorithm)

Με βάση αυτόν τον αλγόριθμο λαμβάνεται υπόψη μόνο το πρόσημο της παραγώγου της συνάρτησης σφάλματος ως προς το βάρος  $w_{ij}$  για τον καθορισμό της κατεύθυνσης διόρθωσής του. Το μέγεθος της παραγώγου δεν παίζει κάποιο ρόλο. Το βάρος μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta w_{ij}(ep) = \begin{cases} \delta_1 \cdot \Delta w_{ij}(ep - 1) & \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep) \cdot \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep - 1) > 0 \\ \Delta w_{ij}(ep - 1) & \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep) \cdot \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep - 1) = 0 \\ \frac{1}{\delta_2} \cdot \Delta w_{ij}(ep - 1) & \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep) \cdot \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep - 1) < 0 \end{cases} \quad (3.56)$$

Όπου  $\delta_1$  και  $\delta_2$  είναι ο αυξητικός και μειωτικός παράγοντας της μεταβολής του βάρους αντίστοιχα. Πρακτικά αυτό το οποίο φαίνεται από τον αλγόριθμο είναι ότι, όταν η παράγωγος του σφάλματος ως προς  $w_{ij}$  έχει το ίδιο πρόσημο για δύο διαδοχικές επαναλήψεις, τότε η αντίστοιχη μεταβολή ενισχύεται. Αν μεταβάλλεται το πρόσημο, μειώνεται, ενώ, όταν η παράγωγος είναι μηδενική, τότε η μεταβολή παραμένει σταθερή.

### 3.9.3. Μέθοδος συζευγμένης μεταβολής της κλίσης (Conjugate gradient algorithm)

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο αλγόριθμος αυτός συγκλίνει γρηγορότερα, διότι η μεταβολή των βαρών δε στηρίζεται μόνο στην αντίστοιχη κλίση του βάρους, αλλά λαμβάνει υπόψη το σύνολο των μεταβολών κλίσης εντός του αντίστοιχου χώρου. Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου αυτού είναι:

- i. Ορίζεται μία κατεύθυνση αναζήτησης  $\vec{p}_0$  ίση με το αντίθετο του διανύσματος μεταβολής κλίσης κατά την πρώτη επανάληψη:

$$\vec{p}_0 = -\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_0} \quad (3.57)$$

- ii. Πραγματοποιείται η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος σ' αυτήν την κατεύθυνση:

$$\Delta \vec{w}(ep) = -a_k \cdot \vec{p}_k \quad (3.58)$$

Όπου με αριθμητικές μεθόδους (π.χ. μέθοδος διχοτόμου) υπολογίζεται η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου  $a_k$ .

- iii. Η κατεύθυνση για το επόμενο βήμα υπολογίζεται από τη σχέση:



$$\vec{p}_{k+1} = -\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}} + \beta_{k+1} \cdot \vec{p}_k \quad (3.59)$$

Η παράμετρος  $\beta_{k+1}$  που εμφανίζεται στην εξίσωση υπολογίζεται από τις εξής σχέσεις:

$$\text{Fletcher - Reeves: } \beta_{k+1} = \frac{\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}^T \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}}{\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}^T \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}} \quad (3.60)$$

$$\text{Polak - Ribiere: } \beta_{k+1} = \frac{\Delta\{G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}^T\} \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}}{\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}^T \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}} \quad (3.61)$$

- iv. Επαναλαμβάνονται τα βήματα (ii) και (iii) μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση του αλγορίθμου. Για να επιταχυνθεί ακόμα περισσότερο η σύγκλιση της διαδικασίας αυτής, πρέπει η επαναληπτική διαδικασία να επανεκκινεί κατά διαστήματα. Συνήθως αυτό συμβαίνει μετά από αριθμό επαναλήψεων ίσο με το πλήθος  $N_w$  των παραμέτρων υπό προσδιορισμό (βαρών και πολώσεων). Επιπροσθέτως και χωρίς να αναιρείται η χρήση αυτού κριτηρίου μπορεί να εφαρμοστεί και η μέθοδος επανεκκίνησης Powell-Beale [55], σύμφωνα με την οποία η μετάβαση στο πρώτο βήμα θα γίνει όταν η ορθογωνικότητα μεταξύ του παρόντος διανύσματος κλίσης και του προηγούμενου είναι μικρή. Δηλαδή αυτό σημαίνει ότι:

$$|\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}^T \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}| \geq \lim_{orthogonality} \|\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}\|^2 \text{ με } k \geq 1$$

Όπου το όριο ορθογωνικότητας επιπέεται να κυμαίνεται στο διάστημα (0.1,0.9) με συνήθη τιμή 0.2.

### 3.9.4. Μέθοδος βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης (Scaled conjugate gradient algorithm)

Το βασικό μειονέκτημα της προηγούμενης μεθόδου είναι ο υπολογιστικός φόρτος για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος. Το μειονέκτημα αυτό δεν εμφανίζεται στον αλγόριθμο της βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με την προσέγγιση των Levenberg-Marquardt. Τα βήματα του αλγορίθμου είναι:

- i. Η κατεύθυνση αναζήτησης αρχικοποιείται όπως και πριν σύμφωνα με την εξίσωση (3.46). Οι υπόλοιπες παράμετροι και συντελεστές αρχικοποιούνται ως εξής:

$$0 < \sigma \leq 10^{-4} \quad 0 < \lambda_0 \leq 10^{-6} \quad \bar{\lambda}_0 = 0 \quad flag = 1 \quad (3.62)$$

- ii. Αν  $flag = 1$  τότε:

$$\sigma_k = \frac{\sigma}{\|\vec{p}_k\|} \quad \vec{s}_k = \frac{\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k+\sigma_k \cdot \vec{p}_k} - \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}}{\sigma_k} \quad \delta_k = \vec{p}_k^T \cdot \vec{s} \quad (3.63)$$

- iii. Προσδιορίζεται η τιμή της παραμέτρου  $\delta_k$ :

$$\delta_k = \delta_k + (\lambda_k - \bar{\lambda}_k) * \|\vec{p}_k\|^2 \quad (3.64)$$

iv. Αν  $\delta_k \leq 0$ , τότε η μήτρα Hesse γίνεται θετική ορίζοντας τις εξής ποσότητες:

$$\bar{\lambda}_k = 2 \left( \lambda_k - \frac{\delta_k}{\|\vec{p}_k\|^2} \right) \quad \delta_k = -\delta_k + \lambda_k \cdot \|\vec{p}_k\|^2 \quad \lambda_k = \bar{\lambda}_k \quad (3.65)$$

v. Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέγεθος του βήματος:

$$\mu_k = -\vec{p}_k^T \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k} \quad a_k = \mu_k / \delta_k \quad (3.66)$$

vi. Υπολογίζεται η παράμετρος σύγκρισης:

$$\Delta_k = \frac{2\delta_k (G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k} - G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k + a_k \vec{p}_k})}{\mu_k^2} \quad (3.67)$$

vii. Αν  $\Delta_k \geq 0$ , τότε πραγματοποιείται πετυχημένη μείωση του σφάλματος:

$$\Delta \vec{w}_k = a_k \cdot \vec{p}_k \quad \vec{r}_{k+1} = -\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}} \quad \bar{\lambda}_k = 0 \quad flag = 1 \quad (3.68)$$

Αν ο αύξων αριθμός επαναλήψεων είναι πολλαπλάσιος του πλήθους  $N_w$  των βαρών και των πλώσεων, τότε ο αλγόριθμος επανεκκινείται:

$$\vec{p}_{k+1} = -\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}} \quad (3.69)$$

Διαφορετικά:

$$\beta_{k+1} = \frac{\|\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}\| - \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}^T \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}}{\mu_k} \quad (3.70)$$

$$\vec{p}_{k+1} = \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k} + \beta_{k+1} \cdot \vec{p}_k \quad (3.71)$$

Αν  $\Delta_k \geq 0.75$ , τότε  $\lambda_k = 0.25 \cdot \lambda_k$ , διαφορετικά  $\bar{\lambda}_k = \lambda_k$ ,  $flag = 0$ .

viii. Ο συντελεστής κλίμακας  $\lambda_k$  επαναπροσδιορίζεται ως εξής: Αν  $\Delta_k < 0.25$  τότε:

$$\lambda_k = \lambda_k + \frac{\delta_k(1 - \Delta_k)}{\|\vec{p}_k\|^2} \quad (3.72)$$

ix. Αν  $\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}} \neq \vec{0}$ , τότε  $k = k + 1$  και επιστρέφει στο βήμα β, αλλιώς έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία με την εύρεση των τελικών βαρών  $\vec{w}_{k+1}$ . Το βασικό μειονέκτημα της διαδικασίας είναι η πολυπλοκότητά της, η οποία φτάνει στο  $O(6N_w^2)$  έναντι του  $O(3N_w^2)$  της βασικής μεθόδου ανάστροφης τροφοδότησης σφάλματος. Επίσης, όταν ο συντελεστής κλίμακας  $\lambda_k$  είναι μηδέν, τότε ο αλγόριθμος της βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης ταυτίζεται με τον αντίστοιχο βασικό. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι το σφάλμα μειώνεται μονότονα, αφού η αύξηση αυτού δεν επιτρέπεται. Στην περίπτωση που το σφάλμα μένει αμετάβλητο μεταξύ δύο επαναλήψεων, η μήτρα Hesse δεν ορίζεται θετικά και το  $\lambda_k$  αυξάνεται.

### 3.9.5. Μέθοδος Newton

Μία δεύτερη βασική κατηγορία εκπαίδευσης εμπρόσθιων πολυεπίπεδων νευρωνικών δικτύων, στηρίζεται στη μέθοδο Newton. Το βασικό βήμα αυτής της

μεθόδου στηρίζεται στην αντιστροφή της μήτρας Hesse  $\nabla^2 G(\vec{w})$  (της συνάρτησης σφάλματος ως προς τα βάρη και τις πολώσεις) για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων μεταβολών:

$$\Delta \vec{w}_k = -\nabla^2 G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k}^{-1} \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k} \quad (3.73)$$

Συνήθως η μέθοδος αυτή είναι πιο γρήγορη από τις προηγούμενες, ωστόσο ο υπολογισμός και η αντιστροφή της μήτρας Hesse είναι αρκετά περίπλοκος και χρονοβόρος, αφού απαιτούνται οι εξής υπολογισμοί:

$$\text{Μήτρα Hesse: } \nabla^2 G(\vec{w}) = J(\vec{w})^T \cdot J(\vec{w}) + \sum_{j \in \mathcal{C}} e_j(\vec{w}) \cdot \nabla^2 e_j(\vec{w}) \quad (3.74)$$

$$\text{Ιακωβιανή μήτρα: } J(\vec{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{N_w}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{N_w}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_{P_c}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{P_c}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{P_c}}{\partial w_{N_w}} \end{bmatrix}_{P_c \times N_w} \quad (3.75)$$

Μία βασική παραλλαγή της μεθόδου Newton είναι η quasi-Newton, όπου ο δεύτερος όρος του δεξιού μέρους της (3.63) παραλείπεται, διότι τα αντίστοιχα στοιχεία λαμβάνουν μικρές τιμές και δεν είναι σημαντικές. Εναλλακτικά, κατά τη μέθοδο της τέμνουσας ενός βήματος (one step secant algorithm) δεν αποθηκεύεται ολόκληρος ο πίνακας Hesse, παρά μόνο τα διαγώνια στοιχεία, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται η αντιστροφή του πίνακα. Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγαλύτερος, αλλά το υπολογιστικό κόστος ανά επανάληψη περιορίζεται σημαντικά.

Μία βασική παραλλαγή της μεθοδολογίας είναι η μέθοδος Levenberg-Marquardt, όπου ο κανόνας μεταβολής των βαρών είναι πλέον ο:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{w}_k &= -(J^T \cdot J + \lambda \cdot \text{diag}[J^T \cdot J])^{-1} \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_k} \Rightarrow \\ \Delta \vec{w}_k &= -(J^T \cdot J + \lambda \cdot \text{diag}[J^T \cdot J])^{-1} \cdot J^T \vec{e}(\vec{w}_k) \end{aligned} \quad (3.76)$$

Ο συντελεστής  $\lambda$  μεταβάλλεται ανάλογα με τις αυξομειώσεις της συνάρτησης σφάλματος σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\lambda(k+1) = \begin{cases} \lambda(k) \cdot \beta & G_{av}(k) > G_{av}(k-1) \\ \lambda(k) & G_{av}(k) = G_{av}(k-1) \\ \lambda(k)/\beta & G_{av}(k) < G_{av}(k-1) \end{cases} \quad (3.77)$$

Όπου η παράμετρος  $\beta$  λαμβάνει σημαντικές τιμές, όπως παραδείγματος χάρι 10. Η μέθοδος των Levenberg-Marquardt δεν είναι η βέλτιστη, αλλά δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πληθώρα προβλημάτων, ειδικά αν το σύνολο των υπό προσδιορισμό παραμέτρων περιορίζεται σε μερικές εκατοντάδες, λόγω της απαιτούμενης αντιστροφής πίνακα.

### 3.10 Διαστήματα Εμπιστοσύνης στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Ο υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης στα νευρωνικά δίκτυα αποτελεί το βασικό μειονέκτημά τους, αφού ο άμεσος υπολογισμός τους δεν είναι εφικτός. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης δε θα πραγματοποιηθεί. Αντιθέτως ο υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε περιπτώσεις μελέτης ροών φορτίου. Επειδή η εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι διαδεδομένη για την πρόβλεψη ροών φορτίου, κρίνεται αναγκαίος και ο προσδιορισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης. Προτείνονται οι εξής μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό των διαστημάτων εμπιστοσύνης [56]:

*Εύρεση σφάλματος εξόδου:* Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο διαθέτει δύο εξόδους για κάθε μεταβλητή εξόδου, την ίδια τη μεταβλητή και την εκτίμηση του αντίστοιχου σφάλματος. Τα στοιχεία που χρειάζονται για το σφάλμα εξόδου προσδιορίζονται σε κάθε εποχή εκπαίδευσης. Κάθε φορά που εμφανίζονται οι είσοδοι στο δίκτυο υπολογίζονται και τα σφάλματα εξόδου. Σε κάθε εποχή χρησιμοποιούνται διαφορετικά στοιχεία σφάλματος εξόδου σαν είσοδοι. Με την πάροδο της εκπαίδευσης τα σφάλματα τείνουν να σταθεροποιηθούν. Στην πραγματικότητα βέβαια το απόλυτο ποσοστό σφάλματος λαμβάνεται από το νευρώνα εξόδου σφάλματος. Έτσι ο υπολογισμός του απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος είναι ευκολότερος από αυτόν του σχετικού σφάλματος. Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης προστίθεται και αφαιρείται στο υπό μελέτη μέγεθος το σφάλμα εξόδου, ώστε να δημιουργηθεί ένα συμμετρικό διάστημα εμπιστοσύνης. Για να δημιουργηθεί ένα μεγαλύτερο διάστημα, τότε πολλαπλασιάζεται το αρχικό διάστημα με έναν αριθμό  $\epsilon$ .

*Επαναδειγματοληψία:* Σε αυτήν τη μέθοδο πραγματοποιείται η δειγματοληψία των λαθών εκτίμησης για κάθε περίοδο πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, αν είναι επιθυμητό να προβλεφθούν τα επόμενα  $t_1$  χρονικά σημεία χρησιμοποιώντας τα δεδομένα  $t_2$  σημείων, προβλέπεται για την πρώτη χρονική στιγμή το υπό πρόβλεψη μέγεθος με τα ήδη γνωστά μεγέθη και προσδιορίζεται το αντίστοιχο σφάλμα. Για την επόμενη χρονική στιγμή χρησιμοποιείται η πρόβλεψη του πρώτου χρονικού σημείου και τα γνωστά δεδομένα των τελευταίων  $t_2-1$  σημείων, υλοποιείται η αντίστοιχη πρόβλεψη, προσδιορίζεται το αντίστοιχο σφάλμα και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται για το σύνολο των  $t_1$  στιγμών. Η ίδια διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλη την υπό μελέτη περίοδο κυλιόμενα συνολικά  $n$  φορές. Στη συνέχεια ταξινομούνται τα  $n$  σφάλματα στη σειρά και προσδιορίζεται η συνάρτηση αθροιστικής διανομής δείγματος:

$$S_n(z) = \begin{cases} 0 & z < z_1 \\ r/n & z_r \leq z < z_{r+1} \\ 1 & z_n \leq z \end{cases} \quad (3.78)$$

Όταν το πλήθος των σφαλμάτων είναι πολύ μεγάλο, τότε η παραπάνω συνάρτηση είναι μία καλή προσέγγιση της πραγματικής αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας. Το διάστημα εμπιστοσύνης προσδιορίζεται ώστε να είναι συμμετρικό

ως προς την πιθανότητα, όχι απαραίτητα συμμετρικό και ως προς το  $z$ . Ο αριθμός των περιπτώσεων που απορρίπτονται σε κάθε χρονική στιγμή από την κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης είναι  $n * p$ , όπου  $p$  είναι η πιθανότητα της ουράς. Από τη στιγμή που το  $n * p$  είναι κλασματικός αριθμός, τότε το πλήθος των περιπτώσεων που απορρίπτονται σε κάθε ουρά είναι  $[n * p]$ . Αν η αθροιστική πυκνότητα πιθανότητας  $F(Z_p)$  για την τιμή  $Z_p$  είναι ίση με την πιθανότητα  $p$  ενός σφάλματος να είναι μικρότερο ή ίσο του  $Z_p$ , τότε το  $Z_p$  είναι το κάτω όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης. Αντίστοιχα η τιμή  $Z_{1-p}$  θα είναι το άνω όριο του διαστήματος και υπάρχει για τα μελλοντικά σφάλματα ένα διάστημα εμπιστοσύνης ίσο με  $(1-2p)$ . Η τιμή  $n * S_n(Z_p)$  παριστάνει την εκτίμηση του πλήθους των στοιχείων του συνόλου σφαλμάτων, τα οποία είναι μικρότερα ή ίσα της τιμής  $Z_p$ . Θεωρώντας τα σφάλματα ανεξάρτητα μεταξύ τους, τότε η παράμετρος  $m = n * S_n(Z_p)$  ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή ανεξάρτητα της αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας:

$$B(m, n, p) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m} \quad (3.79)$$

Η διωνυμική κατανομή παριστάνει την πιθανότητα για την οποία ακριβώς  $m$  τυχαία επιλεγμένες περιπτώσεις από τις συνολικές  $n$  περιπτώσεις να είναι ίσες ή μεγαλύτερες του  $Z_p$ . Η αντίστοιχη πιθανότητα μεγιστοποιείται για  $m = np$ .

Πολυγραμμική...παλινδρόμηση...προσαρμοσμένη...σε...τεχνητά...νευρωνικά...δίκτυα: Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση που η συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα εξόδου είναι γραμμική. Τότε η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι ένα είδος πολυγραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης. Σαν είσοδοι λαμβάνονται οι έξοδοι των κρυμμένων νευρώνων και ως συντελεστές παλινδρόμησης τα συναπτικά βάρη του νευρώνα εξόδου αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του διαστήματος εμπιστοσύνης γίνεται μέσω της διασποράς του σφάλματος πρόβλεψης και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2}{(N - p_c)} \quad (3.80)$$

Όπου  $N$  είναι τα στοιχεία του συνόλου εκπαίδευσης,  $p_c$  ο αριθμός των συντελεστών,  $t_i, o_i$  η επιθυμητή και η εκτιμώμενη τιμή του υπό μελέτη μεγέθους αντίστοιχα. Ο επιδιωκόμενος βαθμός εμπιστοσύνης της χρονικής στιγμής τα ακολουθεί την κατανομή t-Student με  $N - p_c$  βαθμούς ελευθερίας και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{t_\tau - o_\tau}{\sigma * \sqrt{1 + \vec{x}_\tau^T * A^{-1} * \vec{x}_\tau}} \mu \varepsilon A = \sum_{i=1}^N \vec{x}_i * \vec{x}_i^T \quad (3.81)$$

Το διάστημα εμπιστοσύνης της χρονικής στιγμής  $t_a$  δίνεται από τη σχέση:

$$t_\tau - t_{N-p_c} \left(\frac{\alpha}{2}\right) * \sigma * \sqrt{1 + \vec{x}_\tau^T * A^{-1} * \vec{x}_\tau} \leq o_\tau \leq t_\tau + t_{N-p_c} \left(\frac{\alpha}{2}\right) * \sigma * \sqrt{1 + \vec{x}_\tau^T * A^{-1} * \vec{x}_\tau}$$

Όπου  $\alpha$  είναι τόσο, ώστε η πιθανότητα της κατανομής t-Student  $(1-\alpha)$  να είναι ο βαθμός εμπιστοσύνης [57]. Για να συγκριθούν οι τρεις προαναφερθείσες μέθοδοι

πρέπει να οριστεί και το αντίστοιχο σχετικό διάστημα εμπιστοσύνης  $RCI(\tau)$  της χρονικής στιγμής τα σύμφωνα με τη σχέση:

$$RCI(\tau) = \frac{|t_\tau - o_\tau|}{|CL(\tau) - o_\tau|} \quad (3.82)$$

Όπου  $CL(\tau)$  είναι το ελάχιστο όριο αν η ποσότητα  $t_\tau - o_\tau$  είναι αρνητική, διαφορετικά το μέγιστο όριο. Αν η τιμή του σχετικού διαστήματος εμπιστοσύνης είναι κοντά στη μονάδα, τότε ο βαθμός εμπιστοσύνης είναι μεγάλος, όπως και τα αντίστοιχα διαστήματα.

Από τη μελέτη των Silva και Moulin προκύπτει, ότι οι δύο πρώτες μέθοδοι έχουν αποτελέσματα κοντά στον πραγματικό βαθμό εμπιστοσύνης, εν αντιθέσει με την τρίτη μέθοδο. Όμως, η τελευταία μέθοδος έχει αρκετά μικρό διάστημα εμπιστοσύνης, ενώ η πρώτη έχει το μεγαλύτερο, το οποίο και δεν ακολουθεί και τη μορφή του υπό πρόβλεψη μεγέθους. Ακόμα η πρώτη μέθοδος έχει το επιπλέον μειονέκτημα ότι επιβαρύνει το δίκτυό μας με μία ακόμα έξοδο. Τελικά από τους Moulin και Silva προτείνεται η επαναδειγματοληψία ως η καταλληλότερη μέθοδος για τον προσδιορισμό διαστήματος εμπιστοσύνης, με υψηλό βαθμό πιθανότητας [57].

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Θα προσδιοριστούν ο χώρος διεξαγωγής του πειράματος και η θέση των ηλεκτροδίων, οι συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των μετρήσεων και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη λήψη τους.

#### **4.2 Τοποθεσία**

Η τοποθεσία εγκατάστασης βρίσκεται στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, στην κορυφή του λοφίσκου δίπλα από τα κτίρια των Χημικών Μηχανικών, των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και το υπαίθριο parking. Τα κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου χώρου για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι τα εξής:

- Είναι ελεύθερος και δε χρησιμοποιείται από κάποια σχολή ή υπηρεσία.
- Είναι φυσική απόληξη στους πρόποδες του Υμηττού και δεν έχει γίνει καμιά τεχνητή παρέμβαση στο έδαφος και το περιβάλλον.
- Η περιοχή του λόφου που τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια είναι εντελώς επίπεδη, παράγοντας που συμβάλει στην ευκολότερη λήψη των μετρήσεων.
- Η περιοχή είναι τέτοιας έκτασης, που να επιτρέπει την τοποθέτηση πολλών ηλεκτροδίων και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, γεγονός που συμβάλει στην εγκυρότητα και ακρίβεια των μετρήσεων.

Παρατίθεται φωτογραφία της περιοχής καθώς και δορυφορική εικόνα από την υπηρεσία Google Maps:



**Εικόνα 4.1: Φωτογραφία της τοποθεσίας. [2]**



Εικόνα 4.2: Κάτοψη τοποθεσίας. [58]

#### 4.3 Σύσταση εδάφους:

Το έδαφος της περιοχής χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκη άμμος με χαλίκια και κροκάλες. Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη των Φραγκογιάννη, Παπαθεοδώρου και Σταματάκη [59] έγινε δειγματοληψία χώματος από την εν λόγω περιοχή και τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης έδειξαν ότι το συγκεκριμένο έδαφος αποτελείται από χαλίκι και κροκάλες σε ποσοστό 54,78%, άμμο σε ποσοστό 39,47% και άργιλο σε ποσοστό 5,74%. Το σύστημα κατηγοριοποίησης του εδάφους που εφαρμόστηκε ήταν κατά *AASTHO*. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος χώματος μετρήθηκε και βρέθηκε ότι είναι υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το νερό αποστραγγίζεται πολύ γρήγορα από το έδαφος [2].

#### 4.4 Θέση των ηλεκτροδίων:

Στο χώρο ήταν ήδη τοποθετημένα ηλεκτρόδια σε διάταξη που περιγράφεται στα σχήματα 4.1 4.2 και 4.3 για τις ανάγκες εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής του Βασιλείου Π. Ανδροβιτσανέα [2].

Πρόκειται για έξι (6) κύρια ηλεκτρόδια ράβδου *St/e-Cu* τύπου *A* διαστάσεων *17x1500mm*, με πάχος επιχάλκωσης *254μm*, σε απόσταση *10m* το ένα από το άλλο, εκ των οποίων τα πέντε (5) μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης και το ένα απευθείας στο φυσικό έδαφος σε διάταξη όπως αυτή των σχημάτων 4.1 και 4.2 ως εξής:

Ηλεκτρόδιο G<sub>1</sub>: Φυσικό έδαφος

Ηλεκτρόδιο G<sub>2</sub>: Σκυρόδεμα

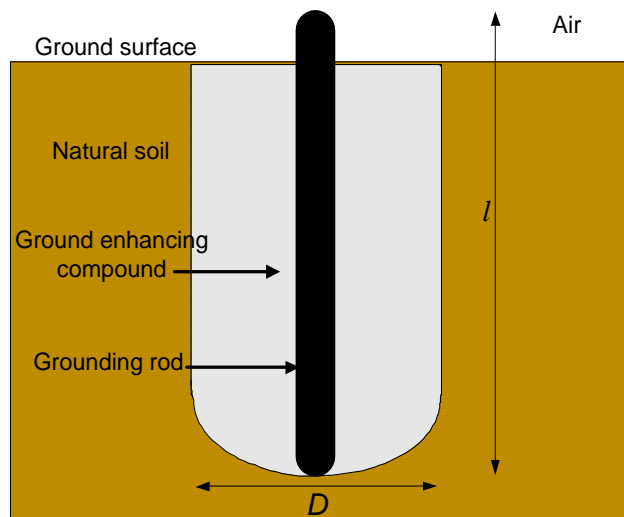
Ηλεκτρόδιο G<sub>3</sub>: Μπετονίτης



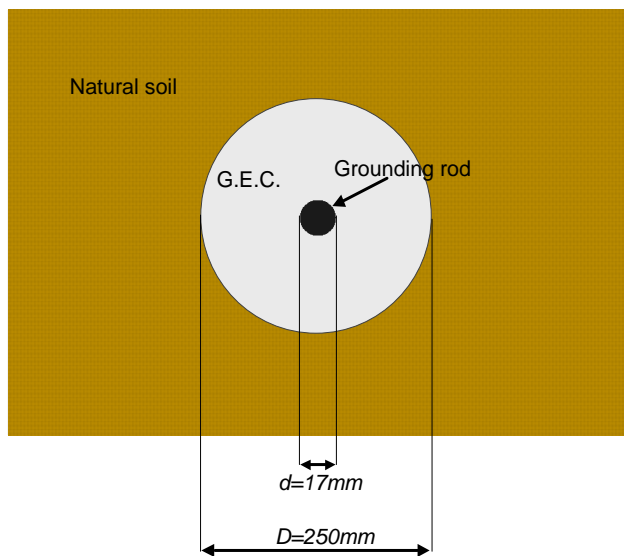
Ηλεκτρόδιο G4: Χημικό υλικό A

Ηλεκτρόδιο G5: Χημικό υλικό B

Ηλεκτρόδιο G6: Χημικό υλικό C



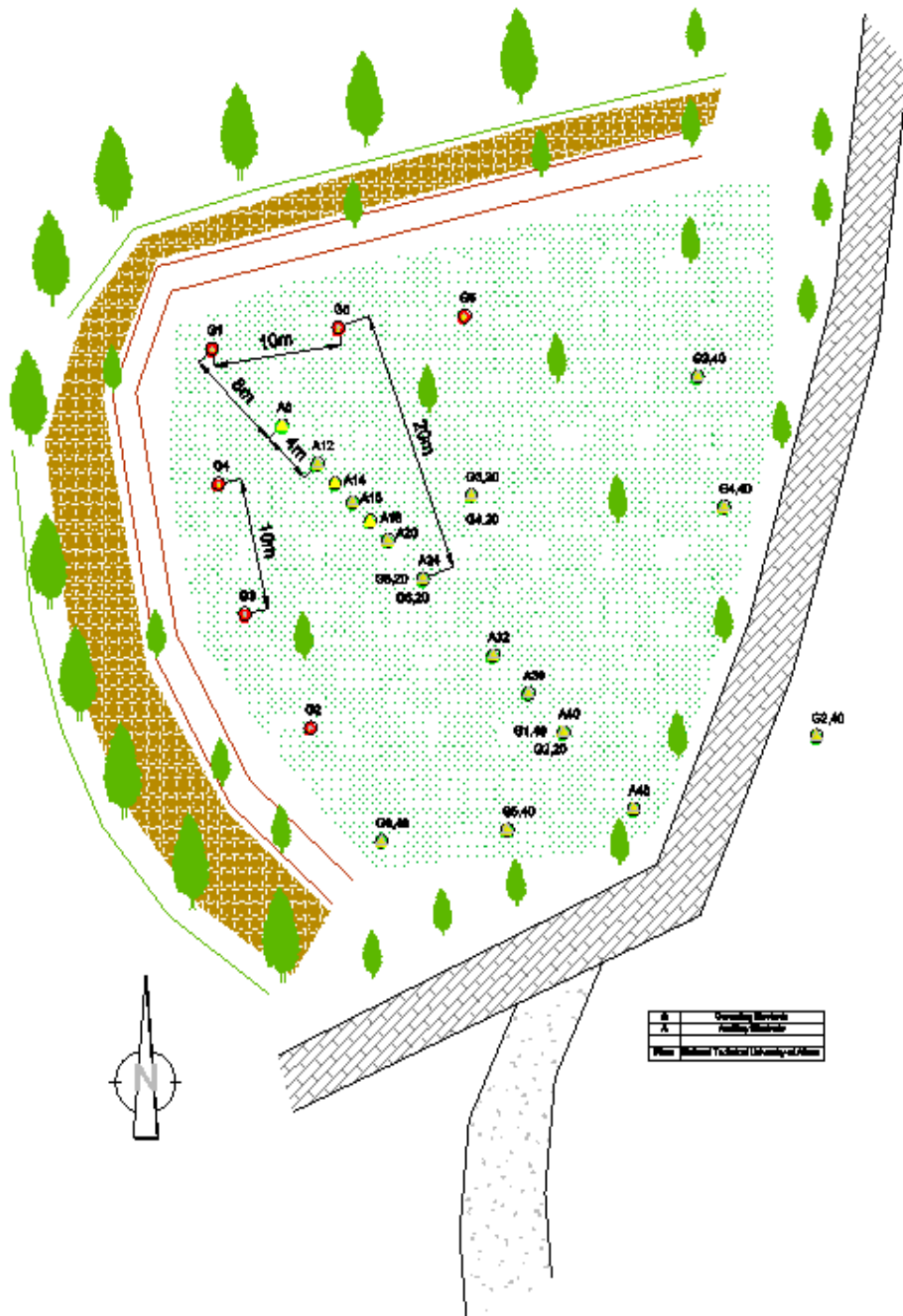
Σχήμα 4.1: Ηλεκτρόδιο γείωσης [60].



Σχήμα 4.2: Κάτοψη ηλεκτροδίου γείωσης [60].

Επίσης, τοποθετήθηκαν μόνιμα στο έδαφος σε διάφορες θέσεις δεκαεπτά (17) βοηθητικά ηλεκτρόδια, του ίδιου τύπου με τα κύρια, αλλά μήκους 0,5m, για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης  $\rho$  και της αντίστασης γείωσης  $R$ .

Στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί φαίνεται η διάταξη που περιγράφηκε:



Σχήμα 4.3: Κάτοψη τοποθεσίας και διάταξης ηλεκτροδίων για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους [2].

Ακολούθως παρατίθενται εικόνες των ηλεκτροδίων με τα βελτιωτικά εδάφους, όπως ήταν μετά την εγκατάστασή τους. Σημειώνεται εδώ, ότι υπάρχουν αισθητές αλλαγές με την πάροδο του χρόνου στη μορφή και τη φυσική κατάσταση ορισμένων βελτιωτικών υλικών, λόγω συρρίκνωσης και απορρόφησής τους από το έδαφος, αλλαγές οι οποίες απεικονίζονται και στις σχετικές φωτογραφίες και θα σχολιαστούν και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.3: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε χημικά βελτιωτικά υλικά [2].



Εικόνα 4.4: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε μπετονίτη και σκυρόδεμα [2].

#### 4.5 Λήψη μετρήσεων

##### *Όργανα μέτρησης*

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι το MEGGER DET2/2, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5 και το οποίο είναι διακριβωμένο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων (ΚΔΕΠ/ΔΕΗ).



**Εικόνα 4.5: Γειωσόμετρο (Megger) [2].**

Για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα χρησιμοποιήθηκε το θερμο-υγρόμετρο OMEGAETTE HH314 Humidity-Temperature Meter (Εικόνα 4.6), επίσης διακριβωμένο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων (ΔΕΚΑ ΑΕΒΕ).



**Εικόνα 4.6: Θερμο-υγρόμετρο [2].**

Για τη μέτρηση του ύψους βροχοπτώσεως, καθώς και της θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα αξιοποιήθηκαν online τιμές από τα όργανα καταγραφής του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου (Εικόνα 4.7), ο οποίος λειτουργεί υπό την εποπτεία του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης



Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Αποτελεί μέρος του παλαιότερου Meteonet, το οποίο πλέον έχει εξελιχθεί στο Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθήνας (HOA). Το όργανο μέτρησης της υγρασίας εδάφους είναι το CS616-L Water Content Reflectometer της Campbell Scientific Inc και του ύψους βροχοπτώσεως είναι το ARG-100 της Campbell Scientific Inc.



**Εικόνα 4.7: Μετεωρολογικός σταθμός Ε.Μ.Π. [2].**

#### Περιγραφή διαδικασίας λήψης των μετρήσεων

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εφαρμόστηκε η μέθοδος Wenner (μέθοδος των 4 ηλεκτροδίων) όπως περιγράφεται στην ενότητα 1.11.3. Χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα (12) ηλεκτρόδια (ένδεκα (11) βοηθητικά ηλεκτρόδια και

το κύριο ηλεκτρόδιο G<sub>1</sub>), διατεταγμένα όλα σε έναν άξονα, όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 4.3. Με αυτήν τη διάταξη των ηλεκτροδίων λαμβάνονται μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για απόσταση των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με 2m, 4m, 8m, 12m και 16m.

Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των κυρίων ηλεκτροδίων εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται αναλυτικά στην αντίστοιχη θεωρία. Τα βοηθητικά ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις 20m και 40m από το εκάστοτε προς μέτρηση ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Η συχνότητα λειτουργίας του γειωσόμετρου καθορίζεται στα 128Hz.

Οι μετρήσεις έγιναν το χρονικό διάστημα 17/2/2011 μέχρι και 28/2/2013 και πραγματοποιούνταν σχεδόν καθημερινά. Η διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων ήταν 60-90 λεπτά, καθότι ο χειριστής που εκτελεί τις μετρήσεις πρέπει να διανύει συχνές διαδρομές για την εναλλαγή στις συνδέσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων όπως και πολλά και συνεχόμενα τυλίγματα και απλώματα των καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του οργάνου στα ηλεκτρόδια.

Σημαντικό γεγονός αποτελεί το ότι η διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σε ανοιχτό χώρο και όχι σε χώρο εργαστηρίου. Έτσι οι καιρικές συνθήκες επηρέασαν αισθητά τη διαδικασία, εφόσον ούτε ο χειριστής, αλλά ούτε και ο εξοπλισμός είναι προστατευμένοι από αυτές. Η θερμοκρασία δυσχέραινε τις λήψεις όντας εξαιρετικά υψηλή το καλοκαίρι ή πολύ χαμηλή το χειμώνα. Η βροχόπτωση είτε καθιστούσε αδύνατη τη διεξαγωγή μετρήσεων λόγω της έντασής της, είτε πρόσθετε δυσκολίες την επόμενη μέρα στους χειρισμούς αφήνοντας το έδαφος ιδιαίτερα λασπώδες. Αντίστοιχα, η παρατεταμένη ξηρασία είχε αντίκτυπο στη μορφολογία του εδάφους αλλοιώνοντας τη συμπεριφορά των βελτιωτικών και κατά συνέπεια τις τιμές των μετρήσεων. Εκτός από τον καιρό, λόγω του ανοιχτού χώρου και άλλοι παράγοντες δυσχέραιναν τη διεξαγωγή των μετρήσεων όπως η κοπιαστική ανάβαση στο λόφο μεταφέροντας με τα χέρια τον εργαστηριακό εξοπλισμό (όργανα μέτρησης και καλώδια), η πυκνή βλάστηση της τοποθεσίας, ή ακόμα και η τυχόν παρουσία στο χώρο άλλων ατόμων ή και ζώων τόσο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όσο και απόντος του χειριστή.

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί, ότι με αυτόν τον τρόπο οι παράγοντες που επηρεάζουν τα εξεταζόμενα υλικά επέδρασαν στην πειραματική διάταξη με καθόλα φυσική διαδικασία και όχι με τεχνητές μεθόδους στο χώρο ενός εργαστηρίου. Έτσι διασφαλίστηκαν ποικίλοι συνδυασμοί των καιρικών συνθηκών, ανά εποχή, κάτι που θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί με τεχνικά μέσα στον εργαστηριακό χώρο.

Κάποιες φορές οι μετρήσεις παρουσίαζαν σημαντική απόκλιση από τις αντίστοιχες τιμές των προηγούμενων ημερών λόγω τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάζονταν κατά τη διαδικασία λήψης. Η πιο συνήθης τέτοια περίπτωση ήταν η μη σωστή επαφή του καλωδίου μέτρησης με κάποιο ηλεκτρόδιο, κάτι που διορθωνόταν με τη σωστή επανατοποθέτηση του καλωδίου στο ηλεκτρόδιο. Πιο χρονοβόρα, ως προς την αντιμετώπιση, προβλήματα ήταν η αναπτυσσόμενη σκουριά στα ηλεκτρόδια που έπρεπε να καθαριστεί με ειδική συρμάτινη βούρτσα ή τυχόν

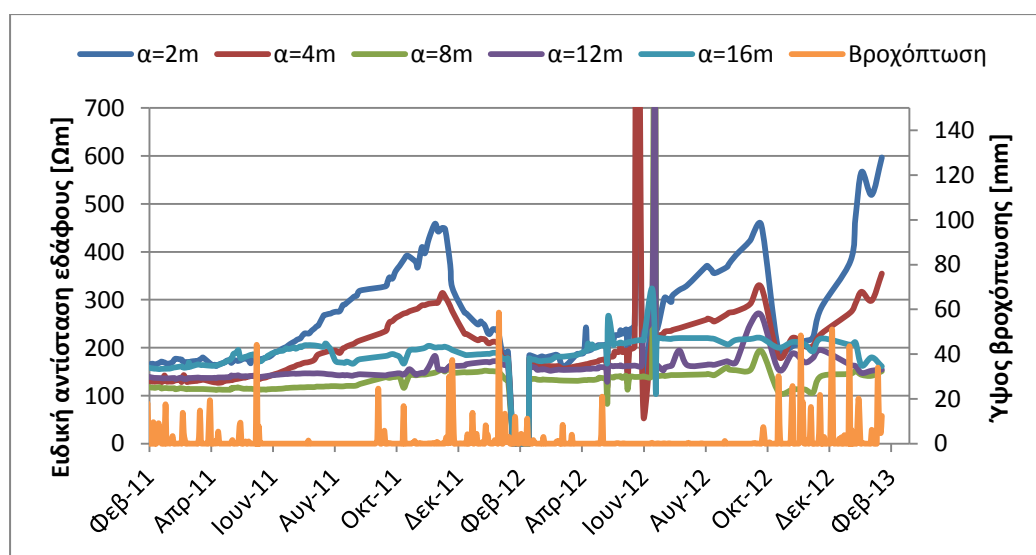
διακοπή ενός καλωδίου μέτρησης σε κάποιο σημείο οπότε και έπρεπε να επισκευασθεί. Σε κάθε περίπτωση η παρουσίαση κάποιου από τα παραπάνω προβλήματα σήμαινε πως η διαδικασία μέτρησης σταματούσε και συνεχιζόταν μετά την αποκατάστασή του προβλήματος.

Τα παραπάνω προβλήματα και δυσκολίες στη διεξαγωγή των μετρήσεων αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την πραγματοποίηση τέτοιων μελετών, με συνέπεια να μην πραγματοποιούνται τέτοιες έρευνες σε μεγάλη κλίμακα. Εκτός από το παρόν πείραμα γίνονται αντίστοιχα πειράματα αυτήν την περίοδο στο Μεξικό, ενώ έχουν γίνει ή συνεχίζουν να γίνονται παρόμοιες έρευνες στη Μαλαισία.

#### 4.6 Αποτελέσματα – Επεξεργασία και αξιολόγηση

Στην ενότητα αυτή παρατίθεται μια διαγραμματική παρουσίαση των μετρήσεων που συλλέχθηκαν κατά την παρούσα εργασία (17/02/2011 μέχρι και 28/2/2013) καταλήγοντας έτσι σε χρήσιμα συμπεράσματα.

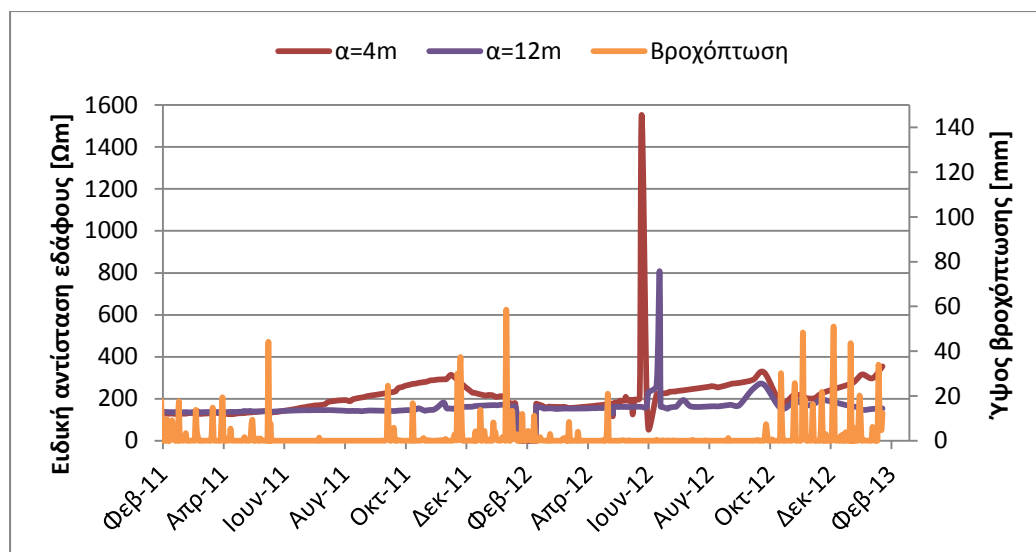
Ακολουθούν διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους  $\rho_s$  συναρτήσει του χρόνου και της βροχόπτωσης, για διάφορα βάθη ανάλογα με την απόσταση  $\alpha$  των βοηθητικών ηλεκτροδίων. Από τα διαγράμματα προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη φυσική δομή του εδάφους όπου πραγματοποιήθηκε το πείραμα, για την υδραυλική αγωγιμότητά του και τη συμπεριφορά του ως προς την κατακράτηση υγρασίας.



Σχήμα 4.4: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους και της βροχόπτωσης με το χρόνο για αποστάσεις  $\alpha=2, 4, 8, 12, 16$  m.

Τους θερινούς μήνες του 2012 για απόσταση 4m και 12m μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων σημειώνεται μεγάλη διακύμανση συγκριτικά με τις τιμές της ειδικής αντίστασης εδάφους για απόσταση 2, 8, 16m. Γι' αυτόν το λόγο ακολουθεί

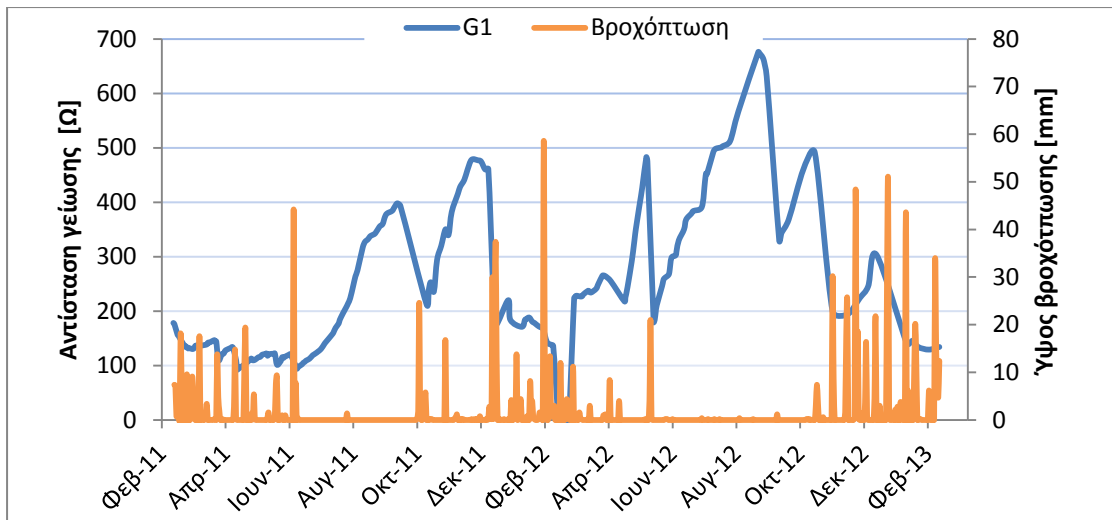
νέο διάγραμμα με τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους για τις συγκεκριμένες τιμές απόστασης (4m και 12m).



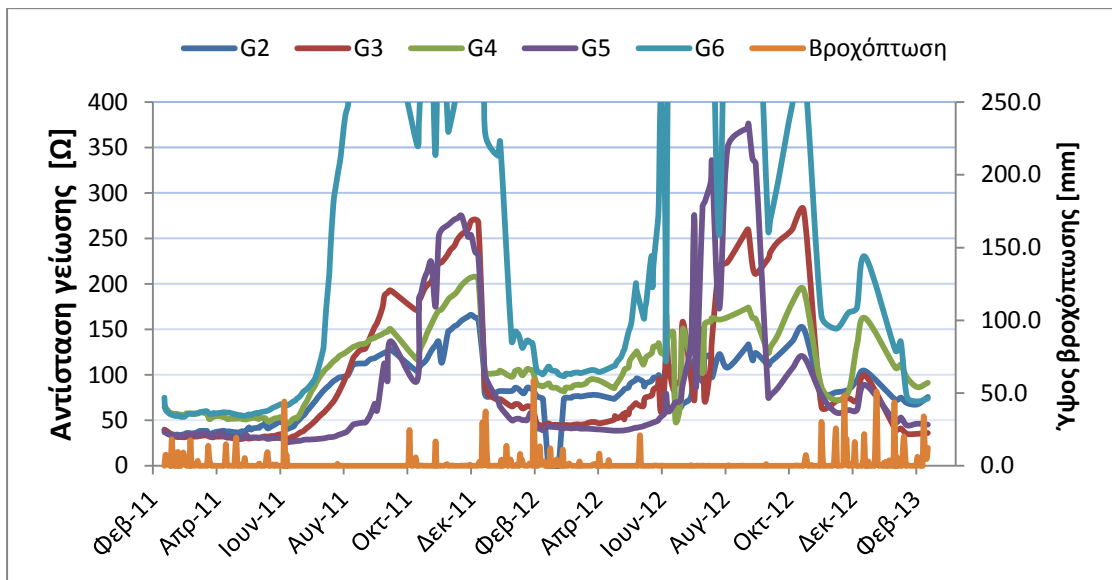
Σχήμα 4.5: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους και της βροχόπτωσης με το χρόνο για αποστάσεις  $\alpha=4$  και  $12m$ .

Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης του εδάφους με καθένα από τα πέντε (5) βελτιωτικά που χρησιμοποιούνται στο πείραμα συναρτήσει του χρόνου και του ύψους βροχόπτωσης. Από τα διαγράμματα αυτά εξάγονται συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των βελτιωτικών ως προς το χρόνο, την ικανότητα συγκράτησης υγρασίας του εδάφους που είναι και ο κυρίαρχος ρόλος των βελτιωτικών, καθώς και την ταχύτητα και το είδος μεταβολής της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση με την ποσότητα νερού που προσλαμβάνεται από το έδαφος. Συνεπώς, αξιολογείται η ικανότητά τους για μείωση αλλά και διατήρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, άρα και της αντίστασης γείωσης των εξεταζόμενων συστημάτων γείωσης, σε χαμηλά επίπεδα. Ως εκ τούτου, ακολούθως μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του κάθε υλικού, έτσι ώστε να προκύψει ένα ικανό και αξιόπιστο κριτήριο για τη σύγκριση μεταξύ τους.



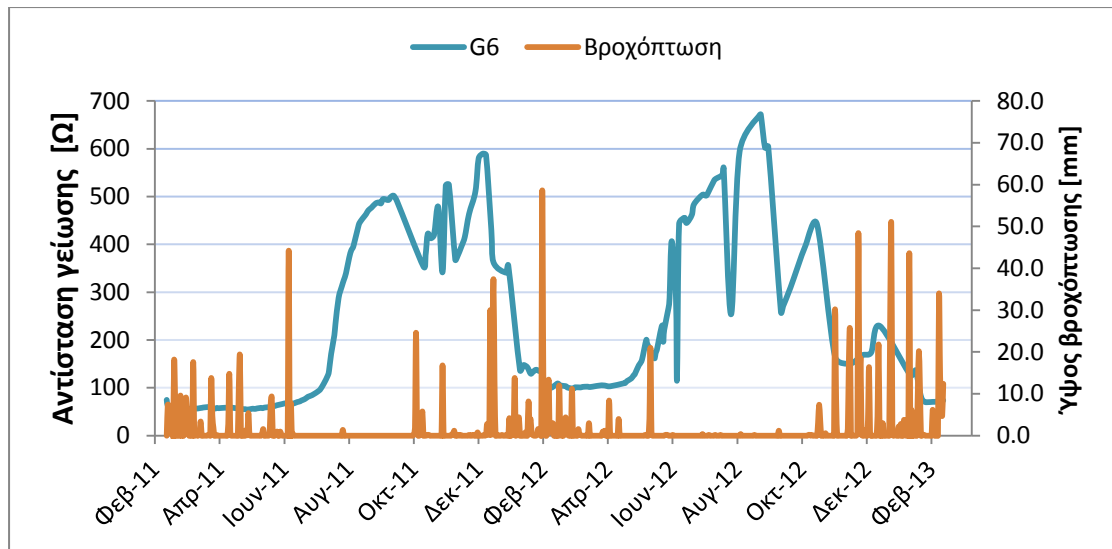


Σχήμα 4.6: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του G1 και της βροχόπτωσης με το χρόνο.



Σχήμα 4.7: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης των G2, G3, G4, G5, G6 και της βροχόπτωσης με το χρόνο[60].

Η μεταβολή της αντίστασης γείωσης του G6 παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές συγκριτικά με εκείνες των G2, G3, G4, G5. Γι' αυτόν το λόγο παρουσιάζεται ξεχωριστά στο ακόλουθο σχήμα (4.8).



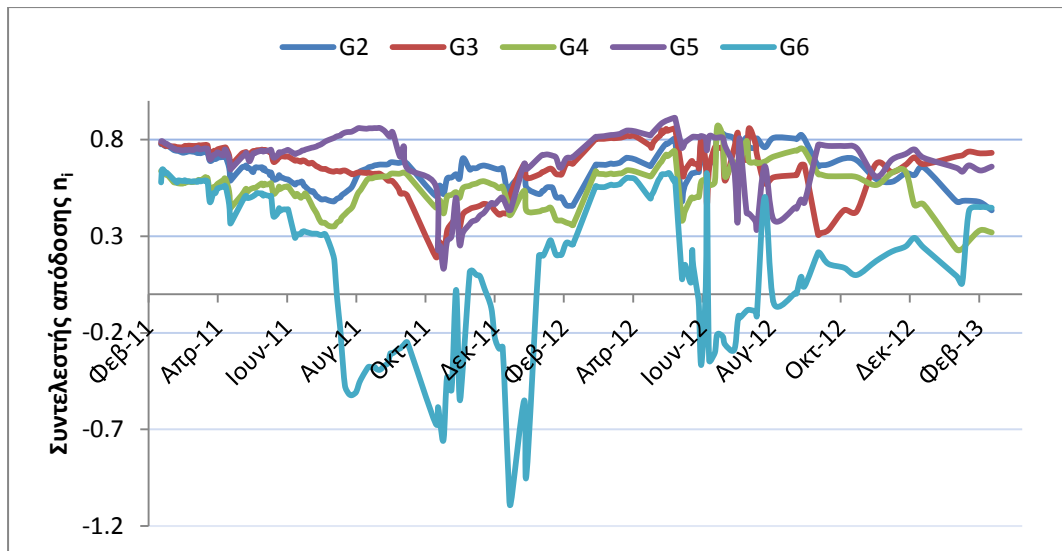
Σχήμα 4.8: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του G6 και της βροχόπτωσης με το χρόνο.

Παρατηρείται στα σχήματα (4.6), (4.7), (4.8) ότι η βροχόπτωση και συνεπώς η υγρασία του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά τη διακύμανση των τιμών αντίστασης γείωσης. Συγκεκριμένα, για τις υψηλές τιμές του ύψους βροχόπτωσης που παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες η αντίσταση γείωσης των βελτιωτικών υλικών διατηρείται σε χαμηλές τιμές παρουσιάζοντας αξιοσημείωτη σταθερότητα. Το καλοκαίρι που σημειώνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες και παρατεταμένη ξηρασία παρατηρείται μεγάλη αύξηση στις τιμές αντίστασης γείωσης και έντονη διακύμανση. Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι η ικανότητα ενός βελτιωτικού υλικού γείωσης να συγκρατεί την υγρασία του εδάφους, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες, είναι ο κύριος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή των διαφορετικών τύπων βελτιωτικών υλικών γείωσης.

Ως απόδοση ενός βελτιωτικού υλικού γείωσης μπορεί να οριστεί η ικανότητα του υλικού αυτού να μειώνει την τιμή της αντίστασης γείωσης του εδάφους. Ο σχετικός συντελεστής απόδοσης  $n_i$  μπορεί λοιπόν να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση [60]:

$$n_i = 1 - \frac{R_i}{R_l}$$

όπου  $R_i$  η αντίσταση γείωσης στο  $G_i$  ηλεκτρόδιο γείωσης και  $R_l$  η αντίσταση γείωσης στο ηλεκτρόδιο αναφοράς  $G_l$ . Ακολουθεί διάγραμμα με τις τιμές του συντελεστή απόδοσης συναρτήσει του χρόνου για το κάθε βελτιωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.



Σχήμα 4.9: Συντελεστής απόδοσης των βελτιωτικών υλικών.

Παρατηρείται ότι και τα πέντε βελτιωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα έχουν αρχικά υψηλή απόδοση και στη συνέχεια η τιμή της απόδοσής τους ακολουθεί φθίνουσα πορεία με την πάροδο του χρόνου. Την υψηλότερη αρχική απόδοση έχουν το χημικό υλικό Β (ηλεκτρόδιο  $G_5$ ), ο μπετονίτης (ηλεκτρόδιο  $G_3$ ) και το σκυρόδεμα (ηλεκτρόδιο  $G_2$ ). Η μετέπειτα πτώση στην απόδοση του κάθε υλικού οφείλεται, εκτός από την υγρασία του εδάφους, στην απορρόφηση του κάθε υλικού από το έδαφος κάτι που φαίνεται έντονα στην απόδοση του χημικού υλικού C (ηλεκτρόδιο  $G_6$ ) όπου ο συντελεστής απόδοσής του φτάνει σε αρνητικές τιμές, δηλαδή η αντίσταση γείωσης του συγκεκριμένου συστήματος έχει αυξηθεί υπερβολικά σε σχέση με την αντίστοιχη στο φυσικό έδαφος. Αυτό οφείλεται στη σταδιακή συρρίκνωση του υλικού γύρω από το ηλεκτρόδιο  $G_6$  και το σχηματισμό κενού ανάμεσα στο έδαφος και το ηλεκτρόδιο μετά την πλήρη απορρόφησή του. Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στις εικόνες (4.8) και (4.9). Η απότομη αύξηση του συντελεστή απόδοσης στο  $G_6$  τον Ιανουάριο του 2012 οφείλεται σε εμπλουτισμό της ποσότητας του χημικού υλικού C γύρω από το ηλεκτρόδιο.



Εικόνα 4.8: Συρρίκνωση του βελτιωτικού υλικού.



Εικόνα 4.9: Οριστική απώλεια του βελτιωτικού υλικού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

#### 5.1 Εισαγωγή

Σ' αυτό το κεφάλαιο κατασκευάζεται ένα νευρωνικό δίκτυο στο περιβάλλον του υπολογιστικού πακέτου Matlab και εκπαιδεύεται για δύο διαφορετικά σενάρια με τους αλγόριθμους που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Κατά την εκπαίδευση του δικτύου αξιολογείται μία σειρά παραμέτρων και στο τέλος, αφού παρουσιαστούν οι αλγόριθμοι με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αναδεικνύεται ο αλγόριθμος, που εμφανίζει αποτελέσματα πιο κοντά στην πραγματικότητα.

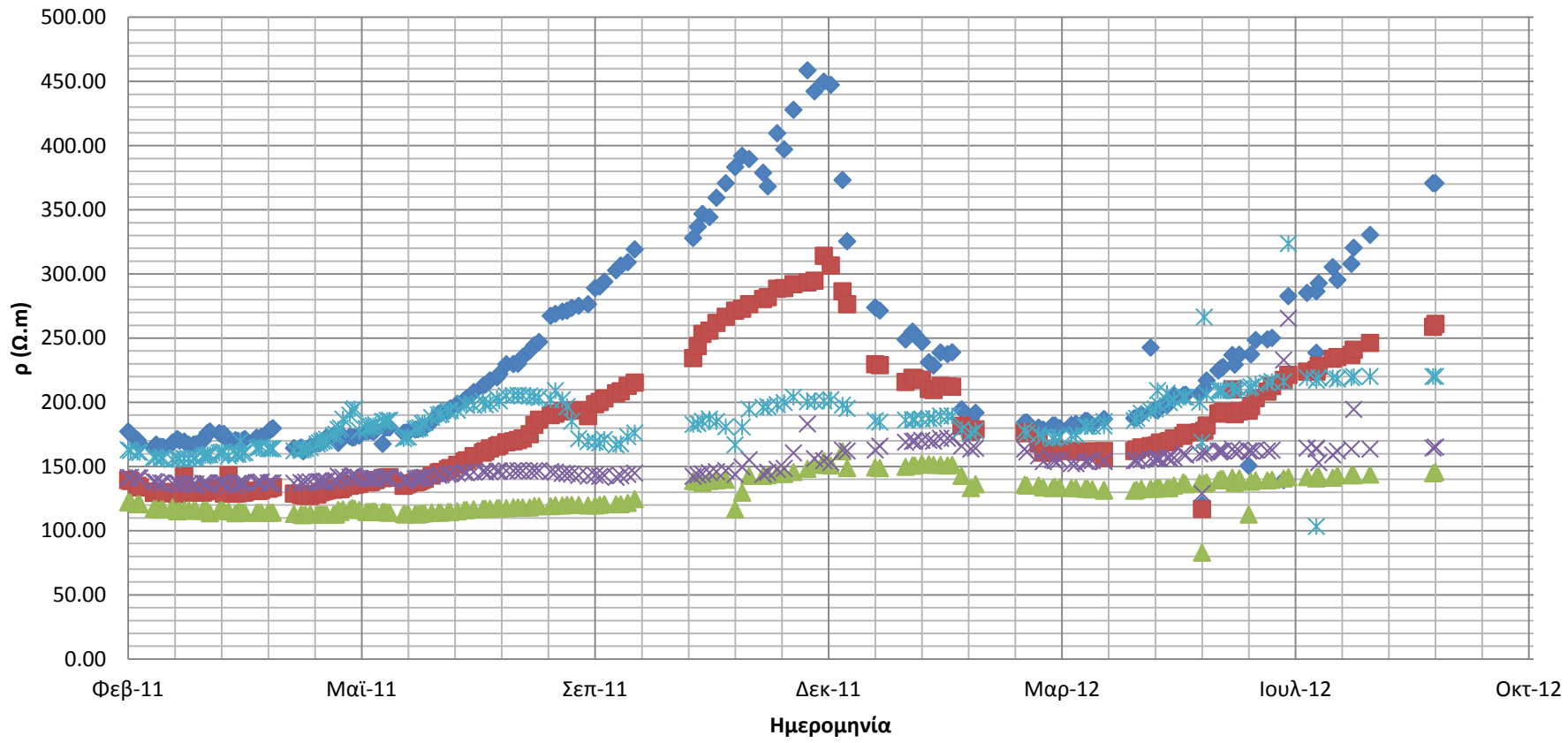
#### 5.2 Εκπαίδευση

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα έχουν την ικανότητα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, να εκπαιδεύονται. Ο όρος «εκπαίδευση» αφορά στον υπολογισμό των συναπτικών βαρών μεταξύ των νευρώνων στο δίκτυο, ώστε η απόκριση του νευρωνικού δικτύου να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές τιμές. Ουσιαστικά κατά την εκπαίδευση του δικτύου αρχικοποιούνται σε πρώτο στάδιο οι τιμές των βαρών και των κατωφλίων. Έπειτα για κάθε πρότυπο εισόδου υπολογίζονται εκ νέου τα βάρη και οι τιμές των κατωφλίων μέχρι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της εξόδου του νευρωνικού δικτύου και των πραγματικών τιμών να ελαχιστοποιηθεί. Ύστερα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής το δίκτυο έχει πλέον εκπαιδευτεί και στη συνέχεια γενικεύεται η γνώση που έχει αποκτήσει. Αυτό σημαίνει, ότι, όταν στην είσοδο δοθεί ένα πρότυπο για πρώτη φορά, τότε το δίκτυο στην έξοδό του θα δώσει μία τιμή πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 185 πρότυπα εισόδου και η εκπαίδευση του δικτύου έγινε στο περιβάλλον της Matlab. Η εφαρμογή όλων των προτύπων εισόδου στο δίκτυο απαρτίζει μία εποχή. Τα πρότυπα αυτά χωρίζονται σε τρία υποσύνολα. Το πρώτο υποσύνολο είναι το σύνολο εκπαίδευσης, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κλίσης της συνάρτησης σφάλματος και την ανανέωση των βαρών και των τιμών κατωφλίου. Το δεύτερο υποσύνολο είναι το σύνολο αξιολόγησης, το σφάλμα του οποίου παρακολουθείται διαρκώς κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Κανονικά το σφάλμα του συνόλου πρέπει να μειώνεται, όπως γίνεται και με το σφάλμα του συνόλου εκπαίδευσης. Ωστόσο όταν παρατηρείται η υπερεκπαίδευση (overfit) του συνόλου, τότε το σφάλμα του αρχίζει να αυξάνεται. Όταν η αύξηση αυτή συνεχίζεται για έναν αριθμό επαναλήψεων, τότε η εκπαίδευση τερματίζεται και οι τιμές των κατωφλίων και των βαρών επιστρέφουν σε αυτές που δίνουν το ελάχιστο σφάλμα. Τέλος, υπάρχει και το σύνολο ελέγχου, το οποίο δε χρησιμοποιείται στη διαδικασία της εκπαίδευσης, αλλά για να γίνει η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μοντέλων.

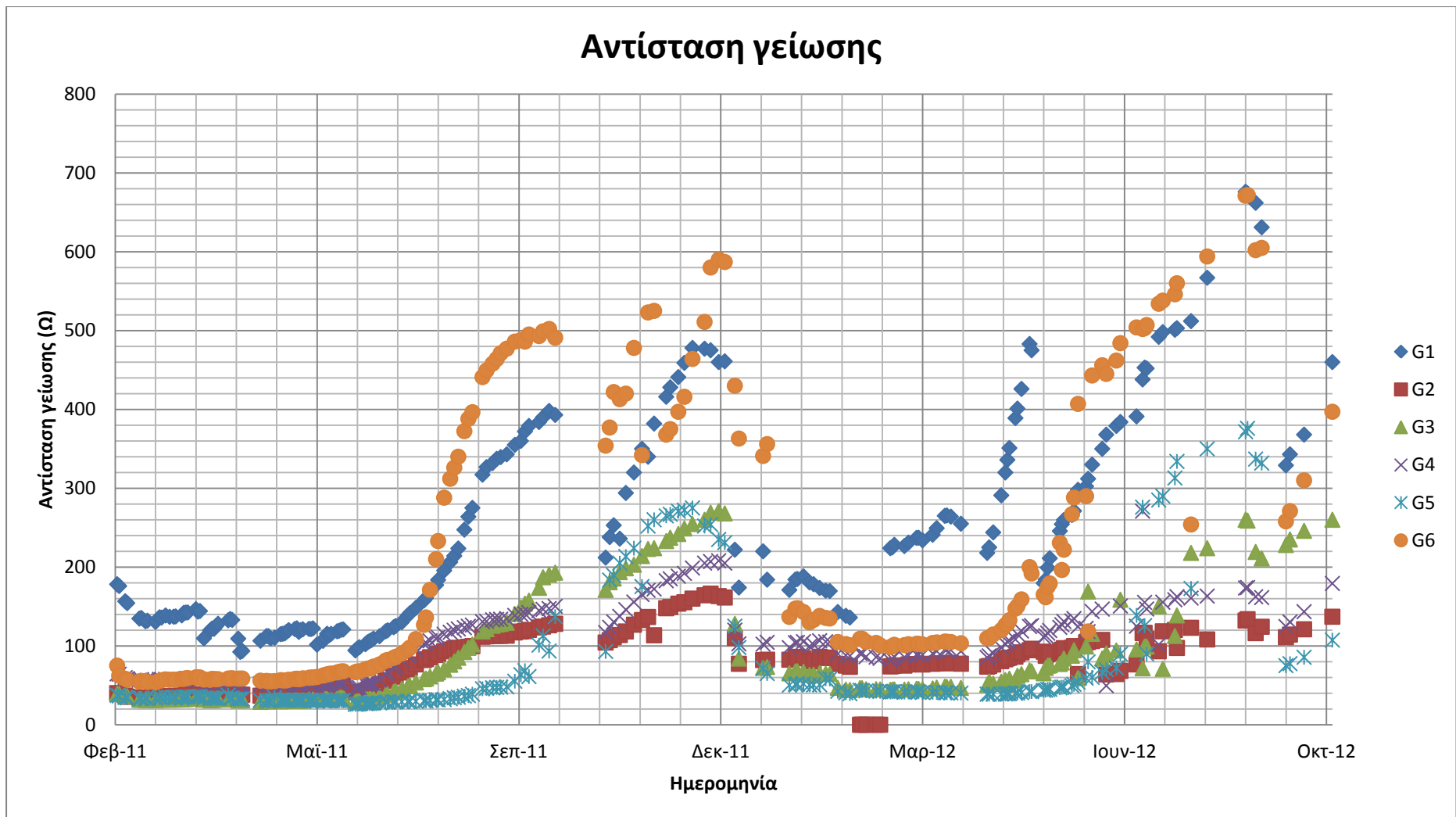
Για την εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις που ελήφθησαν στο χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου μεταξύ του Φεβρουαρίου του 2011 και του Οκτωβρίου του 2012. Οι μετρήσεις αφορούν στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για διάφορες τιμές του βάθους και στη μέτρηση της αντίστασης γείωσης. Για την αντίσταση γείωσης χρησιμοποιήθηκαν πέντε βελτιωτικά υλικά και η έκτη μέτρηση ήταν απευθείας στο έδαφος, χωρίς κάποιο βελτιωτικό. Επίσης σε καθημερινή βάση γινόταν μέτρηση του ύψους της βροχόπτωσης.

# Ειδική Αντίσταση Εδάφους

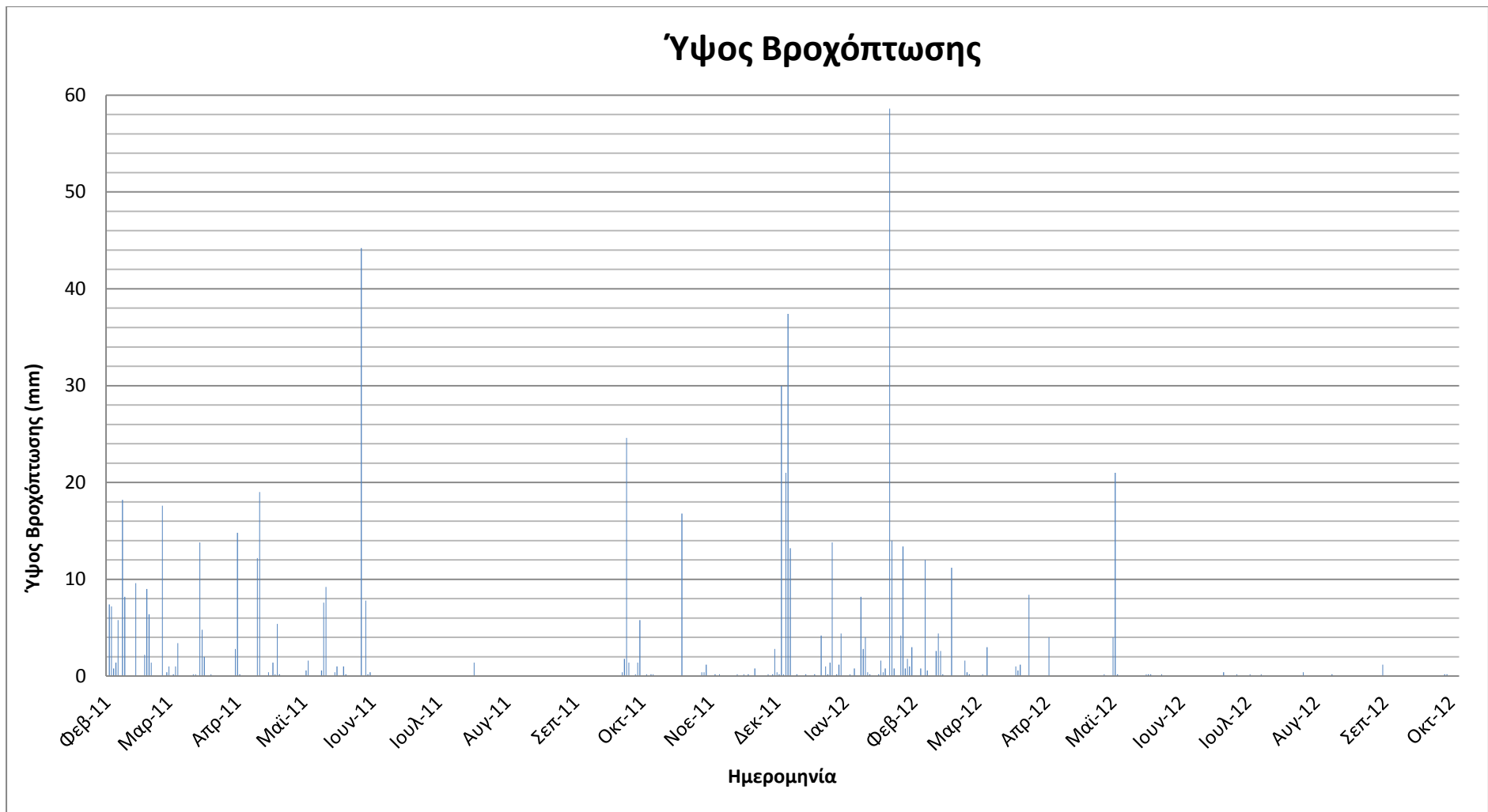
◆ 2m ■ 4m ▲ 8m × 12m \* 16m



Σχήμα 5.1: Τιμές της ειδικής αντίστασης εδάφους κατά την περίοδο των μετρήσεων.



Σχήμα 5.2: Αντίσταση γείωσης για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια του εδάφους κατά την περίοδο των μετρήσεων.



Σχήμα 5.3: Ύψος βροχόπτωσης κατά την περίοδο των μετρήσεων.



Έχοντας τα δεδομένα εισόδου πλέον, κατασκευάζεται ένα δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης, στο οποίο εφαρμόζεται ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος. Το δίκτυο εκπαιδεύεται με όλους τους δυνατούς αλγορίθμους εκπαίδευσης που διαθέτει η Matlab. Για κάθε αλγόριθμο μάλιστα θα επιλεγεί η βέλτιστη τιμή των παραμέτρων, ώστε στην έξοδο να λαμβάνεται η καλύτερη δυνατή απόκριση. Ακολούθως, παρουσιάζονται συνοπτικά οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης, τα αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιαστούν παρακάτω.

**Πίνακας 5.1: Αλγόριθμοι που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο.**

<b>1</b>	Εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (Random order incremental training with learning functions)
<b>2</b>	Εκπαίδευση ανά εποχή (Batch training with weight and bias learning rules)
<b>3</b>	Εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής (Gradient descent with momentum and adaptive learning rate backpropagation)
<b>4</b>	Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (Quasi-Newton backpropagation)
<b>5</b>	Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (Levenberg-Marquardt backpropagation)

Για κάθε αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί υπάρχει μία λίστα παραμέτρων που πρέπει να καθοριστεί για το νευρωνικό δίκτυο.

Αρχικά καθορίζεται ο βέλτιστος αριθμός των νευρώνων του κρυμμένου επιπέδου. Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται διατηρώντας όλες τις παραμέτρους σταθερές και μεταβάλλοντας μόνο τον αριθμό των νευρώνων. Ο αριθμός τους κυμαίνεται μεταξύ του 2 και του 25 και επιλέγεται ο αριθμός των νευρώνων, που δίνει τη βέλτιστη έξοδο.

Έπειτα η επόμενη παράμετρος που χρειάζεται να προσδιοριστεί είναι οι συναρτήσεις ενεργοποίησης από το επίπεδο εισόδου στο κρυμμένο επίπεδο και από το κρυμμένο επίπεδο στο επίπεδο εξόδου. Οι επιλογές είναι τρεις για κάθε νευρώνα. Μπορεί να εφαρμοστεί η γραμμική συνάρτηση, η λογιστική και η υπερβολική εφαπτομένη. Για κάθε επίπεδο δοκιμάζεται ο συνδυασμός όλων των συναρτήσεων μεταξύ τους και επιλέγεται ο συνδυασμός με το καλύτερο αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια έχοντας ρυθμίσει τις παραπάνω παραμέτρους πραγματοποιείται η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Προτού όμως γίνει αυτό θα γίνει μία αναφορά στα δεδομένα εισόδου και τα σενάρια που θα τρέξουν. Αρχικά οι παραπάνω μετρήσεις οι οποίες λήφθηκαν κυμαίνονται μέσα σε ένα ευρύ διάστημα τιμών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το δίκτυο να οδηγηθεί σε κορεσμό για συγκεκριμένες συναρτήσεις ενεργοποίησης, διότι, όταν οι τιμές του πεδίου ορισμού των συναρτήσεων αυτών βρίσκονται έξω από ένα μικρό διάστημα, τότε στην έξοδο η συνάρτηση δίνει σχεδόν την ίδια τιμή, με αποτέλεσμα να μην εκπαιδεύεται αποτελεσματικά το δίκτυο. Ως εκ

τούτου κρίνεται αναγκαία η κανονικοποίηση των δεδομένων εισόδου στο διάστημα  $[-1 \ 1]$ , οπότε στην έξοδο οι τιμές διαφέρουν αισθητά μεταξύ τους.

Τέλος μία σημαντική παράμετρος στην εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου αποτελούν τα κριτήρια τερματισμού. Τα κριτήρια τερματισμού είναι τρία. Πρώτο κριτήριο είναι ο αριθμός των εποχών, ο οποίος ορίζεται στις 7000 για τους περισσότερους αλγορίθμους. Δεύτερο κριτήριο, που εφαρμόζεται και συχνότερα, είναι ο αριθμός των επαναλήψεων κατά τον οποίο παρατηρείται αύξηση του σφάλματος του συνόλου αξιολόγησης, ο οποίος περιορίζεται στις 6 επαναλήψεις. Το τρίτο και τελευταίο κριτήριο είναι η κλίση της συνάρτησης σφάλματος, το όριο της οποίας ορίζεται στην τιμή  $10^{-10}$ .

Αναφορικά με την εκπαίδευση του δικτύου θα εφαρμοστούν δύο σενάρια εκπαίδευσης. Η βασική διαφορά στα δύο αυτά σενάρια είναι τα δεδομένα εισόδου.

**1<sup>ο</sup> Σενάριο:** Στην είσοδο του νευρωνικού δικτύου υπάρχουν 10 είσοδοι. Τα δεδομένα εισόδου είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους για διάφορα βάθη και το ύψος της βροχόπτωσης. Επειδή η εκτίμηση της τιμής της αντίστασης γείωσης του εδάφους εξαρτάται άμεσα από τις τιμές για προηγούμενες χρονικές περιόδους, επιλέχθηκε στην είσοδο του νευρωνικού δικτύου να μη χρησιμοποιηθούν οι τιμές της προηγούμενης ημέρας. Αντιθέτως, θεωρήθηκε ορθότερο στην είσοδο να έχουμε τη μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για το διάστημα της προηγούμενης εβδομάδας. Επίσης ως είσοδος επιλέχθηκε η μέση τιμή της αντίστασης του εδάφους για τον προηγούμενο μήνα για τα βάθη του ενός μέτρου και των δύο μέτρων. Αυτό επιλέχθηκε, διότι οι τιμές σε αυτά τα βάθη είναι περισσότερο ευμετάβλητες. Σε μεγαλύτερο βάθος το έδαφος είναι αρκετά υγρό, επομένως η ειδική αντίσταση δε μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό σχετικά με τις συνθήκες βροχόπτωσης. Τέλος, οι τρεις τελευταίες είσοδοι είναι η συνολική βροχόπτωση την προηγούμενη εβδομάδα από την ημέρα της εκτίμησης, τον προηγούμενο μήνα και την ίδια την ημέρα που γίνεται η εκτίμηση. Ως εκ τούτου στην είσοδο υπάρχει τόσο η βροχόπτωση, η επίδραση της οποίας μελετάται, αλλά και η ειδική αντίσταση του εδάφους για τα διάφορα βάθη.

**2<sup>ο</sup> Σενάριο:** Για την εφαρμογή του δεύτερου σεναρίου έγινε μία προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα CYMGrd. Πρακτικά το πρόγραμμα αυτό προσομοιώνει το έδαφος με ένα διστρωματικό μοντέλο εδάφους. Για κάθε ομάδα τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους για βάθη 1, 2, 4, 6 και 8 μέτρα λαμβάνονται επιλεκτικά μέσω του εν λόγω προγράμματος οι εξής τιμές:

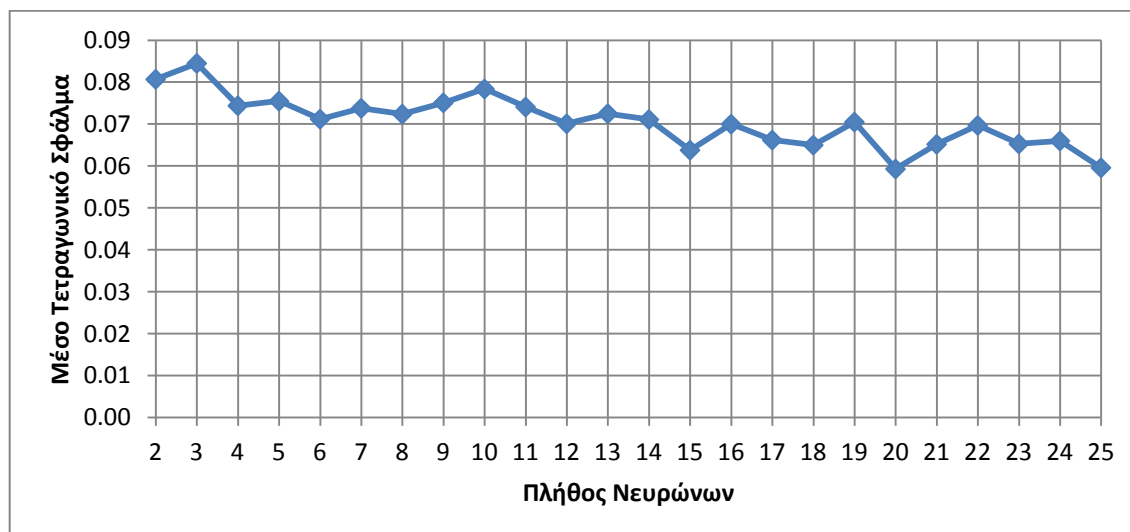
- Πάχος άνω στρώματος εδάφους
- Ειδική αντίσταση άνω στρώματος εδάφους
- Ειδική αντίσταση κάτω στρώματος εδάφους
- Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση επαφής
- Μέγιστη επιτρεπόμενη βηματική τάση
- RMS σφάλμα

Από τις εξόδους αυτές αξιοποιούνται για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου μόνο η ειδική αντίσταση των δύο στρωμάτων. Για τον ίδιο λόγο όμως που παρουσιάστηκε στο πρώτο σενάριο, επιλέγεται ο υπολογισμός της μέσης τιμής της ειδικής αντίστασης άνω και κάτω στρώματος την προηγούμενη εβδομάδα και τον προηγούμενο μήνα από την ημέρα της εκτίμησης. Επομένως οι εισοδοί είναι συνολικά επτά. Οι τέσσερις προέρχονται από τη μέση τιμή των δύο στρωμάτων του εδάφους την τελευταία εβδομάδα και τον τελευταίο μήνα και οι άλλες τρεις είναι η συνολική βροχόπτωση την ημέρα της πρόβλεψης, την προηγούμενη εβδομάδα και τον προηγούμενο μήνα. Η έξοδος πάλι είναι η αντίσταση γείωσης του εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια.

### 5.3 Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για το 1<sup>ο</sup> σενάριο

#### 5.3.1. Εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης

Το περιβάλλον της Matlab διαθέτει δύο συναρτήσεις για εκπαίδευση ανά πρότυπο. Από τις δύο αυτές επιλέχθηκε η συνάρτηση κατά την οποία τα διανύσματα εισόδου δίνονται με τυχαίο τρόπο και όχι με τη σειρά. Για κάθε εποχή τα διανύσματα εκπαίδευσης τροφοδοτούνται με τυχαία σειρά στο δίκτυο και οι τιμές του δικτύου ανανεώνονται με κάθε πέρασμα του διανύσματος. Αρχικά εξετάζεται ο ιδανικός αριθμός νευρώνων που δίνει στην έξοδο την καλύτερη δυνατή απόδοση. Μετά από επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις του αλγορίθμου για διάφορους αριθμούς νευρώνων προέκυψε το παρακάτω γράφημα, το οποίο αναπαριστά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσεως του πλήθους των νευρώνων. Να σημειωθεί ότι εδώ ο αλγόριθμος τερματιζόταν στις εκατό επαναλήψεις, καθώς ο ρυθμός σύγκλισης ήταν πολύ μικρός.



Σχήμα 5.4: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το πλήθος των νευρώνων για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης.

Με βάση το γράφημα αυτό συνάγεται, ότι το δίκτυο δίνει ακριβέστερη έξοδο με είκοσι νευρώνες. Με δεδομένο αυτό ακολουθεί το επόμενο βήμα, όπου επιλέγεται ο βέλτιστος συνδυασμός των συναρτήσεων ενεργοποίησης των επιπέδων. Για κάθε

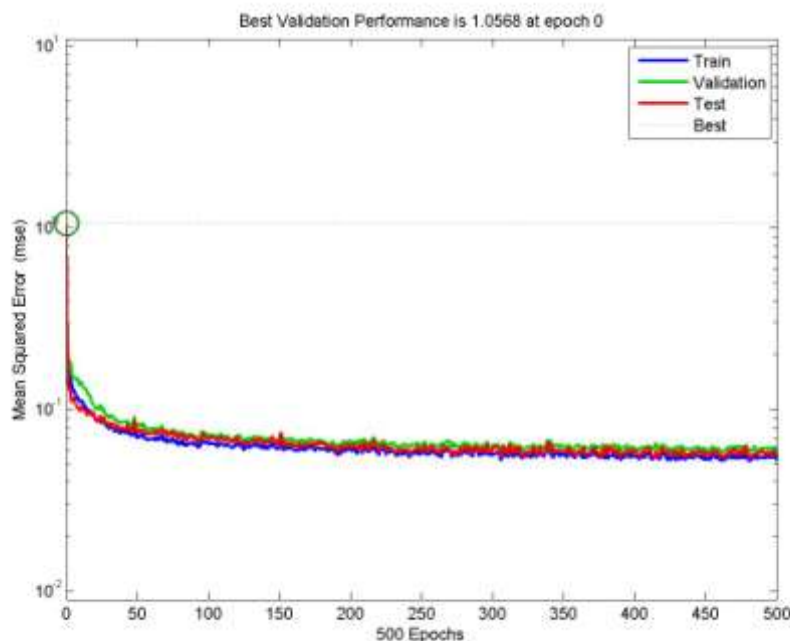
αλγόριθμο σχηματίζεται ο παρακάτω πίνακας, στον οποίο απεικονίζεται το σφάλμα του αλγορίθμου για κάθε συνδυασμό συναρτήσεων ενεργοποίησης.

**Πίνακας 5.2: Δυνατοί συνδυασμοί των συναρτήσεων ενεργοποίησης για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης.**

Συναρτήσεις Ενεργοποίησης		2 <sup>ο</sup> επίπεδο		
		Γραμμική	Σιγμοειδής	Υπερβολική Εφαπτομένη
1 <sup>ο</sup> επίπεδο	Γραμμική	0.0677	0.127	0.0799
	Σιγμοειδής	0.0728	0.151	0.0939
	Υπερβολική Εφαπτομένη	0.0646	0.131	0.668

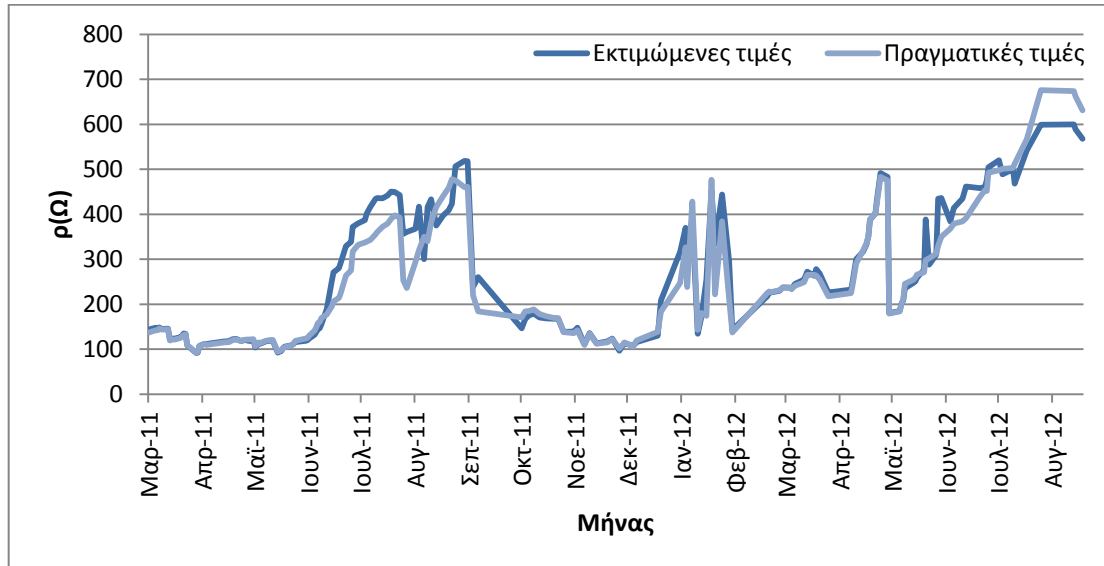
Από τον πίνακα αυτό συνάγεται το συμπέρασμα ότι, η βέλτιστη επιλογή είναι στο πρώτο επίπεδο να επιλεγεί η υπερβολική εφαπτομένη ως συνάρτηση ενεργοποίησης και στο δεύτερο επίπεδο η γραμμική συνάρτηση. Για λόγους συντομίας στην παρουσίαση των υπόλοιπων αλγορίθμων εκπαίδευσης ο πίνακας δε θα παρατίθεται, αλλά θα λαμβάνεται ως δεδομένο, ότι η διαδικασία αυτή έχει προηγηθεί.

Περιορίζοντας τον αριθμό των εποχών στις 500 εκτελούμε τον αλγόριθμο έχοντας προσδιορίσει τις παραπάνω παραμέτρους και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης, το σύνολο αξιολόγησης και το σύνολο ελέγχου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:

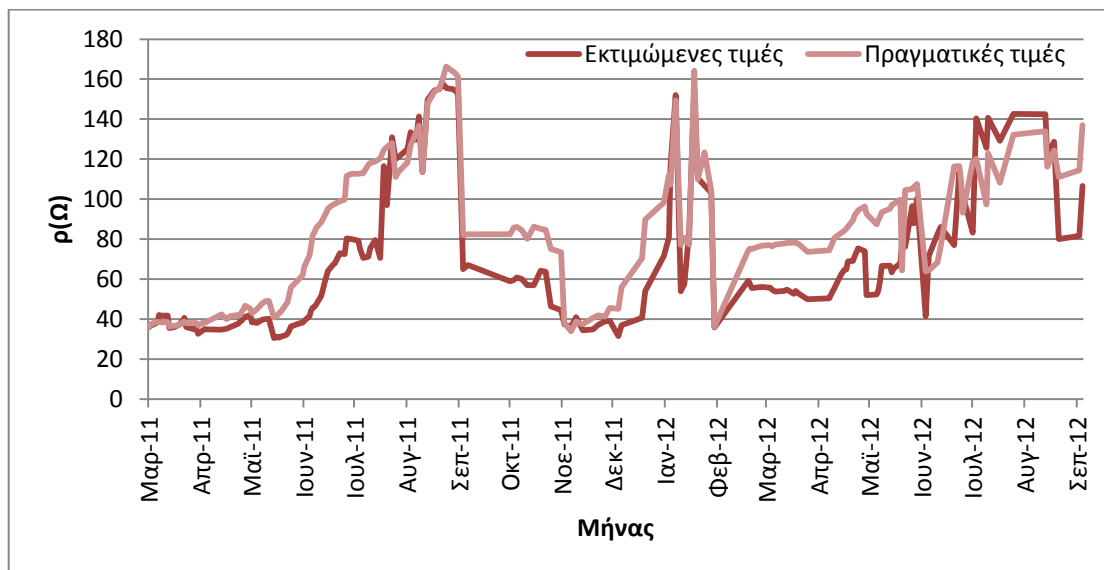


**Σχήμα 5.5: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης.**

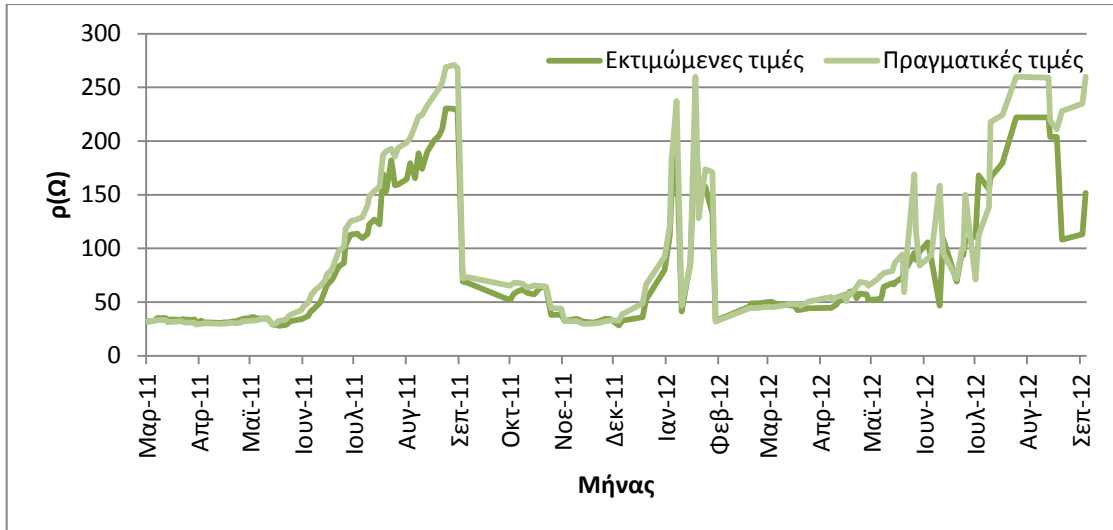
Ως κριτήριο τερματισμού εδώ είναι ο αριθμός των εποχών, ο οποίος για αυτόν τον αλγόριθμο περιορίζεται στις 500. Έχοντας πλέον εκτελέσει την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η απόκριση του νευρωνικού δικτύου σε σύγκριση με τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια.



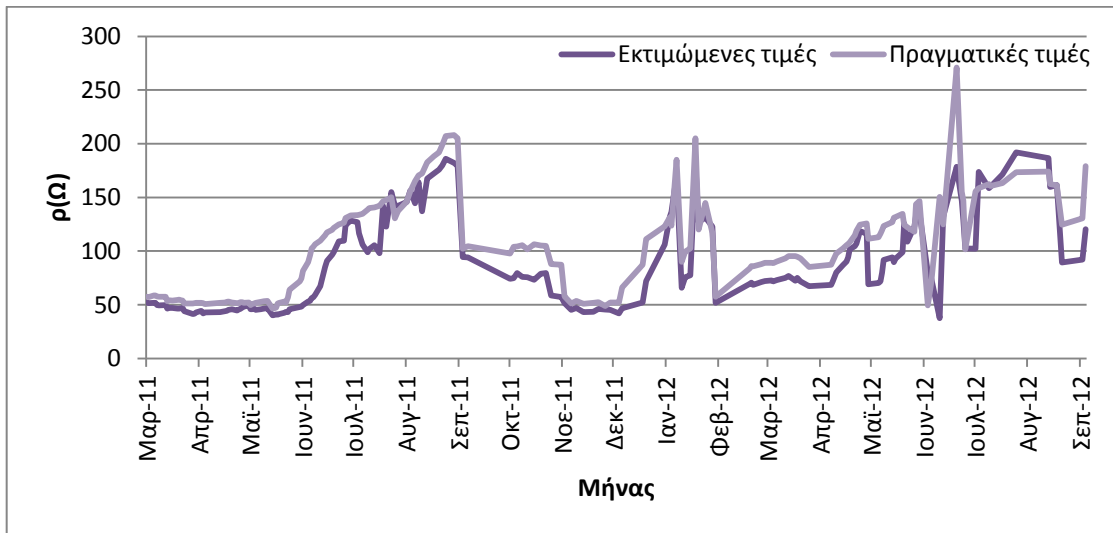
**Σχήμα 5.6-α:** Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).



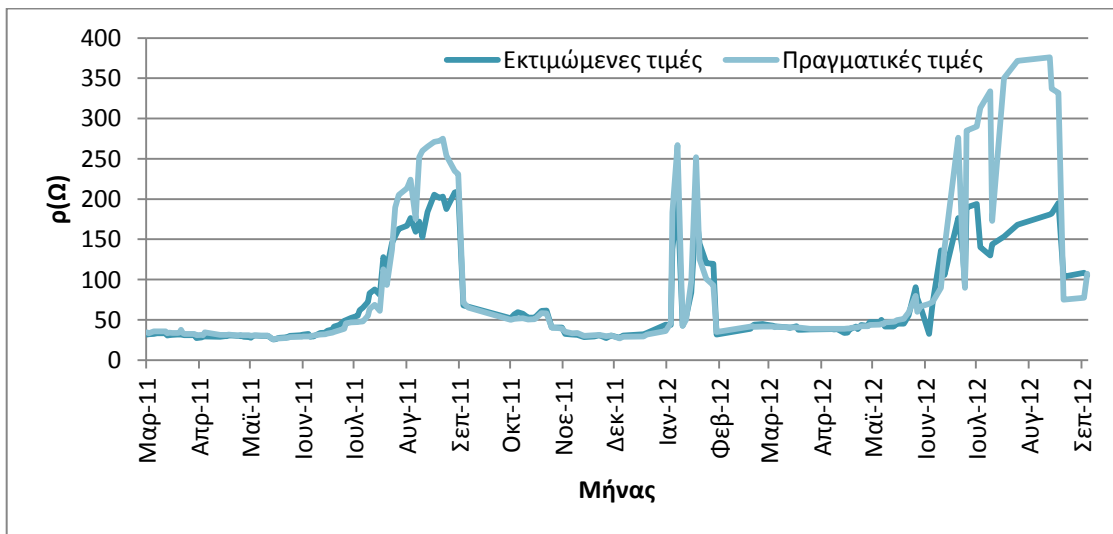
**Σχήμα 5.6-β:** Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).



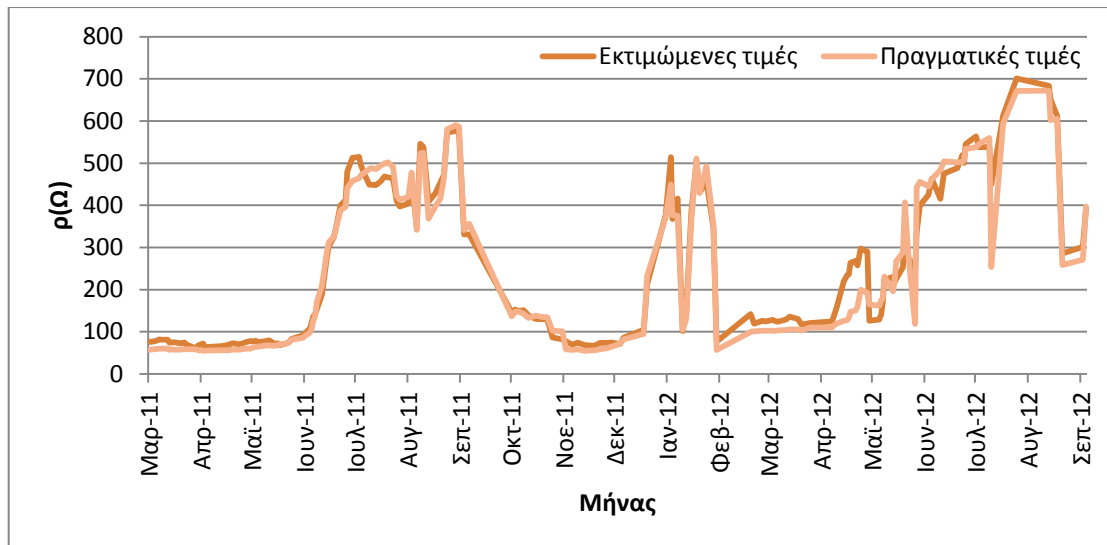
Σχήμα 5.6-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μετενοίτη) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).



Σχήμα 5.6-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).



Σχήμα 5.6-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).

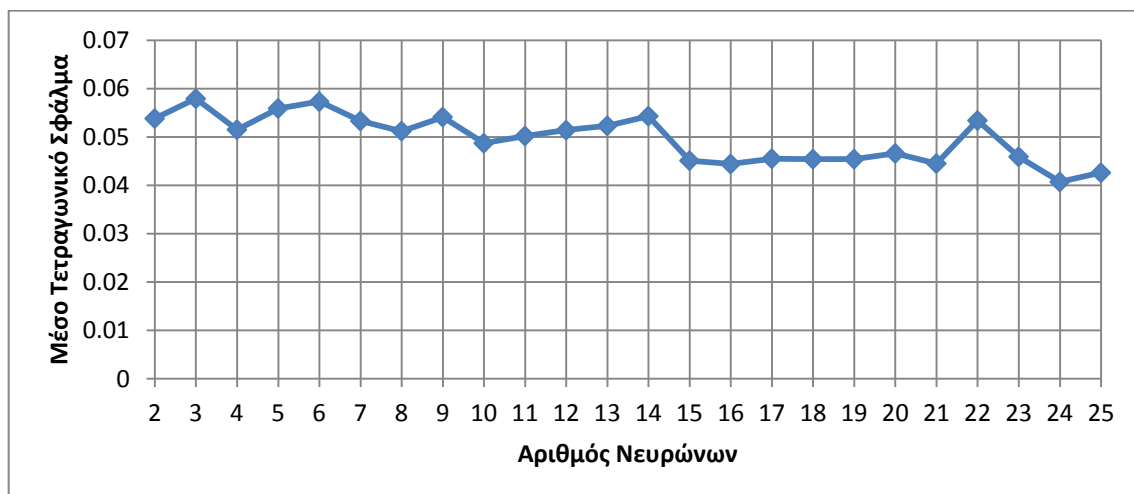


Σχήμα 5.6-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (1ο σενάριο).

Κρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα βλέπουμε πως πρόκειται για έναν αλγόριθμο, ο οποίος δίνει αποτελέσματα με αρκετά καλή ακρίβεια. Όπως θα δειχθεί και στο τέλος του κεφαλαίου, οι συντελεστές συσχέτισης είναι όλοι πάνω από 90%, γεγονός που καθιστά το μόνο αλγόριθμο εκπαίδευσης ανά πρότυπο αρκετά αξιόπιστο.

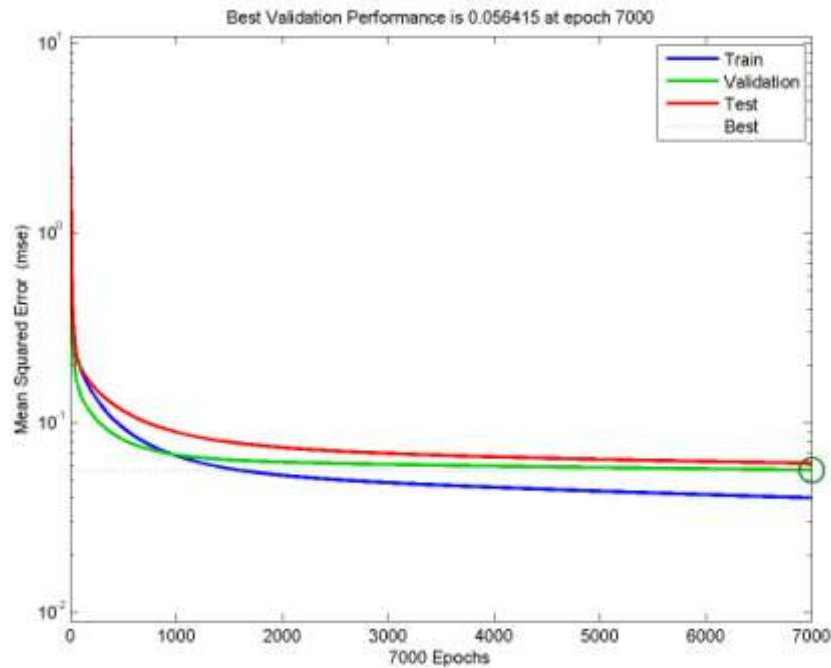
### 5.3.2. Εκπαίδευση ανά εποχή

Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου αυτού τα συναπτικά βάρη και οι τιμές καταωφλίου ανανεώνονται με το πέρασμα κάθε εποχής, δηλαδή του συνόλου των διανυσμάτων εκπαίδευσης. Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με αυτόν τον αλγόριθμο επιλέγονται 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο και ως συναρτήσεις ενεργοποίησης την υπερβολική εφραπτομένη για το πρώτο επίπεδο και τη γραμμική για το δεύτερο επίπεδο.



Σχήμα 5.7: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή.

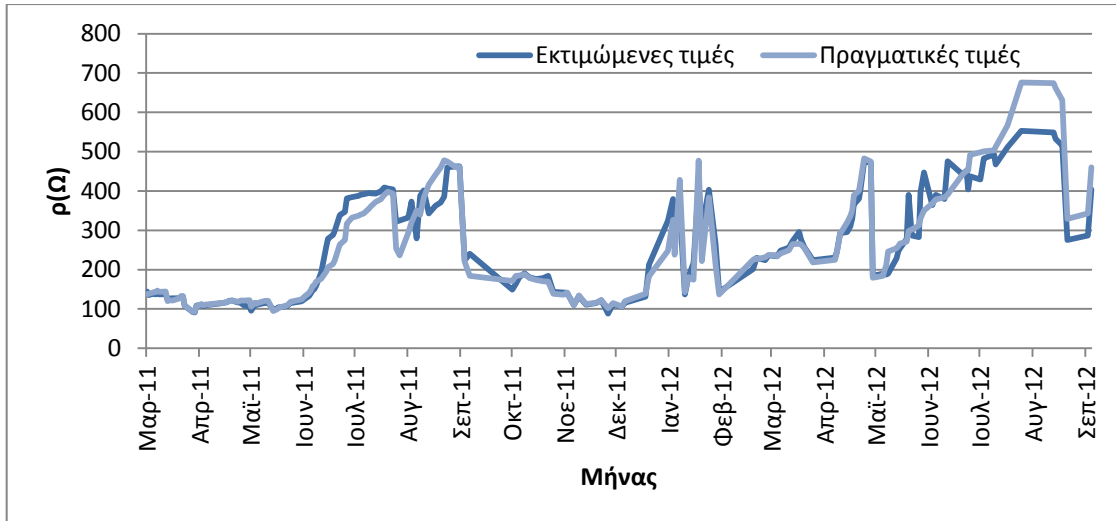
Εκπαιδευόντας το νευρωνικό δίκτυο με αυτές τις παραμέτρους σταθερές το σφάλμα του συνόλου ελέγχου είναι 0,056 και η εκπαίδευση τερματίζεται όταν ολοκληρώνεται το πέρασμα 7000 εποχών. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται η απόδοση του δικτύου, οι τιμές εξόδου του νευρωνικού δικτύου σε αντιπαραβολή με τις πειραματικές τιμές και ο πίνακας με το συντελεστή συσχέτισης των δύο συνόλων τιμών.



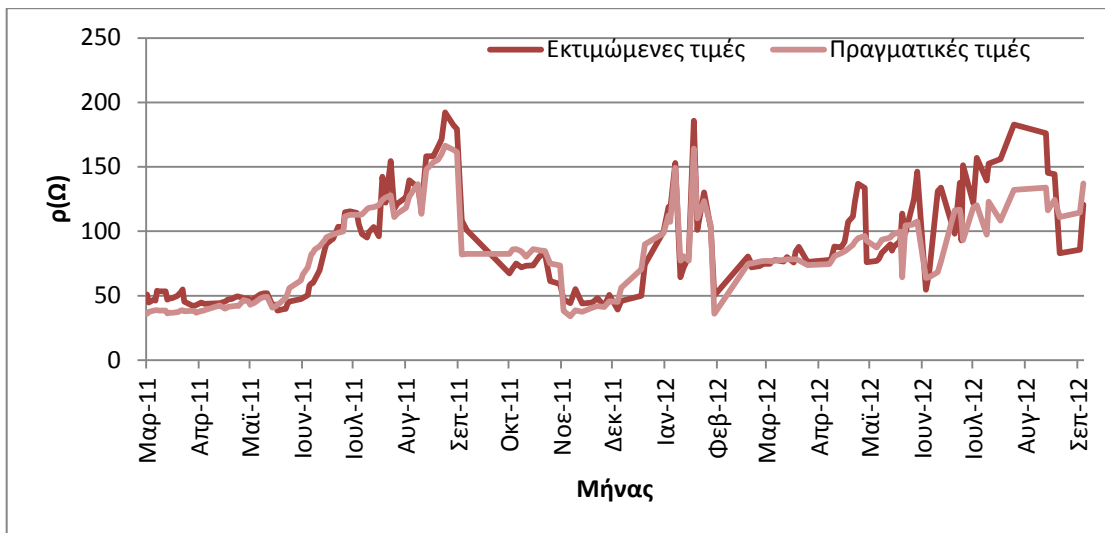
**Σχήμα 5.8:** Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε) το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή.

Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται, ότι το σφάλμα και των τριών συνόλων δε διαφέρει σημαντικά. Επίσης χαρακτηριστικό του αλγορίθμου αυτού είναι η αργή σύγκλιση του, αφού μετά από το πέρασμα περίπου χιλίων εποχών η τιμή δε μεταβάλλεται σημαντικά.

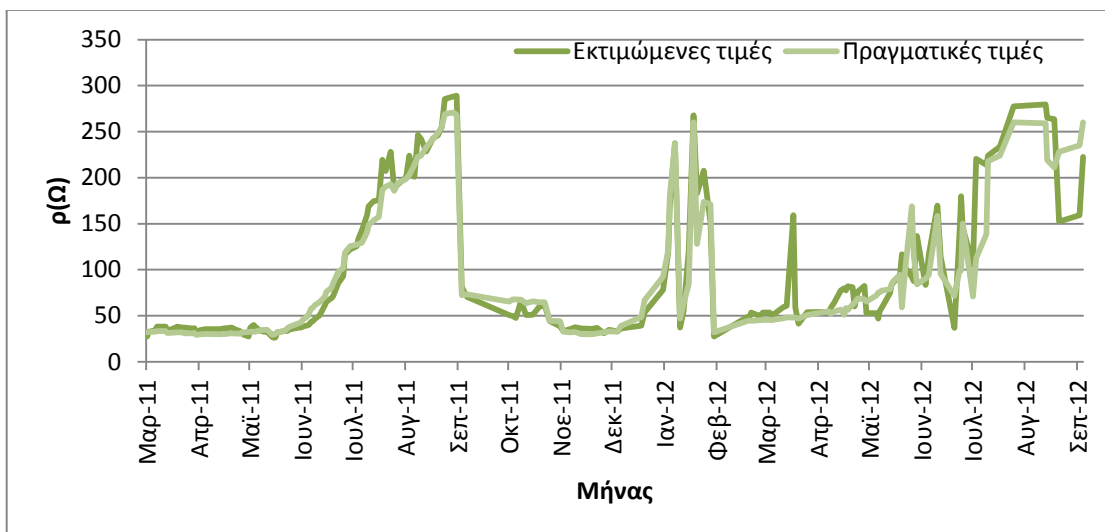




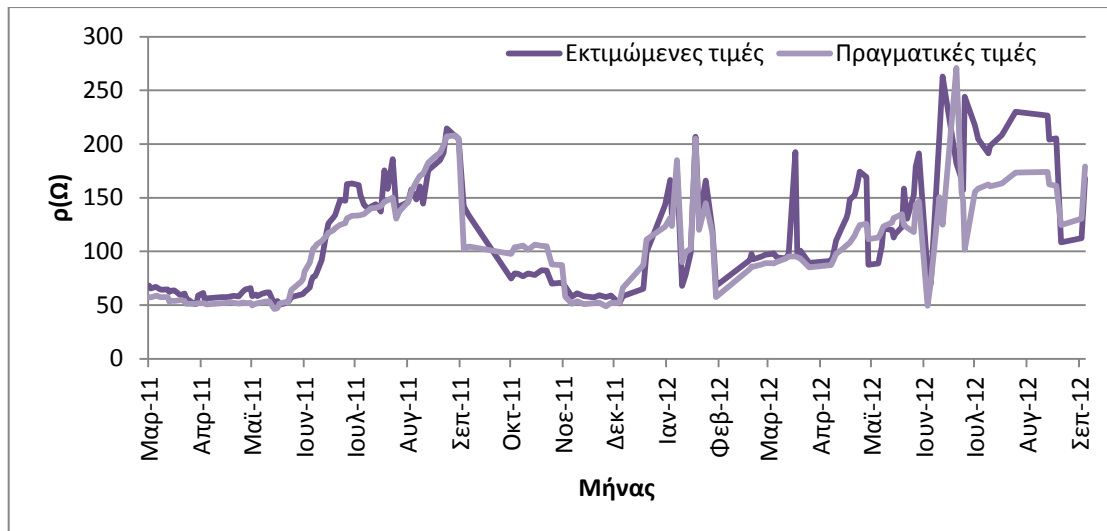
Σχήμα 5.9-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).



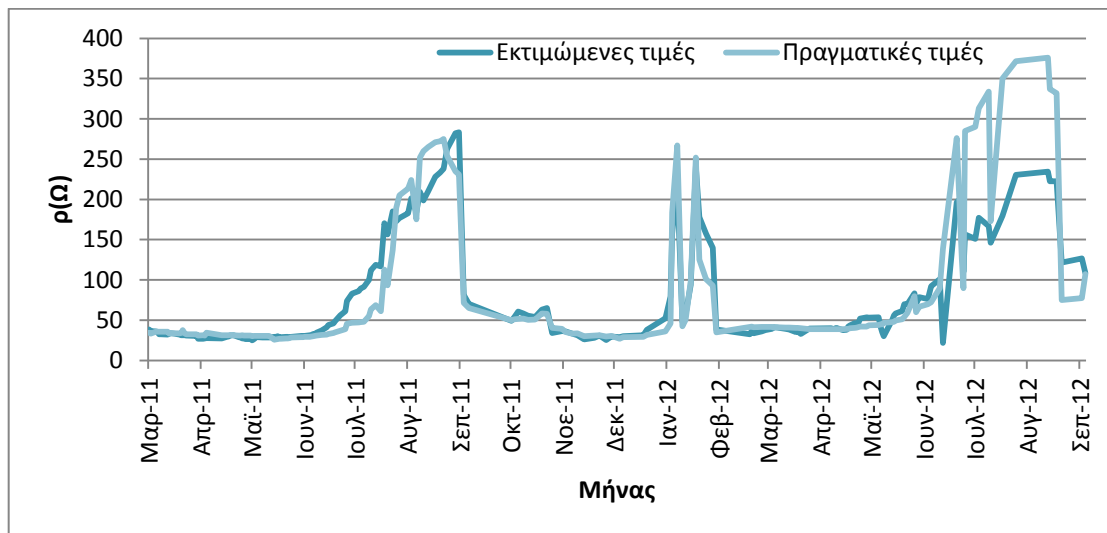
Σχήμα 5.9-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).



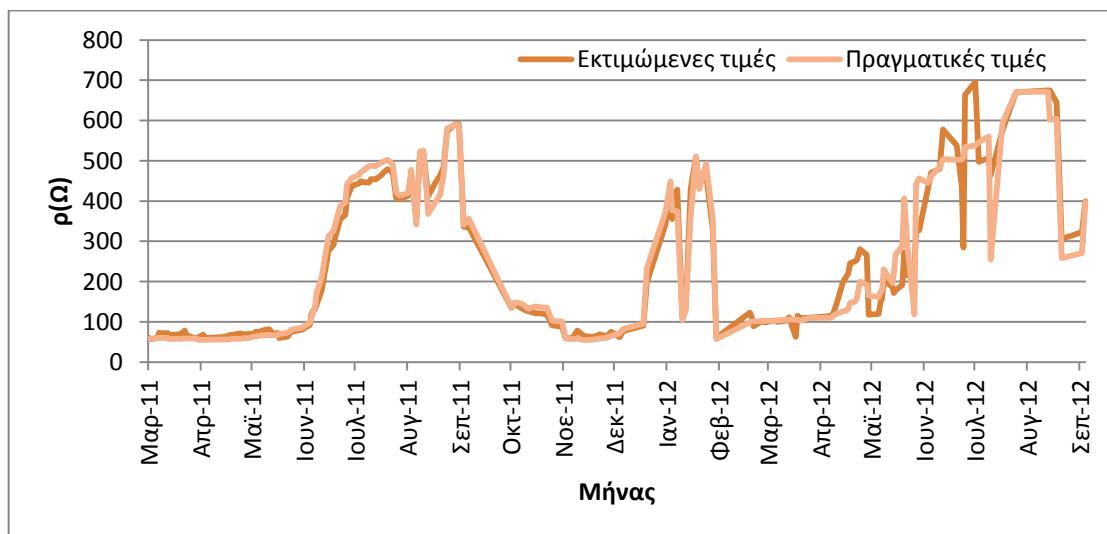
Σχήμα 5.9-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).



Σχήμα 5.9-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).



Σχήμα 5.9-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).

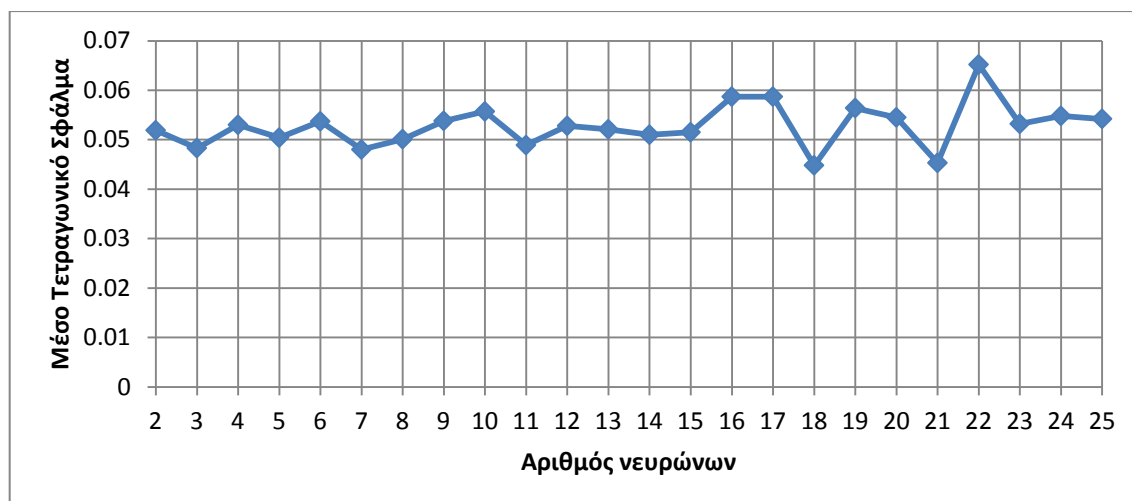


Σχήμα 5.9-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).

Στον πρώτο αλγόριθμο εκπαίδευσης ανά εποχή τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά εμφανίζοντας ωστόσο μία σημαντική απόκλιση στα περισσότερα ηλεκτρόδια κυρίως το καλοκαίρι του 2012, απόκλιση η οποία τείνει να εξαλειφθεί με την εφαρμογή των αλγορίθμων, που ακολουθούν.

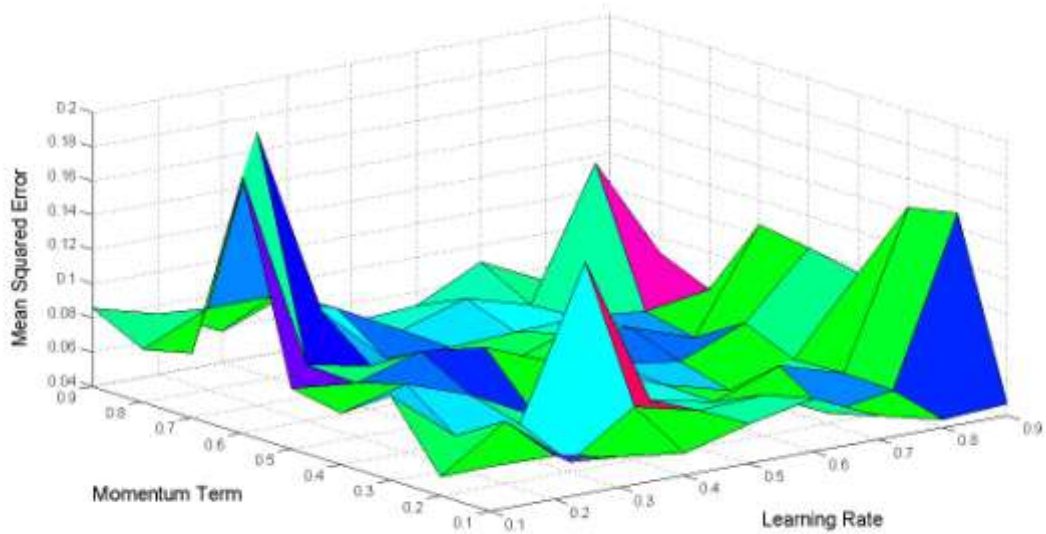
### 5.3.3. Εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής

Γι' αυτόν τον αλγόριθμο ο βέλτιστος αριθμός των νευρώνων είναι 21, όπως προκύπτει από την αξιολόγηση της τιμής του σφάλματος κατά την εκπαίδευση του δικτύου. Το σφάλμα ήταν σχεδόν ίδιο τόσο με την επιλογή 18 όσο και 21 νευρώνων. Ωστόσο, εξετάζοντας το σφάλμα του συνόλου αξιολόγησης κατά την εκπαίδευση του δικτύου, επιλέγονται οι 21 νευρώνες, διότι το σφάλμα τότε είναι μικρότερο. Επίσης ως συναρτήσεις ενεργοποίησης για κάθε επίπεδο ορίζονται η σιγμοειδής για το πρώτο επίπεδο και η υπερβολική εφαπτομένη για το δεύτερο επίπεδο του νευρωνικού δικτύου.



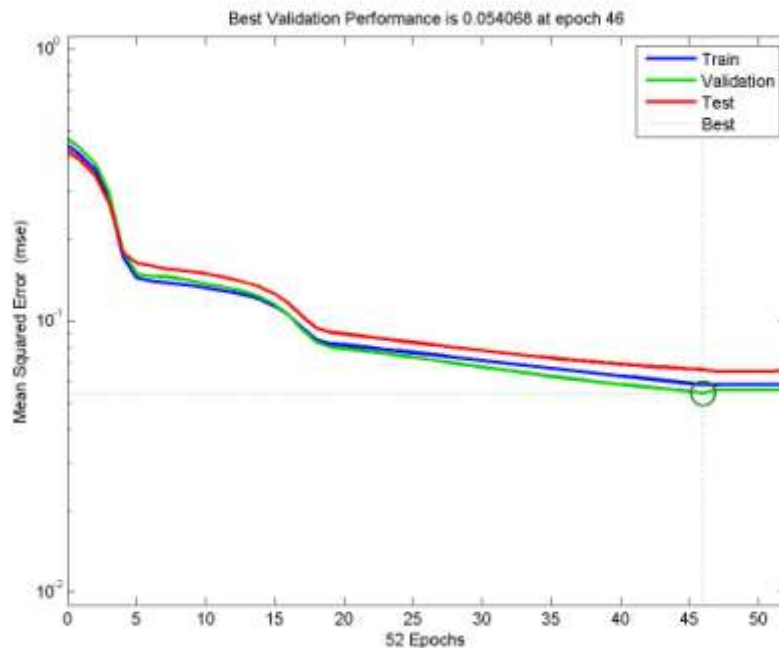
Σχήμα 5.10: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής.

Διατηρώντας τις παραπάνω παραμέτρους σταθερές στη συνέχεια εκτελούνται δοκιμές για διάφορες τιμές του όρου ορμής και του ρυθμού μάθησης. Οι τιμές, οι οποίες δίνουν την καλύτερη απόκριση, είναι για μεν το ρυθμό μάθησης 0,7 με  $T_n=2400$  και για τον όρο ορμής 0,4. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η απόκριση του νευρωνικού δικτύου για διάφορες τιμές του ρυθμού μάθησης και του όρου ορμής.

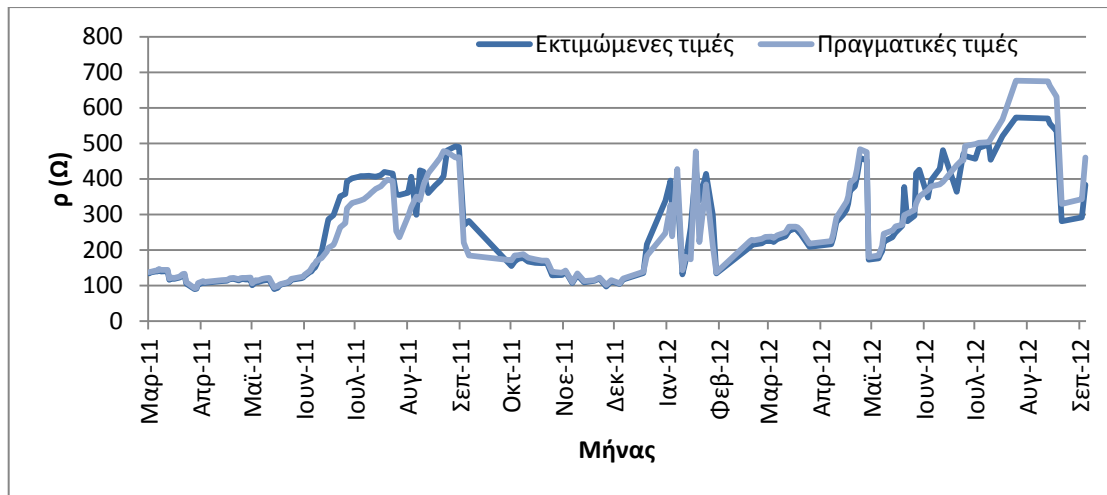


**Σχήμα 5.11:** Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον όρο ορμής και το ρυθμό μάθησης για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής

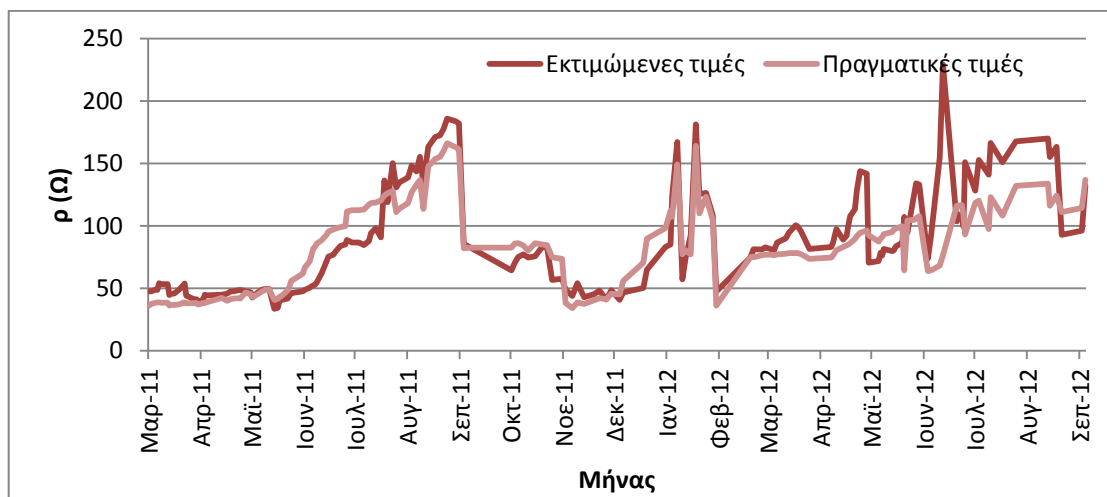
Εκπαιδύοντας το νευρωνικό δίκτυο με αυτές τις παραμέτρους εμφανίζει στην έξοδο τιμές, οι οποίες είναι πολύ κοντά σε αυτές που μετρήθηκαν. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 5.12) απεικονίζεται το σφάλμα για τα τρία σύνολα: το σύνολο εκπαίδευσης, το σύνολο αξιολόγησης και το σύνολο ελέγχου. Στον αλγόριθμο αυτόν η μέση τιμή σφάλματος μειώνεται με σταθερό ρυθμό. Γρήγορα ωστόσο φτάνει στη βέλτιστη τιμή, όπου το σφάλμα του συνόλου αξιολόγησης ισούται με 0,054.



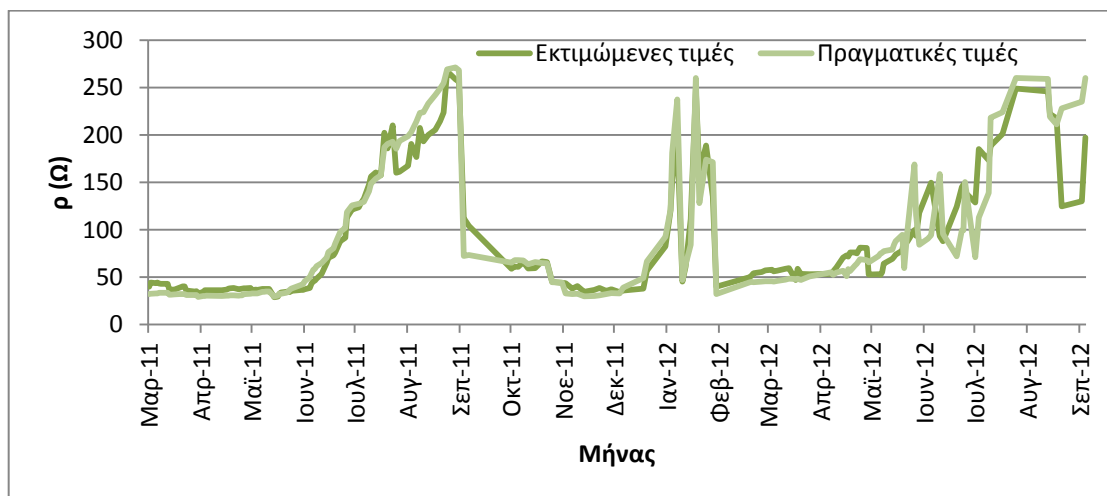
**Σχήμα 5.12:** Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής.



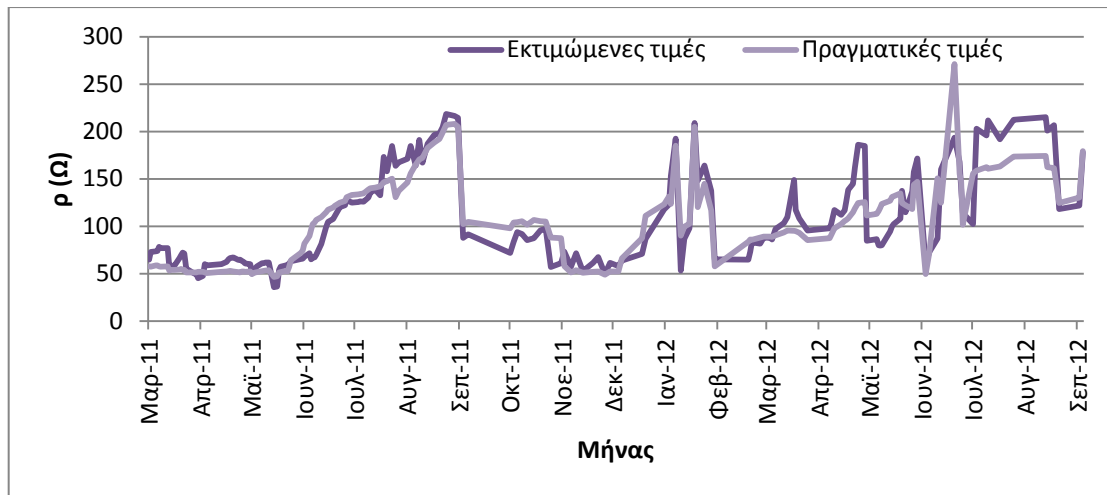
Σχήμα 5.13-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).



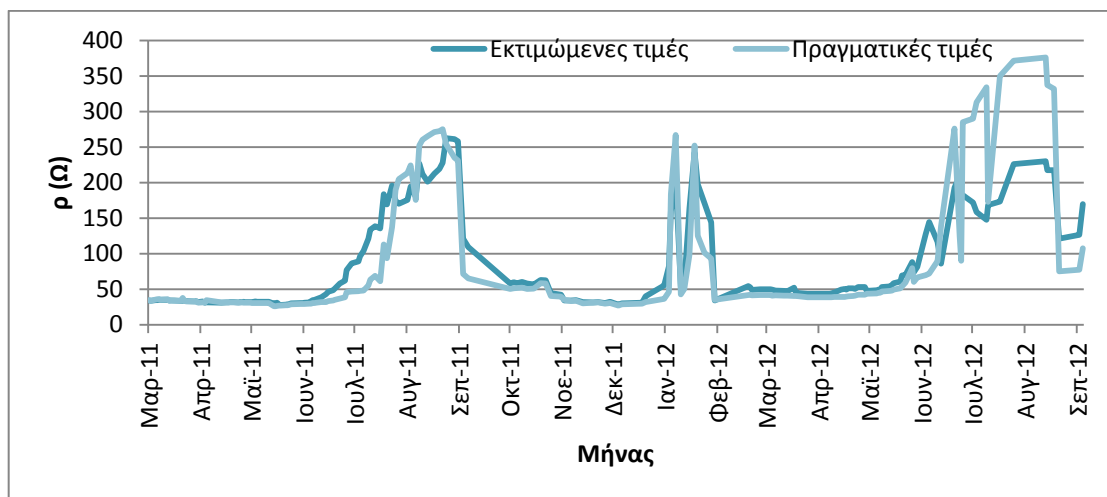
Σχήμα 5.13-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).



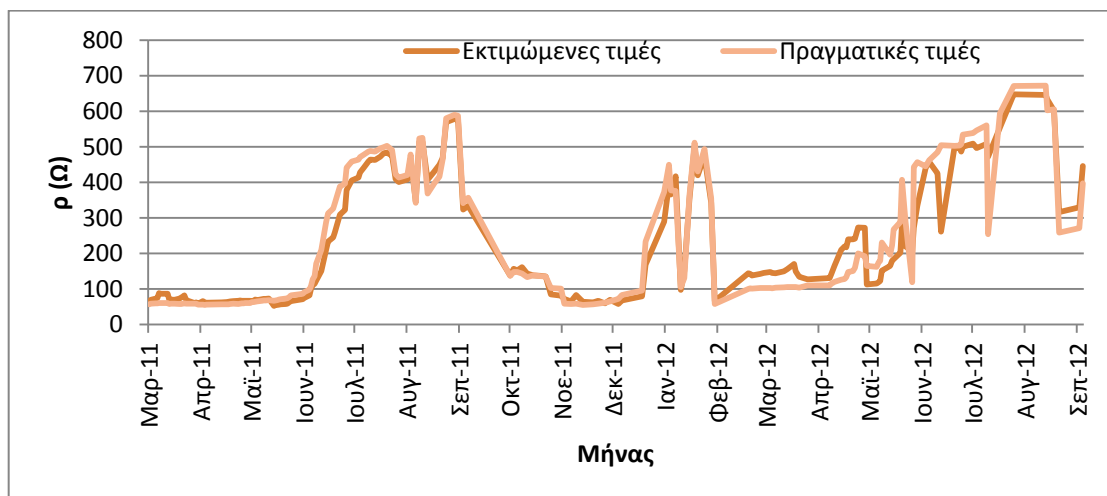
Σχήμα 5.13-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).



Σχήμα 5.13-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).



Σχήμα 5.13-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).

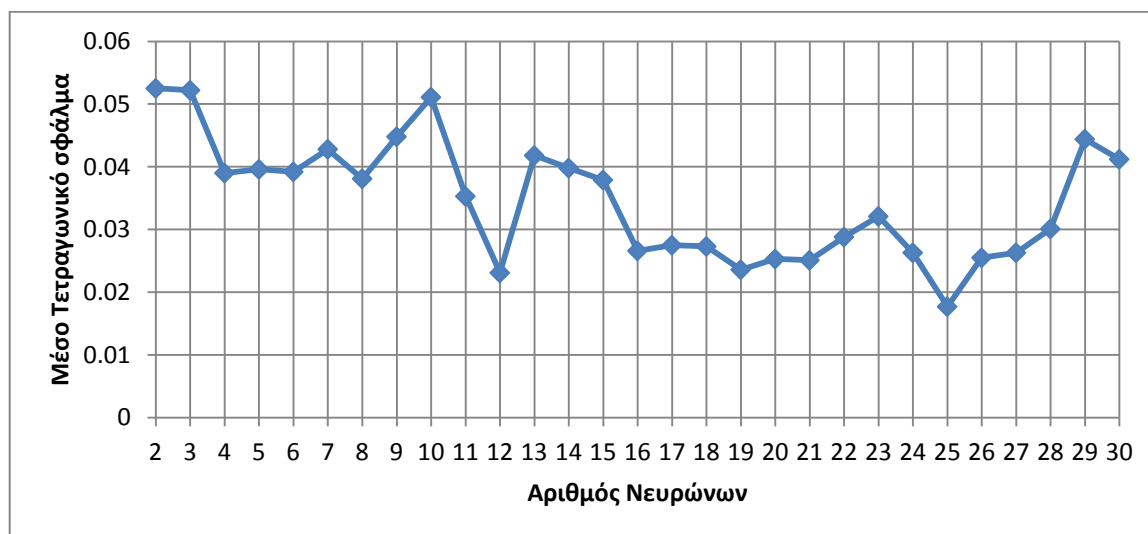


Σχήμα 5.13-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (1ο σενάριο).

Αυτός ο αλγόριθμος αποτελεί μία κατά κάποιο τρόπο βελτίωση του απλού αλγορίθμου που προηγήθηκε. Ωστόσο τα αποτελέσματα δεν ακολούθησαν κάποια βελτίωση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην κατανομή των δεδομένων, καθώς υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές τους κατά την πάροδο του χρόνου. Εξαιτίας των καιρικών συνθηκών παρατηρούνται περίοδοι, όπου οι τιμές της αντίστασης γείωσης αυξάνονται απότομα, ενώ υπάρχουν και περίοδοι, όπου οι τιμές δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή.

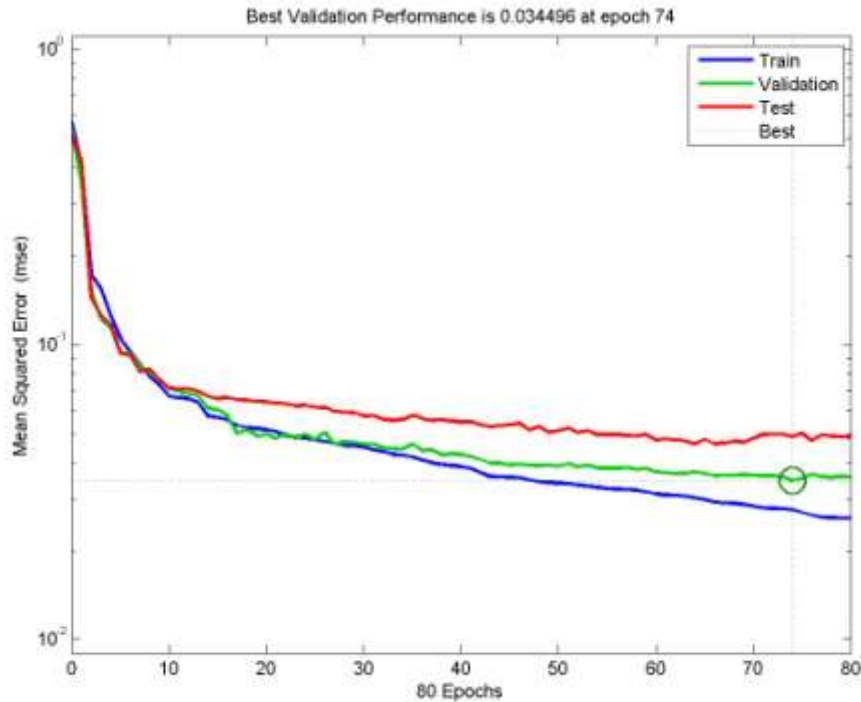
#### 5.3.4. Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου επιλέγονται 25 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο του δικτύου. Επειδή ο βέλτιστος αριθμός νευρώνων βρίσκεται στο όριο του διαστήματος που χρησιμοποιούταν στους προηγούμενους αλγορίθμους εκπαίδευσης, εδώ επεκτάθηκε η μελέτη του δικτύου μέχρι και με 30 νευρώνες. Στο ακόλουθο διάγραμμα εμφανίζεται η μέση τιμή σφάλματος. Στο πρώτο επίπεδο επιλέγεται ως συνάρτηση ενεργοποίησης η σιγμοειδής, ενώ στο δεύτερο η γραμμική συνάρτηση.



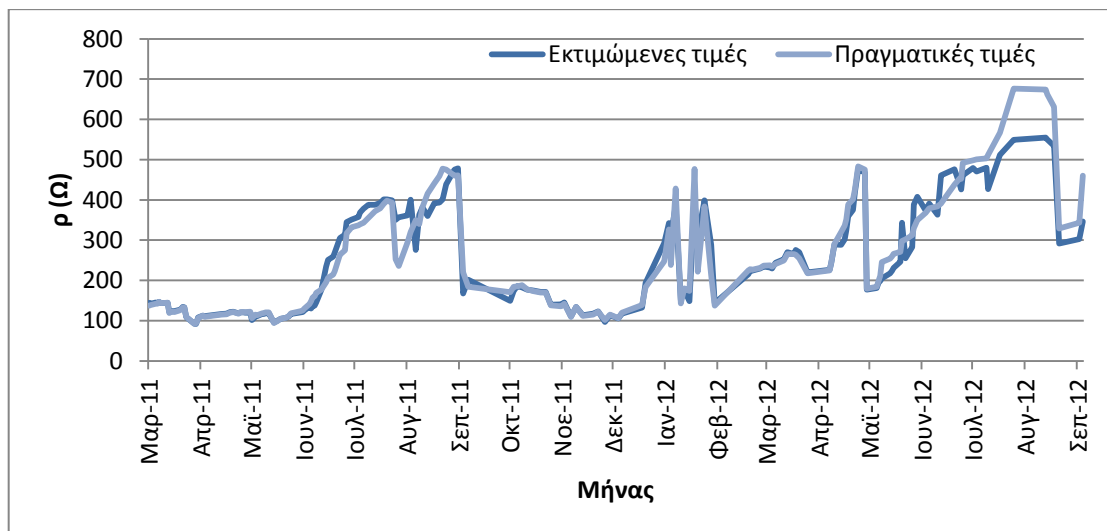
Σχήμα 5.14: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.

Εκπαιδεύοντας το δίκτυο με αυτόν τον αλγόριθμο λαμβάνεται η έξοδος, που απεικονίζεται με το παρακάτω σύνολο διαγραμμάτων. Ανάμεσα στους μέχρι τώρα αλγορίθμους που παρουσιάστηκαν να σημειωθεί, ότι ο quasi-Newton εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή συσχέτισης.



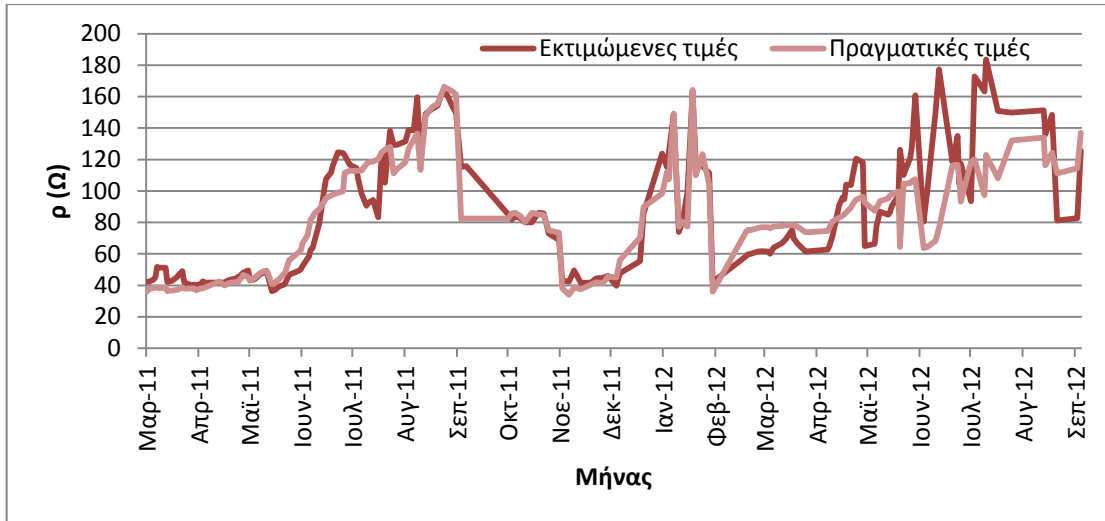
Σχήμα 5.15: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.

Ήδη από αυτό το διάγραμμα φαίνεται η βελτίωση της απόδοσης, αφού το σφάλμα του συνόλου αξιολόγησης περιορίζεται κάτω από το 0,035. Αυτό φαίνεται και από τα γραφήματα που ακολουθούν, όπου σε μερικές περιπτώσεις υπάρχει σχεδόν απόλυτη ταύτιση μεταξύ των δύο συνόλων τιμών.

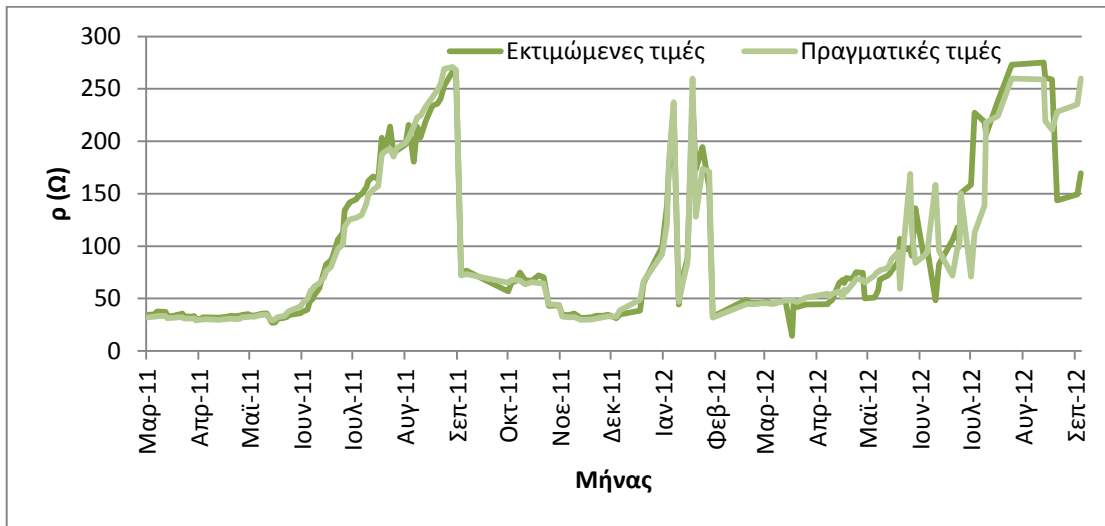


Σχήμα 5.16-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1<sup>ο</sup> σενάριο).

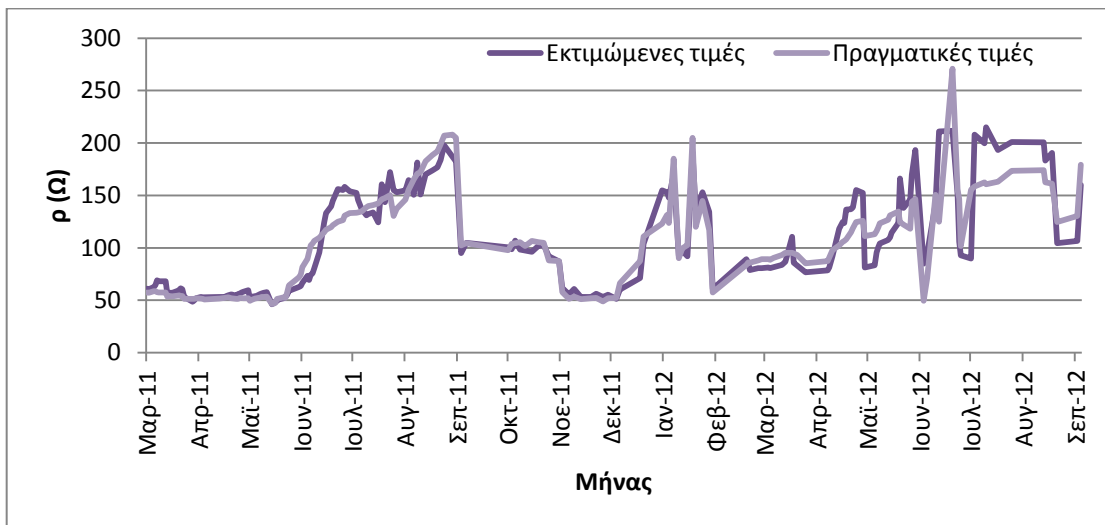




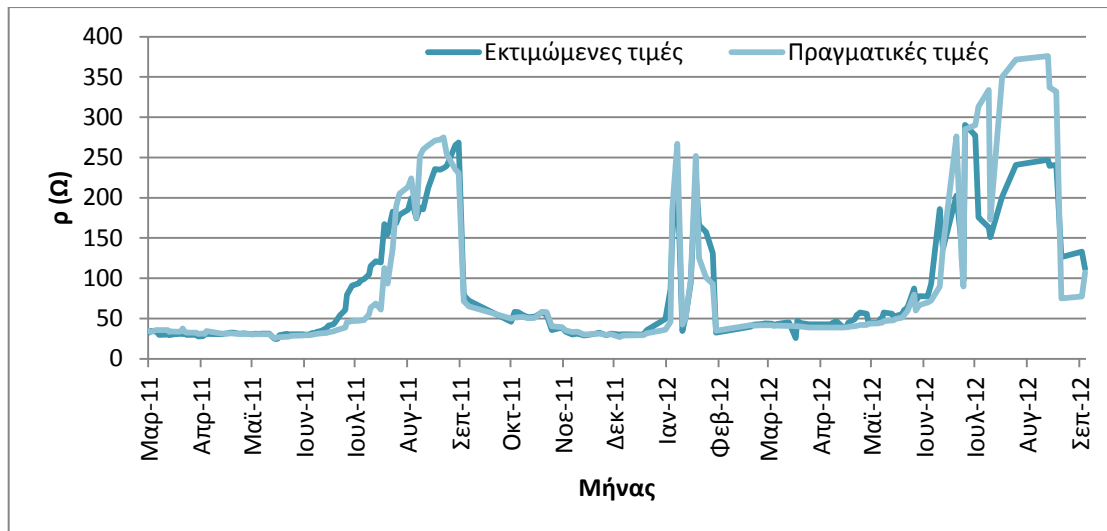
Σχήμα 5.16-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1<sup>ο</sup> σενάριο).



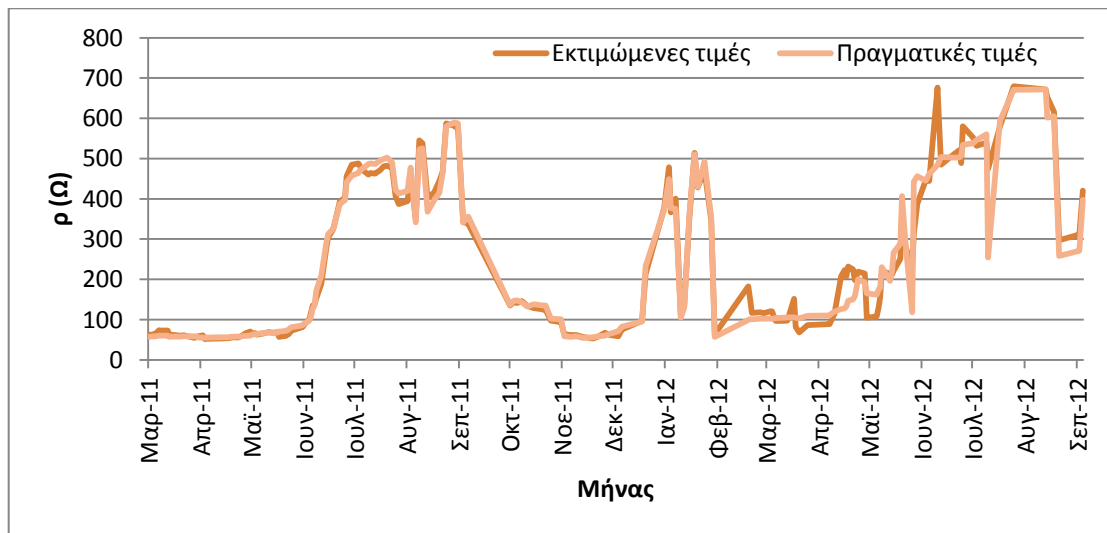
Σχήμα 5.16-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.16-δ Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.16-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1<sup>ο</sup> σενάριο).

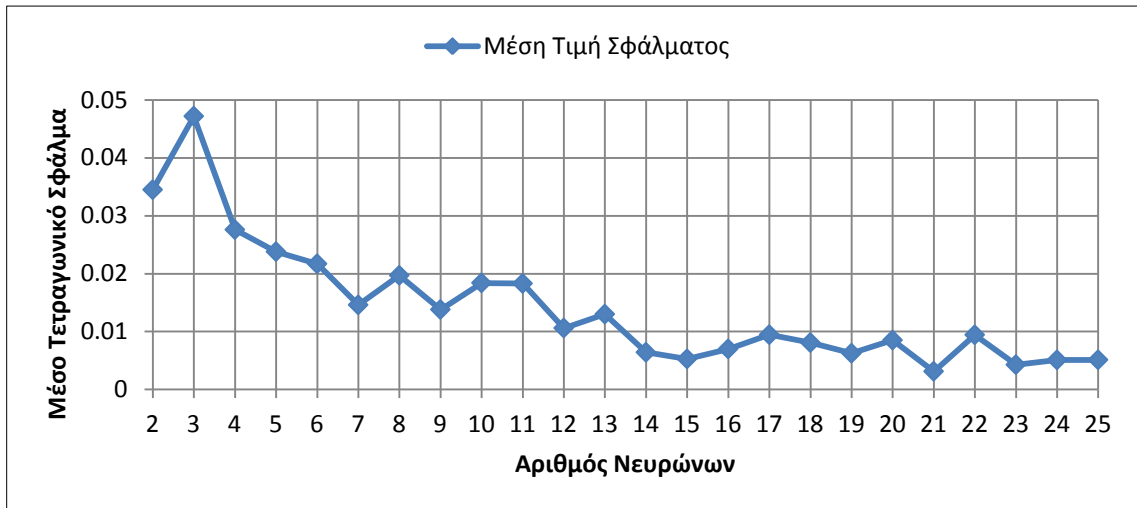


Σχήμα 5.16-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (1<sup>ο</sup> σενάριο).

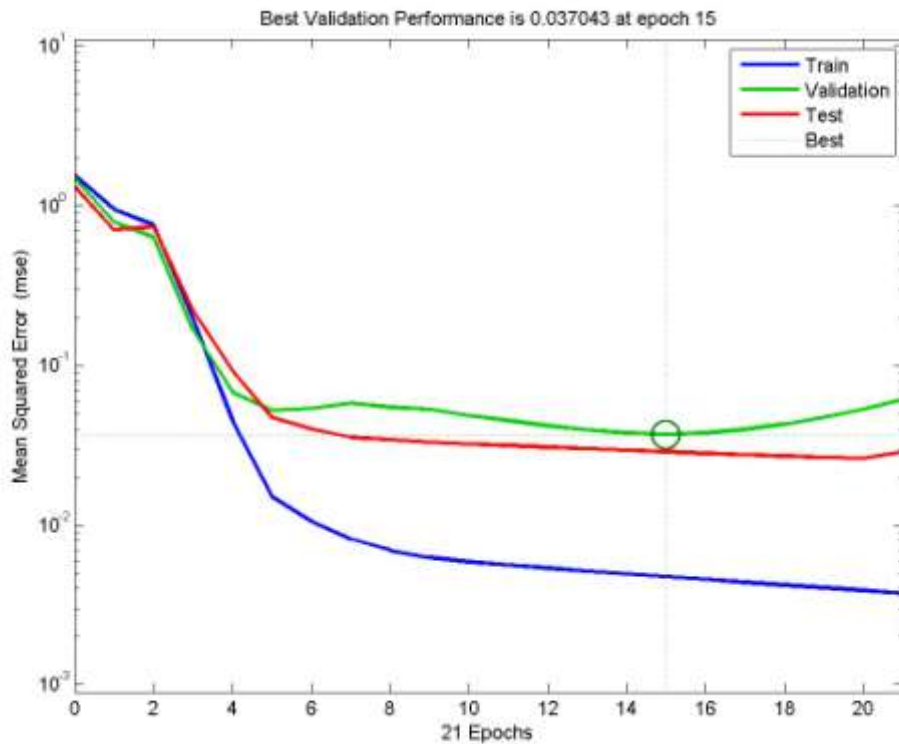
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του αλγόριθμου αυτού φαίνεται να σημειώνεται βελτίωση σχετικά με πριν, χωρίς ωστόσο να υπάρχει σημαντική διαφορά.

### 5.3.5. Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt

Ο τελευταίος αλγόριθμος που παρουσιάζεται αναλυτικά είναι ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt, ο οποίος παρότι εμφανίζει περίπου το ίδιο σφάλμα με τους προηγούμενους, παρουσιάζει στην έξοδό του εξαιρετική ακρίβεια. Αρχικά για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούνται 21 νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο. Αναφορικά με τις συναρτήσεις ενεργοποίησης χρησιμοποιείται στο πρώτο επίπεδο η υπερβολική εφασπομένη και στο δεύτερο η γραμμική συνάρτηση.

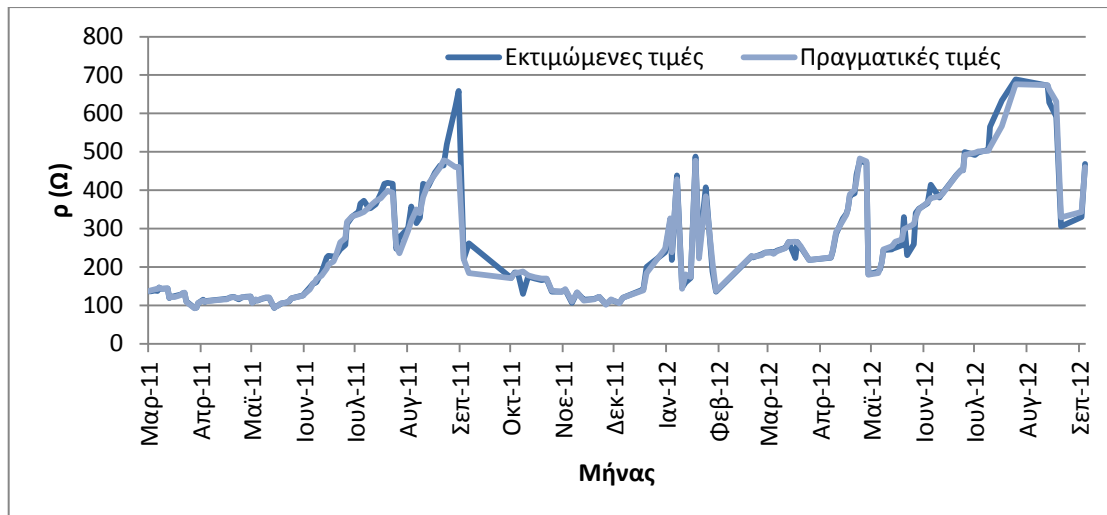


Σχήμα 5.17: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.



Σχήμα 5.18: Μεταβολή σφάλματος του συνόλου εκπαίδευσης (μπλε), του συνόλου αξιολόγησης (πράσινο) και του συνόλου ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.

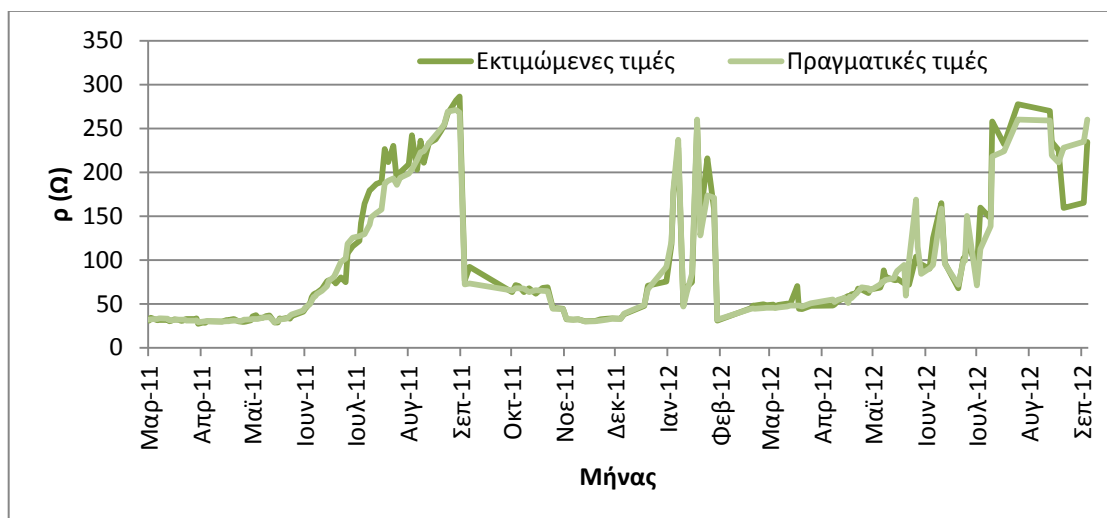
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρείται, ότι το σφάλμα του συνόλου αξιολόγησης είναι στο 0,037 πολύ κοντά σε αυτό του προηγούμενου αλγορίθμου. Ωστόσο εδώ η βασική διαφορά με πριν έγκειται στο σφάλμα του συνόλου εκπαίδευσης, το οποίο είναι το μικρότερο από όλους τους αλγορίθμους της Matlab και είναι κοντά στο 0,005.



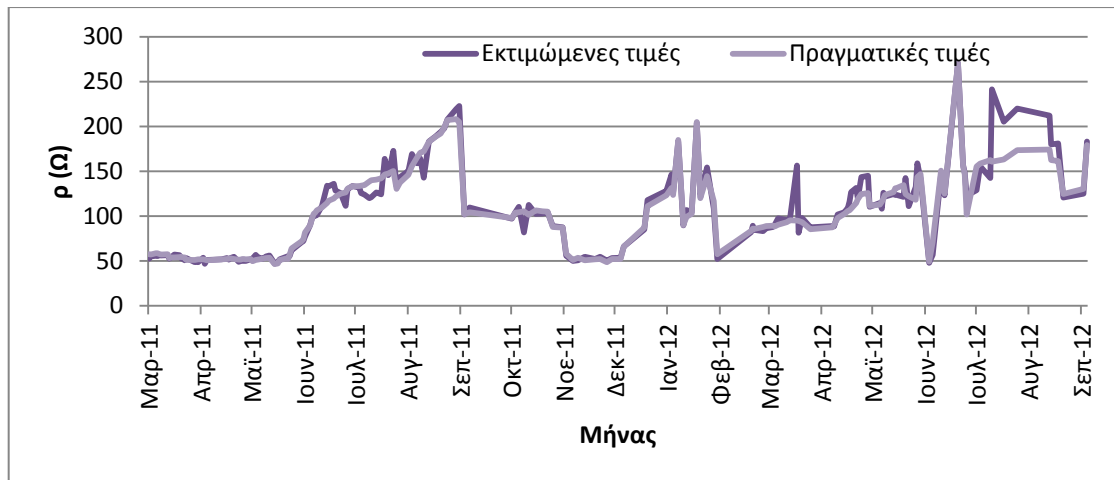
Σχήμα 5.19-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1<sup>ο</sup> σενάριο).



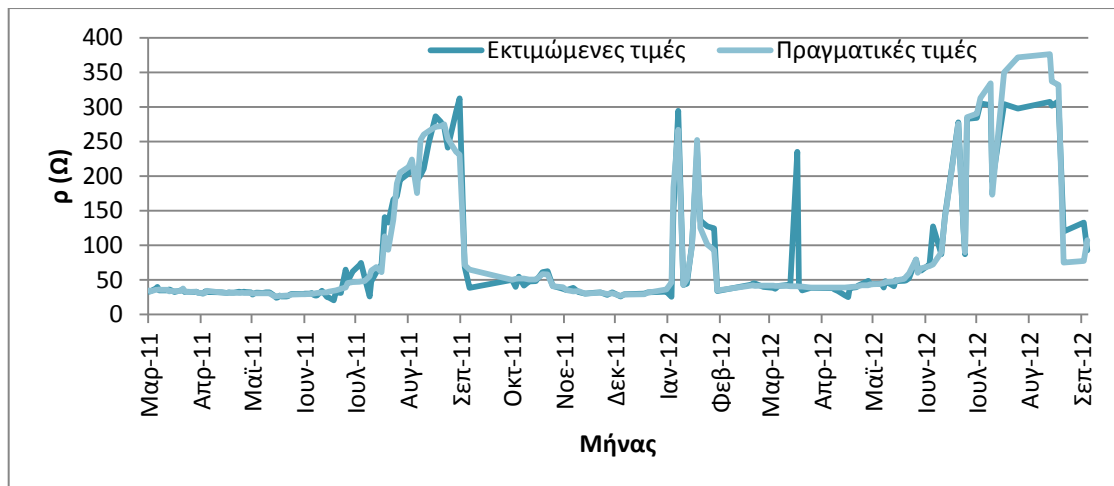
Σχήμα 5.19-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1<sup>ο</sup> σενάριο).



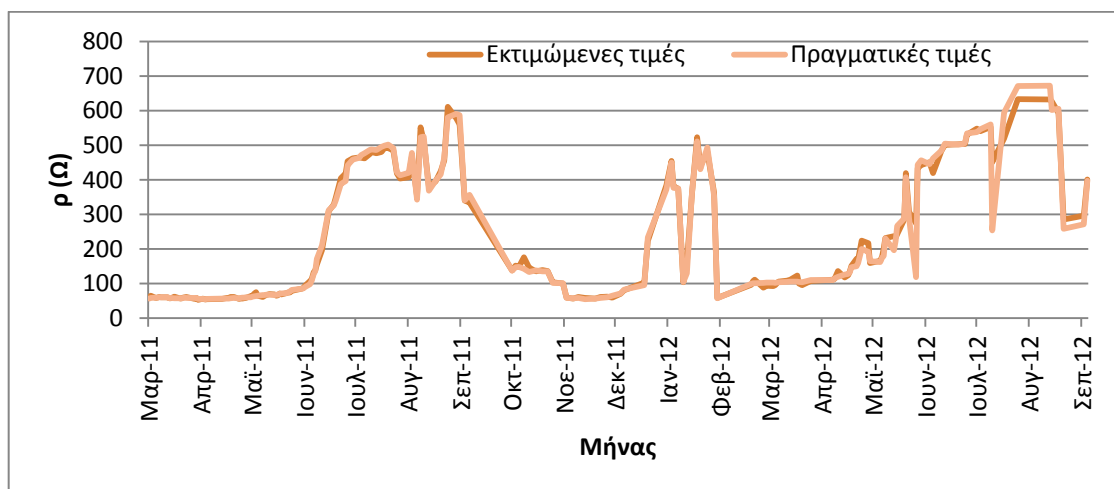
Σχήμα 5.19-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.19-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.19-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.19-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (1<sup>ο</sup> σενάριο).

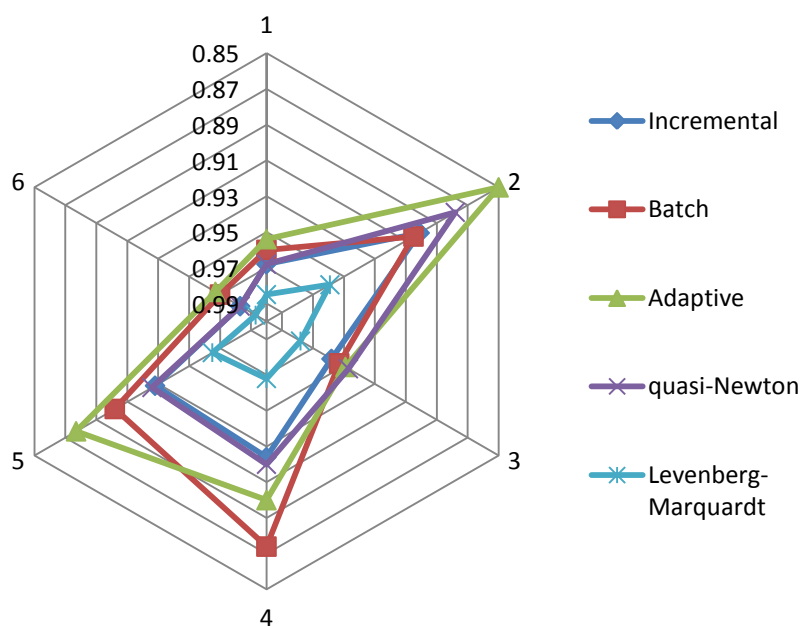
Λαμβάνοντας υπόψη και τα παραπάνω διαγράμματα καθίσταται πλέον φανερή η μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αφού οι συντελεστές συσχέτισης είναι τουλάχιστον 95%.

### 5.3.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το 1<sup>ο</sup> σενάριο

Από τους παραπάνω αλγόριθμους που παρουσιάστηκαν την καλύτερη επίδοση εμφανίζει ο τελευταίος αλγόριθμος. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα ο τελευταίος αλγόριθμος δίνει το μέγιστο συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των δύο συνόλων (εκτιμήσεων από το ΤΝΔ και μετρήσεων), δηλαδή το εξάπλευρο με τη μικρότερη περίμετρο. Επίσης, κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου παρατηρήθηκε, ότι εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης, όσο και στα σύνολα αξιολόγησης και ελέγχου.

**Πίνακας 5.3:** Συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις εκτιμώμενες και τις πραγματικές τιμές για κάθε αλγόριθμο εκπαίδευσης για το πρώτο σενάριο.

	Incremental	Batch	Adaptive	quasi-Newton	Levenberg-Marquardt
1	0.968	0.960	0.954	0.968	0.985
2	0.901	0.905	0.850	0.878	0.959
3	0.958	0.953	0.949	0.947	0.978
4	0.924	0.874	0.900	0.920	0.968
5	0.928	0.902	0.877	0.926	0.965
6	0.983	0.970	0.967	0.983	0.993

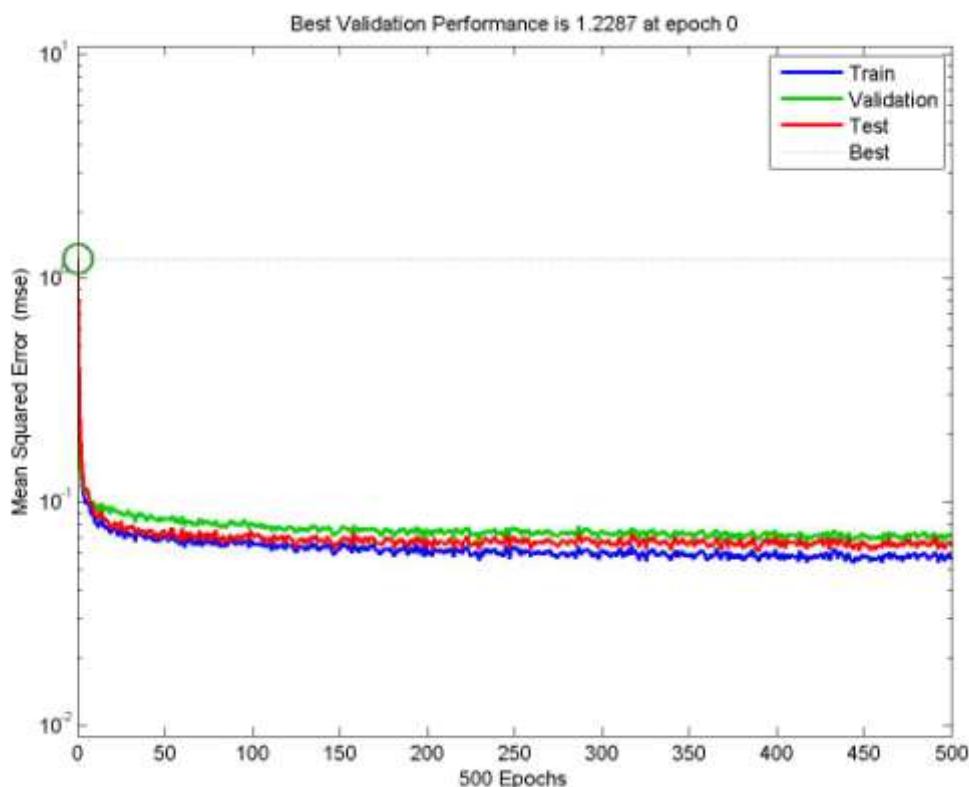


**Σχήμα 5.20:** Γραφική απεικόνιση των συντελεστών συσχέτισης για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια για όλους τους αλγόριθμους

## 5.4 Αποτελέσματα νευρωνικού δικτύου για το 2<sup>ο</sup> σενάριο

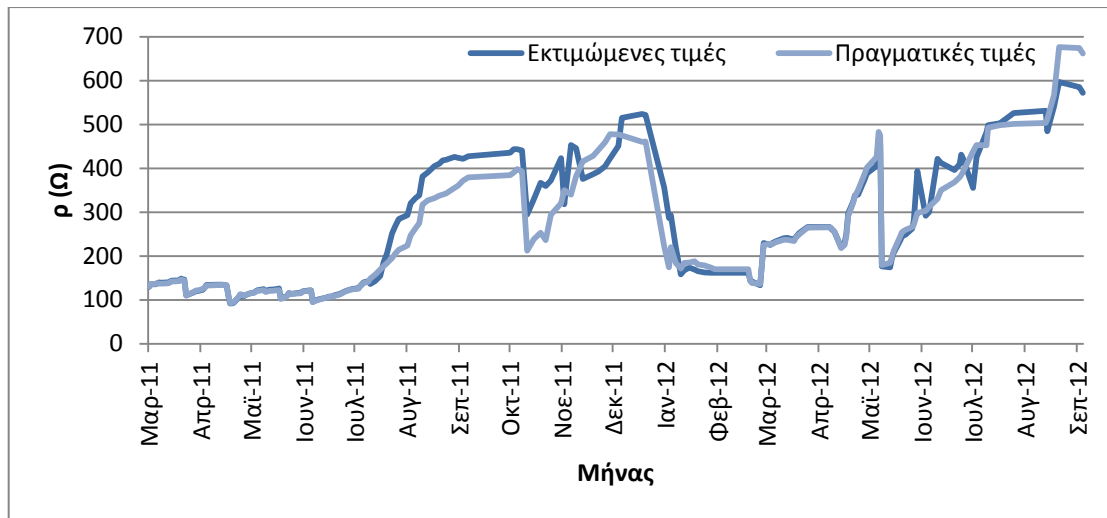
### 5.4.1. Εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου επιλέγουμε 20 νευρώνες για το κρυφό επίπεδο και ως συναρτήσεις ενεργοποίησης την υπερβολική εφαπτομένη για το πρώτο επίπεδο και τη γραμμική για το δεύτερο επίπεδο. Με αυτές τις παραμέτρους πλέον εκπαιδεύεται το νευρωνικό δίκτυο έχοντας στην έξοδο την απόδοση, που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:

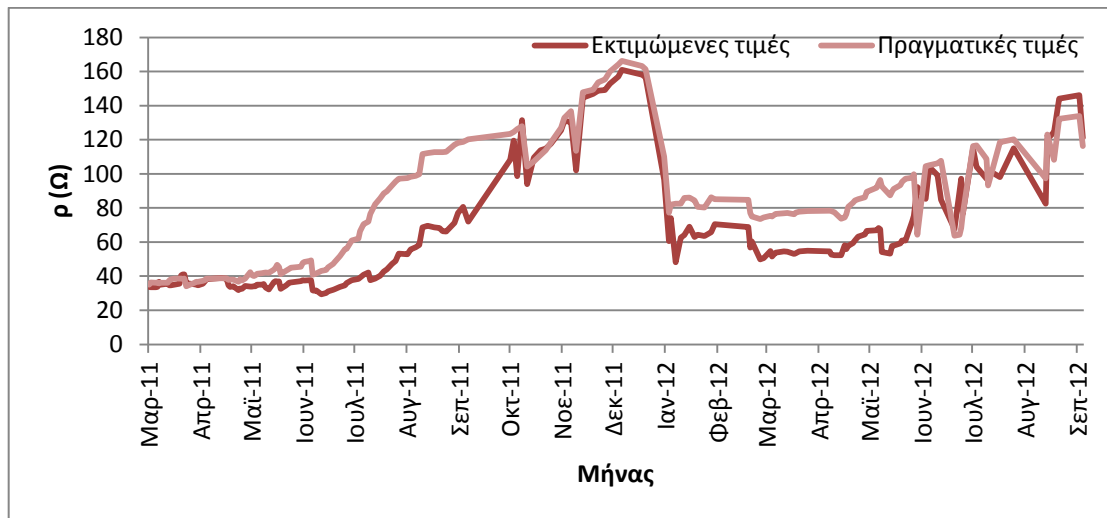


Σχήμα 5.21: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης.

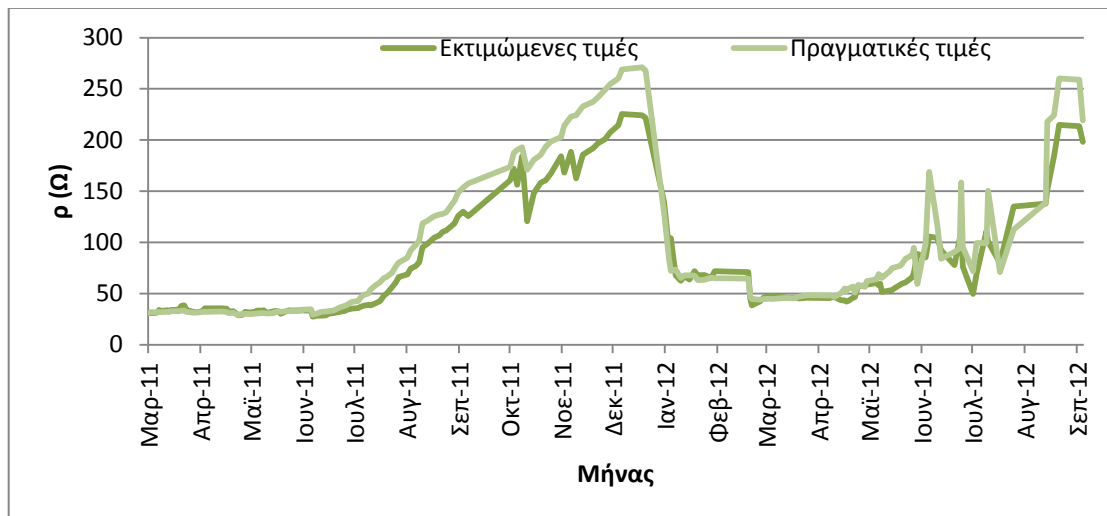
Συγκριτικά με το προηγούμενο σενάριο το σφάλμα λαμβάνει παρεμφερή τιμή με πριν. Αυτό που αλλάζει μόνο είναι το σφάλμα των συνόλων αξιολόγησης και ελέγχου, τα οποία είναι συγκριτικά μεγαλύτερα. Ως εκ τούτου, η απόκριση του νευρωνικού δικτύου δεν είναι το ίδιο ακριβής, το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 5.22-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).

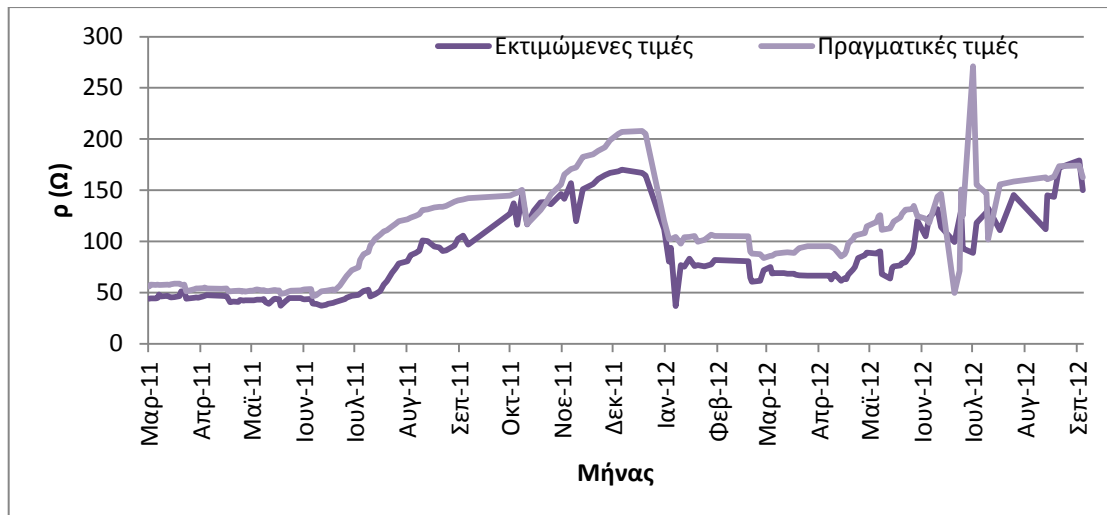


Σχήμα 5.22-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).

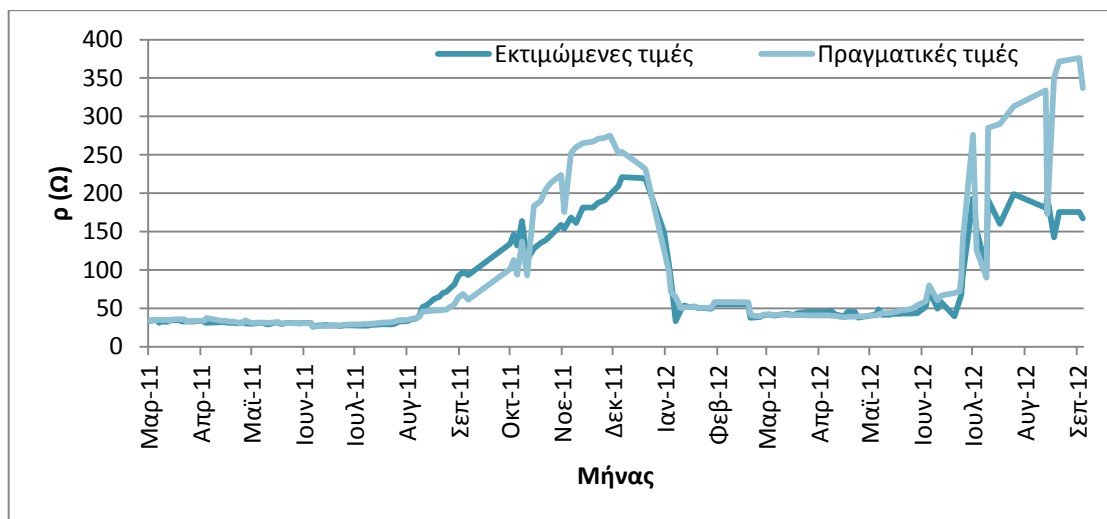


Σχήμα 5.22-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μετονίτη) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).

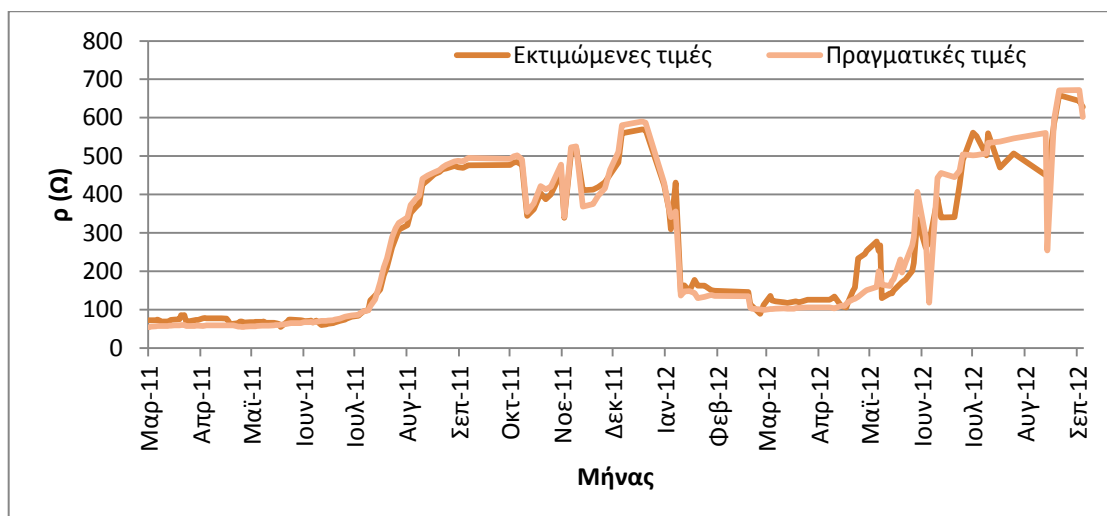




Σχήμα 5.22-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).



Σχήμα 5.22-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).

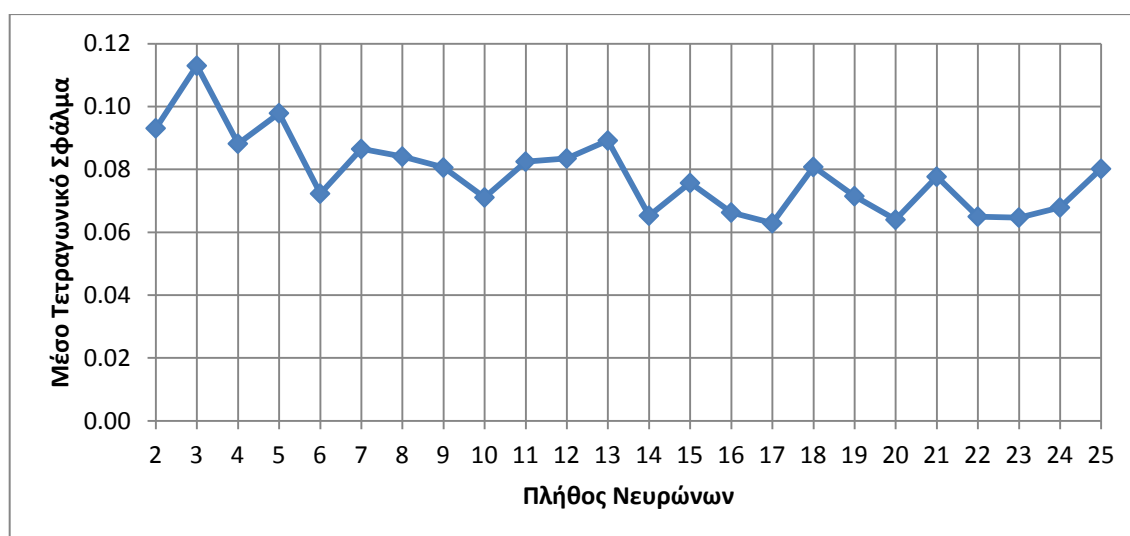


Σχήμα 5.22-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά πρότυπο με σταθερό ρυθμό εκπαίδευσης (2ο σενάριο).

Για το δεύτερο σενάριο παρατηρείται, ότι ο αλγόριθμος δίνει ακριβή αποτελέσματα. Για τα περισσότερα ηλεκτρόδια οι εκτιμώμενες τιμές είναι πολύ κοντά στις πραγματικές με αποτέλεσμα οι συντελεστές συσχέτισης των εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών να είναι πολύ υψηλοί.

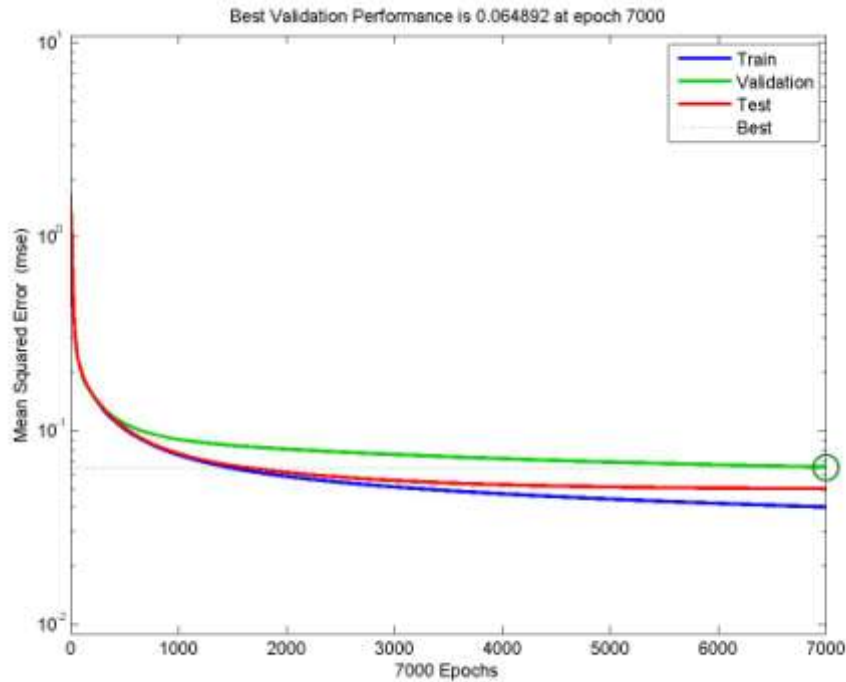
#### 5.4.2. Εκπαίδευση ανά εποχή

Το κρυμμένο επίπεδο αποτελείται από 17 νευρώνες και στο πρώτο επίπεδο χρησιμοποιείται ως συνάρτηση ενεργοποίησης η υπερβολική εφαιπτομένη, ενώ στο δεύτερο επίπεδο η γραμμική.



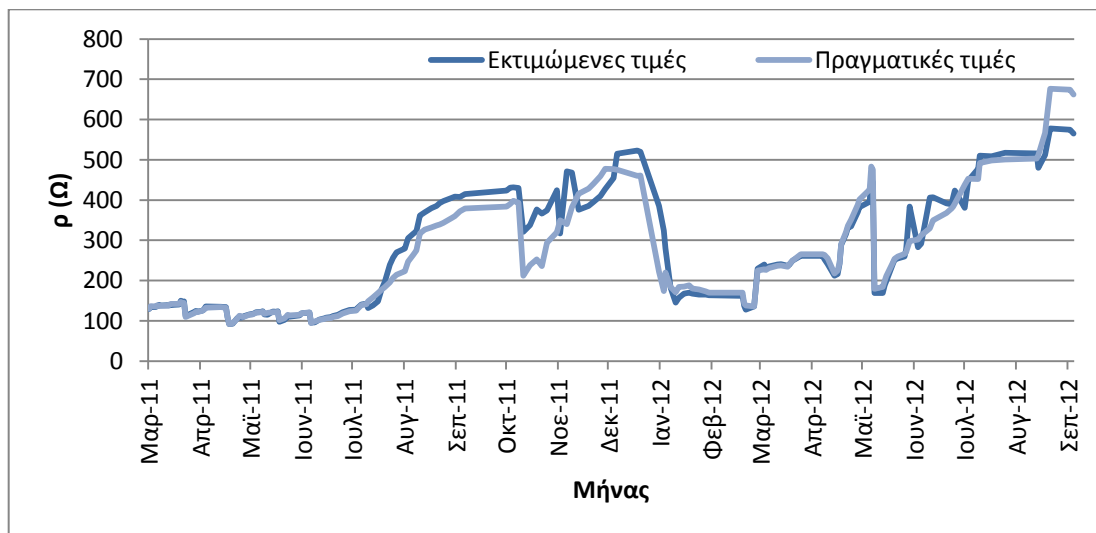
Σχήμα 5.23: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το πλήθος των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή.

Το αποτέλεσμα της εκπαίδευσης του δικτύου είναι σχετικά με το πρώτο σενάριο όχι τόσο ακριβές. Παρακάτω απεικονίζονται η επίδοση του δικτύου, καθώς και το σφάλμα μεταξύ της εξόδου του νευρωνικού δικτύου και των τιμών που μετρήθηκαν.

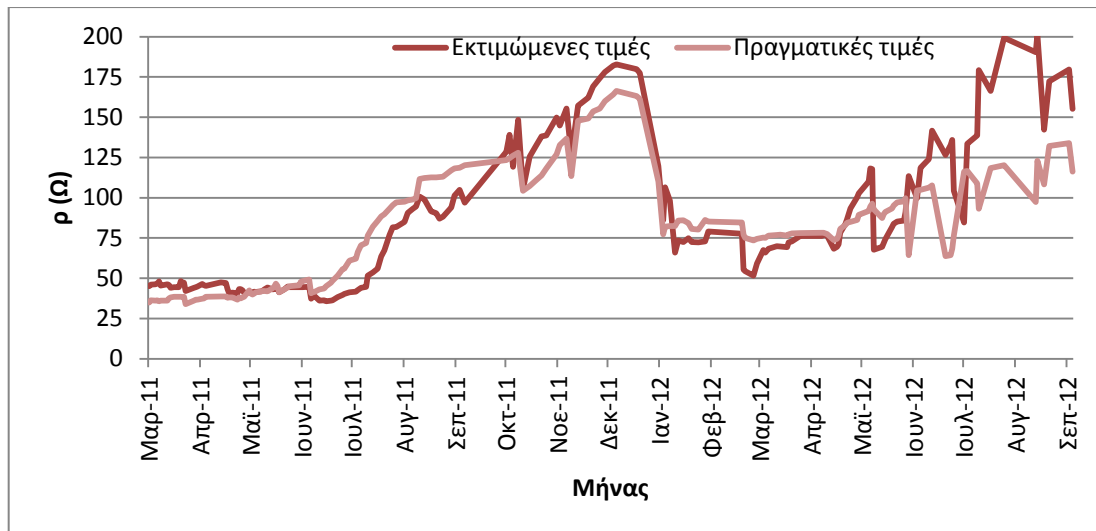


Σχήμα 5.24: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή.

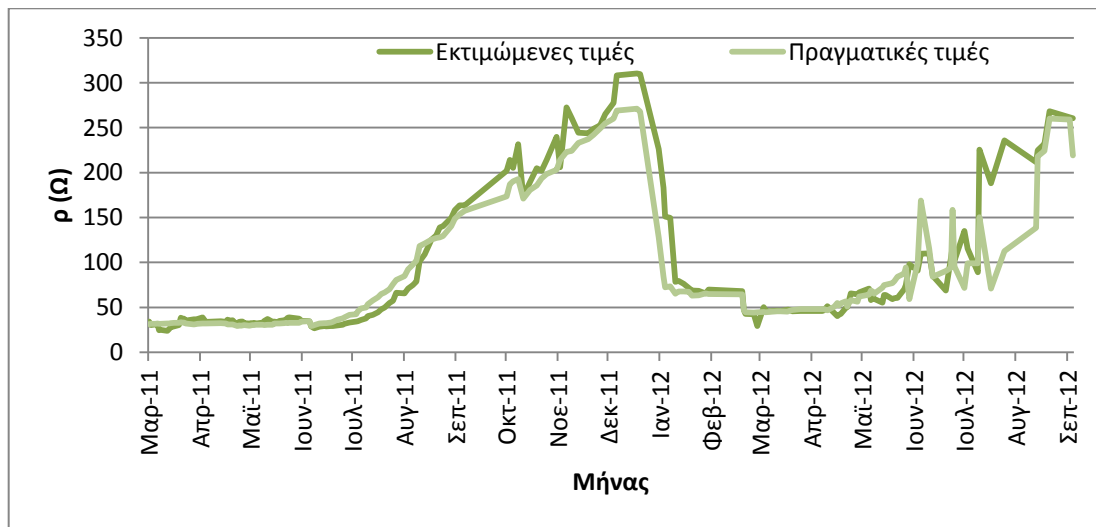
Ομοίως με πριν, το σφάλμα του συνόλου ελέγχου είναι αρκετά μεγαλύτερο για το δεύτερο σενάριο, όπως συμβαίνει και με τα σφάλματα των άλλων συνόλων. Λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω διαγράμματα και για τα δύο σενάρια, προκύπτει το αποτέλεσμα, ότι υπάρχουν ηλεκτρόδια για τα οποία το δεύτερο σενάριο δίνει πιο ακριβή έξοδο.



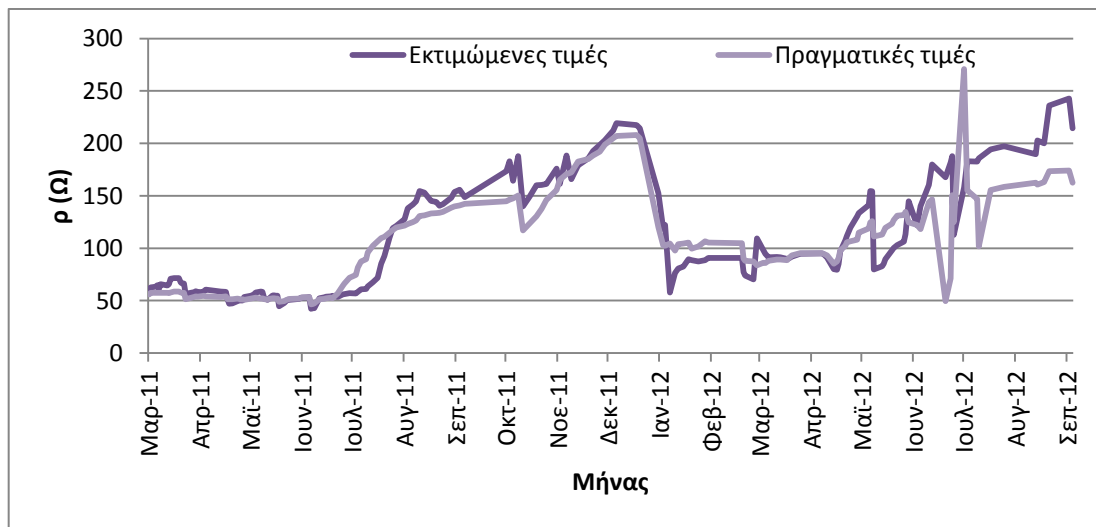
Σχήμα 5.25-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο).



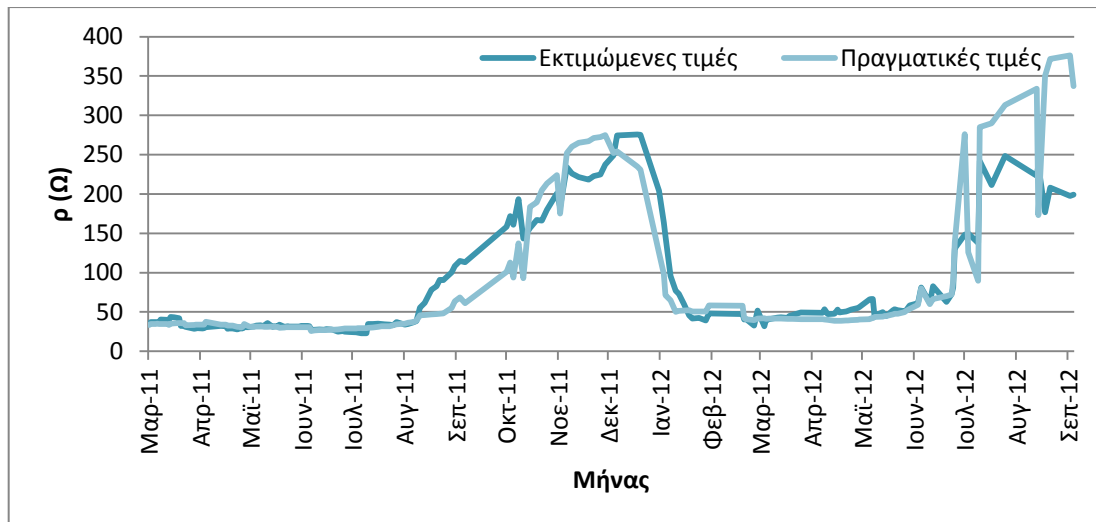
Σχήμα 5.25-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο).



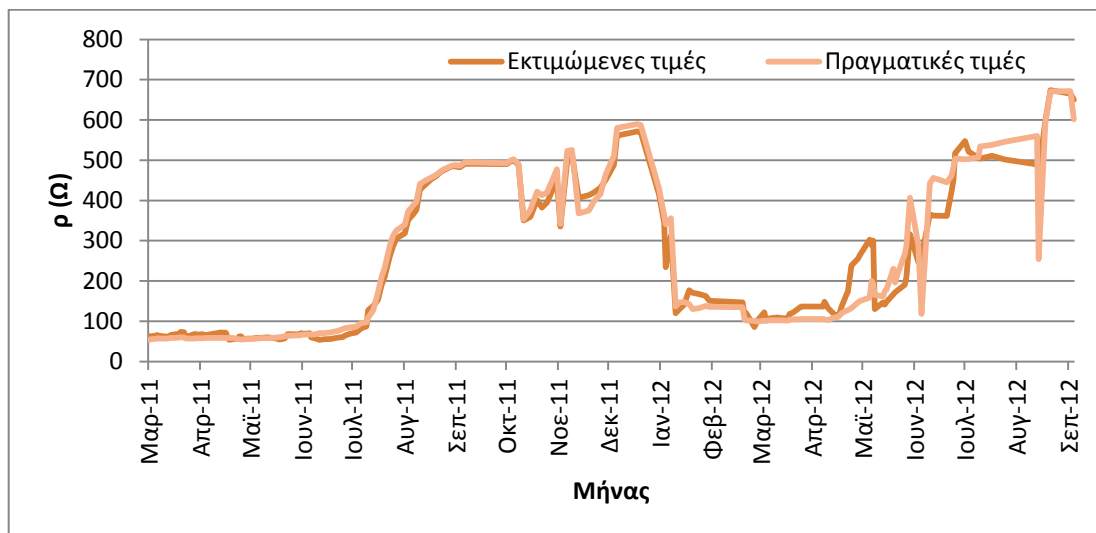
Σχήμα 5.25-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο).



Σχήμα 5.25-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο).



Σχήμα 5.25-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή (2ο σενάριο).



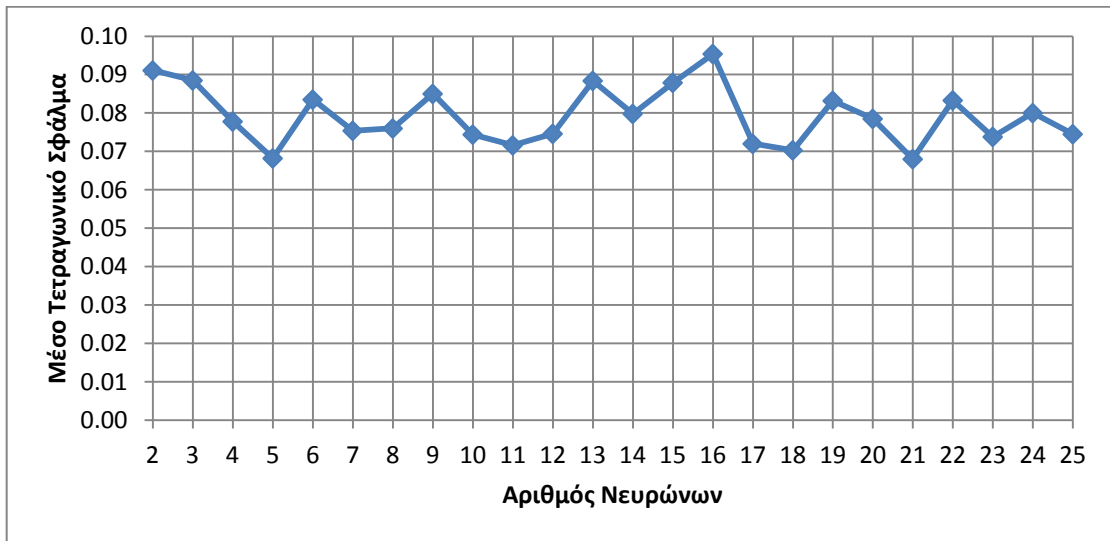
Σχήμα 5.25-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή (1ο σενάριο).

Η εκπαίδευση ανά εποχή δίνει μεν ακριβή αποτελέσματα, χωρίς ωστόσο να δίνουν τους βέλτιστους συντελεστές συσχέτισης. Αυτό διαπιστώνεται και οπτικά από τα παραπάνω διαγράμματα, αφού η απόκλιση μεταξύ των εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών καθίσταται φανερή κυρίως το δίμηνο Ιουλίου και Αυγούστου 2012.

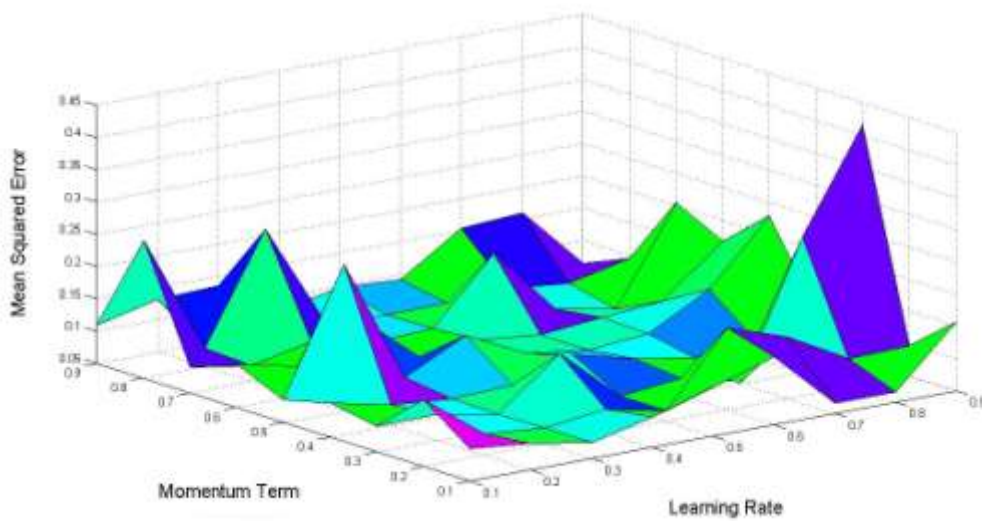
#### 5.4.3. Εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής

Στον αλγόριθμο αυτό για το δεύτερο σενάριο επιλέγονται 21 νευρώνες, καθώς οι νευρώνες αυτοί δίνουν το καλύτερο αποτέλεσμα αναφορικά με τη μέση τιμή σφάλματος και το σφάλμα του συνόλου αξιολόγησης. Επίσης, ως συναρτήσεις

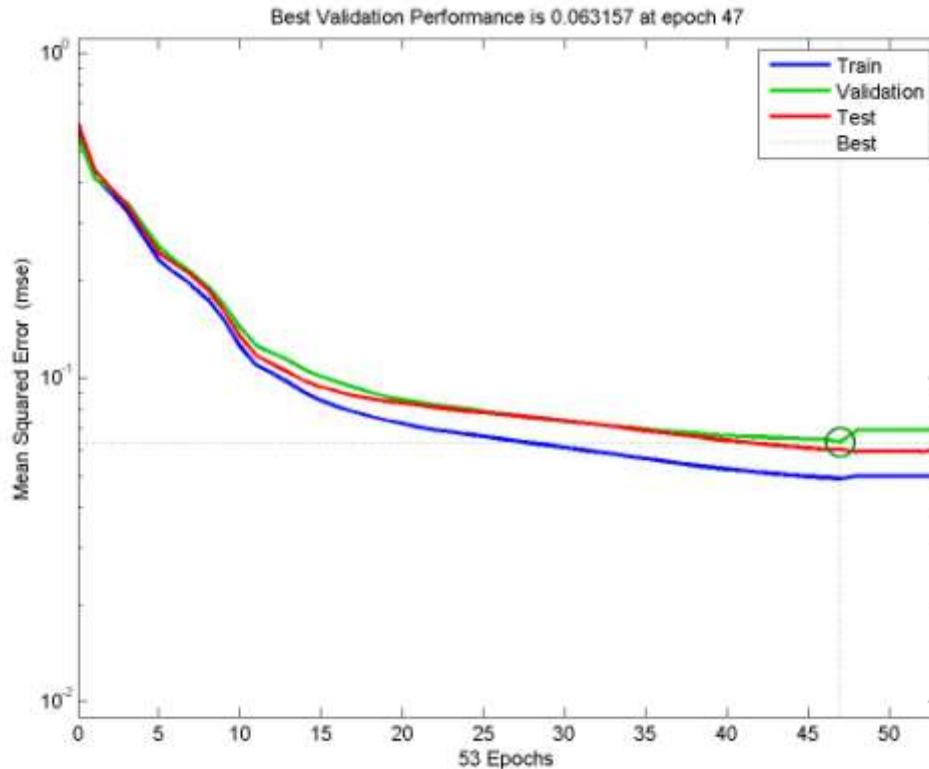
ενεργοποίησης εφαρμόζεται η σιγμοειδής συνάρτηση για το πρώτο επίπεδο και η υπερβολική εφαπτομένη για το δεύτερο επίπεδο.



Σχήμα 5.26: Μέση τιμή τετραγωνικού σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το πλήθος των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής.

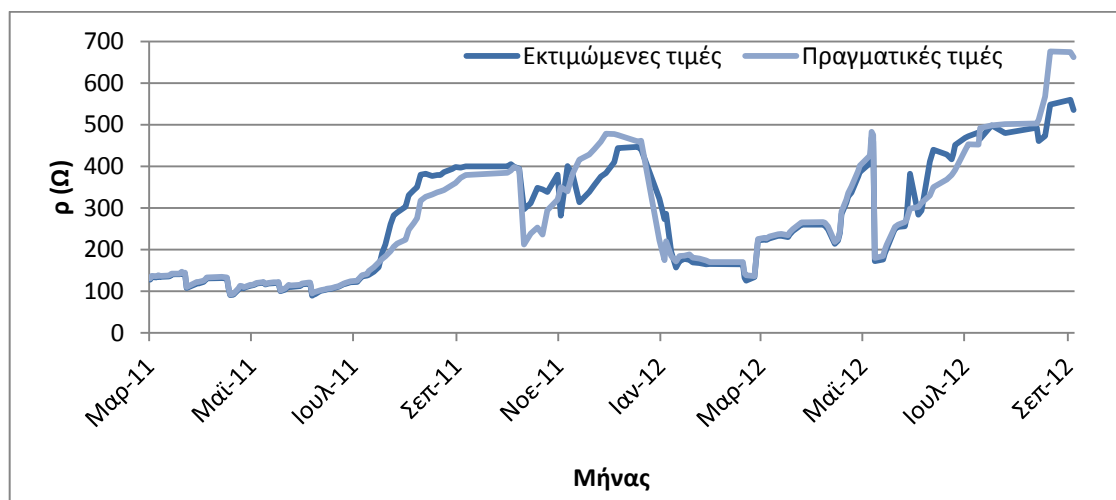


Σχήμα 5.27: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με το ρυθμό μάθησης και τον όρο ορμής για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής.

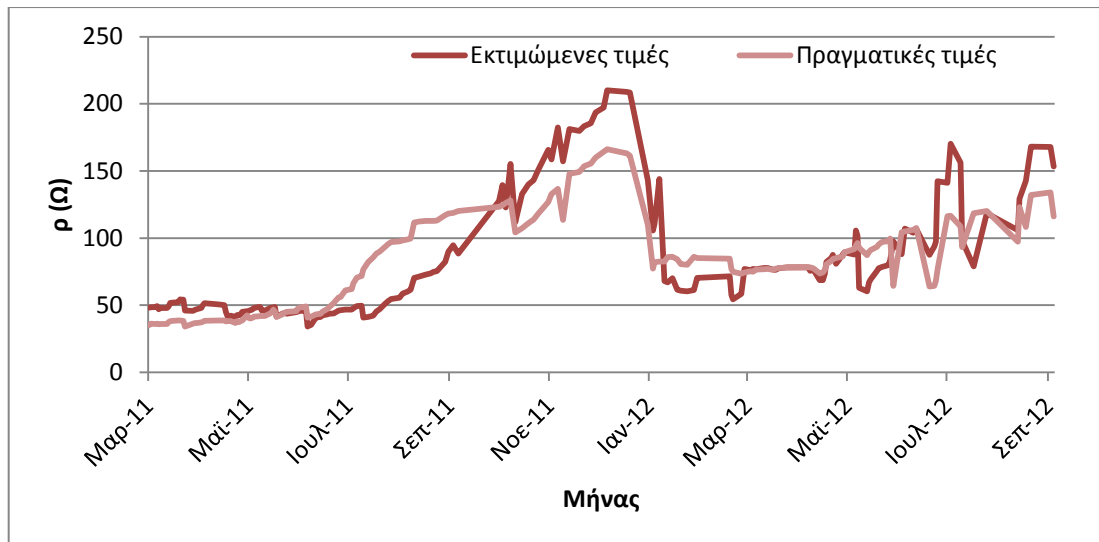


**Σχήμα 5.28:** Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και σταθερό όρο ορμής.

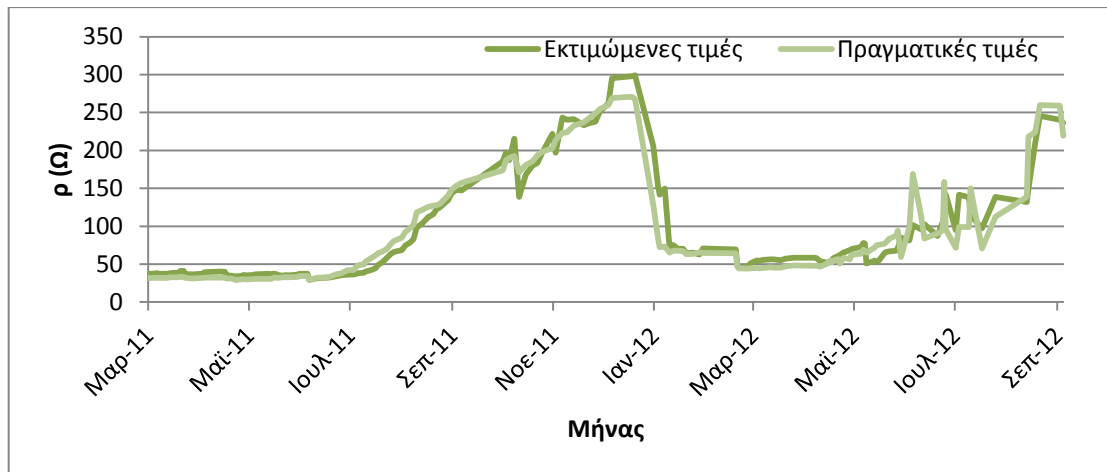
Το αποτέλεσμα είναι παρεμφερές με το πρώτο σενάριο, αφού οι βέλτιστες τιμές είναι 0,8 για το ρυθμό μάθησης και 0,5 για τον όρο ορμής. Αυτό δίνει αποτελέσματα, όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα, με μικρότερο συντελεστή συσχέτισης. Ήδη από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται, ότι το σφάλμα για όλα τα σύνολα είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο σενάριο.



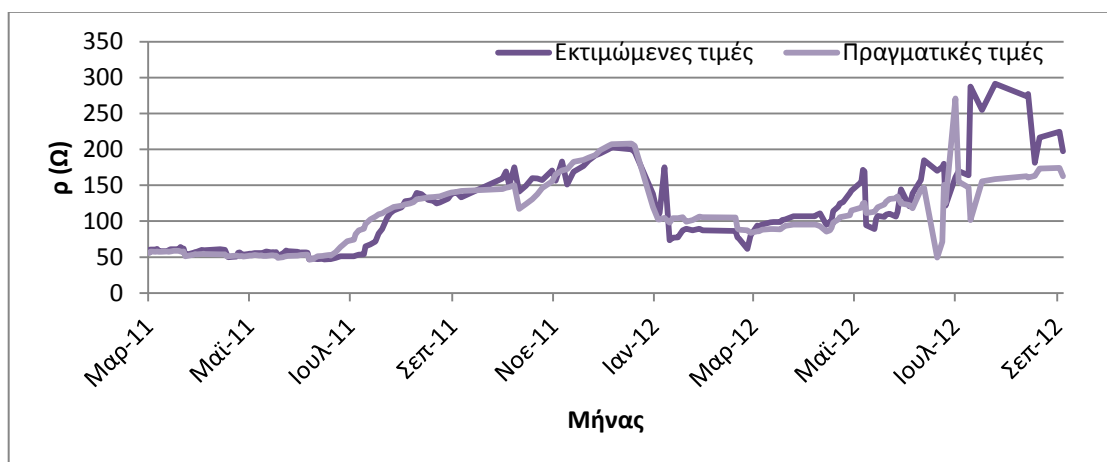
**Σχήμα 5.29-α:** Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο).



Σχήμα 5.29-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο).

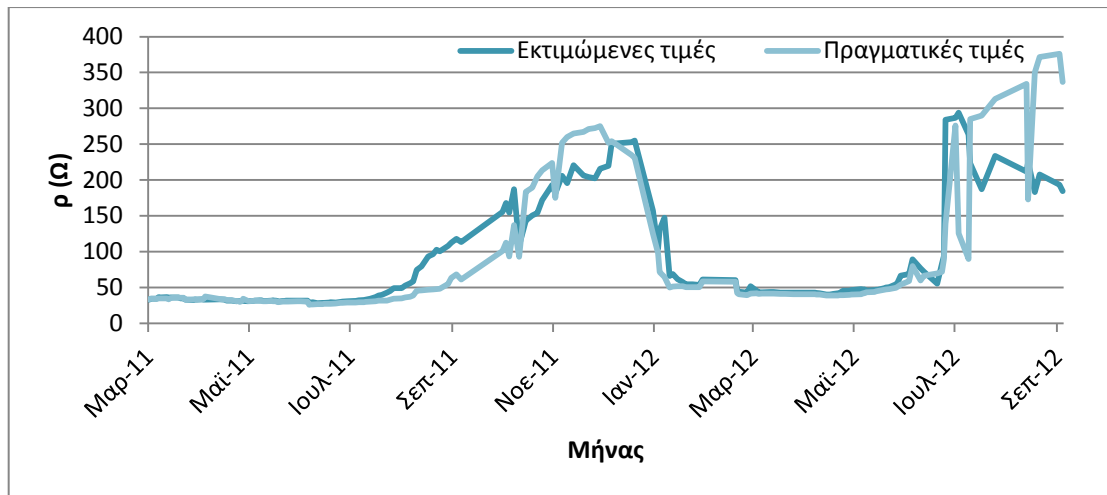


Σχήμα 5.29-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο).

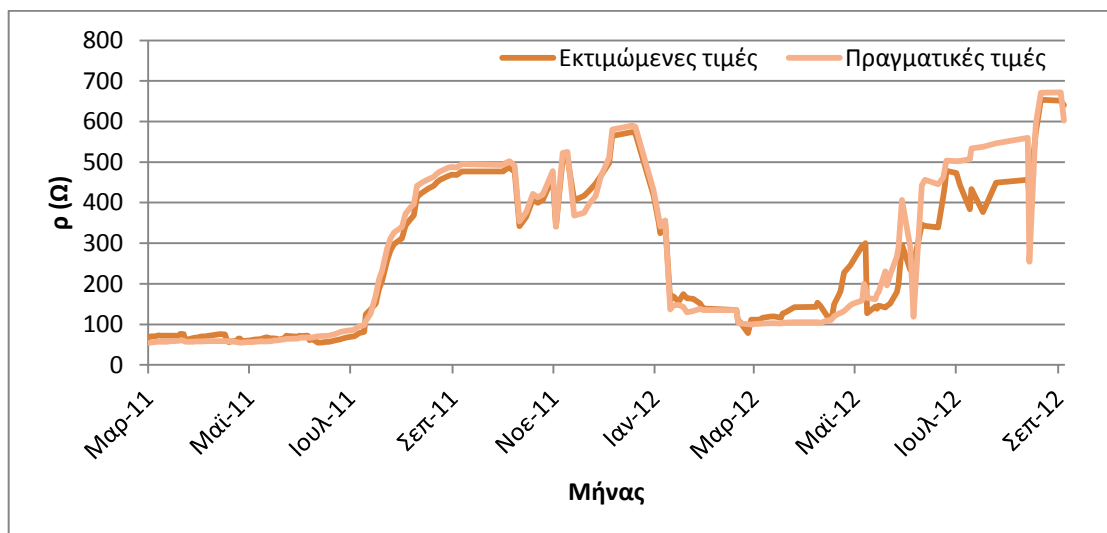


Σχήμα 5.29-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο).





**Σχήμα 5.29-ε:** Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο).

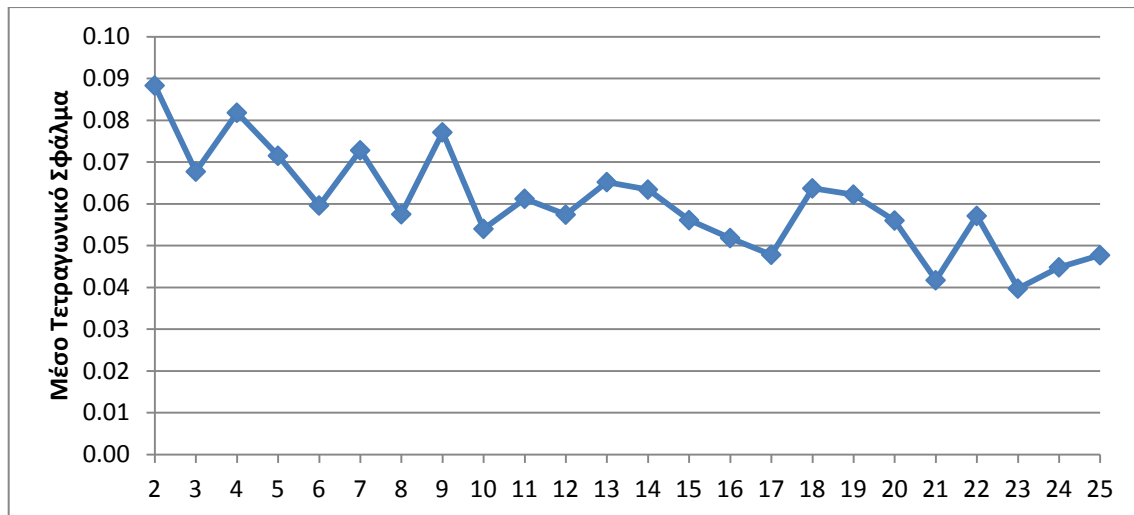


**Σχήμα 5.29-στ:** Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με μεταβλητό ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (2ο σενάριο).

Διαπιστώνουμε και από τα διαγράμματα, ότι στο δεύτερο σενάριο τα αποτελέσματα είναι λιγότερο ακριβή με σημαντικότερη διαφορά να εμφανίζεται στο πέμπτο ηλεκτρόδιο, όπου υπάρχει σημαντική διαφορά σε κάποιες περιόδους λήψης μετρήσεων. Ωστόσο και στο δεύτερο ηλεκτρόδιο φαίνεται, ότι υπάρχει μία απόκλιση μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμώμενων τιμών.

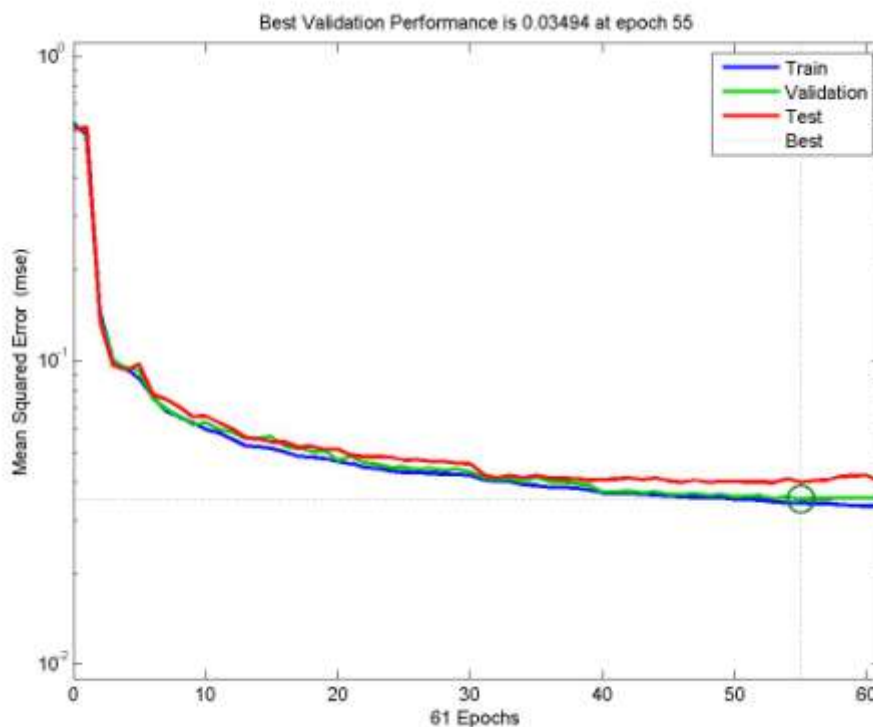
#### 5.4.4. Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton

Στον αλγόριθμο αυτό γι' αυτό το σενάριο επιλέγονται 23 νευρώνες για το κρυμμένο επίπεδο. Επίσης για τις συναρτήσεις ενεργοποίησης προτιμάται η σιγμοειδής για το πρώτο επίπεδο και η γραμμική για το δεύτερο.

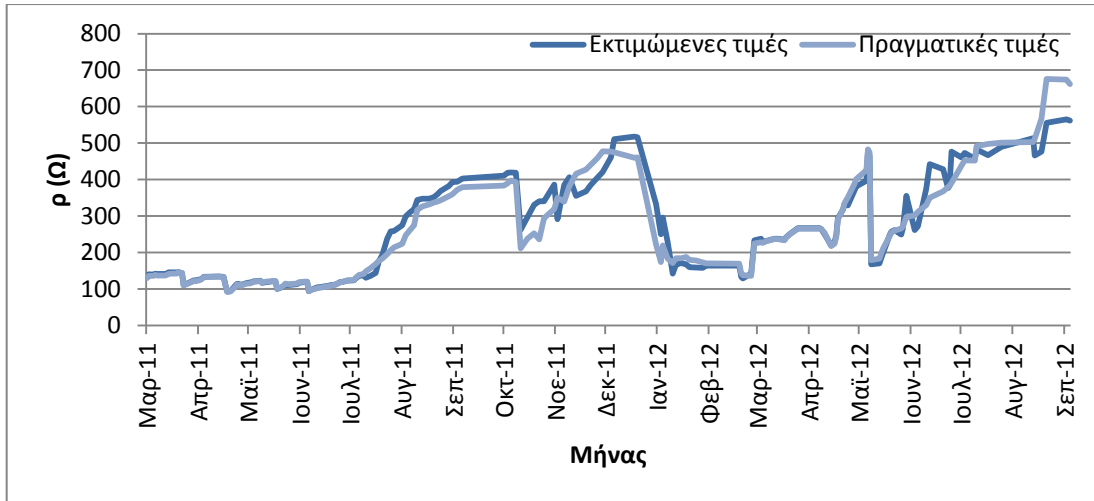


Σχήμα 5.30: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.

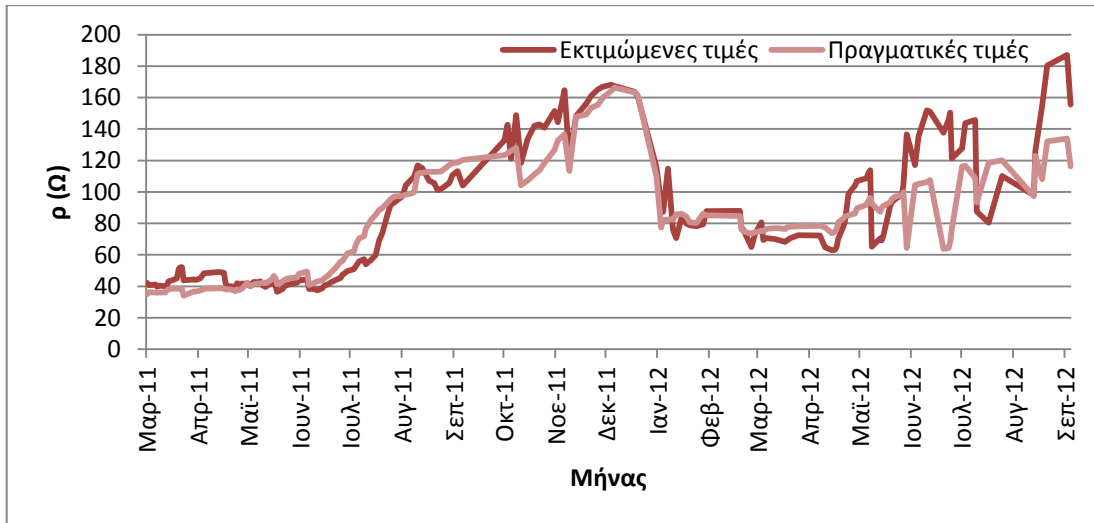
Με αυτόν το συνδυασμό παραμέτρων εκπαιδεύεται το νευρωνικό δίκτυο και το σφάλμα το δίκτυο εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά γι' αυτό το σενάριο. Ωστόσο συγκριτικά με το πρώτο σενάριο το σφάλμα συνεχίζει να είναι μεγαλύτερο, όπως συμβαίνει και με τους προηγούμενους αλγορίθμους εκπαίδευσης.



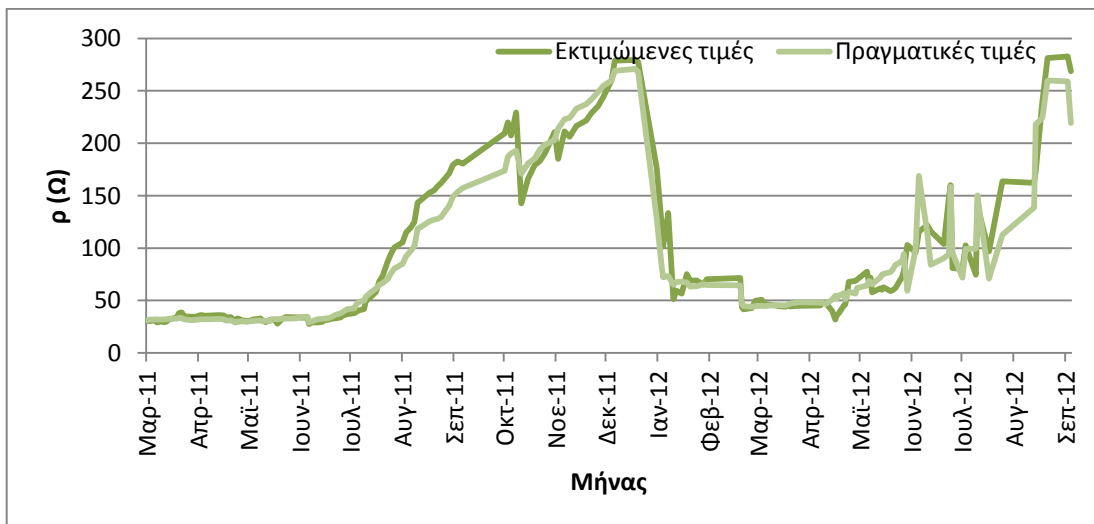
Σχήμα 5.31: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton.



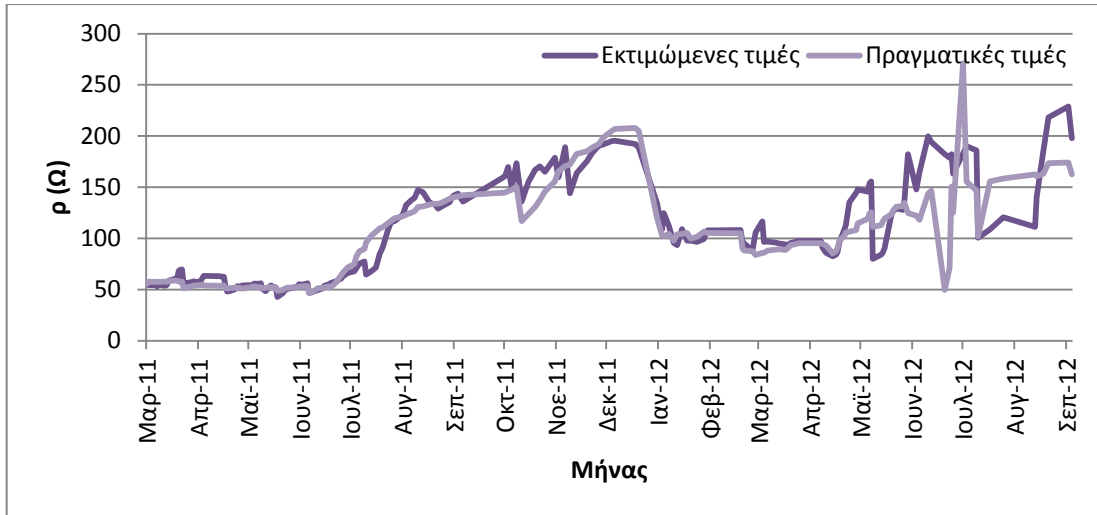
Σχήμα 5.32-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2<sup>ο</sup> σενάριο).



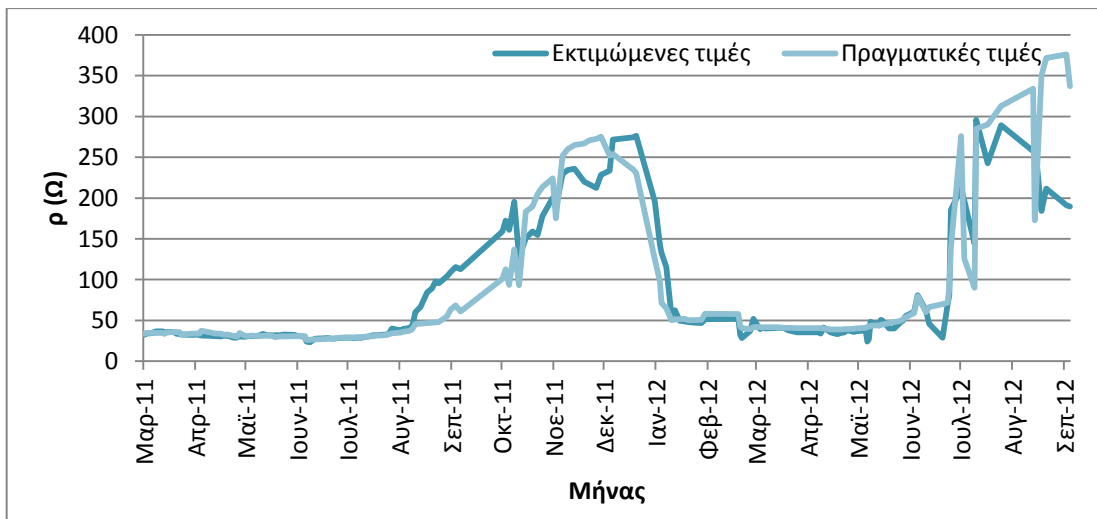
Σχήμα 5.32-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2<sup>ο</sup> σενάριο).



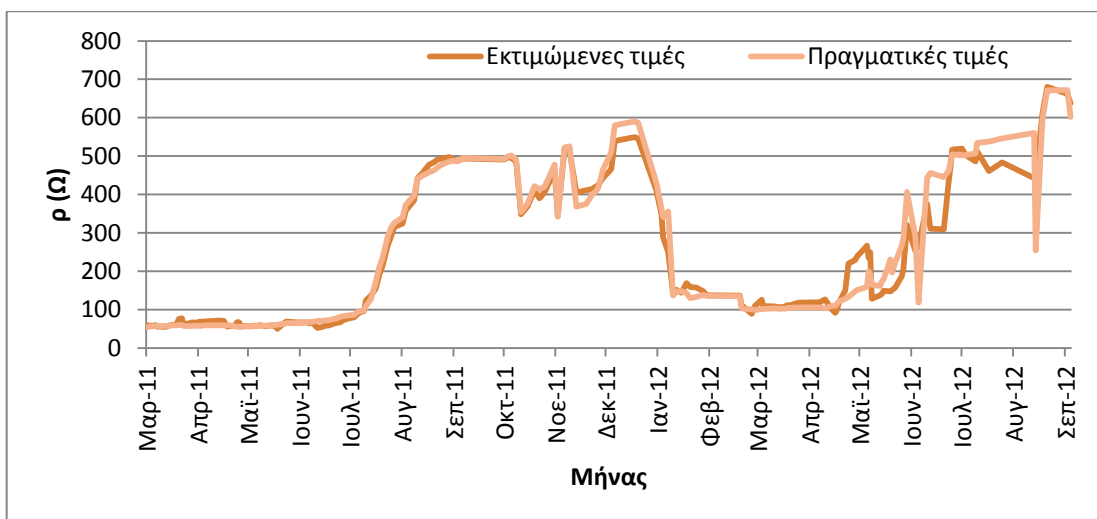
Σχήμα 5.32-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μετεωρίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.32-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.32-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2<sup>ο</sup> σενάριο).

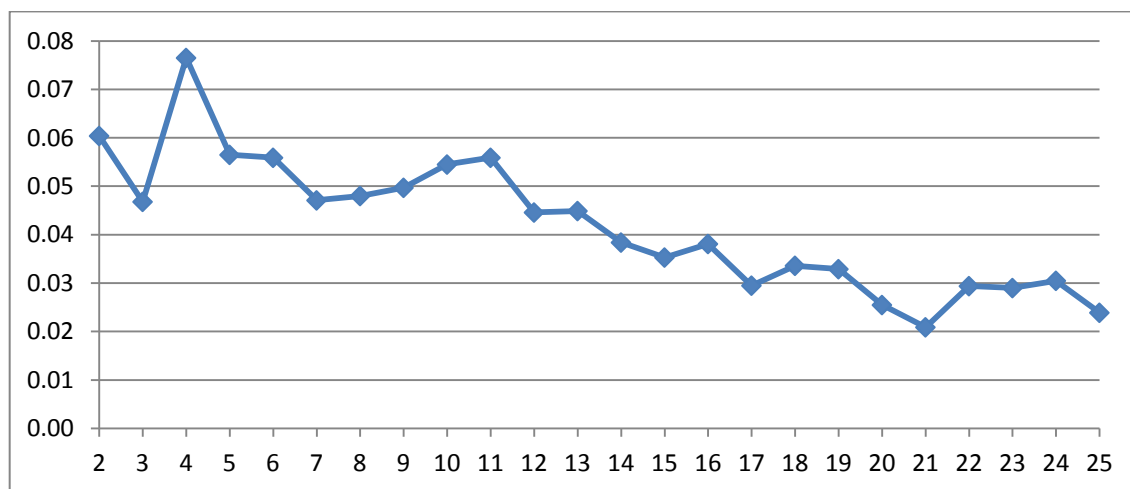


Σχήμα 5.32-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο quasi-Newton (2<sup>ο</sup> σενάριο).

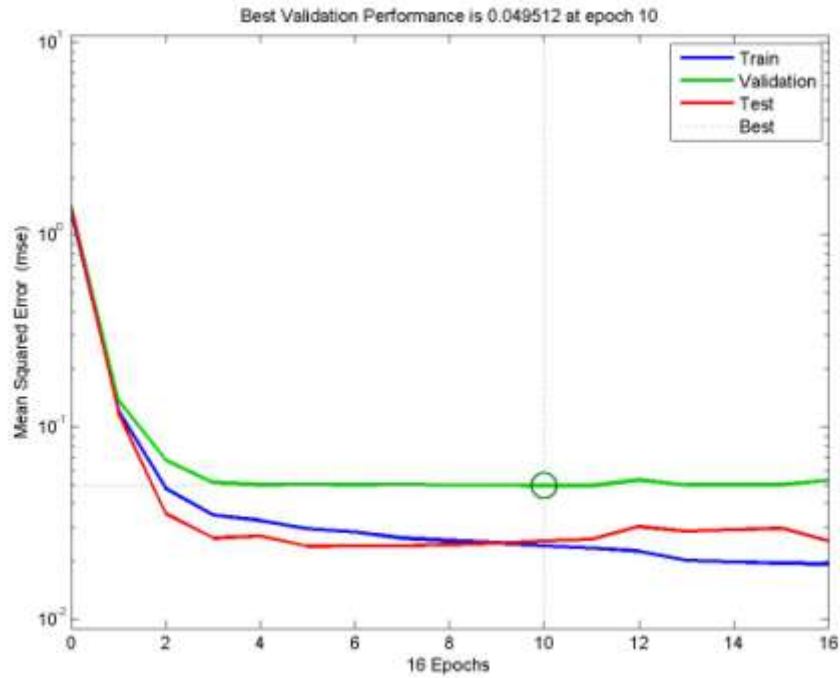
Παρατηρώντας τα διαγράμματα φαίνεται, ότι η ακρίβεια βελτιώνεται στο πέμπτο ηλεκτρόδιο, ενώ σε άλλα, όπως παραδείγματος χάρη στο δεύτερο ηλεκτρόδιο τα αποτελέσματα είναι χειρότερα από άλλους αλγόριθμους.

#### 5.4.5. Εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt

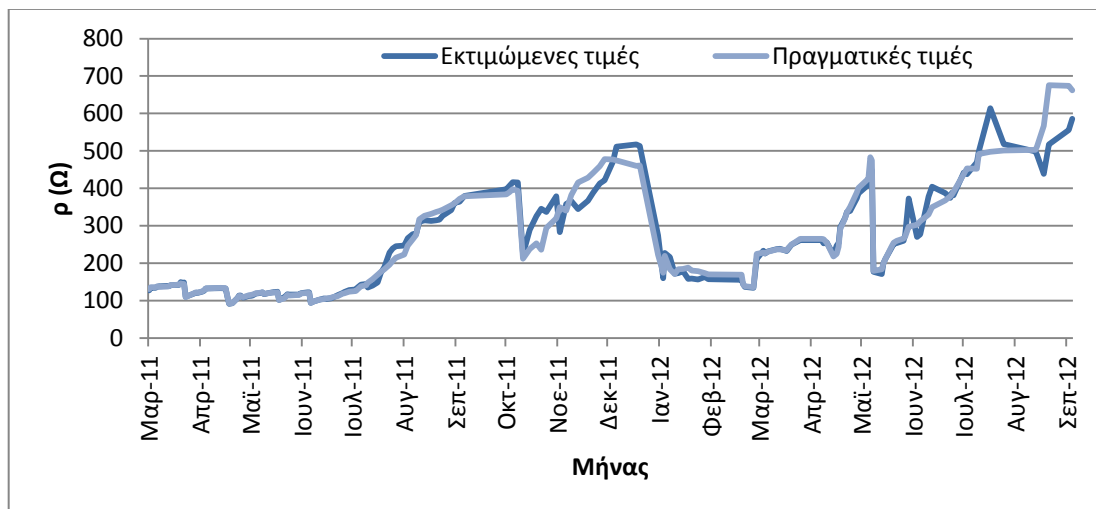
Το νευρωνικό δίκτυο εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα, περίπου 2, για 21 νευρώνες. Επίσης για την εκπαίδευσή του χρησιμοποιείται ως συνάρτηση ενεργοποίησης η σιγμοειδής για το πρώτο επίπεδο και η γραμμική για το δεύτερο επίπεδο.



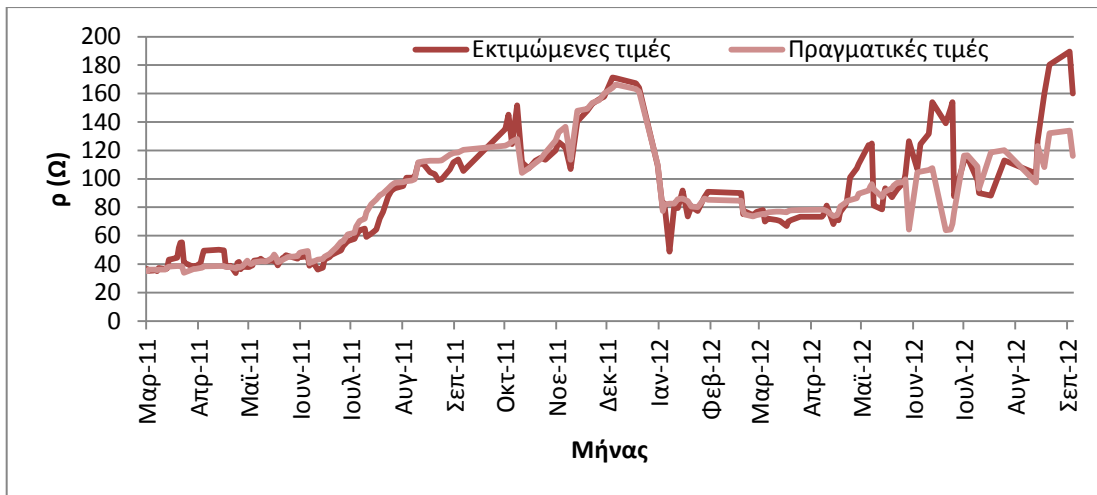
Σχήμα 5.33: Μέση τιμή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.



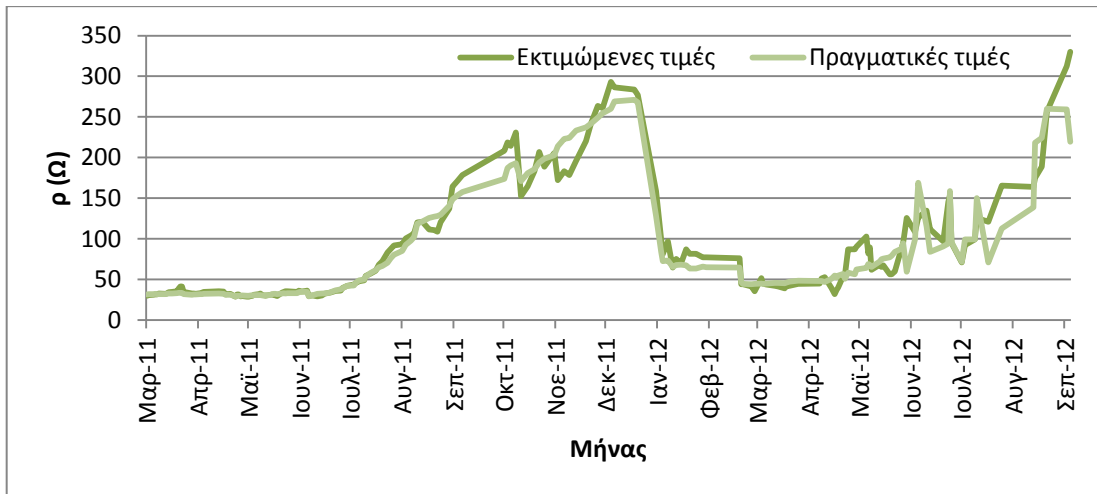
Σχήμα 5.34: Μεταβολή σφάλματος για το σύνολο εκπαίδευσης (μπλ.ε), το σύνολο αξιολόγησης (πράσινο) και το σύνολο ελέγχου (κόκκινο) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.



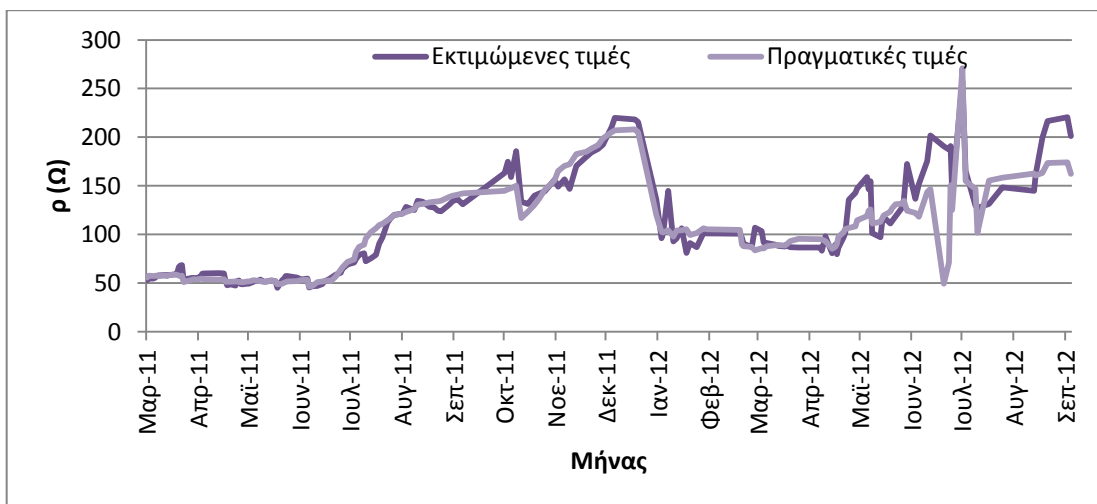
Σχήμα 5.35-α: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 1ο ηλεκτρόδιο (απευθείας στο έδαφος) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2<sup>ο</sup> σενάριο).



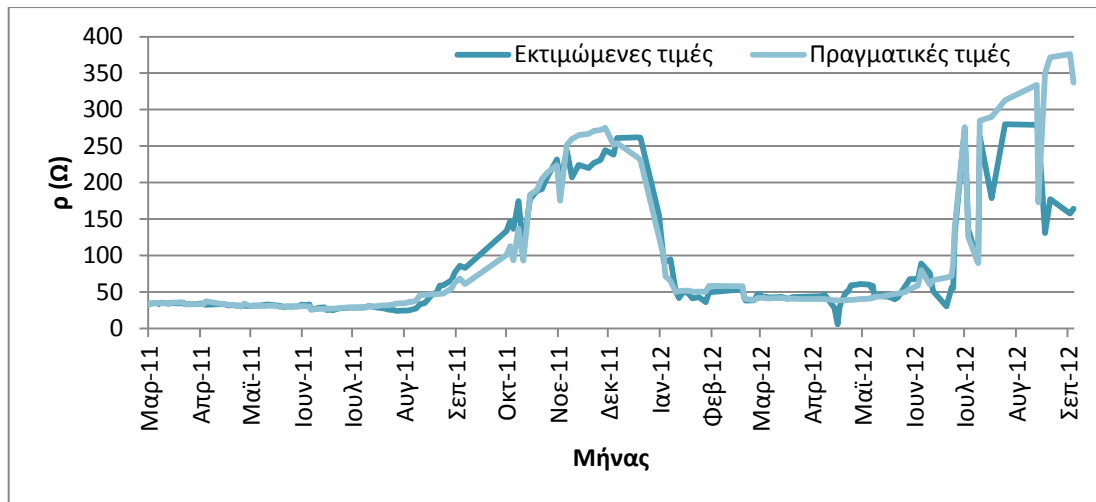
Σχήμα 5.35-β: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 2ο ηλεκτρόδιο (με σκυρόδεμα) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2<sup>ο</sup> σενάριο).



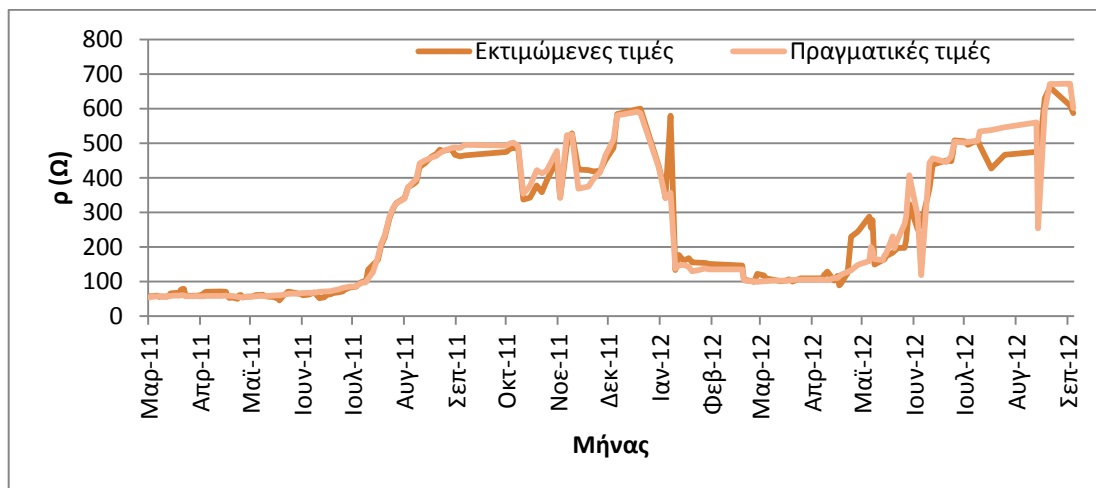
Σχήμα 5.35-γ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 3ο ηλεκτρόδιο (με μπετονίτη) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.35-δ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 4ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Α) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.35-ε: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 5ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό Β) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2<sup>ο</sup> σενάριο).



Σχήμα 5.35-στ: Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές της αντίστασης γείωσης για το 6ο ηλεκτρόδιο (Χημικό Υλικό C) για εκπαίδευση ανά εποχή με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (2<sup>ο</sup> σενάριο).

Σε αυτό το σενάριο ο αλγόριθμος αυτός δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα, ωστόσο όχι με τη σημαντική διαφορά που παρατηρήθηκε στο προηγούμενο σενάριο. Υπάρχουν ηλεκτρόδια, τα οποία με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt εμφανίζουν καλύτερη απόδοση, όπως το δεύτερο ηλεκτρόδιο, στο οποίο έχει τοποθετηθεί σκυρόδεμα. Αντίθετα, στο τρίτο ηλεκτρόδιο με τον μπετονίτη η απόδοση του εν λόγω αλγορίθμου είναι χειρότερη σε σύγκριση με τα προηγούμενα.

#### 5.4.6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το 2<sup>ο</sup> σενάριο

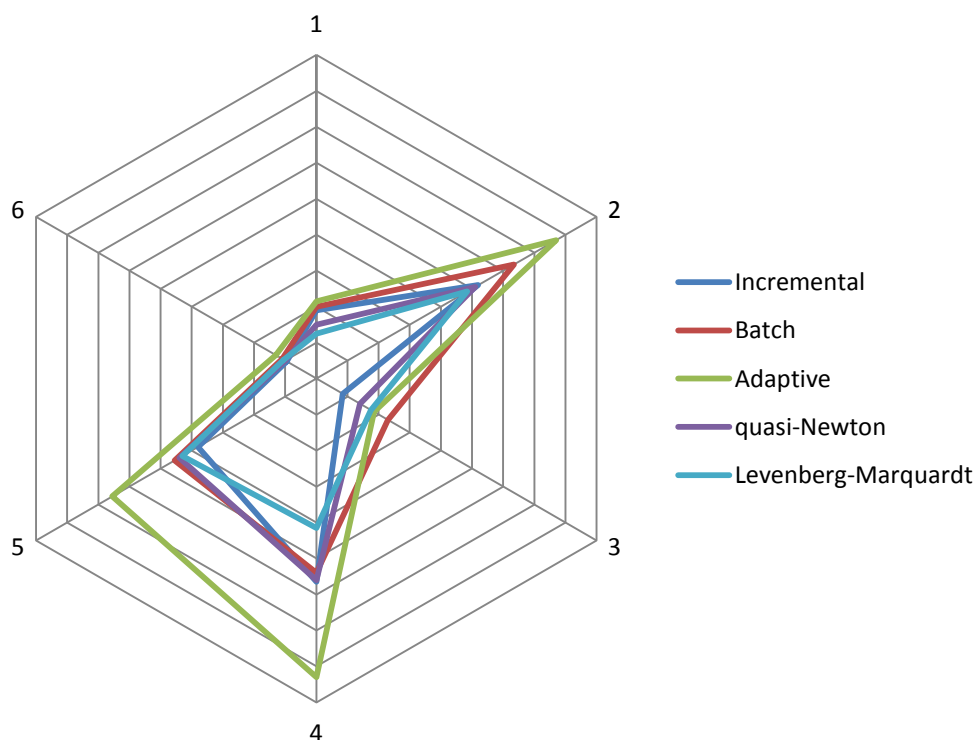
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ του συνόλου των εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών. Στο προηγούμενο σενάριο ήταν φανερό, ότι ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt εμφάνιζε τη μέγιστη ακρίβεια, η οποία ήταν με διαφορά καλύτερη. Σε αυτό το σενάριο τα αποτελέσματα δεν είναι το ίδιο ξεκάθαρα. Αν ήταν επιθυμητό, να διακριθεί κάποιος αλγόριθμος,



αυτός θα ήταν επίσης ο Levenberg-Marquardt. Λαμβάνοντας τη μέση τιμή των συντελεστών συσχέτισης, ο εν λόγω αλγόριθμος προηγείται. Ωστόσο, ο σκοπός της μελέτης αυτής δεν έγκειται αποκλειστικά στην ανάδειξη ενός και μόνο αλγορίθμου. Αντιθέτως, ο σκοπός είναι, να εξεταστεί η συμπεριφορά του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με τους διάφορους αλγορίθμους εκπαίδευσης. Σε αυτό το σενάριο επομένως συνάγεται, ότι για κάθε ηλεκτρόδιο υπάρχει διαφορετικός αλγόριθμος, που εμφανίζει την καλύτερη απόδοση.

**Πίνακας 5.4:** Συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις εκτιμώμενες και τις πραγματικές τιμές για κάθε αλγόριθμο εκπαίδευσης για το δεύτερο σενάριο.

	Incremental	Batch	Adaptive	quasi-Newton	Levenberg-Marquardt
1	0.962	0.960	0.957	0.970	0.975
2	0.896	0.873	0.846	0.898	0.903
3	0.983	0.954	0.963	0.972	0.965
4	0.887	0.892	0.834	0.888	0.917
5	0.924	0.909	0.869	0.912	0.914
6	0.981	0.978	0.974	0.980	0.979



**Σχήμα 5.36:** Γραφική απεικόνιση των συντελεστών συσχέτισης για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια για όλους τους αλγορίθμους για το δεύτερο σενάριο.

## 5.5 Σχολιασμός

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Η πρώτη μελέτη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στις μετρήσεις πραγματοποιήθηκε από τον κ. Ανδροβιτσανέα, την κα Ασημακοπούλου, τον κ. Γκόνο και τον κ. Σταθόπουλο [61], τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάστηκαν στο αντίστοιχο συνέδριο στην Κίνα. Εξελίσσοντας τη μελέτη αυτή έγινε η απόπειρα να εξεταστούν περισσότεροι αλγόριθμοι μέσω του λογισμικού MATLAB.

Παρατηρήθηκε, ότι η εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων ως μέθοδος εκτίμησης της συμπεριφοράς της αντίστασης γείωσης, είναι αξιόπιστη, αφού με τη βοήθεια των νευρωνικών δικτύων γινόταν σωστή εκτίμηση. Τονίζεται, ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε φυσικό χώρο και όχι στο εργαστήριο. Επομένως, καθίσταται φανερό, ότι οι τιμές δεν είναι σταθερές σε όλη τη διάρκεια του έτους. Υπήρχαν περίοδοι, όπου λόγω της εκτεταμένης υγρασίας και των πολύ υψηλών θερμοκρασιών (π.χ. Ιούνιος-Αύγουστος 2012) οι τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης αυξάνονταν σε μεγάλο βαθμό. Επίσης, υπήρχαν βελτιωτικά υλικά (π.χ. το Χημικό Υλικό Β), τα οποία απορροφούνταν από το έδαφος, με αποτέλεσμα η αντίσταση γείωσης να παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές και να είναι περισσότερο ευμετάβλητη ανάλογα με την υγρασία. Αυτό γίνεται άμεσα αντιληπτό στο διάγραμμα της μεταβολής των τιμών της αντίστασης γείωσης για το πέμπτο ηλεκτρόδιο. Ενώ παρατηρείται μία συνεχής και απότομη αύξηση της αντίστασης γείωσης, σημειώνεται απότομη μείωση μετά την πρώτη βροχόπτωση. Σε αυτό το σημείο μάλιστα παρατηρείται, ότι οι περισσότεροι αλγόριθμοι εμφάνιζαν σημαντική απόκλιση από τις πραγματικές τιμές. Επίσης το γεγονός, ότι ο χώρος δεν ήταν φυλασσόμενος, είχε σαν αποτέλεσμα, η διάταξη να είναι προσβάσιμη. Απόρροια αυτού ήταν το Φεβρουάριο του 2012 κάποια από τα ηλεκτρόδια, που χρησιμοποιούνταν για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους να κλαπούν, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η λήψη μετρήσεων.

Εξετάζοντας καθένα από τα σενάρια ξεχωριστά επαναλαμβάνεται, ότι στο πρώτο σενάριο ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt εμφανίζει την καλύτερη απόδοση με εξαιρετική ακρίβεια. Εστιάζοντας στο δεύτερο σενάριο σημειώνεται, ότι για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το πρόγραμμα CYMgrd ως είσοδος στο νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης. Γι' αυτόν το λόγο διαπιστώνεται μεν μία πολύ ακριβής εκτίμηση μέσω του νευρωνικού δικτύου, χωρίς ωστόσο να επιτυγχάνεται η ακρίβεια του πρώτου σεναρίου. Αυτό εξηγείται από το γεγονός, ότι η προσομοίωση με ένα διστρωματικό μοντέλο εδάφους άλλοτε αποδίδει και άλλοτε όχι, επομένως υπάρχει μία απόκλιση από τις πραγματικές τιμές. Παράδειγμα, που να αποδεικνύει αυτό, είναι το δεύτερο ηλεκτρόδιο, το οποίο εμφάνιζε ένα συντελεστή συσχέτισης περίπου στο 90% και συνήθως λίγο παρακάτω. Ωστόσο, στο τέλος τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ**

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να επισημανθούν τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, όσον αφορά στην απόδοση των βελτιωτικών υλικών, αλλά και στη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης. Επίσης, παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία σχεδιασμού και εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, όπως επίσης και τα συμπεράσματα, που προέκυψαν, ύστερα από την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Τέλος, παρατίθενται και οι δυνατότητες μελλοντικής επέκτασης της μελέτης, που έχει πραγματοποιηθεί.

Αρχικά, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνεχίστηκε η λήψη μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης του εδάφους και των πέντε βελτιωτικών που χρησιμοποιούνται στη διάταξη. Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους έγινε με τη μέθοδο Wenner, ενώ η μέτρηση της αντίστασης γείωσης με τη μέθοδο της πτώσης δυναμικού. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Απρίλιο του 2012 μέχρι και το τέλος Φεβρουαρίου 2013 σχεδόν σε καθημερινή βάση και διαρκούσαν 60-90 λεπτά κάθε φορά. Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων συμπληρώνονται δύο χρόνια από την ημέρα έναρξης της μελέτης. Πρόκειται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο μας δίνει τη δυνατότητα να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για το έδαφος και τις ιδιότητές του, μελετώντας τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Επίσης, μέσω των μετρήσεων αυτών, πραγματοποιήθηκε ιδιαίτερη συμβολή στη μελέτη των βελτιωτικών υλικών, καθώς όπως διαπιστώθηκε και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, υπήρχαν βελτιωτικά υλικά, τα οποία παρουσίασαν απρόσμενη συμπεριφορά, όχι μόνο λόγω των καιρικών συνθηκών, αλλά και εξαιτίας των ιδιοτήτων τους. Επομένως, συλλέχθηκαν σημαντικές πληροφορίες και για το χρόνο ζωής των βελτιωτικών υλικών, εκτός φυσικά από την απόδοσή τους.

Συνοψίζοντας, με τη λήψη μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα διερευνήθηκε η μεταβολή της αντίστασης του εδάφους. Επαληθεύτηκε το γεγονός ότι, οι καιρικές συνθήκες και κυρίως η βροχόπτωση διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Υπήρχαν βελτιωτικά υλικά, τα οποία διατηρούνταν σε υγρό περιβάλλον, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μία σχετικά σταθερή απόδοση μέσα στο χρόνο. Ωστόσο, διαπιστώθηκε με τις μετρήσεις, που λαμβάνονταν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ότι η παρατεταμένη ξηρασία και η υψηλή θερμοκρασία είχαν σαν αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης των βελτιωτικών υλικών. Έτσι δικαιολογείται και η απότομη αύξηση της αντίστασης γείωσης για μερικά ηλεκτρόδια, ενώ με την πρώτη βροχόπτωση η αντίσταση γείωσης επέστρεφε στα προηγούμενα επίπεδα.

Όσον αφορά στο υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, επιχειρήθηκε για πρώτη φορά ο σχεδιασμός του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Έχοντας σχεδιάσει το νευρωνικό δίκτυο, πραγματοποιήθηκε η εκπαίδευσή του με όλους τους δυνατούς αλγορίθμους που διατίθενται στο εν λόγω λογισμικό και μελετήθηκαν τα αποτελέσματα για καθέναν από τους αλγορίθμους. Μάλιστα η εκπαίδευση αυτή πραγματοποιήθηκε όχι μόνο για τις μετρήσεις που είχαν ληφθεί (1<sup>ο</sup> σενάριο), αλλά και για τις τιμές, που λήφθηκαν από το λογισμικό CYMgrid, για την προσομοίωση του εδάφους με ένα διστρωματικό μοντέλο εδάφους (2<sup>ο</sup> σενάριο). Εκτός από τους αλγορίθμους που διατίθενται, αποπειράθηκε η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων με παραλλαγές αυτών, ή ακόμα και με τη χρήση άλλων συναρτήσεων ενεργοποίησης, στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας για τη βέλτιστη δυνατή εκπαίδευση και συμπεριφορά του νευρωνικού δικτύου. Έχοντας λοιπόν τα αποτελέσματα από περισσότερους από 10 αλγορίθμους και για τα δύο σενάρια εκπαίδευσης πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ αυτών και των μετρήσεων που συνολικά έχουν ληφθεί από το Φεβρουάριο του 2011 μέχρι τον Οκτώβριο του 2012. Εξαιτίας του πολύ μεγάλου όγκου των αποτελεσμάτων, προτιμήθηκε η επιλεκτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, που παρουσίαζε και μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Αναφορικά με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα συνάγεται το συμπέρασμα, ότι δεν υπάρχει για όλες τις περιπτώσεις ένας συγκεκριμένος αλγόριθμος, που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ανάλογα με το σύνολο των τιμών, που πρέπει να εκτιμηθεί, υπάρχει ο κατάλληλος αλγόριθμος με τη βέλτιστη απόδοση. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση για την ανάδειξη του καταλληλότερου αλγορίθμου. Ακόμα τονίζεται, ότι για κάθε αλγόριθμο μεγάλο ρόλο παίζει η αρχικοποίηση των τιμών. Ανάλογα με τις αρχικές τιμές των μεταβλητών του νευρωνικού δικτύου, μπορεί να υπάρχει και διαφορετική απόδοση.

Η διεξαγωγή της μελέτης αυτής αποτελεί το εφαλτήριο για τη διεξαγωγή αντίστοιχων μελετών σε άλλους τύπους εδάφους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα αποτελέσματα αφορούν σε έδαφος αποτελούμενο από χώμα. Αντίστοιχα, υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής αντίστοιχων μετρήσεων σε πετρώδες έδαφος, σε χωμάτινο έδαφος με άλλη σύσταση, σε εδάφη κοντά στη θάλασσα κ.α. Στη σημερινή εποχή υπάρχει πληθώρα ηλεκτρικών εγκαταστάσεων στη φύση. Αρκεί μόνο να ληφθεί υπόψη η ολοένα ευρύτερη εγκατάσταση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων. Άλλες από αυτές τις εγκαταστάσεις βρίσκονται στη θάλασσα, άλλες σε παράκτιες περιοχές, άλλες στις κορυφές βουνών και άλλες μέσα σε πόλεις. Έχοντας λοιπόν κατά νου την ποικιλομορφία των εδαφών διαπιστώνεται η ανάγκη διεξαγωγής της εν λόγω μελέτης σε περισσότερους τύπους εδαφών. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη δυνατότητα δημιουργίας μίας βάσης δεδομένων, μέσω της οποίας δε θα φαίνεται μόνο κατά πόσο μεταβάλλεται η αντίσταση γείωσης ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, αλλά πλέον ανάλογα και με τον τύπο του εδάφους. Επίσης για κάθε τύπο εδάφους θα προτείνεται η χρήση του βελτιωτικού υλικού με την καλύτερη απόδοση, όπως αυτό θα έχει προκύψει από την αντίστοιχη μελέτη.

Η δυνατότητα επέκτασης της μελέτης δεν αφορά μόνο στο πειραματικό κομμάτι, δηλαδή στη διεξαγωγή μετρήσεων, αλλά και στο θεωρητικό κομμάτι, που αφορά στην κατασκευή του νευρωνικού δικτύου. Το μεγάλο πλεονέκτημα, που προσφέρουν τα νευρωνικά δίκτυα, είναι η μεγάλη τους ευελιξία στα δεδομένα εισόδου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δέκα είσοδοι στο πρώτο σενάριο και επτά είσοδοι στο δεύτερο. Πλέον λαμβάνοντας τις κατάλληλες μετρήσεις μπορεί αν εισαχθεί μία ακόμα είσοδος, η οποία θα σχετίζεται με τον τύπο του εδάφους. Επίσης μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά της απόδοσης του βελτιωτικού υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο, πότε και αν αυτό έχει μέγιστη απόδοση, αλλά κυρίως πότε η απόδοσή του αρχίζει να φθίνει, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη αντικατάστασής του. Αν προσδιοριστεί αυτό, έστω και κατά προσέγγιση σε πρώτο στάδιο, δίνεται η ευκαιρία προσέγγισης της απόδοσης του βελτιωτικών υλικών με μεγαλύτερη ακρίβεια, αφού πλέον θα υπάρχει μία είσοδος, η οποία θα εισάγει και τον παράγοντα του χρόνου.

Τέλος, άλλη μία επέκταση της διπλωματικής θα μπορούσε να είναι η υποβολή των υλικών αυτών σε κρουστικές τάσεις. Παρουσιάζει ενδιαφέρον, να μελετηθεί αν τα υλικά αυτά διατηρούν τις ιδιότητές τους για αυτές τις ακραίες συνθήκες ή αν χάνουν κάποιες από τις φυσικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες λόγω των ισχυρότατων κρουστικών ρευμάτων. Επομένως διαπιστώνεται κατά πόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα γειώσεων αντικεραυνικής προστασίας.

## **Βιβλιογραφία**

- [1] A. J. Delaney, R. P. Peapples και A. S. Arcone, "Electrical resistivity of frozen and petroleum-contaminated fine-grained soil" *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 32, no. 2-3, pp. 107-119, 2001.
- [2] Β. Π. Ανδροβιτσανέας, "Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
- [3] [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.elemko.gr/documents/earthings.asp>.
- [4] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" ANSI/IEEE, 2000.
- [5] Γ. Κονταξής και Κ. Βουρνάς, "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας" Αθήνα, 1997.
- [6] Π. Ντοκόπουλος, "Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο πρότυπο ΕΛΟΤ HD384", Αθήνα: Ζήτη, 2005.
- [7] Ι. Φ. Γκόνος, "Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Ε.Μ.Π., 2002.
- [8] Φ. Η. Ασημακοπούλου, "Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους", Ενδιάμεση κρίση, 2009.
- [9] ΕΛΟΤ HD 384, "Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις", Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης, 2004.
- [10] Ελληνική Δημοκρατία, "Εφημερίς της κυβέρνησεως (Τεύχος δεύτερο)", Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο, 26/03/2009, p. 6860.
- [11] E. R. Sverko, "Ground measuring techniques: Electrode resistance to remote earth & soil resistivity", U.S.A.: ERICO, Inc. facility electrical protection, 1999.
- [12] G. F. Tagg, "Earth resistances", London: George Newnes Limited, 1964.
- [13] "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", ANSI/IEEE, 1983.
- [14] "Getting down to earth: A practical guide to earth resistance testing", [www.megger.com](http://www.megger.com), 2010.
- [15] "Ground resistance testing principle (Fall of potential-3 Point Measurement) 2-Point Measurement", [www.dranetz-bmi.com](http://www.dranetz-bmi.com).
- [16] J. Frei, "Messung der Impedanz ausgedehnter Erdersysteme sowie deren Berechnung mit Hilfe approximativer, analytischer und numerischer Verfahren",

Graz: Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2001.

- [17] H. Kutter and W. Lange, "Grounding improvement by using bentonite", *Elektrie*, 1967, pp. 421-424.
- [18] K. Mc Gowan, "Use of conductive backfills in reducing transmission tower surge impedance and footing resistance", San Fransisco, California: IEEE PES Summer Meeting, 1975, pp. 484-486.
- [19] W. R. Jones, "Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1980.
- [20] H. Yamane, T. Ideguchi and M. Tokuda, "A new ground resistance-reducing material based on water-absorbent polymer", *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 77, no. 5, pp. 68-78, 1994.
- [21] M. Kostic, Z. Radakovic, N. Radovanovic and M. Tomasovic-Canovic, "Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud", *Generation, Transmission and Distribution IEEE Proceedings*, Vol. 146, no. 1, pp. 1-6, January 1999.
- [22] Q. Meng, J. He and J. Dawalibi, "A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity soils", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, no. 3, pp. 911-916, July 1999.
- [23] H.-L. 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, 03 July 2004.
- [24] H. E. Martinez, E. L. Fuentealba, A. L. 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.
- [25] Romualdo-Torres, Velazquez-Sanchez and Loza-Rodriguez, "The application of backfills for improving the grounding resistance of power systems", *2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution conference and exhibition*, pp. 947-950, 21-24 May 2006.
- [26] M. N. Nor, "Effect of enhancement materials when mixed with sand under high impulse conditions", *8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*, 2006.
- [27] 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.
- [28] N. Kumarasinghe, "A low cost lightning protection system and its effectiveness",

*International Lightning Detection Conference+International Lightning Meteorology Conference - Tucson, Arizona, USA, 21-23,24-25 April 2008.*

- [29] G. Eduful and J. E. Cole, "Palm Kernel oil cake as an alternative to earth resistance resistance-reducing agent", *F.M. Tettech, Soil Research Institute, Ghana*, pp. 1-4, 2009.
- [30] A. D. Galván, E. E. Gaona and G. G. Pretelin, "Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods", *X International symposium in Lightning Protection, Curitiba, Brazil*, 9-13 November 2009.
- [31] A. D. Galván, G. G. Pretelin and E. E. Gaona, "Practical evaluation of ground enhancing compounds for high soil resistivities", *ICLP 2010 Proceedings*, pp. 1233-1-1233-4, 2010.
- [32] J. Jasni, L. K. Siow, M. A. Ab Kadir and W. F. Wan Ahmad, "Natural materials as grounding filler for lightning protection system", *30th International Conference on Lightning Protection ICLP, Cagliari, Italy*, 13-17 September 2010.
- [33] F. P. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Ground Electrode Resistance Measurements in Non Uniform Soils", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 1, 2PAS-93, no. 1, pp. 109-115, 1974.
- [34] F. P. Dawalibi and C. Blattner, "Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 1, 2PAS-103, no. 2, pp. 374-382, 1984.
- [35] A. P. S. Meliopoulos and A. Papalexopoulos, "Interpretation of Soil Resistivity Measurements: Experience with the Model SOMIP", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, no. 4, pp. 142-151, 1986.
- [36] C. Mazzetti and G. M. Veca, "Impulse Behavior Of Ground Electrodes", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 1, 2PAS-102, no. 9, pp. 3148-3156, 1983.
- [37] 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, 1990.
- [38] O. Banton, M. Cimon and M. Seguin, "*Soil Science Society of America Journal*", Vol. 61, no. 4, pp. 1010-1017, 1997.
- [39] A. J. Delaney, P. R. Peapples and S. A. Arcone, "*Cold Regions Science and Technology*", Vol. 32, no. 2-3, pp. 107-119, 2001.
- [40] A. Tabbagh, M. Dabas, A. Hesse and C. Panissod, "Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation", *Geoderma*, Vol. 97, no. 3-4, pp.



393-404, 2000.

- [41] A. Samouelian, 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, 2005.
- [42] M. Loke and R. Barker, "Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method", *Geophysical Prospecting*, Vol. 44, no. 1, pp. 131-152, 1996.
- [43] M.H.Loke, *RES2DINV ver.3.3 for Windows 3.1, 95 and NT*, Advanced Geosciences, 1997.
- [44] M. Loke, I. Acworth and T. Dahlin, "A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys" *Exploration Geophysics*, Vol. 34, no. 3, pp. 182-187, 2003.
- [45] 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, 2009.
- [46] Π. Αργυράκης, "Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές", Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2001.
- [47] Σ. Τζαφέστας, "Υπολογιστική Νοημοσύνη", Τόμος Α: Μεθοδολογίες, Αθήνα, 2002.
- [48] A. P. Engelbrecht, "Computational Intelligence (An Introduction)", Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- [49] Α. Λύκας, "Υπολογιστική Νοημοσύνη", 1999.
- [50] Ι. Κ. Χατζηλάου, Δ. Κουπατσιάρης και Γ. Τσεκούρας, "Εισαγωγή στα νευρωνικά δίκτυα", Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Ιανουάριος 2008.
- [51] L. Wessels and E. Barnard, "Avoiding false local minima by proper initialization of connections", *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992.
- [52] D. Plaut, S. Nowlan and G. Hinton, "Experiments on learning by Back Propagation", Department of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1986.
- [53] G. E. Asimakopoulou, V. T. Kontargyri, G. I. Tsekouras, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Artificial neural network optimization methodology for the estimation of the critical flashover voltage on insulators", Vol. 3, no. 1, pp. 90-104, 2009.
- [54] P. Ghosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee, "Estimation of time-flashover characteristics of contaminated electrolytic surfaces using a Neural Network",

*IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 2, no. 6, pp. 1064-1074, December 1995.

- [55] E. Polak, "Computational Methods in Optimization: A unified approach", New York: Academic Publication, 1971.
- [56] Γ. Ασημακοπούλου, "Ανάπτυξη μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης για τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών σε μονωτήρες υψηλής τάσης", Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2007.
- [57] A. Silva and L. Moulin, "Confidence intervals for neural network based short-term load forecasting" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, no. 4, pp. 1191-1196, November 2000.
- [58] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://maps.google.gr/maps?hl=en>.
- [59] G. Fragogiannis, N. Papatheodorou and S. Prof. Stamataki, "Evaluation of Thermal Performance of Ground – Source Energy Systems. A Geophysics Supported Approach", *World Renewable Energy Congress (WRECX)*, 2008.
- [60] 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)*, 2-7 September 2012, paper 231.
- [61] V. P. Androvitsaneas, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Estimation of Ground Enhancing Compound Performance Using Artificial Neural Network", *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 145-149, 2012.
- [62] [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/2633834\\_6115\\_ENG\\_A\\_W.PDF](http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/2633834_6115_ENG_A_W.PDF).

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

Πίνακας Π.1: Μετρήσεις αντίστασης γείωσης( $\Omega$ ), ειδικής αντίστασης εδάφους( $\Omega m$ ), υγρασίας αέρα (%) και θερμοκρασίας ( $^{\circ}C$ ) για το χρονικό διάστημα από 17/02/11 μέχρι 28/02/13

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα $^{\circ}C$
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
17/02/2011	178.2	40.1	39.1	64.6	37.3	75.0	177.31	139.49	122.15	141.45	163.06	67.6	16.8
18/02/2011	176.0	39.3	39.1	64.1	36.5	62.3	175.55	138.73	122.15	141.45	162.46	68.2	17.0
21/02/2011	156.6	36.9	36.4	59.8	34.7	58.3	170.65	134.96	120.64	141.30	161.25	65.8	15.2
22/02/2011	154.3	35.4	36.0	58.4	34.2	57.1	167.38	133.71	120.64	141.15	160.85	63.7	14.6
28/02/2011	134.7	34.2	31.7	56.6	33.1	54.7	165.12	129.43	117.12	138.28	157.23	60.7	10.1
01/03/2011	135.4	34.7	31.9	57.2	33.4	55.6	167.13	130.44	117.12	137.98	157.23	65.5	9.0
03/03/2011	131.3	34.0	31.4	55.7	33.3	55.4	165.37	129.18	116.62	137.22	156.23	66.5	12.8
04/03/2011	132.0	34.1	31.6	56.3	33.3	54.2	165.25	129.43	116.62	137.22	156.43	60.8	11.1
08/03/2011	130.4	35.0	31.3	55.8	33.4	53.9	168.77	130.19	118.12	136.92	155.42	19.0	2.5
10/03/2011	136.3	36.3	31.7	57.6	34.5	55.8	171.41	128.43	115.11	136.77	156.23	27.9	11.2
11/03/2011	135.9	36.1	31.9	57.5	34.6	56.5	170.15	129.68	115.61	136.32	156.02	25.5	19.0
13/03/2011	138.6	36.3	32.1	57.6	35.1	57.5	169.52	142.50	116.11	136.32	156.23	29.6	21.8
15/03/2011	136.9	35.8	31.8	57.5	34.7	57.0	167.01	129.94	116.11	136.47	156.23	55.0	20.7
17/03/2011	137.0	36.1	31.9	57.5	34.8	57.1	167.13	129.94	115.61	136.32	156.43	85.4	13.6
18/03/2011	137.4	36.1	32.0	57.6	34.7	56.9	167.38	129.68	115.61	136.47	156.43	77.8	16.5
21/03/2011	138.7	37.5	32.2	57.3	33.5	58.1	170.15	129.68	115.61	136.92	158.03	71.8	9.1
22/03/2011	141.9	38.2	32.6	57.9	35.2	58.3	173.29	130.69	115.61	136.77	158.64	43.4	11.8
23/03/2011	142.3	38.5	32.7	58.6	35.6	58.9	176.18	131.44	115.61	136.92	159.04	40.8	13.4
24/03/2011	142.4	38.6	32.8	58.8	35.7	59.2	177.31	132.20	113.60	134.81	159.24	47.2	17.2
28/03/2011	146.6	38.6	33.4	57.8	35.9	60.1	176.05	132.95	115.61	137.38	160.65	53.8	19.3
29/03/2011	143.5	38.4	33.3	57.4	35.6	60.0	174.92	132.70	116.11	137.38	161.05	61.7	19.1
30/03/2011	144.3	38.5	33.2	57.6	35.7	60.0	175.43	128.93	115.61	137.38	161.45	53.0	21.5
01/04/2011	109.6	34.0	32.0	51.2	33.2	57.3	170.15	143.26	115.11	135.26	158.24	72.2	17.7
04/04/2011	119.5	36.2	31.2	53.4	33.5	57.0	170.53	128.93	113.60	134.81	159.44	45.5	18.3

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
05/04/2011	121.9	36.7	31.4	54.1	34.0	58.2	170.02	129.18	114.61	136.92	159.64	55.7	20.2
06/04/2011	121.7	36.7	31.6	53.9	33.7	57.9	168.64	132.70	114.61	136.92	169.70	67.2	18.3
07/04/2011	125.2	37.3	32.0	54.4	33.7	57.6	170.27	129.68	114.10	137.07	160.45	58.5	15.2
08/04/2011	128.1	37.6	32.0	54.8	34.0	57.8	171.41	129.94	114.10	137.07	160.85	47.6	19.8
13/04/2011	132.5	38.5	32.1	54.1	37.5	58.6	172.54	130.94	114.10	137.68	164.07	52.8	21.2
14/04/2011	134.10	38.7	32.4	53.6	33.8	58.6	171.41	130.94	114.10	137.68	164.67	48.3	19.3
15/04/2011	133.0	38.7	32.1	54.0	33.7	59.0	173.04	131.70	114.10	137.98	165.47	56.6	16.3
18/04/2011	109.2	37.9	30.9	51.3	32.6	58.5	176.93	132.70	114.10	137.22	163.87	62.2	12.8
19/04/2011	92.4	38.1	30.9	51.3	32.7	58.5	178.69	133.45	114.10	137.22	163.87	58.3	12.4
20/04/2011	93.6	38.1	31.1	51.4	32.7	58.6	179.82	133.96	114.10	137.22	163.97	52.4	14.4
29/04/2011	106.5	36.8	29.1	51.9	31.1	55.9	164.37	128.93	113.10	137.07	162.26	44.1	19.8
02/05/2011	112.5	38.2	29.9	51.8	31.2	55.6	164.87	127.93	112.59	137.53	162.86	60.2	21.7
03/05/2011	112.3	37.5	29.7	51.0	30.1	55.0	161.85	127.67	112.09	136.62	163.26	49.1	24.6
04/05/2011	109.5	38.1	30.0	51.4	31.0	54.9	163.36	127.17	112.59	137.83	164.07	61.8	20.5
06/05/2011	110.5	38.6	30.3	50.7	34.5	55.3	165.62	127.17	113.10	138.13	164.67	67.5	14.3
09/05/2011	114.9	42.4	29.8	51.8	31.3	56.6	167.89	128.18	112.59	138.13	167.48	51.3	19.2
10/05/2011	115.4	40.6	30.0	51.9	31.1	56.3	168.01	129.94	112.59	138.28	168.49	49.1	19.3
11/05/2011	115.9	40.0	30.2	52.2	31.2	56.2	169.27	130.44	112.59	137.83	169.70	34.4	19.2
12/05/2011	118.00	40.5	30.2	52.6	31.3	56.4	170.15	130.94	112.59	138.43	170.10	58.2	17.4
13/05/2011	120.0	41.4	30.6	53.0	31.6	57.1	172.79	131.44	112.59	138.58	171.30	51.2	21.3
16/05/2011	121.4	41.8	30.8	52.1	31.3	58.1	174.30	131.95	112.59	138.88	174.02	41.6	25.4
17/05/2011	122.3	42.0	30.8	52.3	31.4	58.4	170.53	132.45	112.59	139.19	175.12	60.1	23.0
18/05/2011	117.8	42.1	30.4	51.5	30.9	57.7	168.39	132.70	116.11	142.50	178.95	73.1	23.9
19/05/2011	120.1	41.9	30.6	51.4	31.1	58.0	170.78	132.45	114.61	140.99	179.95	63.1	19.1
20/05/2011	121.1	43.8	30.7	52.4	31.4	58.9	173.54	133.71	116.62	141.75	186.99	61.3	21.2

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
23/05/2011	121.6	44.9	32.0	52.4	31.1	59.6	173.54	134.96	116.62	141.75	190.00	44.0	26.0
24/05/2011	121.4	46.7	32.1	51.9	31.0	59.8	172.54	135.97	117.62	142.50	194.02	39.0	29.2
25/05/2011	122.2	45.3	32.3	52.1	30.9	60.0	172.79	135.72	117.12	142.50	195.03	54.3	26.4
27/05/2011	101.6	41.3	32.0	48.8	29.7	60.6	174.04	136.47	116.11	140.84	177.94	60.5	24.7
30/05/2011	106.4	43.0	32.6	49.6	30.3	62.4	177.44	137.73	114.61	140.54	179.55	56.1	25.3
31/05/2011	110.2	43.7	32.8	50.5	30.5	63.2	177.56	137.73	114.61	140.69	180.75	55.1	24.6
01/06/2011	115.4	44.3	32.6	51.1	30.6	63.9	178.07	137.98	114.61	140.84	181.16	55.3	27.9
02/06/2011	113.5	45.0	32.8	51.7	30.5	64.4	176.93	139.49	115.11	140.69	181.76	55.2	27.4
03/06/2011	115.3	45.6	33.0	52.1	30.7	64.9	178.32	139.49	114.61	140.54	182.56	59.7	28.2
06/06/2011	118.50	47.8	34.2	52.6	30.7	66.4	167.64	140.99	114.61	141.15	185.18	48.7	27.2
07/06/2011	119.3	48.3	34.4	53.1	30.7	67.0	180.20	141.25	114.61	141.15	184.78	47.6	28.3
08/06/2011	120.5	49.0	34.6	53.3	30.6	67.6	180.45	141.50	114.10	141.45	185.98	51.8	27.1
09/06/2011	120.9	49.2	34.7	53.5	30.6	67.8	180.45	141.75	114.10	141.67	186.08	49.1	29.2
15/06/2011	94.3	40.8	29.2	46.5	25.9	66.7	176.18	134.96	113.10	139.19	171.71	59.8	25.8
16/06/2011	96.7	41.3	29.8	46.9	26.2	67.5	176.56	135.97	112.59	139.34	172.71	54.2	27.4
17/06/2011	98.3	41.6	30.2	47.3	26.5	67.8	176.81	136.72	113.10	139.64	172.91	51.5	28.6
20/06/2011	102.2	43.1	32.2	51.2	26.8	70.4	178.69	137.73	113.10	140.47	179.05	49.1	28.9
21/06/2011	104.6	43.6	32.4	51.7	26.9	70.9	179.07	138.23	112.59	140.84	179.55	50.3	28.3
22/06/2011	106.0	45.1	32.6	52.2	27.1	71.6	179.70	138.98	113.10	141.07	180.15	47.4	26.3
23/06/2011	107.4	47.2	33.2	52.9	27.4	72.3	180.45	139.99	113.60	141.45	183.57	36.8	28.2
24/06/2011	109.2	48.4	34.0	52.2	27.5	73.8	180.70	140.49	113.60	141.75	184.17	34.4	30.2
27/06/2011	112.3	51.7	36.4	56.8	27.7	76.5	184.85	143.01	114.10	142.65	188.19	48.1	24.8
30/06/2011	118.5	55.8	37.9	64.1	28.6	81.3	191.13	145.27	114.10	143.11	190.20	55.8	26.2
01/07/2011	119.8	56.0	38.8	66.2	28.8	82.2	191.51	145.77	114.10	143.48	190.81	46.4	27.2
04/07/2011	123.7	61.0	41.9	71.9	29.1	84.9	193.15	147.78	114.61	144.01	193.02	50.6	28.4

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
05/07/2011	125.3	62.1	42.6	74.5	29.0	86.2	195.28	148.79	114.61	144.31	193.62	46.8	26.7
08/07/2011	130.1	66.3	45.6	81.7	29.2	90.3	198.93	151.30	115.11	144.76	193.82	41.9	29.1
11/07/2011	138.6	70.5	48.8	87.3	29.4	95.2	201.69	153.81	116.11	145.37	199.05	40.0	31.6
12/07/2011	141.4	71.9	49.8	89.6	29.5	97.8	203.20	154.82	116.11	145.22	197.84	48.6	30.1
15/07/2011	148.3	76.5	53.6	96.0	29.8	108.7	207.97	158.08	116.62	145.82	197.64	43.7	30.8
19/07/2011	157.7	82.1	57.8	102.4	30.3	126.7	212.87	160.85	117.12	146.27	200.86	47.2	27.9
20/07/2011	160.7	83.2	58.6	104.1	30.4	136.1	213.88	161.85	117.12	145.82	198.05	46.4	30.3
22/07/2011	169.1	85.6	61.3	106.5	30.9	171.2	217.15	164.12	117.12	145.97	199.05	43.4	29.9
25/07/2011	177.2	88.5	64.9	109.6	31.7	210.0	219.41	165.62	117.62	146.20	203.07	41.9	30.4
26/07/2011	183.7	89.8	66.6	111.0	31.7	233.0	222.05	166.63	117.62	146.42	201.06	42.2	29.7
29/07/2011	195.6	93.2	70.4	114.7	32.0	288.0	229.71	168.89	117.62	146.72	205.08	41.2	30.8
01/08/2011	206.3	95.4	76.1	117.3	33.1	312.0	229.84	169.65	118.12	146.65	205.28	52.0	27.8
03/08/2011	214.2	97.1	80.4	119.8	34.3	326.1	230.09	170.65	118.12	146.72	205.49	55.2	26.6
05/08/2011	223.6	97.6	85.0	121.6	34.9	340.0	235.24	171.91	118.12	146.57	205.28	45.2	27.7
08/08/2011	247.4	98.3	92.3	123.2	36.2	372.4	240.27	175.18	118.12	146.50	204.88	46.0	27.5
10/08/2011	263.9	98.9	97.6	124.9	37.0	388.0	244.54	182.46	119.13	146.80	204.28	47.6	29.3
12/08/2011	275.1	99.8	101.8	126.4	38.8	396.5	247.05	186.48	119.13	146.72	203.58	48.3	24.9
17/08/2011	317.2	111.6	118.4	130.7	45.6	441.0	267.41	190.00	119.13	146.12	202.07	43.5	27.7
19/08/2011	326.8	112.2	121.3	131.3	46.2	449.4	268.92	191.26	119.63	145.52	209.10	35.4	29.9
22/08/2011	332.0	112.7	125.5	133.1	46.9	458.0	270.68	193.02	119.63	144.76	202.07	38.8	28.5
24/08/2011	337.3	112.7	127.2	133.6	47.3	463.8	271.43	193.27	120.13	144.61	196.64	33.4	28.3
26/08/2011	339.5	112.8	127.9	133.9	47.7	471.2	273.57	193.77	120.13	144.16	185.18	37.6	29.1
29/08/2011	343.0	113.0	129.4	134.6	48.1	477.0	275.20	194.02	120.13	143.11	171.71	49.2	24.9
02/09/2011	355.0	117.1	140.5	138.6	55.2	486.0	276.46	189.25	119.63	142.50	169.50	50.3	27.1
05/09/2011	360.0	118.2	148.6	140.0	63.5	488.0	289.03	198.55	119.63	143.26	169.09	39.2	26.4

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
07/09/2011	372.0	118.7	153.6	140.8	68.6	486.0	290.28	200.31	120.13	142.35	168.29	42.5	26.3
09/09/2011	379.0	120.3	157.4	142.2	61.1	495.0	294.05	203.07	120.64	143.11	171.10	53.8	24.9
14/09/2011	384.0	123.4	173.7	144.8	101.0	493.0	302.85	207.09	120.64	141.60	166.88	36.4	25.7
16/09/2011	390.0	124.5	187.1	146.4	112.8	499.0	306.62	208.60	120.64	142.80	167.69	35.3	25.9
19/09/2011	398.0	126.2	190.3	147.4	93.5	502.0	309.13	212.87	121.64	143.86	173.32	34.8	27.1
22/09/2011	393.0	128.0	192.9	150.2	137.2	491	319.19	215.39	124.66	144.92	176.13	62.4	22.3
17/10/2011	212.0	104.3	171.0	116.9	93.0	354.0	327.98	234.49	138.73	142.35	182.77	80.6	11.2
19/10/2011	238.0	107.3	180.8	123.6	183.5	377.0	336.78	243.91	138.23	143.48	183.57	65.1	9.7
21/10/2011	253.0	111.1	185.5	130.5	189.5	422.0	346.83	253.34	137.22	144.31	185.28	70.6	12.9
24/10/2011	236.0	113.8	193.6	137.4	205.0	413.0	344.32	255.85	138.73	145.14	186.99	64.3	15.3
27/10/2011	294.0	118.3	198.5	146.0	213.4	420.0	359.40	261.88	139.24	145.97	184.98	59.9	15.2
31/10/2011	320.0	126.9	203.0	155.6	224.0	478.0	370.71	266.66	139.74	146.80	180.96	61.0	12.9
04/11/2011	350.00	132.8	214.0	165.2	175.3	342.0	383.27	271.43	116.62	143.86	166.88	65.2	11.7
07/11/2011	340.0	136.7	223.0	170.6	252.0	523.0	392.07	272.94	129.68	149.59	180.75	76.8	10.7
10/11/2011	382.0	113.5	224.0	172.2	260.0	525.0	389.56	276.46	142.75	155.32	194.63	84.7	11.8
16/11/2011	416.0	147.8	233.0	182.7	265.0	368.0	378.88	280.48	142.75	144.01	196.04	69.7	8.6
18/11/2011	428.0	149.3	237.2	185.1	267.0	375.0	368.19	281.99	143.26	145.52	196.64	70.3	7.8
22/11/2011	441.0	153.6	242.0	188.4	271.0	397.0	409.66	288.52	144.26	147.78	198.15	76.2	7.6
25/11/2011	459.0	155.4	249.0	192.0	272.3	416.0	397.10	289.03	144.26	148.53	199.86	65.5	10.9
29/11/2011	478.0	160.0	254.6	198.8	275.0	464.0	427.88	292.04	145.77	160.60	204.08	76.3	6.8
05/12/2011	477.0	164.2	260.0	205.0	252.0	511.0	458.67	293.42	148.28	183.22	200.46	51.0	10.7
08/12/2011	475.0	166.3	269.0	207.0	254.0	580.0	442.34	294.81	151.30	156.07	201.06	27.0	12.5
12/12/2011	460.0	163.2	271.0	208.0	235.0	590.0	449.88	314.16	154.32	154.57	201.06	57.0	11.5
15/12/2011	461.0	161.4	268.0	205.0	231.0	587.0	447.36	306.62	150.80	153.06	202.07	79.2	11.1
20/12/2011	222.0	110.0	128.0	120.0	125.0	430.0	373.22	286.51	161.85	162.86	197.84	87.9	12.6



Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
22/12/2011	174.0	77.3	84.0	102.6	98.0	363.0	325.47	276.46	148.79	162.11	195.23	67.2	10.1
03/01/2012	220.0	82.0	72.2	102.2	71.5	341.0	273.95	229.71	149.29	162.86	185.68	68.4	6.1
05/01/2012	184.0	82.5	73.3	104.5	65.0	356.0	271.43	228.96	148.79	165.88	184.57	87.6	6.8
16/01/2012	171.0	82.5	65.2	97.8	50.2	136.8	248.94	215.89	149.79	168.89	186.18	75.8	3.9
19/01/2012	184.2	85.8	67.8	104.0	51.3	147.3	255.10	219.16	150.80	169.65	186.38	69.2	1.4
20/01/2012	184.9	86.1	67.9	104.4	51.7	147.8	252.58	218.40	150.80	169.87	186.59	65.0	3.0
23/01/2012	188.2	84.3	67.3	105.4	52.0	143.0	246.93	217.65	152.30	170.40	186.99	42.0	6.3
26/01/2012	180.5	80.6	63.2	99.5	50.5	130.0	231.22	210.36	151.80	170.40	187.39	47.4	9.1
28/01/2012	178.3	80.2	63.5	101.6	50.5	133.0	228.71	209.61	151.30	169.65	187.29	52.0	4.0
31/01/2012	173.5	86.2	65.6	106.5	50.7	138.0	238.89	212.87	151.30	171.91	189.40	65.6	2.5
03/02/2012	170.1	85.2	64.8	105.3	58.4	135.5	237.50	212.37	150.80	171.98	189.30	84.4	5.6
05/02/2012	169.6	84.7	64.5	104.9	58.0	134.8	239.01	212.12	151.30	172.06	189.40	73.3	12.6
09/02/2012	143.0	77.1	46.8	90.0	42.5	105.0	194.53	181.71	142.75	165.88	178.74	52.0	3.9
13/02/2012	138.2	75.0	44.5	88.0	40.6	102.3	186.86	176.93	133.20	163.61	175.93	89.6	9.3
15/02/2012	136.0	73.5	44.1	87.3	39.4	100.8	191.89	178.95	136.22	164.37	177.94	79.2	7.1
20/02/2012	-	-	46.5	90.5	43.7	109.0	-	-	-	-	-	67.0	6.3
21/02/2012	-	-	46.4	90.3	43.5	109.1	-	-	-	-	-	90.2	7.1
23/02/2012	-	-	45.0	86.3	43.0	105.2	-	-	-	-	-	84.3	9.0
28/02/2012	-	-	45.1	85.7	42.6	103.8	-	-	-	-	-	86.3	7.4
01/03/2012	-	-	44.8	84.2	42.3	100.6	-	-	-	-	-	61.3	4.4
06/03/2012	224.0	74.0	44.2	81.6	41.5	98.6	-	-	-	-	-	93.0	8.7
07/03/2012	225.0	74.4	44.5	83.7	41.8	99.3	184.22	176.68	135.72	163.61	177.94	77.6	9.7
08/03/2012	228.2	75.3	44.8	86.0	42.1	101.4	184.35	175.93	135.21	161.35	175.93	75.9	10.6
13/03/2012	226.7	75.0	44.5	85.8	41.3	101.0	180.33	167.89	135.21	158.34	174.92	77.0	6.1
15/03/2012	231.0	76.5	45.0	88.0	41.6	102.2	178.82	160.85	133.71	153.81	172.91	38.0	8.0

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
19/03/2012	237.0	76.9	45.6	89.1	41.8	102.7	181.96	160.85	133.20	155.32	171.91	78.7	11.7
20/03/2012	237.2	77.0	45.5	89.2	41.7	102.6	182.09	163.87	134.21	154.57	172.51	80.8	11.6
22/03/2012	234.0	76.4	45.2	88.7	41.0	101.9	179.95	162.36	133.71	155.32	172.91	54.3	15.6
27/03/2012	241.0	77.3	46.0	90.4	41.1	103.7	182.34	162.11	133.20	152.30	174.02	52.7	14.2
29/03/2012	249.3	77.8	47.1	93.3	41.0	104.4	183.22	161.60	133.20	152.30	174.92	63.8	11.5
02/04/2012	265.0	78.1	48.2	95.4	40.7	105.5	185.61	161.60	132.70	153.81	181.16	34.0	15.2
03/04/2012	265.5	78.3	48.0	95.2	40.6	105.3	185.35	161.85	132.70	153.81	181.36	66.2	12.5
05/04/2012	264.0	78.2	48.1	94.8	40.4	105.0	182.21	161.60	132.20	154.57	181.46	70.8	16.8
10/04/2012	255.0	77.4	46.8	93.2	40.1	103.4	160.85	156.58	131.70	153.81	181.56	71.6	11.9
23/04/2012	218.0	73.7	50.6	85.3	38.8	109.8	186.99	162.11	131.19	154.57	184.98	34.5	23.0
24/04/2012	225.0	74.5	54.8	87.4	38.8	110.0	187.62	162.11	131.19	154.57	185.78	50.0	24.0
26/04/2012	244.0	76.4	52.1	90.6	38.8	114.5	187.74	163.11	131.70	154.57	187.59	29.9	25.2
30/04/2012	291.0	80.6	54.6	97.8	38.9	119.9	190.63	164.87	132.70	155.32	191.51	30.0	28.8
02/05/2012	320.0	83.0	56.7	102.4	39.0	126.2	242.66	165.88	132.70	156.07	193.42	29.7	33.3
03/05/2012	336.0	84.4	50.9	105.6	39.2	127.8	194.28	166.13	132.70	156.07	194.83	29.5	28.4
04/05/2012	351.0	85.1	58.3	106.6	39.4	132.7	193.77	166.63	133.20	156.07	209.10	38.0	28.0
07/05/2012	389.0	86.3	56.4	108.2	39.9	147.2	195.91	168.64	133.20	156.07	197.44	37.7	29.6
08/05/2012	401.0	89.5	62.1	114.7	40.3	150.4	197.54	168.89	133.20	156.83	207.09	30.8	29.1
10/05/2012	426.0	91.8	64.1	118.9	40.8	159.0	200.56	169.90	133.20	156.83	199.86	53.3	24.0
14/05/2012	483.0	94.5	68.9	124.6	42.2	200.0	205.59	171.91	135.21	156.83	202.07	44.5	29.5
15/05/2012	475.0	96.4	67.7	125.7	42.0	191.9	205.59	173.92	137.73	159.84	204.08	35.0	26.5
21/05/2012	179.6	92.7	65.3	111.3	43.6	165.0	205.96	176.18	136.22	159.09	204.08	45.0	25.1
22/05/2012	184	87.4	72.1	112.9	43.9	161.7	206.59	176.68	137.22	159.84	200.06	46.0	26.0
23/05/2012	199.2	89.7	74.9	116.2	44.8	174.9	120.26	116.87	82.94	128.93	168.89	34.0	26.1
24/05/2012	211.2	91.1	75.4	119.5	45.0	179.3	210.49	177.94	136.72	160.60	266.41	41.0	23.6

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
29/05/2012	245.7	93.4	77.1	123.5	46.9	230.7	217.02	181.96	137.73	161.35	206.09	36.0	25.4
30/05/2012	254.4	95.2	79.0	126.9	47.6	196.3	224.81	191.26	139.24	162.11	209.10	36.0	26.1
31/05/2012	259.7	97.1	84.0	131.0	47.9	222.0	226.45	191.51	140.24	162.11	209.10	42.4	27.2
04/06/2012	266.0	97.7	87.6	131.6	49.6	267.0	227.58	192.52	140.24	162.11	209.10	40.5	28.4
05/06/2012	271.2	99.8	94.5	134.7	51.2	288.2	236.88	210.11	141.25	163.61	211.12	27.0	29.1
07/06/2012	298.0	64.3	59.2	124.6	54.0	407.0	229.34	190.76	137.22	161.35	209.10	31.1	27.0
11/06/2012	302.3	104.5	99.2	122.3	59.1	289.9	237.13	193.02	140.74	162.11	210.11	33.1	31.9
12/06/2012	312.0	105.0	168.9	118.1	79.8	118.3	150.67	125.66	112.59	162.11	211.12	31.6	31.7
14/06/2012	330.0	106.2	115.3	143.7	60.1	443.0	237.38	197.29	138.23	162.11	212.12	30.5	33.2
19/06/2012	350.0	107.6	84.0	146.7	66.6	456.0	248.56	203.32	139.24	162.86	214.13	32.1	32.1
21/06/2012	368.0	63.8	90.5	49.5	69.9	445.0	765.29	1553.20	139.24	162.11	215.14	25.7	30.8
26/06/2012	379.0	64.3	94.2	71.1	72.1	462.0	250.20	212.62	139.74	162.86	216.14	40.6	33.8
28/06/2012	384.0	68.3	158.6	150.6	89.6	484.0	139.36	52.78	140.74	232.98	216.14	43.2	27.4
06/07/2012	391.1	76.5	95.5	125.0	138.8	504.0	282.74	221.42	141.75	265.40	323.71	43.9	28.6
09/07/2012	438.0	116.3	71.7	271.0	276.0	502.0	547.89	223.93	1507.96	809.02	219.16	30.4	29.8
10/07/2012	453.0	116.6	99.2	155.2	125.7	503.0	286.51	223.93	141.75	163.61	103.35	31.0	33.3
11/07/2012	452.0	108.8	99.2	146.8	89.8	507.0	238.64	225.19	140.74	164.37	217.15	39.1	35.6
17/07/2012	492.0	93.2	150.2	101.7	285.0	534.0	292.80	228.46	142.25	153.06	219.16	53.5	30.4
19/07/2012	498.0	118.5	70.9	155.5	290.0	538.0	305.36	233.99	141.25	159.09	219.16	30.9	29.7
25/07/2012	501.0	120.2	112.6	158.5	313.0	546.0	295.31	235.24	143.26	162.11	218.15	42.2	34.5
26/07/2012	503.0	97.4	138.7	162.5	334.0	560.0	307.88	237.00	143.26	163.61	219.16	49.1	31.9
02/08/2012	512.0	123.0	218.0	160.7	172.9	254.0	320.44	241.02	143.26	194.53	220.16	34.8	32.4
10/08/2012	567.0	108.2	224.0	163.2	350.0	594.0	330.50	246.30	143.76	163.61	220.16	32.2	27.3
29/08/2012	676.0	132.2	260.0	173.4	371.6	671.0	370.71	258.87	144.76	164.44	220.16	47.8	27.7
30/08/2012	674.0	133.9	259.0	174.1	376.0	672.0	370.71	261.13	145.77	165.12	220.16	40.4	29.4

Ημερομηνία	Αντίσταση γείωσης εδάφους για καθένα από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )						Ειδική Αντίσταση Εδάφους ( $\Omega m$ )					Υγρασία Αέρα(%)	Θερμοκρασία αέρα °C
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$		
03/09/2012	662.0	116.2	219.2	162.4	337.0	602.0	361.91	258.11	143.76	164.97	219.16	28.4	26.8
06/09/2012	631.0	124.3	211.0	161.3	331.9	604.9	355.63	255.10	143.26	164.59	218.15	39.2	29.4
18/09/2012	329	111.1	228	124.6	75	258.0	368.19	269.93	159.34	171.91	207.09	42.9	27.8
20/09/2012	343	114.4	235	130.4	77.5	271.0	374.48	273.19	154.82	170.40	207.09	53.0	28.3
27/09/2012	368	121.1	246	143.4	85.6	310.0	393.33	276.21	153.31	169.65	216.14	35.0	29.3
11/10/2012	460	137	260	179.2	107.3	397.0	423.49	291.29	153.31	248.06	218.15	42.5	25.2
22/10/2012	491	151	281	193.4	119.9	442.0	456.16	326.47	193.52	267.66	220.16	60.16	17.9
08/11/2012	199.2	80.5	64.9	86.7	77.9	165.0	194.78	181.96	108.07	154.57	200.06	53.54	19.3
22/11/2012	193.6	81.1	71.2	72.1	58.9	150.8	203.58	220.92	113.10	188.50	212.12	50.6	19.8
04/12/2012	224.0	84.0	74.2	81.6	61.5	168.6	214.26	203.32	113.10	169.65	207.09	53.22	13.3
12/12/2012	245.6	94.3	71.7	132.5	61.6	173.9	221.92	204.08	106.56	178.69	192.62	38.3	16.2
20/12/2012	303.2	104.5	99.2	162.3	89.1	229.9	282.74	228.96	140.74	195.28	219.16	58.54	8.4
18/01/2013	140.0	72.9	40.2	107.6	48.5	126.8	380.76	273.70	145.77	164.37	206.09	43.11	11.8
23/01/2013	145.5	75.3	41.1	111.4	53.3	136.9	471.24	292.55	151.80	162.11	211.12	44.12	12.6
29/01/2013	133.9	69.2	35.1	96.9	44.6	76.1	566.74	316.92	143.76	147.48	162.86	35	15.5
08/02/2013	129.2	67.8	35.1	86.4	46.5	70.9	518.99	298.58	141.75	152.30	179.95	55.3	12.3
18/02/2013	134.0	75.9	36.0	91.2	45.5	74.0	596.90	354.87	151.30	154.57	161.15	61.47	6.6
28/02/2013	135.7	81.2	35.3	99.2	46.1	77.3	715.03	779.11	1588.39	1501.93	150.19	48.44	9.7

Πίνακας Π.2: Μετρήσεις ύψους βροχόπτωσης (mm) για το χρονικό διάστημα από 17/02/2011 μέχρι 28/02/2013

Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση
17/02/2011	0.0	10/03/2011	0.0	31/03/2011	13.8	21/04/2011	0.0	12/05/2011	0.0	02/06/2011	0.0	23/06/2011	0.0
18/02/2011	7.4	11/03/2011	0.0	01/04/2011	4.8	22/04/2011	0.0	13/05/2011	0.0	03/06/2011	0.0	24/06/2011	0.0
19/02/2011	7.2	12/03/2011	0.0	02/04/2011	2.0	23/04/2011	0.0	14/05/2011	0.0	04/06/2011	1.0	25/06/2011	0.0
20/02/2011	0.8	13/03/2011	0.0	03/04/2011	0.0	24/04/2011	0.0	15/05/2011	0.0	05/06/2011	0.2	26/06/2011	0.0
21/02/2011	1.4	14/03/2011	17.6	04/04/2011	0.0	25/04/2011	0.0	16/05/2011	0.0	06/06/2011	0.0	27/06/2011	0.0
22/02/2011	5.8	15/03/2011	0.0	05/04/2011	0.2	26/04/2011	12.2	17/05/2011	0.0	07/06/2011	0.0	28/06/2011	0.0
23/02/2011	0.0	16/03/2011	0.4	06/04/2011	0.0	27/04/2011	19.0	18/05/2011	0.6	08/06/2011	0.0	29/06/2011	0.0
24/02/2011	18.2	17/03/2011	1.0	07/04/2011	0.0	28/04/2011	0.0	19/05/2011	1.6	09/06/2011	0.0	30/06/2011	0.0
25/02/2011	8.2	18/03/2011	0.0	08/04/2011	0.0	29/04/2011	0.0	20/05/2011	0.0	10/06/2011	0.0	01/07/2011	0.0
26/02/2011	0.0	19/03/2011	0.2	09/04/2011	0.0	30/04/2011	0.0	21/05/2011	0.0	11/06/2011	0.0	02/07/2011	0.0
27/02/2011	0.0	20/03/2011	1.0	10/04/2011	0.0	01/05/2011	0.4	22/05/2011	0.0	12/06/2011	44.2	03/07/2011	0.0
28/02/2011	0.0	21/03/2011	3.4	11/04/2011	0.0	02/05/2011	0.0	23/05/2011	0.0	13/06/2011	0.0	04/07/2011	0.0
01/03/2011	0.0	22/03/2011	0.0	12/04/2011	0.0	03/05/2011	1.4	24/05/2011	0.0	14/06/2011	7.8	05/07/2011	0.0
02/03/2011	9.6	23/03/2011	0.0	13/04/2011	0.0	04/05/2011	0.2	25/05/2011	0.6	15/06/2011	0.2	06/07/2011	0.0
03/03/2011	0.0	24/03/2011	0.0	14/04/2011	0.0	05/05/2011	5.4	26/05/2011	7.6	16/06/2011	0.4	07/07/2011	0.0
04/03/2011	0.0	25/03/2011	0.0	15/04/2011	0.0	06/05/2011	0.2	27/05/2011	9.2	17/06/2011	0.0	08/07/2011	0.0
05/03/2011	0.0	26/03/2011	0.0	16/04/2011	2.8	07/05/2011	0.0	28/05/2011	0.0	18/06/2011	0.0	09/07/2011	0.0
06/03/2011	2.2	27/03/2011	0.0	17/04/2011	14.8	08/05/2011	0.0	29/05/2011	0.0	19/06/2011	0.0	10/07/2011	0.0
07/03/2011	9.0	28/03/2011	0.2	18/04/2011	0.2	09/05/2011	0.0	30/05/2011	0.0	20/06/2011	0.0	11/07/2011	0.0
08/03/2011	6.4	29/03/2011	0.2	19/04/2011	0.0	10/05/2011	0.0	31/05/2011	0.4	21/06/2011	0.0	12/07/2011	0.0
09/03/2011	1.4	30/03/2011	0.0	20/04/2011	0.0	11/05/2011	0.0	01/06/2011	1.0	22/06/2011	0.0	13/07/2011	0.0

Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση
14/07/2011	0.0	04/08/2011	0.0	25/08/2011	0.0	15/09/2011	0.0	06/10/2011	0.0	27/10/2011	0.0	17/11/2011	0.0
15/07/2011	0.0	05/08/2011	0.0	26/08/2011	0.0	16/09/2011	0.0	07/10/2011	0.0	28/10/2011	0.0	18/11/2011	0.0
16/07/2011	0.0	06/08/2011	0.0	27/08/2011	0.0	17/09/2011	0.0	08/10/2011	0.4	29/10/2011	0.0	19/11/2011	0.2
17/07/2011	0.0	07/08/2011	0.0	28/08/2011	0.0	18/09/2011	0.0	09/10/2011	1.8	30/10/2011	0.0	20/11/2011	0.0
18/07/2011	0.0	08/08/2011	0.0	29/08/2011	0.0	19/09/2011	0.0	10/10/2011	24.6	31/10/2011	0.0	21/11/2011	0.2
19/07/2011	0.0	09/08/2011	0.0	30/08/2011	0.0	20/09/2011	0.0	11/10/2011	1.4	01/11/2011	0.0	22/11/2011	0.0
20/07/2011	0.0	10/08/2011	0.0	31/08/2011	0.0	21/09/2011	0.0	12/10/2011	0.0	02/11/2011	0.0	23/11/2011	0.0
21/07/2011	0.0	11/08/2011	0.0	01/09/2011	0.0	22/09/2011	0.0	13/10/2011	0.0	03/11/2011	0.0	24/11/2011	0.0
22/07/2011	0.0	12/08/2011	0.0	02/09/2011	0.0	23/09/2011	0.0	14/10/2011	0.2	04/11/2011	16.8	25/11/2011	0.0
23/07/2011	0.0	13/08/2011	0.0	03/09/2011	0.0	24/09/2011	0.0	15/10/2011	1.4	05/11/2011	0.0	26/11/2011	0.0
24/07/2011	0.0	14/08/2011	0.0	04/09/2011	0.0	25/09/2011	0.0	16/10/2011	5.8	06/11/2011	0.0	27/11/2011	0.0
25/07/2011	0.0	15/08/2011	0.0	05/09/2011	0.0	26/09/2011	0.0	17/10/2011	0.0	07/11/2011	0.0	28/11/2011	0.0
26/07/2011	0.0	16/08/2011	0.0	06/09/2011	0.0	27/09/2011	0.0	18/10/2011	0.0	08/11/2011	0.0	29/11/2011	0.2
27/07/2011	0.0	17/08/2011	0.0	07/09/2011	0.0	28/09/2011	0.0	19/10/2011	0.2	09/11/2011	0.0	30/11/2011	0.0
28/07/2011	0.0	18/08/2011	0.0	08/09/2011	0.0	29/09/2011	0.0	20/10/2011	0.0	10/11/2011	0.0	01/12/2011	0.0
29/07/2011	0.0	19/08/2011	0.0	09/09/2011	0.0	30/09/2011	0.0	21/10/2011	0.2	11/11/2011	0.0	02/12/2011	0.2
30/07/2011	0.0	20/08/2011	0.0	10/09/2011	0.0	01/10/2011	0.0	22/10/2011	0.2	12/11/2011	0.0	03/12/2011	0.0
31/07/2011	0.0	21/08/2011	0.0	11/09/2011	0.0	02/10/2011	0.0	23/10/2011	0.0	13/11/2011	0.4	04/12/2011	0.2
01/08/2011	0.0	22/08/2011	0.0	12/09/2011	0.0	03/10/2011	0.0	24/10/2011	0.0	14/11/2011	0.4	05/12/2011	0.0
02/08/2011	1.4	23/08/2011	0.0	13/09/2011	0.0	04/10/2011	0.0	25/10/2011	0.0	15/11/2011	1.2	06/12/2011	0.0
03/08/2011	0.0	24/08/2011	0.0	14/09/2011	0.0	05/10/2011	0.0	26/10/2011	0.0	16/11/2011	0.0	07/12/2011	0.8

Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση
08/12/2011	0.0	29/12/2011	0.0	19/01/2012	0.2	09/02/2012	0.0	01/03/2012	0.2	22/03/2012	0.0	12/04/2012	0.0
09/12/2011	0.0	30/12/2011	0.2	20/01/2012	0.0	10/02/2012	0.0	02/03/2012	0.0	23/03/2012	0.0	13/04/2012	0.0
10/12/2011	0.0	31/12/2011	0.0	21/01/2012	0.8	11/02/2012	4.2	03/03/2012	0.0	24/03/2012	0.0	14/04/2012	0.0
11/12/2011	0.0	01/01/2012	0.0	22/01/2012	0.0	12/02/2012	13.4	04/03/2012	0.0	25/03/2012	0.0	15/04/2012	0.0
12/12/2011	0.0	02/01/2012	0.0	23/01/2012	0.0	13/02/2012	0.8	05/03/2012	11.2	26/03/2012	0.0	16/04/2012	0.0
13/12/2011	0.2	03/01/2012	0.2	24/01/2012	8.2	14/02/2012	1.8	06/03/2012	0.0	27/03/2012	0.0	17/04/2012	0.0
14/12/2011	0.0	04/01/2012	0.0	25/01/2012	2.8	15/02/2012	1.0	07/03/2012	0.0	28/03/2012	0.0	18/04/2012	4.0
15/12/2011	0.2	05/01/2012	0.0	26/01/2012	4.0	16/02/2012	3.0	08/03/2012	0.0	29/03/2012	0.0	19/04/2012	0.0
16/12/2011	2.8	06/01/2012	4.2	27/01/2012	0.4	17/02/2012	0.0	09/03/2012	0.0	30/03/2012	0.0	20/04/2012	0.0
17/12/2011	0.4	07/01/2012	0.0	28/01/2012	0.2	18/02/2012	0.0	10/03/2012	0.0	31/03/2012	0.0	21/04/2012	0.0
18/12/2011	0.2	08/01/2012	1.0	29/01/2012	0.0	19/02/2012	0.0	11/03/2012	1.6	01/04/2012	0.0	22/04/2012	0.0
19/12/2011	30.0	09/01/2012	0.2	30/01/2012	0.0	20/02/2012	0.8	12/03/2012	0.4	02/04/2012	0.0	23/04/2012	0.0
20/12/2011	0.2	10/01/2012	1.4	31/01/2012	0.0	21/02/2012	0.0	13/03/2012	0.2	03/04/2012	1.0	24/04/2012	0.0
21/12/2011	21.0	11/01/2012	13.8	01/02/2012	0.2	22/02/2012	12.0	14/03/2012	0.0	04/04/2012	0.6	25/04/2012	0.0
22/12/2011	37.4	12/01/2012	0.0	02/02/2012	1.6	23/02/2012	0.6	15/03/2012	0.0	05/04/2012	1.2	26/04/2012	0.0
23/12/2011	13.2	13/01/2012	0.2	03/02/2012	0.4	24/02/2012	0.0	16/03/2012	0.0	06/04/2012	0.0	27/04/2012	0.0
24/12/2011	0.0	14/01/2012	1.2	04/02/2012	0.8	25/02/2012	0.0	17/03/2012	0.0	07/04/2012	0.0	28/04/2012	0.0
25/12/2011	0.0	15/01/2012	4.4	05/02/2012	0.0	26/02/2012	0.0	18/03/2012	0.0	08/04/2012	0.0	29/04/2012	0.0
26/12/2011	0.2	16/01/2012	0.0	06/02/2012	58.6	27/02/2012	2.6	19/03/2012	0.2	09/04/2012	8.4	30/04/2012	0.0
27/12/2011	0.0	17/01/2012	0.0	07/02/2012	14.0	28/02/2012	4.4	20/03/2012	0.0	10/04/2012	0.0	01/05/2012	0.0
28/12/2011	0.0	18/01/2012	0.0	08/02/2012	0.8	29/02/2012	2.6	21/03/2012	3.0	11/04/2012	0.0	02/05/2012	0.0

Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση
03/05/2012	0.0	24/05/2012	0.0	14/06/2012	0.0	05/07/2012	0.0	26/07/2012	0.0	16/08/2012	0.0	06/09/2012	0.0
04/05/2012	0.0	25/05/2012	0.0	15/06/2012	0.0	06/07/2012	0.4	27/07/2012	0.0	17/08/2012	0.0	07/09/2012	0.0
05/05/2012	0.0	26/05/2012	0.0	16/06/2012	0.0	07/07/2012	0.0	28/07/2012	0.0	18/08/2012	0.0	08/09/2012	0.0
06/05/2012	0.0	27/05/2012	0.0	17/06/2012	0.0	08/07/2012	0.0	29/07/2012	0.0	19/08/2012	0.0	09/09/2012	0.0
07/05/2012	0.0	28/05/2012	0.0	18/06/2012	0.0	09/07/2012	0.0	30/07/2012	0.0	20/08/2012	0.0	10/09/2012	0.0
08/05/2012	0.0	29/05/2012	0.0	19/06/2012	0.0	10/07/2012	0.0	31/07/2012	0.0	21/08/2012	0.0	11/09/2012	0.0
09/05/2012	0.0	30/05/2012	0.0	20/06/2012	0.0	11/07/2012	0.0	01/08/2012	0.0	22/08/2012	0.0	12/09/2012	0.0
10/05/2012	0.0	31/05/2012	0.0	21/06/2012	0.0	12/07/2012	0.2	02/08/2012	0.0	23/08/2012	0.0	13/09/2012	0.0
11/05/2012	0.0	01/06/2012	0.2	22/06/2012	0.0	13/07/2012	0.0	03/08/2012	0.0	24/08/2012	0.2	14/09/2012	0.0
12/05/2012	0.0	02/06/2012	0.2	23/06/2012	0.0	14/07/2012	0.0	04/08/2012	0.0	25/08/2012	0.0	15/09/2012	0.0
13/05/2012	0.2	03/06/2012	0.2	24/06/2012	0.0	15/07/2012	0.0	05/08/2012	0.0	26/08/2012	0.0	16/09/2012	1.2
14/05/2012	0.0	04/06/2012	0.0	25/06/2012	0.0	16/07/2012	0.0	06/08/2012	0.0	27/08/2012	0.0	17/09/2012	0.0
15/05/2012	0.0	05/06/2012	0.0	26/06/2012	0.0	17/07/2012	0.0	07/08/2012	0.0	28/08/2012	0.0	18/09/2012	0.0
16/05/2012	0.0	06/06/2012	0.0	27/06/2012	0.0	18/07/2012	0.2	08/08/2012	0.0	29/08/2012	0.0	19/09/2012	0.0
17/05/2012	4.0	07/06/2012	0.0	28/06/2012	0.0	19/07/2012	0.0	09/08/2012	0.0	30/08/2012	0.0	20/09/2012	0.0
18/05/2012	21.0	08/06/2012	0.2	29/06/2012	0.0	20/07/2012	0.0	10/08/2012	0.0	31/08/2012	0.0	21/09/2012	0.0
19/05/2012	0.2	09/06/2012	0.0	30/06/2012	0.0	21/07/2012	0.0	11/08/2012	0.4	01/09/2012	0.0	22/09/2012	0.0
20/05/2012	0.0	10/06/2012	0.0	01/07/2012	0.0	22/07/2012	0.0	12/08/2012	0.0	02/09/2012	0.0	23/09/2012	0.0
21/05/2012	0.0	11/06/2012	0.0	02/07/2012	0.0	23/07/2012	0.2	13/08/2012	0.0	03/09/2012	0.0	24/09/2012	0.0
22/05/2012	0.0	12/06/2012	0.0	03/07/2012	0.0	24/07/2012	0.0	14/08/2012	0.0	04/09/2012	0.0	25/09/2012	0.0
23/05/2012	0.0	13/06/2012	0.0	04/07/2012	0.0	25/07/2012	0.0	15/08/2012	0.0	05/09/2012	0.0	26/09/2012	0.0



Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση	Ημερομηνία	Βροχόπτωση
27/09/2012	0.0	20/10/2012	0.0	12/11/2012	0.0	05/12/2012	0.0	28/12/2012	0.0	20/01/2013	0.0	12/02/2013	0.0
28/09/2012	0.0	21/10/2012	0.0	13/11/2012	0.0	06/12/2012	1.4	29/12/2012	0.0	21/01/2013	0.0	13/02/2013	0.0
29/09/2012	0.0	22/10/2012	0.0	14/11/2012	0.0	07/12/2012	0.6	30/12/2012	29.8	22/01/2013	0.0	14/02/2013	34.0
30/09/2012	0.0	23/10/2012	3.2	15/11/2012	0.0	08/12/2012	0.0	31/12/2012	50.4	23/01/2013	0.0	15/02/2013	14.4
01/10/2012	0.0	24/10/2012	7.4	16/11/2012	0.0	09/12/2012	3.6	01/01/2013	2.8	24/01/2013	0.0	16/02/2013	7.8
02/10/2012	0.0	25/10/2012	3.6	17/11/2012	0.0	10/12/2012	16.4	02/01/2013	0.0	25/01/2013	10.6	17/02/2013	4.8
03/10/2012	0.0	26/10/2012	0.0	18/11/2012	0.0	11/12/2012	0.2	03/01/2013	0.2	26/01/2013	20.2	18/02/2013	12.4
04/10/2012	0.0	27/10/2012	0.0	19/11/2012	0.0	12/12/2012	0.0	04/01/2013	0.2	27/01/2013	11.8	19/02/2013	0.2
05/10/2012	0.0	28/10/2012	0.2	20/11/2012	1.6	13/12/2012	0.0	05/01/2013	0.0	28/01/2013	0.0	20/02/2013	4.2
06/10/2012	0.0	29/10/2012	0.0	21/11/2012	17.4	14/12/2012	0.0	06/01/2013	0.0	29/01/2013	0.0	21/02/2013	0.0
07/10/2012	0.0	30/10/2012	0.6	22/11/2012	25.0	15/12/2012	0.0	07/01/2013	2.2	30/01/2013	0.2	22/02/2013	3.0
08/10/2012	0.0	31/10/2012	0.0	23/11/2012	0.0	16/12/2012	0.0	08/01/2013	0.0	31/01/2013	0.2	23/02/2013	69.8
09/10/2012	0.0	01/11/2012	0.0	24/11/2012	0.0	17/12/2012	0.0	09/01/2013	2.8	01/02/2013	0.0	24/02/2013	0.2
10/10/2012	0.0	02/11/2012	0.0	25/11/2012	0.0	18/12/2012	4.6	10/01/2013	0.0	02/02/2013	0.0	25/02/2013	0.0
11/10/2012	0.0	03/11/2012	0.0	26/11/2012	0.0	19/12/2012	21.8	11/01/2013	0.0	03/02/2013	0.0	26/02/2013	0.0
12/10/2012	0.0	04/11/2012	0.0	27/11/2012	0.0	20/12/2012	0.0	12/01/2013	3.8	04/02/2013	0.0	27/02/2013	0.0
13/10/2012	0.0	05/11/2012	0.0	28/11/2012	0.0	21/12/2012	0.0	13/01/2013	0.2	05/02/2013	0.0	28/02/2013	0.0
14/10/2012	0.2	06/11/2012	0.0	29/11/2012	0.6	22/12/2012	0.0	14/01/2013	0.0	06/02/2013	0.0		
15/10/2012	0.2	07/11/2012	0.0	30/11/2012	48.4	23/12/2012	3.0	15/01/2013	0.0	07/02/2013	0.0		
16/10/2012	0.0	08/11/2012	30.2	01/12/2012	7.4	24/12/2012	0.0	16/01/2013	0.6	08/02/2013	6.2		
17/10/2012	0.2	09/11/2012	8.8	02/12/2012	18.6	25/12/2012	0.0	17/01/2013	43.6	09/02/2013	1.8		
18/10/2012	0.0	10/11/2012	0.0	03/12/2012	0.2	26/12/2012	0.0	18/01/2013	0.0	10/02/2013	0.0		
19/10/2012	0.0	11/11/2012	0.0	04/12/2012	0.0	27/12/2012	0.2	19/01/2013	6.2	11/02/2013	0.0		

Πίνακας Π.3: Είσοδοι του νευρωνικού δικτύου (1ο σενάριο)

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
167.8	133	115.9	136.4	156.3	169	132.4	20.8	69.8	0.0
167.9	129.8	115.7	136.5	156.8	168	131.2	19	77.6	3.4
170.8	130.3	115.6	136.7	157.7	168.9	131.2	19	77.6	0.0
172.9	130.7	115.2	136.4	158.3	169.3	131	19	77.6	0.0
175.7	131.8	115.1	136.5	159.4	169.8	131	25.4	95.2	0.2
176.1	132.3	115.2	136.6	160	170.1	131.1	18	95.6	0.2
175.9	131.7	115.2	136.7	160.6	170.4	131	19	96.6	0.0
172.8	133.5	115.1	136.2	160	171.6	131.9	20.2	90.4	0.0
171.5	132.6	114.7	136.1	159.7	171.5	131.8	6	86.6	0.2
169.8	133.5	114.5	136	161.8	171.3	131.8	6	85.8	0.0
169.9	132.8	114.4	136.2	161.5	171.3	131.7	5.6	84.4	0.0
170.2	130.1	114.2	136.6	162	171.4	131.7	3.4	52.2	0.0
171.4	130.2	114.1	137.3	161.8	171.7	131.3	0.2	52.4	0.0
172.3	131.2	114.1	137.8	164.7	172	131.4	0.4	52.6	0.0
173.5	131.6	114.1	137.6	164.5	172.8	131.7	14.2	66.4	0.2
174.5	131.9	114.1	137.6	164.4	173.2	131.8	21	63.6	0.0
176	132.6	114.1	137.5	164.4	173.5	131.9	20.8	63.6	0.0
164.4	128.9	113.1	137.1	162.3	172.4	131.8	20.8	61.6	0.0
164.6	128.4	112.8	137.3	162.6	171.7	130.8	20.8	52.6	0.0
163.6	127.9	112.6	137.3	163.1	170.5	130.4	7	46.2	0.2
163.9	127.5	112.6	137.5	163.7	170.2	130.3	0	44.8	0.2
164.7	127.5	112.6	137.7	164.9	170	130.1	0	27.2	0.0
167.7	128.9	112.7	138.1	167.6	169.8	130.1	0	27.2	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
168.2	129.3	112.7	138.2	168.1	169.9	130.1	17.6	43.4	0.0
169.6	130.2	112.6	138.3	169.4	170	130.2	17.8	43.4	0.0
170.9	130.9	112.6	138.4	170.7	169.9	130.1	17.8	42.4	0.0
171.2	131.9	113.3	139.5	173.9	169.8	130.4	31.2	69.8	0.6
171.4	132.2	113.7	140	175.9	169.4	130.4	31.6	51.6	1.6
171.5	132.7	114.5	140.7	179	169.1	130.4	31.6	49.6	0.0
171.4	133.3	115.3	141.2	182.2	168.7	130.5	20.8	51	0.0
171.8	134	116.3	141.9	186	168.9	130.8	7.4	56.4	0.0
172.6	134.6	116.5	141.9	189.2	169.1	131.1	7.2	56.6	0.6
174.2	136.5	116.4	141.6	186.6	170.1	131.8	7.2	56.6	0.0
175.5	136.9	115.6	141.1	183.3	170.5	132.1	5.8	56.6	0.4
176.8	137.5	115	140.7	179.8	170.8	132.4	5.6	56.6	1.0
176.8	137.9	115	140.7	180.2	171.4	133	0.2	56.6	0.0
175.7	139.1	114.7	140.8	182.3	172.7	134.5	0	56.6	0.0
176.2	139.8	114.7	140.9	183.1	173.1	134.9	0	53.8	0.0
176.7	140.5	114.6	141	184.1	173.4	135.2	0	39	0.0
177.4	141	114.4	141.2	184.9	174	135.8	0.6	39.4	0.0
178.3	138.4	113.6	140.4	178.9	174.9	136.8	2.2	41	0.2
176.4	135.5	112.8	139.3	172.2	175	137	2.2	41	0.4
176.5	135.9	112.9	139.4	172.4	175.4	137.2	2.2	41	0.0
177.1	136.3	113	139.7	174.1	176.4	138	2.2	41	0.0
177.5	136.7	112.9	139.9	175.2	176.5	138	8.2	37	0.0
178.9	138.3	113.1	140.7	179	177	138.3	17.4	27.2	0.0
179.7	139.1	113.2	141.1	181.3	177.5	138.6	17.4	27.2	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
181	140.1	113.4	141.6	183.1	178.3	139.1	17.8	27.2	0.0
185.6	142.9	113.9	142.5	187.5	179.1	139.5	18.2	28.2	0.0
191.9	146.3	114.3	143.5	191.3	181.1	140.6	10.6	26.8	0.0
192.8	146.9	114.4	143.7	191.9	181.9	141.1	2.6	22.2	0.0
195.8	149.3	114.8	144.4	193.5	184	141.8	2.6	22.2	0.0
201.3	153.3	115.8	145.1	196.9	186.7	143.4	2.2	22.2	0.0
204.3	155.6	116.3	145.5	198.2	188	144.2	1.2	22.2	0.0
210.4	159.5	116.9	146	199.3	191.9	147	52	74.2	0.0
211.6	160.3	117	146	198.9	193.3	147.9	52.2	74.4	0.0
214.6	162.3	117.1	146	199.3	196.8	150.3	52.6	74.8	0.0
215.8	163.1	117.2	146.1	200.3	202.4	153.9	8.4	72.6	0.0
223.7	167	117.6	146.4	203.1	207	156.7	8.4	72.6	0.0
227.2	168.4	117.8	146.6	203.8	211.2	159.4	0.6	72.6	0.0
229.9	169.7	118	146.7	205.3	212.5	160.2	0.4	72.6	0.0
231.7	170.7	118.1	146.6	205.4	217.1	162.9	0	72.6	0.0
240	176.5	118.5	146.6	204.8	222	166	0	55.2	0.0
244	181.4	118.8	146.7	204.2	226.9	169.4	0	55.2	0.0
257.2	188.2	119.1	146.4	202.8	231.5	171.9	0	54.8	0.0
269	191.4	119.5	145.5	204.4	242.1	177.6	0	53.8	0.0
270.3	192.5	119.8	145	202.6	244.4	178.8	0	52.8	0.0
271.9	193.4	120	144.5	194.6	250.7	182.2	0	52.6	0.0
273.4	193.7	120.1	144	184.5	254.5	184.3	0	52.6	0.0
275.8	191.6	119.9	142.8	170.6	258.4	185.9	0	52.6	0.0
282.7	193.9	119.6	142.9	169.3	265.9	189.8	0	0.6	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
285.3	196	119.8	142.7	169	267.9	190.6	0	0	0.0
291.1	200.6	120.1	142.9	169.5	272.4	193	0	0	0.0
304.7	207.8	120.6	142.2	167.3	282.2	196.9	0	0	0.0
306.2	209.5	121	142.8	169.3	287.2	199.4	0	0	0.0
311.6	212.3	122.3	143.9	172.4	291.6	201.5	0	0	0.0
337.2	243.9	138.1	143.4	183.9	332.7	236.8	0	0	0.2
342.6	251	138.1	144.3	185.3	339	246.9	1.4	1.4	0.0
350.2	257	138.4	145.1	185.7	343.1	249.9	1.4	1.4	0.0
365.1	264.3	139.5	146.4	183	347.7	252.7	1.4	1.4	0.0
377	269	128.2	145.3	173.9	352.8	255.4	0	1.4	16.8
387.7	272.2	123.2	146.7	173.8	357.7	257.6	0	1.4	0.0
388.3	273.6	129.7	149.6	180.8	361.2	259.7	0	1.4	0.0
384.2	278.5	142.8	149.7	195.3	363	261.7	0	1.4	0.0
385.6	283.7	143.4	145.8	196.9	377.3	272.9	0	1.4	0.0
403.4	288.8	144.3	148.2	199	383.2	276.6	0	1.4	0.0
412.5	290.5	145	154.6	202	390.8	280	0	1.4	0.2
450.5	294.1	149.8	169.6	200.8	409	287.1	0	1.4	0.0
446.1	304.5	152.8	155.3	201.1	416.6	291.8	0	0	0.0
448.6	310.4	152.6	153.8	201.6	420	293.5	0	0	0.2
273.9	229.7	149.3	162.9	185.7	395.8	286	0	0	0.2
272.7	229.3	149	164.4	185.1	369.1	276.7	0	0	0.0
248.9	215.9	149.8	168.9	186.2	298.6	247.5	0	0	0.0
252	217.5	150.3	169.3	186.3	291.4	242.8	0	0	0.2
252.2	217.8	150.5	169.5	186.4	271.2	231.4	0	0	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
251.5	218.4	151.3	170	186.7	258.2	221.6	0	0	0.0
235.6	212.5	151.8	170.1	187.2	251.1	218.7	33.4	35.6	0.2
232.9	210.9	151.5	170.7	188	249.7	218.1	7.4	35.6	0.0
235	211.6	151.1	171.2	188.7	245.7	216.1	7.6	35.8	0.4
238.5	212.5	151.1	172	189.4	242.1	214.3	0.6	36.2	0.0
190.7	179.3	138	164.7	177.3	232.8	207.9	0.4	36.2	0.8
191.1	179.2	137.4	164.6	177.5	229.3	205.5	0	36.2	1.0
169.5	130	115.6	136.6	157.4	168.4	131.2	0	36.2	0.0
174.1	134.5	115.6	136.8	160.3	170.9	131.8	16.8	53	4.8
171.8	130.6	114.1	137.5	163.2	171.7	131.3	16.8	26.2	0.0
163.7	128.2	112.6	137.1	162.8	171	130.6	2	19.4	1.4
166.2	128.1	112.7	138.1	166.2	169.9	130.1	2	19.4	0.0
171.4	131.4	112.6	138.6	172	169.9	130.3	1.6	19.2	0.0
173.2	135.8	116.9	141.9	189.2	169.4	131.4	0.4	19.2	9.2
177.7	138.5	114.7	140.7	181.2	172.2	133.5	0	19.2	0.0
178.2	137.5	112.9	140.3	176.9	176.7	138.1	0.6	3	0.0
189.2	144.7	114.1	143.1	189.7	179.9	140	1.2	3.8	0.0
198.6	151.3	115.3	144.8	195.5	185.6	142.6	0.8	3.8	0.0
218.1	164.6	117.4	146.1	200.3	203.8	154.8	0.2	3.2	0.0
235.2	172.6	118.1	146.6	205.2	220.3	164.8	33.8	35.4	0.0
268.2	190.6	119.4	145.8	205.6	235.8	174.2	54.8	56.4	0.0
332.4	239.2	138.5	142.9	183.2	323.3	226.7	0.2	107	0.2
373.5	281.2	143	144.8	196.3	367	266.5	0.4	107	0.0
223.7	202.1	148.3	170	185.8	237.3	211	21.2	129.4	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
243.6	215.5	151.6	170.2	187	254.3	220	5.8	98.8	4.0
349.3	281.5	155.3	162.5	196.5	414.6	293.5	6	98.8	37.4
443.3	292.7	147	171.9	202.3	402.8	284.4	1	28	0.0
410.3	296.6	156.3	158	200	425.8	295.6	12	38.8	0.2
298.5	205.1	120.6	142.4	169	280	195.8	16.2	43.2	0.0
328	234.5	138.7	142.4	182.8	318.8	220.9	15.6	43.2	0.0
168.5	133	115.9	136.4	156.2	169.1	132.6	2.4	44.8	1.0
184.2	176.7	135.7	163.6	177.9	189.4	179.2	3	46	0.0
184.3	176.3	135.5	162.5	176.9	188.4	178.6	76.2	114	0.0
183	173.5	135.4	161.1	176.3	185.5	177.1	91	116.2	0.2
179.6	164.4	134.5	156.1	173.9	183.9	174.9	21	113.2	0.0
180.4	163.2	134	155.8	173.2	181.9	170.3	14	132	0.2
181	161.9	133.7	154.6	172.4	182	168.4	11.4	73.4	0.0
181.3	162.4	133.7	155.1	172.4	181.7	167.7	2	56.4	0.0
181.1	162.2	133.5	153.8	173.5	181.8	166.9	2.2	42.4	0.0
182.8	161.9	133.2	152.3	174.5	181.9	166.3	0.6	36.6	0.0
183.7	161.8	133	152.8	176.7	182.3	165.8	0.4	36.8	0.0
184.7	161.7	132.9	153.3	179.1	182.6	165.4	3.2	39	1.0
184.4	161.7	132.5	154.1	181.3	182.5	165.1	3	26.4	1.2
171.5	159.1	131.9	154.2	181.5	180.2	162.5	0	23.8	0.0
187	162.1	131.2	154.6	185	180.9	160.9	0	16.6	0.0
187.3	162.1	131.2	154.6	185.4	181.8	161.1	0	16.6	0.0
187.4	162.4	131.4	154.6	186.1	182.4	161.1	1.6	7	0.0
188.7	163.4	131.9	154.8	188.3	183.4	161.3	11.2	16.6	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
207	164.6	132.4	155.3	190.8	190.5	161.7	4	15.2	0.0
209.2	165.6	132.7	155.8	193.3	191.6	162.3	4	15.2	0.0
205.3	165.9	132.8	155.9	197.2	191.9	162.8	0	15.2	0.0
206.7	166.8	133	156.1	198.7	193.4	163.4	0	15.2	0.0
204.8	167.2	133	156.2	200.4	193.8	164	0	15.2	0.0
196.9	168.5	133.2	156.5	203.4	197.8	165.4	0	15.2	0.0
201.2	170.2	133.9	156.8	203	198.5	165.8	0	14.2	0.0
203.9	171.9	135.4	157.8	202	199.1	166.4	0	12.4	0.0
205.8	175	137	159.5	204.1	199.6	167	0	12.4	0.0
206.3	176.4	136.7	159.5	202.1	200.1	167.7	0	4	0.0
177.6	156.6	118.8	149.3	191	195.3	168.8	0.2	4.2	0.0
185.8	161.9	123.3	152.1	209.9	197	165.4	0.2	4.2	0.0
182.6	158.9	119.1	150.3	213.8	199.1	166.5	25.2	25.4	0.0
217.4	183.7	137.9	161.4	227.2	201.5	167.8	25.2	25.4	0.0
222.8	188.2	139.1	161.9	208.1	203.2	169.5	25.2	25.4	0.0
224	189.3	139.4	161.9	208.4	203.4	172.1	25.2	25.4	0.0
228.9	196.3	140.2	162.5	209.6	205.8	173.7	0	25.4	0.0
231.3	197.8	139.6	162.4	209.8	209	177.6	0	25.4	0.0
234.4	198	139.7	162.4	210.1	211.8	179.3	0	25.4	0.0
205.7	169.8	130.2	161.9	210.1	207.5	180.4	0.6	26	0.0
208.4	172	130.5	162.1	211.1	210	177	0.6	26	0.0
243	200.3	138.7	162.5	213.1	212.8	178.6	0.6	26	0.0
506.9	878.3	139.2	162.5	214.6	256.3	181	0.2	26.2	0.0
507.7	882.9	139.5	162.5	215.6	270.9	311.9	0.2	26.2	0.0



Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )					Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\Omega m$ )		Συνολική βροχόπτωση (mm)		
$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	$\alpha=8m$	$\alpha=12m$	$\alpha=16m$	$\alpha=2m$	$\alpha=4m$	Την προηγούμενη εβδομάδα	Τον προηγούμενο μήνα	Την ίδια ημέρα
194.8	132.7	140.2	197.9	216.1	264.5	314.7	0.2	26	0.0
282.7	221.4	141.7	265.4	323.7	282.3	341.1	0	0.8	0.4
415.3	222.7	824.9	537.2	271.4	317.7	344.9	0	0.8	0.0
372.4	223.1	597.2	412.7	215.4	314.6	331.5	0	0.8	0.0
338.9	223.6	483.1	350.6	215.8	314.7	334.9	0	0.8	0.0
265.7	226.8	141.5	158.7	218.2	339.1	364.6	0	0.2	0.0
299.1	231.2	141.7	156.1	219.2	345.4	367.7	0.4	0.4	0.0
300.3	234.6	142.3	160.6	218.7	293.2	202.8	0.4	0.4	0.0
301.6	236.1	143.3	162.9	218.7	299.6	205.6	0.4	0.4	0.0
320.4	241	143.3	194.5	220.2	319.7	228.6	0.2	0.6	0.0
330.5	246.3	143.8	163.6	220.2	308.7	235.1	0.4	0.8	0.0
370.7	258.9	144.8	164.4	220.2	340.5	243.7	0.4	1	0.0
370.7	260	145.3	164.8	220.2	348.1	248.7	0.2	1	0.0
367.8	259.4	144.8	164.8	219.8	358.5	255.4	0	1	0.0
358.8	256.6	143.5	164.8	218.7	357.9	256.1	0	0.6	0.0
368.2	269.9	159.3	171.9	207.1	365.4	258.3	0.2	0.6	0.0
371.3	271.6	157.1	171.2	207.1	366.9	260.6	0.2	0.6	0.0
423.5	291.3	153.3	248.1	218.2	388.7	271.6	0	0.6	0.0

Πίνακας Π.4: Έξοδος νευρωνικού δικτύου για το 1ο σενάριο

Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)					
R1	R2	R3	R4	R5	R6
137.4	36.1	32	57.6	34.7	56.9
138.7	37.5	32.2	57.3	33.5	58.1
142.3	38.5	32.7	58.6	35.6	58.9
142.4	38.6	32.8	58.8	35.7	59.2
146.6	38.6	33.4	57.8	35.9	60.1
143.5	38.4	33.3	57.4	35.6	60
144.3	38.5	33.2	57.6	35.7	60
119.5	36.2	31.2	53.4	33.5	57
121.9	36.7	31.4	54.1	34	58.2
121.7	36.7	31.6	53.9	33.7	57.9
125.2	37.3	32	54.4	33.7	57.6
128.1	37.6	32	54.8	34	57.8
132.5	38.5	32.1	54.1	37.5	58.6
133	38.7	32.1	54	33.7	59
109.2	37.9	30.9	51.3	32.6	58.5
92.4	38.1	30.9	51.3	32.7	58.5
93.6	38.1	31.1	51.4	32.7	58.6
106.5	36.8	29.1	51.9	31.1	55.9
112.5	38.2	29.9	51.8	31.2	55.6
109.5	38.1	30	51.4	31	54.9
110.5	38.6	30.3	50.7	34.5	55.3
114.9	42.4	29.8	51.8	31.3	56.6
115.9	40	30.2	52.2	31.2	56.2
118	40.5	30.2	52.6	31.3	56.4
120	41.4	30.6	53	31.6	57.1
121.4	41.8	30.8	52.1	31.3	58.1
117.8	42.1	30.4	51.5	30.9	57.7
120.1	41.9	30.6	51.4	31.1	58
121.1	43.8	30.7	52.4	31.4	58.9
121.6	44.9	32	52.4	31.1	59.6
121.4	46.7	32.1	51.9	31	59.8
122.2	45.3	32.3	52.1	30.9	60
106.4	43	32.6	49.6	30.3	62.4
110.2	43.7	32.8	50.5	30.5	63.2
115.4	44.3	32.6	51.1	30.6	63.9
113.5	45	32.8	51.7	30.5	64.4

**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
118.5	47.8	34.2	52.6	30.7	66.4
119.3	48.3	34.4	53.1	30.7	67
120.5	49	34.6	53.3	30.6	67.6
120.9	49.2	34.7	53.5	30.6	67.8
94.3	40.8	29.2	46.5	25.9	66.7
96.7	41.3	29.8	46.9	26.2	67.5
98.3	41.6	30.2	47.3	26.5	67.8
102.2	43.1	32.2	51.2	26.8	70.4
104.6	43.6	32.4	51.7	26.9	70.9
107.4	47.2	33.2	52.9	27.4	72.3
109.2	48.4	34	52.2	27.5	73.8
112.3	51.7	36.4	56.8	27.7	76.5
118.5	55.8	37.9	64.1	28.6	81.3
123.7	61	41.9	71.9	29.1	84.9
125.3	62.1	42.6	74.5	29	86.2
130.1	66.3	45.6	81.7	29.2	90.3
141.4	71.9	49.8	89.6	29.5	97.8
148.3	76.5	53.6	96	29.8	108.7
157.7	82.1	57.8	102.4	30.3	126.7
160.7	83.2	58.6	104.1	30.4	136.1
169.1	85.6	61.3	106.5	30.9	171.2
177.2	88.5	64.9	109.6	31.7	210
195.6	93.2	70.4	114.7	32	288
206.3	95.4	76.1	117.3	33.1	312
214.2	97.1	80.4	119.8	34.3	326.1
223.6	97.6	85	121.6	34.9	340
263.9	98.9	97.6	124.9	37	388
275.1	99.8	101.8	126.4	38.8	396.5
317.2	111.6	118.4	130.7	45.6	441
332	112.7	125.5	133.1	46.9	458
337.3	112.7	127.2	133.6	47.3	463.8
339.5	112.8	127.9	133.9	47.7	471.2
343	113	129.4	134.6	48.1	477
355	117.1	140.5	138.6	55.2	486
360	118.2	148.6	140	63.5	488
372	118.7	153.6	140.8	68.6	486
379	120.3	157.4	142.2	61.1	495
390	124.5	187.1	146.4	112.8	499
398	126.2	190.3	147.4	93.5	502

**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
393	128	192.9	150.2	137.2	491
253	111.1	185.5	130.5	189.5	422
236	113.8	193.6	137.4	205	413
294	118.3	198.5	146	213.4	420
320	126.9	203	155.6	224	478
350	132.8	214	165.2	175.3	342
340	136.7	223	170.6	252	523
382	113.5	224	172.2	260	525
416	147.8	233	182.7	265	368
441	153.6	242	188.4	271	397
459	155.4	249	192	272.3	416
478	160	254.6	198.8	275	464
475	166.3	269	207	254	580
460	163.2	271	208	235	590
461	161.4	268	205	231	587
220	82	72.2	102.2	71.5	341
184	82.5	73.3	104.5	65	356
171	82.5	65.2	97.8	50.2	136.8
184.2	85.8	67.8	104	51.3	147.3
184.9	86.1	67.9	104.4	51.7	147.8
188.2	84.3	67.3	105.4	52	143
178.3	80.2	63.5	101.6	50.5	133
173.5	86.2	65.6	106.5	50.7	138
170.1	85.2	64.8	105.3	58.4	135.5
169.6	84.7	64.5	104.9	58	134.8
138.2	75	44.5	88	40.6	102.3
136	73.5	44.1	87.3	39.4	100.8
141.9	38.2	32.6	57.9	35.2	58.3
109.6	34	32	51.2	33.2	57.3
134.1	38.7	32.4	53.6	33.8	58.6
112.3	37.5	29.7	51	30.1	55
115.4	40.6	30	51.9	31.1	56.3
122.3	42	30.8	52.3	31.4	58.4
101.6	41.3	32	48.8	29.7	60.6
115.3	45.6	33	52.1	30.7	64.9
106	45.1	32.6	52.2	27.1	71.6
119.8	56	38.8	66.2	28.8	82.2
138.6	70.5	48.8	87.3	29.4	95.2
183.7	89.8	66.6	111	31.7	233

**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
247.4	98.3	92.3	123.2	36.2	372.4
326.8	112.2	121.3	131.3	46.2	449.4
238	107.3	180.8	123.6	183.5	377
428	149.3	237.2	185.1	267	375
143	77.1	46.8	90	42.5	105
180.5	80.6	63.2	99.5	50.5	130
174	77.3	84	102.6	98	363
477	164.2	260	205	252	511
222	110	128	120	125	430
384	123.4	173.7	144.8	101	493
212	104.3	171	116.9	93	354
137	36.1	31.9	57.5	34.8	57.1
225	74.4	44.5	83.7	41.8	99.3
228.2	75.3	44.8	86	42.1	101.4
226.7	75	44.5	85.8	41.3	101
231	76.5	45	88	41.6	102.2
237	76.9	45.6	89.1	41.8	102.7
237.2	77	45.5	89.2	41.7	102.6
234	76.4	45.2	88.7	41	101.9
241	77.3	46	90.4	41.1	103.7
249.3	77.8	47.1	93.3	41	104.4
265	78.1	48.2	95.4	40.7	105.5
265.5	78.3	48	95.2	40.6	105.3
264	78.2	48.1	94.8	40.4	105
255	77.4	46.8	93.2	40.1	103.4
218	73.7	50.6	85.3	38.8	109.8
225	74.5	54.8	87.4	38.8	110
244	76.4	52.1	90.6	38.8	114.5
291	80.6	54.6	97.8	38.9	119.9
320	83	56.7	102.4	39	126.2
336	84.4	50.9	105.6	39.2	127.8
351	85.1	58.3	106.6	39.4	132.7
389	86.3	56.4	108.2	39.9	147.2
401	89.5	62.1	114.7	40.3	150.4
426	91.8	64.1	118.9	40.8	159
483	94.5	68.9	124.6	42.2	200
475	96.4	67.7	125.7	42	191.9
179.6	92.7	65.3	111.3	43.6	165
184	87.4	72.1	112.9	43.9	161.7

**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
199.2	89.7	74.9	116.2	44.8	174.9
211.2	91.1	75.4	119.5	45	179.3
245.7	93.4	77.1	123.5	46.9	230.7
254.4	95.2	79	126.9	47.6	196.3
259.7	97.1	84	131	47.9	222
266	97.7	87.6	131.6	49.6	267
271.2	99.8	94.5	134.7	51.2	288.2
298	64.3	59.2	124.6	54	407
302.3	104.5	99.2	122.3	59.1	289.9
312	105	168.9	118.1	79.8	118.3
330	106.2	115.3	143.7	60.1	443
350	107.6	84	146.7	66.6	456
368	63.8	90.5	49.5	69.9	445
379	64.3	94.2	71.1	72.1	462
384	68.3	158.6	150.6	89.6	484
391.1	76.5	95.5	125	138.8	504
438	116.3	71.7	271	276	502
453	116.6	99.2	155.2	125.7	503
452	108.8	99.2	146.8	89.8	507
492	93.2	150.2	101.7	285	534
498	118.5	70.9	155.5	290	538
501	120.2	112.6	158.5	313	546
503	97.4	138.7	162.5	334	560
512	123	218	160.7	172.9	254
567	108.2	224	163.2	350	594
676	132.2	260	173.4	371.6	671
674	133.9	259	174.1	376	672
662	116.2	219.2	162.4	337	602
631	124.3	211	161.3	331.9	604.9
329	111.1	228	124.6	75	258
343	114.4	235	130.4	77.5	271
460	137	260	179.2	107.3	397

Πίνακας Π.5: Είσοδος νευρωνικού δικτύου (2ο σενάριο)

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Συνολική βροχόπτωση (mm)		
				Τον προηγούμενο μήνα	Την προηγούμενη εβδομάδα	Την ημέρα της εκτίμησης
157.41	129.00	161.57	131.32	69.8	20.8	6.4
157.97	128.85	161.44	131.05	77.6	19.0	0.0
159.68	128.19	161.48	130.63	77.6	19.0	0.0
161.40	127.64	161.52	130.32	77.6	19.0	0.0
163.74	127.87	162.29	130.17	95.2	25.4	0.0
163.41	127.66	162.05	130.01	95.6	18.0	1.0
162.78	127.89	161.85	129.85	96.6	19.0	0.0
159.26	127.84	160.26	129.08	90.4	20.2	3.4
159.78	127.83	160.34	128.99	86.6	6.0	0.0
161.23	127.68	160.64	128.89	85.8	6.0	0.0
162.58	127.59	160.97	128.50	84.4	5.6	0.0
166.28	126.96	161.74	127.97	52.2	3.4	0.2
168.14	126.96	162.18	127.96	52.4	0.2	0.2
168.75	127.18	162.49	127.98	52.6	0.4	0.0
166.85	127.96	163.24	127.77	66.4	14.2	4.8
169.40	126.49	165.03	127.25	63.6	21.0	0.0
167.96	126.00	164.90	127.16	63.6	20.8	0.2
166.31	125.78	164.66	127.18	61.6	20.8	0.0
165.73	126.20	164.52	127.31	52.6	20.8	0.0
164.85	126.43	164.57	127.22	46.2	7.0	0.0
161.98	128.02	164.39	127.17	44.8	0.0	0.0
162.50	127.54	164.34	127.21	27.2	0.0	0.0
162.89	127.82	164.54	127.22	27.2	0.0	0.0
163.53	128.14	165.19	127.22	43.4	17.6	0.2
164.97	127.92	165.43	127.23	43.4	17.8	0.0
166.28	127.75	165.77	127.22	42.4	17.8	0.0
160.46	127.86	165.81	127.15	69.8	31.2	0.0
155.43	127.93	164.12	127.59	51.6	31.6	0.0
155.19	127.83	163.42	127.60	49.6	31.6	1.4
154.25	127.76	162.63	127.60	51.0	20.8	0.2
153.86	127.87	161.98	127.79	56.4	7.4	0.2
153.59	127.98	161.28	127.78	56.6	7.2	0.0
154.08	128.10	160.92	127.82	56.6	7.2	0.0
155.57	128.32	160.72	127.87	56.6	5.8	0.0
157.35	128.36	160.66	127.90	56.6	5.6	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Συνολική βροχόπτωση (mm)		
				Τον προηγούμενο μήνα	Την προηγούμενη εβδομάδα	Την ημέρα της εκτίμησης
158.04	128.39	160.67	127.95	56.6	0.2	0.0
159.85	128.39	160.21	127.93	56.6	0.0	0.0
161.41	128.48	160.53	127.98	53.8	0.0	0.0
162.04	128.68	160.60	128.08	39.0	0.0	0.6
161.50	129.79	159.79	128.53	39.4	0.6	1.6
161.32	130.51	159.01	128.86	41.0	2.2	0.0
160.98	131.67	158.26	129.34	41.0	2.2	0.0
160.53	132.87	158.52	129.67	41.0	2.2	0.0
160.50	134.22	158.69	130.06	41.0	2.2	0.6
161.73	132.75	158.84	129.83	37.0	8.2	9.2
162.80	132.33	159.43	130.09	27.2	17.4	0.0
164.82	131.47	160.01	130.14	27.2	17.4	0.4
167.09	130.25	160.53	130.21	27.2	17.8	1.0
169.48	131.62	161.34	130.39	28.2	18.2	0.0
169.78	131.70	162.26	130.61	26.8	10.6	0.0
171.06	131.50	163.72	130.90	22.2	2.6	0.0
169.51	132.04	163.67	131.05	22.2	2.6	0.0
170.44	132.13	164.21	131.09	22.2	2.2	0.0
171.34	132.18	165.10	131.25	22.2	1.2	0.0
175.55	131.72	166.69	131.91	74.2	52.0	0.2
172.32	130.24	166.93	131.91	74.4	52.2	0.4
169.62	128.64	167.41	131.86	74.8	52.6	0.0
170.00	128.77	169.09	131.39	72.6	8.4	0.0
172.17	129.16	169.65	131.33	72.6	8.4	0.0
173.55	129.38	170.18	131.27	72.6	0.6	0.0
175.68	129.80	171.14	131.06	72.6	0.4	0.0
176.59	130.28	171.88	130.76	72.6	0.0	0.0
177.48	130.69	173.04	130.96	55.2	0.0	0.0
176.73	131.28	173.61	131.00	55.2	0.0	0.0
181.05	131.42	174.63	131.00	54.8	0.0	0.0
185.40	131.56	176.17	130.90	53.8	0.0	0.0
188.95	131.70	177.09	130.99	52.8	0.0	0.0
190.92	131.95	179.28	130.81	52.6	0.0	0.0
194.47	132.22	181.22	130.79	52.6	0.0	0.0
198.29	132.67	182.62	130.98	52.6	0.0	0.0
202.03	133.06	184.01	131.12	0.6	0.0	0.0



Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Συνολική βροχόπτωση (mm)		
				Τον προηγούμενο μήνα	Την προηγούμενη εβδομάδα	Την ημέρα της εκτίμησης
208.25	133.39	188.99	131.79	0.0	0.0	0.0
214.89	133.68	192.78	132.18	0.0	0.0	0.0
219.19	133.68	199.71	132.64	0.0	0.0	0.0
221.20	133.59	201.84	132.70	0.0	0.0	0.0
224.51	133.62	205.82	132.89	0.0	0.0	0.0
228.27	133.70	211.40	133.22	0.0	0.0	0.0
236.17	133.58	213.85	133.24	1.4	1.4	0.0
237.86	133.54	220.27	133.46	1.4	1.4	0.0
241.41	133.61	224.21	133.60	1.4	1.4	0.0
244.03	133.62	226.24	133.59	1.4	0.0	0.0
249.09	133.51	233.10	133.58	1.4	0.0	0.0
261.17	133.62	238.03	133.63	1.4	0.0	0.0
268.75	134.06	242.90	133.65	1.4	0.0	0.0
284.06	133.22	249.83	133.55	1.4	0.0	0.0
288.89	133.12	253.89	133.50	1.4	0.0	0.0
299.25	132.53	263.28	133.35	1.4	0.0	0.0
301.73	132.46	269.86	133.21	1.4	0.0	0.0
306.06	131.61	275.99	132.99	0.0	0.0	0.0
310.33	130.12	286.49	132.48	0.0	0.0	0.0
311.68	128.65	288.70	132.08	0.0	0.0	0.0
318.34	128.46	296.25	131.59	0.0	0.0	0.0
333.18	128.06	307.11	130.83	0.0	0.0	0.0
337.33	128.46	310.10	130.65	0.0	0.0	0.0
347.06	128.26	319.71	129.84	0.0	0.0	0.0
356.50	127.83	325.74	129.34	0.0	0.0	0.0
365.14	130.88	352.19	134.99	35.6	33.4	5.8
373.79	131.72	359.39	133.90	35.6	7.4	0.0
383.23	135.71	370.66	137.80	35.8	7.6	0.0
391.75	137.14	391.75	137.14	36.2	0.6	0.0
417.60	139.99	400.41	137.85	36.2	0.4	0.0
425.02	140.72	405.06	138.57	36.2	0.0	0.0
445.37	141.38	411.78	139.04	36.2	0.0	0.0
453.81	141.25	418.99	139.34	53.0	16.8	0.0
478.12	133.02	428.36	137.54	26.2	16.8	0.0
494.78	135.86	435.74	137.35	19.4	2.0	1.2
483.40	146.96	447.92	139.04	19.4	2.0	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους (Ωm)	Συνολική βροχόπτωση (mm)		
				Τον προηγούμενο μήνα	Την προηγούμενη εβδομάδα	Την ημέρα της εκτίμησης
480.92	145.23	463.53	139.40	19.2	1.6	0.2
471.60	144.21	468.33	140.02	19.2	0.4	0.0
491.53	144.99	480.16	140.47	19.2	0.0	0.0
502.48	146.03	490.88	141.04	3.0	0.6	0.0
534.10	150.51	496.61	144.69	3.8	1.2	0.0
547.15	153.58	505.95	147.66	3.8	0.8	0.0
557.03	153.86	511.94	148.09	3.2	0.2	0.2
576.14	152.39	529.98	149.52	35.4	33.8	0.8
573.06	151.23	534.98	149.59	56.4	54.8	0.0
438.34	154.43	542.30	153.55	107.0	0.2	0.0
398.86	155.46	519.73	154.39	107.0	0.4	21.0
352.11	156.99	435.71	155.47	129.4	21.2	0.0
310.67	156.32	410.70	155.64	98.8	5.8	4.4
293.50	157.79	351.97	157.48	98.8	6.0	0.0
290.54	158.42	316.99	157.30	28.0	1.0	0.2
280.72	159.63	311.03	157.74	38.8	12.0	0.0
277.13	160.67	305.60	158.26	43.2	16.2	8.2
262.65	161.91	298.93	158.78	43.2	15.6	0.4
250.80	162.29	280.27	159.60	44.8	2.4	0.0
255.41	162.31	273.62	160.46	46.0	3.0	0.2
260.62	162.40	272.08	160.66	114.0	76.2	0.0
261.21	162.46	270.99	160.84	116.2	91.0	0.0
231.66	159.75	264.73	160.50	113.2	21.0	4.2
221.81	157.10	219.14	156.87	132.0	14.0	0.0
199.47	152.97	214.22	155.90	73.4	11.4	0.0
194.89	153.22	196.49	153.65	56.4	2.0	0.0
190.68	152.69	193.73	152.37	42.4	2.2	1.6
187.41	151.36	191.15	152.29	36.6	0.6	0.0
185.00	150.14	188.95	151.37	36.8	0.4	0.0
182.41	148.59	188.01	150.69	39.0	3.2	0.0
184.16	147.56	187.58	150.28	26.4	3.0	0.0
183.42	148.02	186.86	150.02	23.8	0.0	0.0
183.30	147.44	186.63	149.65	16.6	0.0	0.0
183.94	147.20	186.49	149.36	16.6	0.0	0.0
185.42	147.09	186.47	149.22	7.0	1.6	0.0
186.19	147.91	184.75	148.29	16.6	11.2	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Συνολική βροχόπτωση (mm)		
				Τον προηγούμενο μήνα	Την προηγούμενη εβδομάδα	Την ημέρα της εκτίμησης
175.72	148.99	184.48	147.64	15.2	4.0	0.0
158.36	151.40	180.74	148.18	15.2	4.0	0.0
172.91	149.58	181.58	148.12	15.2	0.0	0.0
177.93	148.99	182.01	148.27	15.2	0.0	0.0
188.15	148.13	182.80	148.30	15.2	0.0	0.0
189.20	148.63	183.56	148.66	15.2	0.0	0.0
207.06	147.31	190.47	148.16	14.2	0.0	0.0
204.07	147.97	191.59	148.41	12.4	0.0	0.0
205.26	148.91	191.75	148.83	12.4	0.0	0.0
206.90	149.14	192.37	149.00	4.0	0.0	0.0
196.41	151.53	193.93	149.34	4.2	0.2	0.0
199.68	150.98	194.74	149.45	4.2	0.2	0.0
205.69	151.04	195.89	149.62	25.4	25.2	4.0
208.20	153.07	196.81	150.01	25.4	25.2	21.0
209.11	154.06	197.78	150.26	25.4	25.2	0.2
209.84	153.97	201.56	150.43	25.4	25.2	0.0
179.19	138.79	197.10	147.65	25.4	0.0	0.0
179.38	140.45	198.09	148.43	25.4	0.0	0.0
183.63	140.66	200.64	148.86	25.4	0.0	0.0
223.94	156.20	201.49	149.69	26.0	0.6	0.0
227.59	156.18	204.34	150.18	26.0	0.6	0.2
238.59	155.94	207.98	150.48	26.0	0.6	0.2
246.00	156.55	213.89	150.94	26.2	0.2	0.0
247.26	155.71	216.07	151.14	26.2	0.2	0.2
250.70	155.50	219.75	151.52	26.0	0.2	0.0
203.95	150.96	215.81	151.13	0.8	0.0	0.0
205.66	150.42	219.36	151.11	0.8	0.0	0.0
261.63	154.51	234.84	154.80	0.8	0.0	0.0
271.01	154.72	238.01	154.79	0.8	0.0	0.0
225.73	878.44	247.66	154.05	0.2	0.0	0.0
151.49	2075.97	234.21	393.86	0.4	0.4	0.0
218.81	1128.55	239.98	370.22	0.4	0.4	0.4
252.84	804.12	248.07	348.72	0.4	0.4	0.0
310.35	131.01	266.29	392.31	0.6	0.2	0.0
266.99	158.74	266.36	366.36	0.8	0.4	0.0
336.93	151.06	276.37	392.41	1.0	0.4	0.0

Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση εβδομαδιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης άνω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Μέση μηνιαία τιμή της ειδικής αντίστασης κάτω στρώματος του εδάφους ( $\Omega m$ )	Συνολική βροχόπτωση (mm)		
				Τον προηγούμενο μήνα	Την προηγούμενη εβδομάδα	Την ημέρα της εκτίμησης
344.72	151.64	284.83	365.72	1.0	0.2	0.0
339.67	155.19	294.30	392.04	1.0	0.0	0.0
371.24	153.54	325.09	146.50	0.6	0.0	0.0
391.69	153.64	357.83	158.96	0.6	0.2	0.0
386.32	154.46	367.33	157.46	0.6	0.2	0.0
414.23	152.86	396.50	156.20	0.6	0.0	0.0
441.62	152.98	407.65	155.83	0.6	0.0	0.0
428.81	155.68	424.89	153.52	1.4	1.2	0.0
421.20	153.32	424.15	153.48	1.4	1.2	1.2
438.17	163.57	426.49	155.16	1.2	0.0	0.0
449.81	160.56	436.05	157.16	1.2	0.0	0.0

Πίνακας Π.6: Έξοδος νευρωνικού δικτύου (2ο σενάριο)

Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)					
R1	R2	R3	R4	R5	R6
130.4	35	31.3	55.8	33.4	53.9
136.3	36.3	31.7	57.6	34.5	55.8
135.9	36.1	31.9	57.5	34.6	56.5
138.6	36.3	32.1	57.6	35.1	57.5
136.9	35.8	31.8	57.5	34.7	57
137	36.1	31.9	57.5	34.8	57.1
137.4	36.1	32	57.6	34.7	56.9
138.7	37.5	32.2	57.3	33.5	58.1
141.9	38.2	32.6	57.9	35.2	58.3
142.3	38.5	32.7	58.6	35.6	58.9
142.4	38.6	32.8	58.8	35.7	59.2
146.6	38.6	33.4	57.8	35.9	60.1
143.5	38.4	33.3	57.4	35.6	60
144.3	38.5	33.2	57.6	35.7	60
109.6	34	32	51.2	33.2	57.3
119.5	36.2	31.2	53.4	33.5	57
121.9	36.7	31.4	54.1	34	58.2
121.7	36.7	31.6	53.9	33.7	57.9
125.2	37.3	32	54.4	33.7	57.6
128.1	37.6	32	54.8	34	57.8
132.5	38.5	32.1	54.1	37.5	58.6
134.1	38.7	32.4	53.6	33.8	58.6
133	38.7	32.1	54	33.7	59
109.2	37.9	30.9	51.3	32.6	58.5
92.4	38.1	30.9	51.3	32.7	58.5
93.6	38.1	31.1	51.4	32.7	58.6
106.5	36.8	29.1	51.9	31.1	55.9
112.5	38.2	29.9	51.8	31.2	55.6
112.3	37.5	29.7	51	30.1	55
109.5	38.1	30	51.4	31	54.9
110.5	38.6	30.3	50.7	34.5	55.3
114.9	42.4	29.8	51.8	31.3	56.6
115.4	40.6	30	51.9	31.1	56.3
115.9	40	30.2	52.2	31.2	56.2
118	40.5	30.2	52.6	31.3	56.4
120	41.4	30.6	53	31.6	57.1
121.4	41.8	30.8	52.1	31.3	58.1
122.3	42	30.8	52.3	31.4	58.4

**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
117.8	42.1	30.4	51.5	30.9	57.7
120.1	41.9	30.6	51.4	31.1	58
121.1	43.8	30.7	52.4	31.4	58.9
121.6	44.9	32	52.4	31.1	59.6
121.4	46.7	32.1	51.9	31	59.8
122.2	45.3	32.3	52.1	30.9	60
101.6	41.3	32	48.8	29.7	60.6
106.4	43	32.6	49.6	30.3	62.4
110.2	43.7	32.8	50.5	30.5	63.2
115.4	44.3	32.6	51.1	30.6	63.9
113.5	45	32.8	51.7	30.5	64.4
115.3	45.6	33	52.1	30.7	64.9
118.5	47.8	34.2	52.6	30.7	66.4
119.3	48.3	34.4	53.1	30.7	67
120.5	49	34.6	53.3	30.6	67.6
120.9	49.2	34.7	53.5	30.6	67.8
94.3	40.8	29.2	46.5	25.9	66.7
96.7	41.3	29.8	46.9	26.2	67.5
98.3	41.6	30.2	47.3	26.5	67.8
102.2	43.1	32.2	51.2	26.8	70.4
104.6	43.6	32.4	51.7	26.9	70.9
106	45.1	32.6	52.2	27.1	71.6
107.4	47.2	33.2	52.9	27.4	72.3
109.2	48.4	34	52.2	27.5	73.8
112.3	51.7	36.4	56.8	27.7	76.5
118.5	55.8	37.9	64.1	28.6	81.3
119.8	56	38.8	66.2	28.8	82.2
123.7	61	41.9	71.9	29.1	84.9
125.3	62.1	42.6	74.5	29	86.2
130.1	66.3	45.6	81.7	29.2	90.3
138.6	70.5	48.8	87.3	29.4	95.2
141.4	71.9	49.8	89.6	29.5	97.8
148.3	76.5	53.6	96	29.8	108.7
157.7	82.1	57.8	102.4	30.3	126.7
169.1	85.6	61.3	106.5	30.9	171.2
177.2	88.5	64.9	109.6	31.7	210
183.7	89.8	66.6	111	31.7	233
195.6	93.2	70.4	114.7	32	288
206.3	95.4	76.1	117.3	33.1	312

**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
214.2	97.1	80.4	119.8	34.3	326.1
223.6	97.6	85	121.6	34.9	340
247.4	98.3	92.3	123.2	36.2	372.4
263.9	98.9	97.6	124.9	37	388
275.1	99.8	101.8	126.4	38.8	396.5
317.2	111.6	118.4	130.7	45.6	441
326.8	112.2	121.3	131.3	46.2	449.4
332	112.7	125.5	133.1	46.9	458
337.3	112.7	127.2	133.6	47.3	463.8
339.5	112.8	127.9	133.9	47.7	471.2
343	113	129.4	134.6	48.1	477
355	117.1	140.5	138.6	55.2	486
360	118.2	148.6	140	63.5	488
372	118.7	153.6	140.8	68.6	486
379	120.3	157.4	142.2	61.1	495
384	123.4	173.7	144.8	101	493
390	124.5	187.1	146.4	112.8	499
398	126.2	190.3	147.4	93.5	502
393	128	192.9	150.2	137.2	491
212	104.3	171	116.9	93	354
238	107.3	180.8	123.6	183.5	377
253	111.1	185.5	130.5	189.5	422
236	113.8	193.6	137.4	205	413
294	118.3	198.5	146	213.4	420
320	126.9	203	155.6	224	478
350	132.8	214	165.2	175.3	342
340	136.7	223	170.6	252	523
382	113.5	224	172.2	260	525
416	147.8	233	182.7	265	368
428	149.3	237.2	185.1	267	375
441	153.6	242	188.4	271	397
459	155.4	249	192	272.3	416
478	160	254.6	198.8	275	464
477	164.2	260	205	252	511
475	166.3	269	207	254	580
460	163.2	271	208	235	590
461	161.4	268	205	231	587
222	110	128	120	125	430
174	77.3	84	102.6	98	363

**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια (Ω)**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
220	82	72.2	102.2	71.5	341
184	82.5	73.3	104.5	65	356
171	82.5	65.2	97.8	50.2	136.8
184.2	85.8	67.8	104	51.3	147.3
184.9	86.1	67.9	104.4	51.7	147.8
188.2	84.3	67.3	105.4	52	143
180.5	80.6	63.2	99.5	50.5	130
178.3	80.2	63.5	101.6	50.5	133
173.5	86.2	65.6	106.5	50.7	138
170.1	85.2	64.8	105.3	58.4	135.5
169.6	84.7	64.5	104.9	58	134.8
143	77.1	46.8	90	42.5	105
138.2	75	44.5	88	40.6	102.3
136	73.5	44.1	87.3	39.4	100.8
225	74.4	44.5	83.7	41.8	99.3
228.2	75.3	44.8	86	42.1	101.4
226.7	75	44.5	85.8	41.3	101
231	76.5	45	88	41.6	102.2
237	76.9	45.6	89.1	41.8	102.7
237.2	77	45.5	89.2	41.7	102.6
234	76.4	45.2	88.7	41	101.9
241	77.3	46	90.4	41.1	103.7
249.3	77.8	47.1	93.3	41	104.4
265	78.1	48.2	95.4	40.7	105.5
265.5	78.3	48	95.2	40.6	105.3
264	78.2	48.1	94.8	40.4	105
255	77.4	46.8	93.2	40.1	103.4
218	73.7	50.6	85.3	38.8	109.8
225	74.5	54.8	87.4	38.8	110
244	76.4	52.1	90.6	38.8	114.5
291	80.6	54.6	97.8	38.9	119.9
320	83	56.7	102.4	39	126.2
336	84.4	50.9	105.6	39.2	127.8
351	85.1	58.3	106.6	39.4	132.7
389	86.3	56.4	108.2	39.9	147.2
401	89.5	62.1	114.7	40.3	150.4
426	91.8	64.1	118.9	40.8	159
483	94.5	68.9	124.6	42.2	200
475	96.4	67.7	125.7	42	191.9



**Αντίσταση γείωσης καθενός από τα έξι ηλεκτρόδια ( $\Omega$ )**

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
179.6	92.7	65.3	111.3	43.6	165
184	87.4	72.1	112.9	43.9	161.7
199.2	89.7	74.9	116.2	44.8	174.9
211.2	91.1	75.4	119.5	45	179.3
245.7	93.4	77.1	123.5	46.9	230.7
254.4	95.2	79	126.9	47.6	196.3
259.7	97.1	84	131	47.9	222
266	97.7	87.6	131.6	49.6	267
271.2	99.8	94.5	134.7	51.2	288.2
298	64.3	59.2	124.6	54	407
302.3	104.5	99.2	122.3	59.1	289.9
312	105	168.9	118.1	79.8	118.3
330	106.2	115.3	143.7	60.1	443
350	107.6	84	146.7	66.6	456
368	63.8	90.5	49.5	69.9	445
379	64.3	94.2	71.1	72.1	462
384	68.3	158.6	150.6	89.6	484
391.1	76.5	95.5	125	138.8	504
438	116.3	71.7	271	276	502
453	116.6	99.2	155.2	125.7	503
452	108.8	99.2	146.8	89.8	507
492	93.2	150.2	101.7	285	534
498	118.5	70.9	155.5	290	538
501	120.2	112.6	158.5	313	546
503	97.4	138.7	162.5	334	560
512	123	218	160.7	172.9	254
567	108.2	224	163.2	350	594
676	132.2	260	173.4	371.6	671
674	133.9	259	174.1	376	672
662	116.2	219.2	162.4	337	602
631	124.3	211	161.3	331.9	604.9
329	111.1	228	124.6	75	258
343	114.4	235	130.4	77.5	271
368	121.1	246	143.4	85.6	310
460	137	260	179.2	107.3	397

Ο κώδικας, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή και εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου είναι ο ακόλουθος:

```
clc;
clear;
load inputs.txt;
load outputs.txt;
[pn,ps] = mapminmax(inputs);
[tn,ts] = mapminmax(outputs);
net = newff(pn',tn',17,{'tansig' 'purelin'},'trainb');3
net.trainParam.epochs = 7000;
net.trainParam.goal = 0;
net.inputweights{1,1}.initFcn = 'rands';
net.biases{1}.initFcn = 'rands';
net=init(net);
[net,TR] = train(net,pn',tn');
w1=net.IW{1,1};
```

Σε περίπτωση που εφαρμόζεται ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος με σταθερό όρο ορμής και μεταβλητό ρυθμό μάθησης πρέπει να προστεθούν και οι ακόλουθες εντολές:

```
Tn=2400;
Ta=1500;
net.trainParam.lr = 0.8;
net.trainParam.lr_dec = exp(-1/Tn);
net.trainParam.mc = 0.5;
```

---

<sup>3</sup> Αναφέρεται ότι η δομή της εν λόγω εντολής είναι η εξής: newff(pn',tn', "αριθμός νευρώνων", {συναρτήσεις ενεργοποίησης}, 'τρόπος εκπαίδευσης')