



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Φανή Η. Ασημακοπούλου

Αθήνα, Νοέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

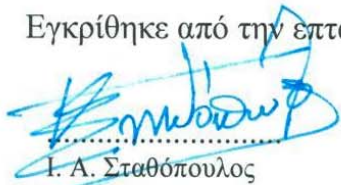
Φανή Η. Ασημακοπούλου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

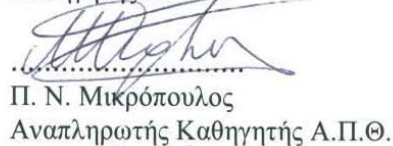
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

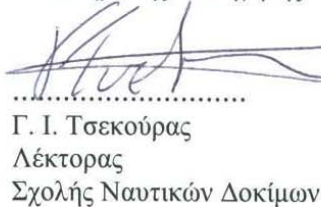
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 22^α Νοεμβρίου 2011


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

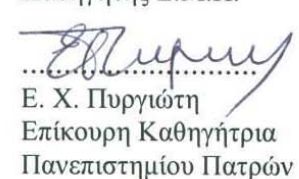

.....
Π. Δ. Μπούρκας
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Κ. Π. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Π. Ν. Μικρόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.


.....
Γ. Ι. Τσεκούρας
Λέκτορας
Σχολής Ναυτικών Δοκίμων


.....
Φ. Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Ε. Χ. Πυργιώτη
Επίκουρη Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Πατρών

Αθήνα, Νοέμβριος 2011



Φανή Η. Ασημακοπούλου

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

Copyright © Φανή Η. Ασημακοπούλου, 2011.

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 τη συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμών της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Περίληψη

Η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης και παρουσιάζει διακυμάνσεις, τόσο κατά τη διάρκεια του έτους, όσο και λόγω της πρόκλησης ιονισμού του εδάφους, κατά τη διάχυση κεραινικού ρεύματος στο έδαφος, μέσω του συστήματος γείωσης.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζεται στην πειραματική μελέτη εδαφικών δειγμάτων, προκειμένου να μελετηθούν οι παράγοντες που συμβάλλουν στην εκδήλωση ιονισμού του εδάφους. Μεταξύ άλλων, η σημαντικότερη παράμετρος είναι η κρίσιμη ένταση ιονισμού του εδάφους. Για τη μελέτη αυτής της παραμέτρου, και των παραγόντων που την επηρεάζουν, πραγματοποιήθηκαν πειράματα, με την εφαρμογή κρουστικής τάσης σε εδαφικά δείγματα.

Τα πειραματικά αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αβεβαιότητας, που σχετίζεται με την τιμή της τάσης έναρξης του φαινομένου. Η κρίσιμη ένταση ιονισμού υπολογίστηκε, επίσης, με την εφαρμογή μεθόδων, που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, αλλά και νέων, που προτείνονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και των οποίων αξιολογείται η αποτελεσματικότητα.

Ακόμη, με τη βοήθεια μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου και Γενετικού Αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση των παραμέτρων εξίσωσης, που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία, για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού, βάσει πειραματικών δεδομένων, ενώ προτάθηκε και καινούργια εξίσωση, η οποία παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών.

Τέλος, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής μελετήθηκε η συμπεριφορά της ειδικής αντίστασης του εδάφους, συναρτήσει των καιρικών συνθηκών. Γι' αυτόν τον σκοπό, εκπαιδεύθηκε Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, με τη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων εκπαίδευσης, με εισόδους τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και του ύψους βροχόπτωσης, για μία παρελθούσα χρονική περίοδο, και έξοδο την πρόβλεψη/εκτίμηση της αντίστασης γείωσης για συγκεκριμένη ημέρα.

Λέξεις - κλειδιά

Αντίσταση γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, ιονισμός εδάφους, κρίσιμη ένταση του ιονισμού, χαρακτηριστικές I-V, τάση διάσπασης $U_{50\%}$, μέθοδος αυξομείωσης της τάσης (up-and-down method), αβεβαιότητα μετρήσεων, μη γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο, Γενετικός Αλγόριθμος, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος.

Abstract

The behavior of any grounding system greatly depends on the soil resistivity. Soil resistivity varies not only seasonally, but also due to the development of non-linear phenomena (such as soil ionization) when a high impulse current is injected to the grounding system.

The present PhD thesis focuses on the experimental study of the critical ionization gradient, which is the most important parameter for the onset of ionization in the soil. On that purpose, impulse voltages have been applied on soil samples and the parameters, which affect ionization gradient, such as impulse polarity, grain size, etc., have been investigated.

The experimental results have been processed in order to estimate the uncertainty of the ionization voltage and the soil ionization gradient. Moreover, the soil critical ionization gradient has been evaluated by applying methodologies proposed in literature and new ones introduced in the present study.

Furthermore, a hybrid non-linear regression model has been developed for the correlation of electrical parameters of the soil with soil critical ionization gradient. The parameters of the equation were optimized by using Genetic Algorithm. As outcome of this procedure an equation is proposed, which minimizes the divergence between experimental and estimated values.

Last but not least, in the present thesis, the seasonal variation of the ground resistance of a single rod by means of Artificial Neural Networks has been investigated. On that purpose, different training algorithms have been implemented, while the training set comprised soil resistivity values, rainfall data for previous days with view to predict the ground resistance at the present day.

Keywords

Ground resistance, soil resistivity, soil ionization, critical ionization gradient, I-V characteristics, $U_{50\%}$ breakdown voltage, up-and-down method, uncertainty, non-linear regression model, Genetic Algorithm, Artificial Neural Networks, back-propagation algorithm.

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εικονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλου και αφορά στη διερεύνηση της μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους, τόσο σε κανονικές συνθήκες, όσο και κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων, όπως, παραδείγματος χάριν, κατά την πτώση κεραυνού. Η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης και παρουσιάζει διακυμάνσεις, τόσο κατά τη διάρκεια του έτους, λόγω της βροχόπτωσης και της μεταβολής της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, όσο και λόγω της εκδήλωσης του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους, κατά τη διάχυση ρεύματος, είτε κεραυνού, είτε σφάλματος, στο έδαφος, μέσω του συστήματος γείωσης.

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, που αφορά στην παρουσίαση των παραμέτρων και του τρόπου, με τον οποίο επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στον ιονισμό του εδάφους και στις θερμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος, γύρω από το σύστημα γείωσης, υπό συνθήκες υψηλού ρεύματος (κεραυνοί, ρεύμα σφάλματος), καθώς αποτελούν τους δύο επικρατέστερους μηχανισμούς, που προκαλούν διάσπαση του εδάφους. Υιοθετώντας την άποψη της επιστημονικής κοινότητας ότι, ο επικρατών μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους, παρουσιάζονται διεξοδικά τα μοντέλα, που κατά καιρούς έχουν προταθεί, για την περιγραφή του, καθώς και οι συνέπειες της εκδήλωσης του ως άνω ιονισμού στη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος γείωσης. Δεδομένου ότι, ο ιονισμός εκδηλώνεται εντονότερα σε συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης, εν συγκρίσει με εκτεταμένα συστήματα γείωσης, η ανάλυση επικεντρώνεται σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης και σε οριζόντια τοποθετημένους γειωτές. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανασκόπηση των προσπαθειών, για την εκτίμηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο χρησιμοποιηθείς πειραματικός εξοπλισμός και οι διαδικασίες, που ακολουθήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων, υπό κρουστική τάση, αναφερομένων στον προσδιορισμό, τόσο της τάσης διάσπασης εδαφικών δειγμάτων, τοποθετημένων σε διάταξη παραλλήλων πλακών, όσο και της τάσης έναρξης του ιονισμού, με τη χρήση κυλινδρικής διάταξης. Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, με τη βοήθεια της οποίας, μελετήθηκε η ετήσια μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται εμβάθυνση στον τρόπο προσδιορισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Χρησιμοποιούνται πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν από την τοποθέτηση των εδαφικών δειγμάτων σε διάταξη παραλλήλων πλακών, και εφαρμόζεται η μέθοδος αυξομείωσης της τάσης (ευρέως αναφερομένη ως up-and-down method) για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης 50%, η οποία θεωρείται ίση προς την τάση έναρξης του ιονισμού. Παράλληλα, πραγματοποιείται εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων, που σχετίζεται τόσο με την τάση, όσο και με την κρίσιμη ένταση διάσπασης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε κυλινδρική διάταξη και, με την εφαρμογή της μεθόδου των I-V καμπυλών, προσδιορίστηκε η κρίσιμη τάση έναρξης του ιονισμού. Στη συνέχεια του ιδίου κεφαλαίου, εφαρμόζονται και αξιολογούνται μεθοδολογίες από τη βιβλιογραφία, αλλά και νέες, που προτείνονται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, για την εκτίμηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση εξίσωσης, που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού, βάσει πειραματικών δεδομένων. Προς επίτευξη τούτου, εφαρμόσθηκε μη γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο στα πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα, που προέκυψαν, βελτιστοποιήθηκαν με τη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία για την εκτίμηση της τιμής της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου, με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Για το σκοπό αυτόν, εκπαιδεύθηκε Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, με τη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων εκπαίδευσης, το οποίο έχει ως εισόδους τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και του ύψους βροχόπτωσης, για μία παρελθούσα χρονική

περίοδο, και, ως έξοδο, δίνει μία πρόβλεψη/εκτίμηση της αντίστασης γείωσης, για συγκεκριμένη ημέρα.

Στο έκτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα, που προέκυψαν, και αναδεικνύεται η συμβολή της παρούσας εργασίας, στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους και όλων των συνοδών αυτού μεγεθών, όπως π.χ. της κρίσιμης έντασης ιονισμού, της ειδικής αντίστασης του εδάφους, καθώς και της εποχής και του ύψους βροχόπτωσης, στην αντίσταση γείωσης συγκεντρωμένου συστήματος γείωσης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και τις ευχαριστίες μου στον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, αφ' ενός μεν, για την αποδοχή μου στη θέση της υποψήφιας διδάκτορος, αφ' ετέρου, δε, για την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση, τις συμβουλές του, το άριστο κλίμα συνεργασίας και τη διασφάλιση των απαιτούμενων μέσων για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους Καθηγητές κ.κ. Κωνσταντίνο Γ. Καραγιαννόπουλο και Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, για την αποδοχή συμμετοχής τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη συμβολή τους στην εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

Εξίσου θερμές ευχαριστίες οφείλονται στον Ομότιμο Καθηγητή του Ιδρύματος κ. Περιλή Δ. Μπούρα, για την αποδοχή συμμετοχής του, τόσο στην πενταμελή εξεταστική επιτροπή της ενδιάμεσης κρίσης, όσο και στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ την Επίκουρη Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Πατρών Κυρία Ελευθερία Χ. Πυργιώτη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κ. Παντελή Ν. Μικρόπουλο, για την αποδοχή συμμετοχής τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ θερμότατα τον Λέκτορα της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων κ. Γεώργιο Ι. Τσεκούρα, για την αποδοχή συμμετοχής του στην επταμελή εξεταστική επιτροπή,

πολλώ δε μάλλον, για τη βοήθειά του στην ανάπτυξη του μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου, σε θέματα προγραμματισμού των αλγορίθμων των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, καθώς και για τις εν γένει επικοινωνητικές συμβουλές του.

Οι ευχαριστίες μου είναι βαθιές και ειλικρινείς στον κ. Ιωάννη Φ. Γκόννο, Διδάκτορα Μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για τη διαρκή συμπαράσταση και τις πολύτιμες συμβουλές, που, πρόθυμα, προσέφερε, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής της παρούσας διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ την Κυρία Βασιλική Θ. Κονταργύρη, Διδάκτορα Μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη βοήθειά της σε θέματα, που άπτονται του προγραμματισμού των αλγορίθμων των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, καθώς και για την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και τα επικοινωνητικά σχόλια στο έργο μου.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στο Λέκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη και στην Υποψηφία Διδάκτορα Κυρία Δάφνη Σίδερη του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της ως άνω Σχολής, για τη διάθεση του απαραίτητου εργαστηριακού εξοπλισμού και την, από πλευράς τους, καθοδήγησή μου στη διεξαγωγή των δοκιμών κοκκομετρίας σε εδαφικά δείγματα, χρησιμοποιηθέντα στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Οφείλω πολλές ευχαριστίες στον κ. Θεόδωρο Στρίγκο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών, Υποψήφιο Διδάκτορα του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon του Pittsburgh, χωρίς τη βοήθεια του οποίου, η πρόσβαση σε βιβλιογραφικές πηγές θα ήταν ιδιαίτερα δυσχερής.

Στο σημείο αυτό, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συνεργάτες μου, Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Υπολογιστών, οι οποίοι συνέβαλαν στην ερευνητική προσπάθεια για την πραγματοποίηση της έρευνάς μου. Ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης, αναφέρω τα ονόματά τους: Κυρίες Αθηνά Βαλαμβάνου, Χαριτωμένη Μαρκιαντωνάκη, Αντιγόνη Λοϊζου και Ελένη Κούρνη, και

κ.κ. Ιωάννης Φραγγής, Κωνσταντίνος Αλεξάνδρου, Χρήστος Κουρέλης, Ανδρέας Κοντονικόλα και Γρηγόρης Λοΐζου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Κυρία Νικολέτα Χ. Ηλία, Υπεύθυνη Διασφάλισης Ποιότητας του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, για την τεχνική βοήθεια και συμπαράστασή της, όπως και στην Κυρία Χρύσα Α. Σιγάλα, για τη γραμματειακή υποστήριξη, που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Ευχαριστώ, επίσης, τους κ.κ. Χρήστο Κ. Ηλία και Αριστείδη Γιάννακα, τεχνικούς του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, για την τεχνική υποστήριξη, που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστώ στους γονείς μου Ηλία και Αγγελική και στην αδελφή μου Τζωρτζίνα, για την ηθική και συναισθηματική συμπαράσταση και υλική στήριξη, που μου προσέφεραν, καθ' όλη τη διάρκεια των εγκυκλίων και μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Φανή Η. Ασημακοπούλου
Αθήνα, Νοέμβριος 2011

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract.....	iii
Πρόλογος.....	v
Περιεχόμενα	xi
Κεφάλαιο 1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ειδική αντίσταση εδάφους	1
1.3 Μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους	4
1.4 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους.....	7
1.4.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων	7
1.4.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης.....	10
1.4.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας.....	17
1.5 Συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης κατά την εκδήλωση ιονισμού του εδάφους.....	24
1.6 Προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής της πεδιακής έντασης ιονισμού και της πεδιακής έντασης διάσπασης εδάφους.....	42
1.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1	54
Κεφάλαιο 2 Μετρητικές διατάξεις – Πειραματική διαδικασία	61
2.1 Εισαγωγή	61
2.2 Πειραματική διαδικασία για τη μελέτη του ιονισμού σε εδαφικά δείγματα.....	62
2.2.1 Εξοπλισμός	62
2.2.2 Εδαφικά δείγματα.....	63
2.2.3 Πειραματικές διατάξεις	64
2.2.4 Προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού σε διάταξη παραλλήλων πλακών.....	69
2.2.5 Προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού σε κυλινδρική διάταξη με τη μέθοδο των I-V καμπυλών	70
2.3 Πειραματική διαδικασία για τη μελέτη της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στην τιμή της αντίστασης γείωσης	71
2.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2	75
Κεφάλαιο 3 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού εδάφους	77

3.1 Εισαγωγή.....	77
3.2 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού εδαφικών δειγμάτων, τοποθετημένων σε διάταξη παραλλήλων πλακών.....	79
3.2.1 Προσδιορισμός της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$	79
3.2.2 Υπολογισμός της αβεβαιότητας μέτρησης	80
3.2.2.1 Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης τύπου Α.....	80
3.2.2.2 Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης τύπου Β.....	81
3.2.2.3 Εκτίμηση ολικής αβεβαιότητας μέτρησης.....	81
3.2.3 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_o) και της αντίστοιχης αβεβαιότητας μέτρησης	90
3.2.4 Συμπεράσματα για την τάση διάσπασης $U_{50\%}$	91
3.2.5 Συμπεράσματα για τις αβεβαιότητες.....	93
3.3 Υπολογισμός κρίσιμης έντασης ιονισμού σε κυλινδρική διάταξη	94
3.3.1 Προσδιορισμός της τάσης έναρξης του ιονισμού με χρήση καμπυλών I-V.....	95
3.3.2 Μέθοδοι υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού	97
3.3.3 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού	101
3.3.3.1 Υπολογισμός με χρήση προσεγγιστικών εξισώσεων.....	103
3.3.3.2 Υπολογισμός βάσει της γεωμετρίας της διάταξης	104
3.3.3.3 Υπολογισμός με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου	105
3.3.4 Συμπεράσματα από τη χρήση των καμπυλών I-V	108
3.4 Συμπεράσματα	109
3.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3	114
Κεφάλαιο 4 Συσχέτιση των ηλεκτρικών παραμέτρων του εδάφους με την κρίσιμη ένταση ιονισμού	117
4.1 Εισαγωγή.....	117
4.2 Μεθοδολογία υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου.....	118
4.2.1 Εφαρμογή του υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου.....	118
4.3 Βελτιστοποίηση με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου	121
4.4 Συμπεράσματα	124
4.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4	125
Κεφάλαιο 5 Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ..	127
5.1 Εισαγωγή.....	127

5.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	129
5.2.1 Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος	129
5.2.2 Συνάρτηση ενεργοποίησης και κορεσμός	132
5.2.3 Τρόποι εκπαίδευσης	134
5.2.4 Κριτήρια τερματισμού	134
5.2.5 Παραλλαγές αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος	135
5.2.6 Διαστήματα εμπιστοσύνης	135
5.3 Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου	137
5.3.1 Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	137
5.3.2 Δεδομένα εκπαίδευσης.....	137
5.3.3 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης.....	140
5.3.4 Διαδικασία βελτιστοποίησης.....	141
5.3.5 Αποτελέσματα	145
5.4 Συμπεράσματα	147
5.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 5.....	149
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα της διατριβής.....	151
6.1 Ανακεφαλαίωση.....	151
6.2 Συμβολή – Πρωτοτυπία.....	154
6.3 Η επόμενη μέρα.....	161

Κεφάλαιο 1

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα από σημείο υψηλότερου δυναμικού προς σημείο χαμηλότερου δυναμικού και η ροή του ρεύματος προς το σημείο χαμηλότερου δυναμικού πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία του συστήματος γείωσης, και σε όλες τις περιπτώσεις, την ελάχιστη πτώση δυναμικού [1.1]. Το σύστημα γείωσης παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα σφαλμάτων και κεραυνοπληξιών προς τη γη και σκοπός του είναι η προστασία του ανθρώπου, από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, η προστασία της κατασκευής και του εξοπλισμού, η μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, η εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και ο περιορισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

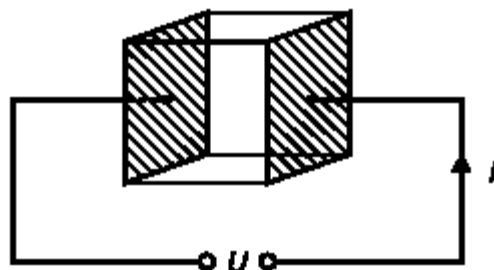
Η αντίσταση γείωσης, την οποία μετράμε σε ένα γειωτή, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου του γειωτή, προς το έδαφος που το περιβάλλει και ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την ένταση ρεύματος, δηλαδή $R = \frac{V}{I}$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου έχει, προφανώς, διαστάσεις αντίστασης και είναι ένα μέγεθος κατανεμημένο στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο [1.2].

1.2 Ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, που καθορίζουν την αντίσταση του συστήματος γείωσης και, συνεπώς, αποτελεί σημαντικό

παράγοντα για την αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Ένας άλλος παράγοντας, που επιδρά στην τιμή της αντίστασης γείωσης είναι το είδος και το μέγεθος του συστήματος γείωσης.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους ορίζεται ως η αντίσταση του υλικού του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1** και η τιμή της δίδεται σε Ωm .



Σχήμα 1.1 Ειδική αντίσταση του εδάφους.

Ο τύπος του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασής του. Στον **Πίνακα 1.1** παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφόρους τύπους εδαφών.

Έδαφος	Ειδική αντίσταση (Ωm)
Επιφάνεια εδάφους, παχύ χώμα, κ.τ.λ.	1-50
Λάσπη, πηλός, χώμα	2-100
Άμμος με χαλίκι	50-1000
Επιφάνεια ασβεστόλιθου	100-10000
Σχιστόλιθος	5-100
Αμμόπετρα με χαλαζία και άμμο	20-2000
Γρανίτης, βασάλτης, κ.τ.λ.	1000
Διαλυόμενος γνευσίτης (ορυκτό)	50-500
Πλακόστρωτα, κ.τ.λ.	10-100

Πίνακας 1.1 Ειδική αντίσταση διαφόρων τύπων εδάφους [1.3].

Το μέγεθος των κόκκων και η ανομοιογένειά τους στο έδαφος διαδραματίζουν πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασής του, καθ' όσον επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων, τόσο λιγότερη υγρασία κατακρατείται και η τιμή της ειδικής αντίστασης λαμβάνει υψηλότερες τιμές. Στην περίπτωση που το μέγεθος των κόκκων ποικίλει, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγάλων, σε μέγεθος, κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους και, έτσι, η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται. Έχει, επίσης, αποδειχθεί ότι, ο βαθμός συμπίεσης του εδάφους μεταβάλλει

την τιμή της ειδικής αντίστασης: συμπαγείς δομές εδάφους παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης έναντι των μη συμπαγών δομών.

Επίσης, για τον ίδιο τύπο εδάφους, η αύξηση της περιεκτικότητας αυτού σε νερό οδηγεί σε μείωση της ειδικής του αντίστασης. Αυτό οφείλεται στο προφανές γεγονός ότι, η αγωγιμότητα του νερού είναι, σε μεγάλο βαθμό, ηλεκτρολυτική. Θα πρέπει, βέβαια, να επισημάνουμε ότι η ακριβής περιεκτικότητα σε νερό είναι μεταβλητή εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού, με συνέπεια τη μεταβολή της τιμής της ειδικής αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους.

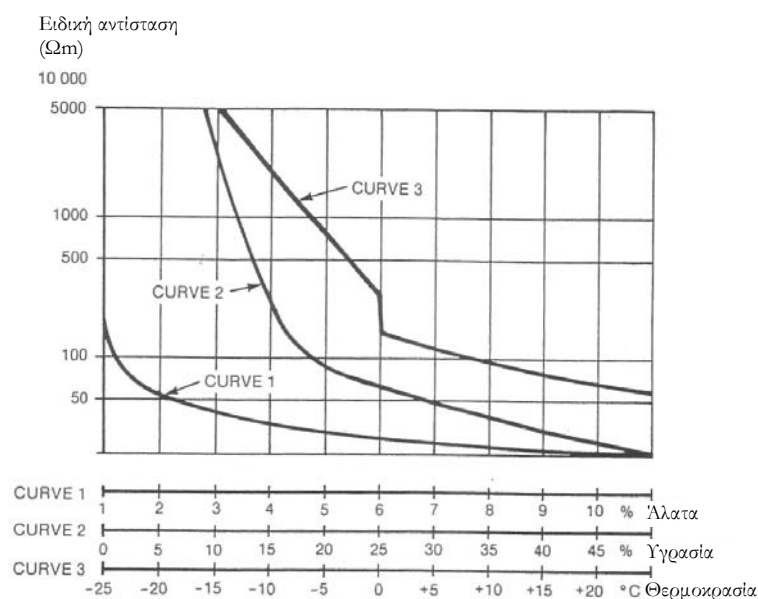
Επιπλέον, το νερό περιέχει διαλυμένα άλατα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης. Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση, σε σχέση με την τιμή, που αυτή έχει όταν το νερό, που έχει προστεθεί στο χώμα, είναι απιονισμένο. Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι, διαφορετικά άλατα έχουν διαφορετικές επιδράσεις και, πιθανώς, αυτό εξηγεί, γιατί η ειδική αντίσταση ομοίων εδαφών, από διαφορετικές περιοχές, παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Σε ορισμένες, μάλιστα, περιπτώσεις, η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχου νατρίου (NaCl , δηλ. αλατιού), χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2), θειικού χαλκού (CuSO_4), θειικού μαγνησίου (MgSO_4) είναι ένας απλός, φθηνός και πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Είναι γνωστό ότι, καθώς η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται, η ειδική αντίστασή του μειώνεται. Είναι άξιο παρατήρησης ότι, στην περίπτωση που η θερμοκρασία του εδάφους πέσει κάτω από τους 0°C , τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί πάρα πολύ [1.5].

Στο **Σχήμα 1.2** [1.4] παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας αυτού σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας.

Τέλος, η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους επηρεάζεται από την αναπτυσσόμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα, εφ' όσον η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβεί την κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_0). Η τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_0) εξαρτάται από το είδος του

εδάφους και, συνήθως, είναι της τάξης μερικών εκατοντάδων kV/m. Αν σημειωθεί υπέρβαση αυτής της τιμής, δημιουργούνται τόξα στην περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο, τα οποία οδηγούν σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Σε όλο τον υπόλοιπο χώρο, εντός του οποίου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνει τιμές μικρότερες της κρίσιμης έντασης ($E < E_0$), η τιμή της ειδικής αντίστασης παραμένει αμετάβλητη [1.6]. Η μελέτη της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου στην τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, αποτελεί ένα από τα επί μέρους αντικείμενα της παρούσας διδακτορικής διατριβής.



Σχήμα 1.2 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα (CURVE 1), της υγρασίας (CURVE 2) και της θερμοκρασίας (CURVE 3) [1.4],[1.5],[1.6].

1.3 Μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους

Όπως είναι γνωστό, το έδαφος σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιομορφα, αγωγιμα ή μη, σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα, ή αέρας. Στο νερό και στα διαλυμένα σε αυτό άλατα οφείλεται κατά κύριο λόγο η αγωγιμότητα του εδάφους, ενώ το μέγεθος των διακένων μεταξύ των κόκκων του εδάφους επηρεάζει την αναπτυσσόμενη σε αυτά ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, εξαιτίας της επιβαλλόμενης τάσης. Παρ' όλο, που οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί [1.7], [1.8] και η συμπεριφορά τους είναι κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος) τότε, μέσα στο έδαφος και γύρω από τους

αγωγούς του συστήματος γείωσης, αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους.

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι, ο όρος ιονισμός χρησιμοποιείται για να περιγράψει περιορισμένου εύρους μερικές διασπάσεις, ενώ, με τον όρο διάσπαση νοείται η πλήρης διάσπαση του διηλεκτρικού. Για την πρώτη περίπτωση θα χρησιμοποιούνται οι όροι τάση έναρξης του ιονισμού (V_o) και κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_o). Στη δεύτερη περίπτωση θα χρησιμοποιούνται οι όροι τάση διάσπασης (V_b) και κρίσιμη ένταση διάσπασης (E_b).

Για παράδειγμα [1.9], στην περίπτωση ενός διακένου αέρα, στο οποίο αναπτύσσεται μη ομογενές πεδίο, όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι αρκούντως μικρή, δεν προκαλείται διάσπασή του. Ωστόσο, τοπικά, σε περιοχές αυξημένης πεδιακής έντασης, εκδηλώνεται το φαινόμενο Corona, ή αλλιώς στεμματοειδής εκκένωση, η οποία προσδίδει στο μέσο ιδιότητες αγωγιμότητας και, στο όριο της περιοχής, εντός της οποίας εκδηλώνεται το φαινόμενο, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ισούται με την κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_o). Καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη τάση, ο όγκος εντός του οποίου εκδηλώνεται ο ιονισμός αυξάνεται και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λάβει την κρίσιμη τιμή E_b , τότε ο όγκος εντός του οποίου εκδηλώνεται ο ιονισμός παύει να μεγαλώνει και δημιουργείται ένας οχετός εκκένωσης. Άπαξ και δημιουργηθεί ο οχετός εκκένωσης, απαιτείται ένταση μικρότερης τιμής για τη διατήρησή του και οδηγούμεθα στην πλήρη διάσπαση του μέσου. Στην περίπτωση, βέβαια, που το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές, τότε οι τιμές των E_b και E_o ταυτίζονται.

Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η διάσπαση του εδάφους μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστός. Ωστόσο, έχουν καταβληθεί προσπάθειες από πλήθος ερευνητών για τη μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους σε μεταβατικά φαινόμενα και την περιγραφή των μηχανισμών, που λαμβάνουν χώρα.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί δύο μηχανισμοί για την περιγραφή της διάσπασης του εδάφους: ο ένας είναι ο θερμικός μηχανισμός και ο άλλος είναι ο ιονισμός του εδάφους.

Σύμφωνα με τον θερμικό μηχανισμό, που προτάθηκε από τους Snowden et al. [1.10] και [1.11], όταν το ρεύμα εγχέεται μέσω του συστήματος γείωσης στο έδαφος, λόγω του φαινομένου Joule, θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, που

είναι παγιδευμένο στο έδαφος, και μείωση της ειδικής του αντίστασης. Καθώς το ρεύμα επιλέγει να ρέει μέσω του δρόμου μικρότερης αντίστασης, θα διαρρεύσει εκείνα τα μονοπάτια, που παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση (και, ως εκ τούτου, έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία) προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Στις περιοχές εκείνες, που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των πόλων του εδάφους ξεπερνάει μία κρίσιμη τιμή εκδηλώνεται διάσπαση του εδάφους. Ο χρόνος για την έναρξη της διάσπασης εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για τη θέρμανση και εξάτμιση του νερού, που με τη σειρά του εξαρτάται από την αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του νερού, το μήκος των μονοπατιών, στα οποία έχει εκδηλωθεί διάσπαση, και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους.

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους και προτάθηκε από τους Leadon et al. [1.12]. Ο μηχανισμός του ιονισμού του εδάφους είναι ηλεκτρική διαδικασία και λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των πόλων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους. Μάλιστα, λόγω της ανομοιομορφίας των πόλων, η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης, που προκαλεί διάσπαση του εδάφους, είναι μικρότερη από την τιμή που απαιτείται για διάσπαση ενός διακένου αέρα αντίστοιχων διαστάσεων [1.13]. Με τη βοήθεια πειραμάτων, οι Flanagan et al. [1.14], [1.15] υπολόγισαν την κρίσιμη τιμή της έντασης στα 10-20kV/cm.

Πειραματικά αποτελέσματα των Oettle [1.16], [1.17], Πετρόπουλου [1.18] και Liew et al. [1.19] υποστηρίζουν τον μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω του ιονισμού.

Σύμφωνα με τους Nor και Ramli [1.20] για να καταστεί δυνατή η διάκριση μεταξύ των δύο μηχανισμών είναι απαραίτητη η εκτίμηση της ενέργειας, που απορροφάται από το χώμα, για δεδομένη επιβαλλόμενη τάση και περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Οι δυσκολίες, που σχετίζονται με τον υπολογισμό της απορροφώμενης ενέργειας από το υγρό έδαφος, τους οδήγησαν στη μελέτη ξηρών εδαφών. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο επικρατών μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους, παραδόξως, όμως, παρατηρήθηκαν και φαινόμενα που σχετίζονται με τον θερμικό μηχανισμό διάσπασης. Για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε ό,τι αφορά τους μηχανισμούς διάσπασης.

Στο πλαίσιο, ωστόσο, της παρούσας εργασίας ο μηχανισμός διάσπασης, που υιοθετείται, είναι ο ιονισμός του εδάφους.

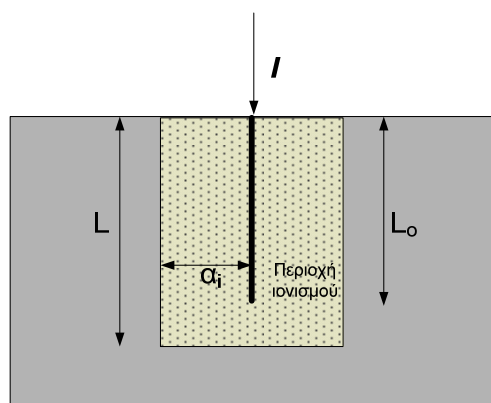
1.4 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω.

1.4.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων

Οι Bellaschi et al. [1.21] και ο Πετρόπουλος [1.18] θεώρησαν ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου. Με άλλα λόγια, μοντελοποίησαν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων.

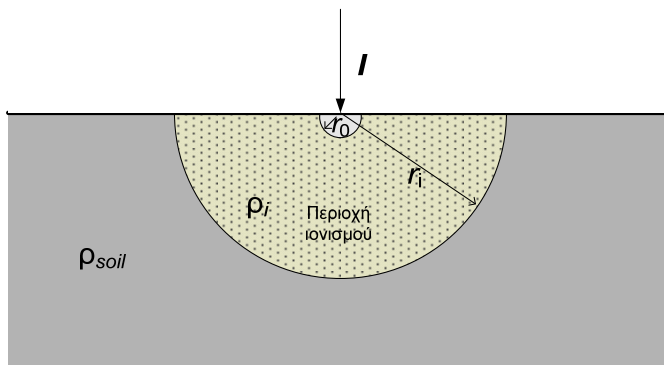
Σε άλλη εργασία τους, ο Bellaschi και οι συνεργάτες του [1.22] έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκινώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι, το έδαφος είναι ομογενές, η ειδική αντίσταση του εδάφους παραμένει σταθερή, κατά τη διάσπαση δεν παρατηρείται πτώση τάσης και η ζώνη των εκκινώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκινώσεων και, κατ' επέκταση, τη μείωση της αντίστασης. Στο **Σχήμα 1.3** [1.13], [1.22] παρουσιάζεται η μορφή της ζώνης ιονισμού, σύμφωνα με τους Bellaschi et al.



Σχήμα 1.3 Μοντέλο Bellaschi [1.13], [1.22].

Ο Γ.Μ. Πετρόπουλος σε άρθρο του [1.18] αναφέρει ότι, η αντίσταση των γειώσεων υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων παίρνει τιμές κατά πολύ μικρότερες από

εκείνες που μετρώνται με μεθόδους διέλευσης ασθενών εναλλασσομένων ρευμάτων. Η αντίσταση των συνηθισμένων γειώσεων μειώνεται κατά το 1/5 περίπου υπό την επίδραση κρουστικών ρευμάτων της τάξης των 10kA. Σε περιπτώσεις όπου άλλα αγωγίμα σώματα υπάρχουν κοντά στα ηλεκτρόδια γείωσης, τότε η αντίσταση γείωσης μειώνεται ακόμα περισσότερο. Η μείωση αυτή της αντίστασης αποδίδεται σε ηλεκτρικές εκκενώσεις, οι οποίες βραχυκυκλώνουν τη σχετικά υψηλή αντίσταση μεταξύ των αγωγίμων τμημάτων του εδάφους καταλαμβάνοντας ένα χώρο στον οποίο η αγωγιμότητα (σ_i) γίνεται πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι στο υπόλοιπο έδαφος. Τότε το ηλεκτρόδιο εμφανίζεται σαν να έχει αυξημένες διαστάσεις και συνεπώς παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση ως προς τη γη. Στα πειράματα, που διεξήγαγε, χρησιμοποίησε ημισφαιρικό δοχείο από χαλκό γεμάτο με χώμα. Στο κέντρο του τοποθέτησε το σφαιρικό ηλεκτρόδιο. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκενώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης έναν συγκεκριμένο χώρο εκκενώσεων για κάθε τάση, διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο χώμα με μία ημισφαιρική επιφάνεια, η ακτίνα της οποίας εξαρτάται από την τιμή της τάσης. Στο **Σχήμα 1.4** φαίνεται το μοντέλο των εκκενώσεων που πρότεινε ο Πετρόπουλος.



Σχήμα 1.4 Μοντέλο Πετρόπουλου [1.9], [1.18], [1.23].

Η αντίσταση μονίμου καταστάσεως του ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο:

$$R_0 = \frac{\rho_{soil}}{2\pi r_0} \quad (1.1)$$

όπου R_0 είναι η αντίσταση μονίμου καταστάσεως σε Ω , r_0 είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου σε m, ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm .

Όταν επιβάλλεται κεραυνικό ρεύμα στο ηλεκτρόδιο, τότε η πυκνότητα ρεύματος σε συγκεκριμένη απόσταση απ' αυτό, δίνεται από τον τύπο:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1.2)$$

όπου J είναι η πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2 , I το επιβαλλόμενο ρεύμα σε A και r η απόσταση από το ηλεκτρόδιο σε m .

Το φαινόμενο του ιονισμού εκδηλώνεται, όταν η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί μία κρίσιμη τιμή, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$J_c = \frac{E_o}{\rho_{soil}} \quad (1.3)$$

όπου J_c είναι η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2 , E_o η κρίσιμη ένταση ιονισμού σε V/m και ρ_{soil} η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm .

Από τις εξισώσεις (1.2) και (1.3) μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της περιοχής ιονισμού, η οποία δίδεται από τον τύπο:

$$r_{ion} = \sqrt{\frac{\rho_{soil} I}{2\pi E_o}} \quad (1.4)$$

Βέβαια, η ομοιομορφία του χώρου εκκινώσεων προϋποθέτει την ομοιογένεια του εδάφους, κάτι που δεν ισχύει στην πράξη. Ωστόσο, η μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης αποδίδεται και σε άλλους παράγοντες, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας που περιβάλλει τα ηλεκτρόδια, αφού μείωση της αντίστασης γείωσης παρατηρείται και όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι σχετικά μικρή, ώστε να μη συμβαίνουν εκκινώσεις.

Τέλος, σύμφωνα με τις έρευνες των Loboda et al [1.24], όταν ένα ηλεκτρόδιο διαρρέεται από ρεύμα, τότε στο έδαφος γύρω από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου δημιουργείται μία ζώνη εκκινώσεων. Στη ζώνη αυτή, αρχικά, εκδηλώνονται σπινθήρες και, καθώς η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται, δημιουργούνται τόξα. Στην περιοχή, που εκδηλώνονται τα τόξα, η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι το ηλεκτρόδιο μαζί με τη γύρω απ' αυτό περιοχή ισοδυναμούν με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων (κυρίως αυξημένης διαμέτρου). Η ζώνη των εκκινώσεων εκτείνεται μέχρι εκείνη την περιοχή, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δεν προκαλεί διάσπαση του εδάφους.

1.4.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

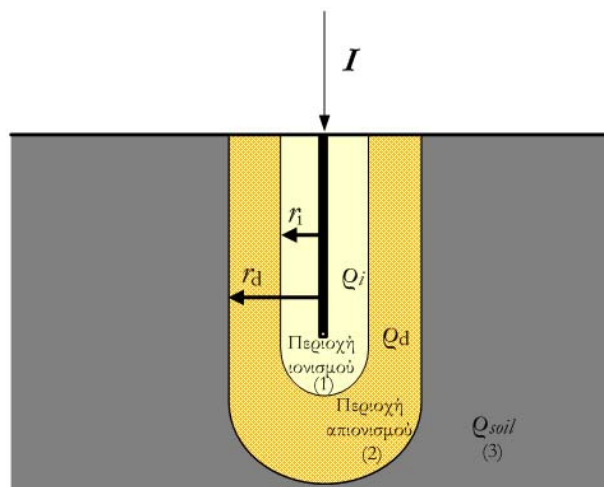
Σ' αυτό το μοντέλο, η μείωση της αντίστασης του ηλεκτροδίου ερμηνεύεται ως μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ_{soil}) στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, εξαιτίας του φαινομένου του ιονισμού.

Το 1974 οι Liew και Darveniza [1.19] πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων ειδών χώματος σε κρουστικά ρεύματα, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ισοτροπικό, δηλαδή η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Σύμφωνα με το μοντέλο τους, το έδαφος, γύρω από το ηλεκτρόδιο, χωρίζεται σε τρεις περιοχές ανάλογα με την τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος που εγχέεται. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.5** διακρίνονται τρεις περιοχές: (1) η περιοχή ιονισμού, (2) η περιοχή απιονισμού και (3) η περιοχή όπου δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού.

Αναλυτικότερα, καθώς το επιβαλλόμενο στο ηλεκτρόδιο ρεύμα αυξάνεται και εγχέεται στο έδαφος, η ειδική αντίσταση στις περιοχές, στις οποίες η πυκνότητα ρεύματος (J) είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή (J_c), θα παρουσιάζει τιμή μικρότερη από την τιμή της ειδικής αντίστασης μονίμου καταστάσεως (ρ_{soil}). Σε κάθε άλλη περίπτωση η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{\text{soil}} \quad \text{για } J < J_c & (\alpha) \\ \rho &= \rho_{\text{soil}} e^{-t/\tau_1} \quad \text{για } J \geq J_c & (\beta) \end{aligned} \quad (1.5)$$

όπου τ_1 είναι η χρονική σταθερά ιονισμού κατά την αύξηση του ρεύματος και t είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του ιονισμού.



Σχήμα 1.5 Μοντέλο Liew και Darveniza [1.19], [1.23].

Ο ιονισμός θα επεκταθεί σε μια περιοχή με ακτίνα r_{ion} η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή που θα πάρει το ρεύμα.

Στη συνέχεια, καθώς το ρεύμα θα αρχίσει να μειώνεται θα διαμορφωθούν στο έδαφος τρεις περιοχές:

1. Στην περιοχή 1, για την οποία ισχύουν $r < r_{\text{ion}}$ και $J \geq J_c$, εξακολουθούν να εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού και η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σύμφωνα με την (1.5)(β). Η διαδικασία αυτή θα σταματήσει όταν η πυκνότητα ρεύματος J θα πάρει τιμές μικρότερες από J_c , οπότε θα αρχίσει η διαδικασία του απιονισμού.
2. Στην περιοχή 2, στην οποία η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή, η ειδική αντίσταση αρχίζει να ανακτά την αρχική τιμή της, σύμφωνα με τη σχέση:

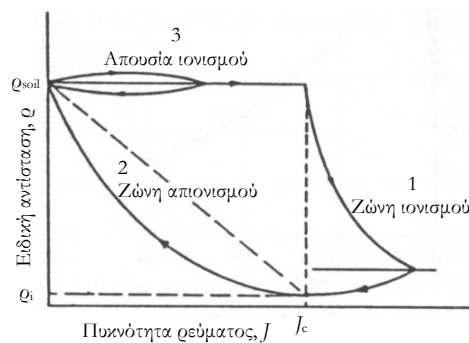
$$\varrho = \varrho_i + (\varrho_{\text{soil}} - \varrho_i) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2} \right) \left(1 - \frac{J}{J_c} \right)^2 \text{ για } r < r_{\text{ion}} \text{ και } J < J_c \quad (1.6)$$

όπου ϱ_i είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης, όταν η πυκνότητα του ρεύματος (J) είναι ίση με την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ρεύματος (J_c), τ_2 η χρονική σταθερά απιονισμού και t ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του απιονισμού.

3. Στην περιοχή 3, στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί ιονισμός, για την οποία μπορούμε να γράψουμε:

$$\varrho = \varrho_{\text{soil}} \text{ για } r > r_{\text{ion}} \text{ και } J < J_c \quad (1.7)$$

Στο **Σχήμα 1.6** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης καθώς το εγχεόμενο ρεύμα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται.



Σχήμα 1.6 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος [1.19].

Καθώς όλα τα στοιχειώδη κελύφη έχουν διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος, για μία ορισμένη τιμή ρεύματος και χρόνου, κάθε κελύφος εντός της n_{ion} πρέπει να έχει διαφορετική ειδική αντίσταση. Η συνολική αντίσταση σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται αθροίζοντας τις στοιχειώδεις αντιστάσεις όλων των κελύφων κατά τις διάφορες φάσεις του ιονισμού τους. Ένας τέτοιος υπολογισμός μπορεί να γίνει πολύ εύκολα με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Οι Almeida και Correia de Barros [1.25] τροποποίησαν το μοντέλο των Liew και Darveniza, ώστε το αναπτυσσόμενο στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ηλεκτρικό πεδίο να μην ξεπερνά την κρίσιμη τιμή και η περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο να μπορεί να θεωρηθεί ισοδυναμική. Για τις ανάγκες του μοντέλου τους, υπέθεσαν ότι, το έδαφος είναι ομογενές και ισοτροπικό και έχει σταθερή τιμή ειδικής αντίστασης, εφ' όσον το ηλεκτρικό πεδίο δεν έχει υπερβεί την κρίσιμη τιμή του. Καθώς το εγγεόμενο ηλεκτρικό ρεύμα αυξάνεται, αυξάνεται και το αναπτυσσόμενο ηλεκτρικό πεδίο στη γύρω περιοχή. Όταν, κάποια στιγμή, η ένταση του αναπτυσσόμενου ηλεκτρικού πεδίου υπερβεί την κρίσιμη ένταση, τότε εκδηλώνεται ιονισμός του εδάφους και η ειδική αντίσταση στη ζώνη ιονισμού μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (1.8):

$$\rho_k = \frac{E_o}{I} A_k \quad (1.8)$$

όπου A_k είναι η ισοδυναμική επιφάνεια του k -οστού κελύφους.

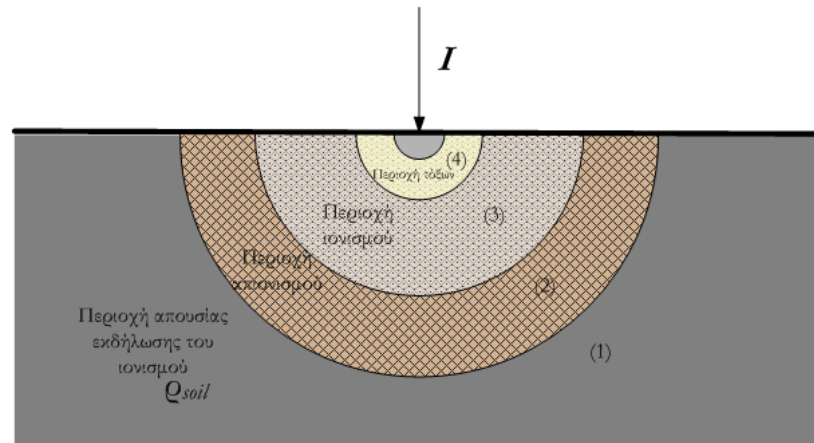
Πέραν της ζώνης ιονισμού, η ειδική αντίσταση διατηρεί την αρχική τιμή της (ρ_o). Όταν το εγγεόμενο ρεύμα, και κατά συνέπεια, και το ηλεκτρικό πεδίο μειώνονται, διαμορφώνεται η περιοχή απιονισμού, στην οποία η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (1.9).

$$\rho_k = \rho_{k_i} + (\rho_{soil} - \rho_{k_i}) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_1} \right) \left(1 - \frac{E_k}{E_o} \right)^2 \quad (1.9)$$

όπου τ_1 είναι η σταθερά απιονισμού, E_k το ηλεκτρικό πεδίο του k -οστού κελύφους και ρ_{k_i} η ειδική αντίσταση στο κελύφος αυτό.

Ο Song [1.26], κατόπιν διεξαγωγής πειραμάτων, τόσο σε εργαστηριακό, όσο και σε εξωτερικό χώρο, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του, αλλά και από το μηχανισμό διάσπασης. Επίσης,

ο ίδιος, διεξήγαγε πειράματα με σκοπό τον καθορισμό των παραγόντων, που δημιουργούν διακριτούς οχετούς διάσπασης, ώστε να καταστεί δυνατή η επαλήθευση ενός μοντέλου ικανού να περιγράψει τη μεταβατική συμπεριφορά του εδάφους υπό την επίδραση υψηλών κεραυνικών ρευμάτων [1.27].



Σχήμα 1.7 Μοντέλο Wang: (1) μη ιονισμένη περιοχή, (2) περιοχή απιονισμού, (3) περιοχή ιονισμού, (4) περιοχή τόξων [1.28].

Οι J. Wang, A.C. Liew και M. Darveniza σε εργασία τους το 2005 [1.28] εμπλούτισαν το μοντέλο του 1974 [1.19], λαμβάνοντας, πλέον, υπ' όψιν τη δημιουργία τόξων, τόσο μέσα στον όγκο του εδάφους, όσο και στην επιφάνειά του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μοντελοποιείται πληρέστερα η μη γραμμική και χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όταν υπόκειται σε κρουστικά ρεύματα, εφ' όσον μοντελοποιείται, όχι μόνο, η επέκταση της ζώνης ιονισμού, αλλά και η δημιουργία διακριτών οχετών, στους οποίους εκδηλώνονται τόξα (δηλ. διάσπαση). Χάριν απλότητας, θεώρησαν ότι, οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ημισφαιρικές. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συνολική αντίσταση μπορεί να υπολογισθεί αθροίζοντας την αντίσταση των στοιχειωδών ημισφαιρικών κελύφων πάχους dr , ήτοι με ολοκλήρωση. Στο **Σχήμα 1.7** παρουσιάζεται το ημισφαιρικό μοντέλο των Wang – Liew – Darveniza [1.28]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό [1.28], καθώς ρεύμα εγχέεται στο έδαφος, λαμβάνουν χώρα τρεις διακριτές φυσικές διαδικασίες, εξαρτώμενες από την τιμή της πυκνότητας του εγχεομένου ρεύματος, οι οποίες διαχωρίζουν το έδαφος σε τέσσερις διακριτές ζώνες: τη ζώνη, εντός της οποίας εκδηλώνονται ηλεκτρικά τόξα (διάσπαση), τη ζώνη ιονισμού, τη ζώνη απιονισμού και τη ζώνη, εντός της οποίας η ειδική αντίσταση παραμένει αμετάβλητη. Η ζώνη ιονισμού διαμορφώνεται από την κρίσιμη τιμή πυκνότητας ρεύματος ιονισμού (J_c), όπως έχει, ήδη, παρουσιασθεί στο μοντέλο των

Liew και Darveniza [1.19]. Στο νέο μοντέλο των Wang, Liew και Darveniza [1.28], εισάγεται μία νέα παράμετρος: η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος, που προκαλεί διάσπαση (J_s). Αυτή σχετίζεται με την κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος ιονισμού (J_c), μέσω της εξίσωσης:

$$J_s = a \cdot J_c \quad (1.10)$$

Η σταθερά a ορίζεται ως εξής:

- i) Καθώς το ρεύμα αυξάνεται και διαπερνά το έδαφος, η σταθερά a μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο (1.11):

$$a = a_0 (1 - \lambda e^{I^{\beta_1}}) \quad (1.11)$$

όπου I είναι το εγχεόμενο ρεύμα, a_0 είναι η αρχική τιμή του a , ενώ ο όρος β_1 περιλαμβάνεται στην ενεργειακή θεωρηση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του J_s , τόσο πιο έντονα θα είναι τα τόξα και θα εκδηλώνονται σε μεγαλύτερη περιοχή. Συνεπώς, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του εγχεομένου ρεύματος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η περιοχή εμφάνισης τόξων. Η σταθερά λ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της χρονικής στιγμής, κατά την οποία το a θα αρχίσει να μειώνεται.

Η παράμετρος a , σύμφωνα με το μοντέλο, θα πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη της μονάδας ($a > 1$). Καθώς το εγχεόμενο ρεύμα συνεχίζει να αυξάνεται, εκδηλώνονται τόξα και στην επιφάνεια του εδάφους και η παράμετρος a μειώνεται. Προκειμένου, ωστόσο, αυτή να παραμείνει μεγαλύτερη της μονάδας, η συνάρτηση, για την περιγραφή της μεταβολής του a συναρτήσει του ρεύματος δίνεται από την (1.12 (α)):

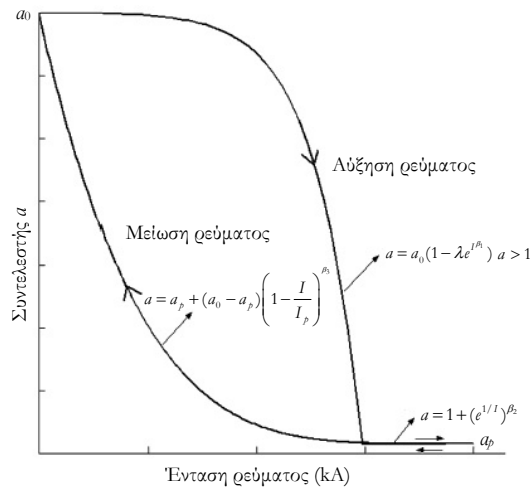
$$\begin{aligned} a &= 1 + (e^{1/I})^{\beta_2} \quad (\alpha) \\ \beta_2 &= I(t - \Delta t) \ln(a_s - 1) \quad (\beta) \end{aligned} \quad (1.12)$$

όπου a_s είναι η τιμή του a , που υπολογίζεται από τη σχέση (1.11), πριν αυτή λάβει τιμή μικρότερη της μονάδας.

- ii) Καθώς το ρεύμα μειώνεται από τη μέγιστη τιμή του, το a ανακτά την αρχική τιμή του σύμφωνα με τον τύπο:

$$a = a_p + (a_0 - a_p) \left(1 - \frac{I}{I_p} \right)^{\beta_3} \quad (1.13)$$

όπου a_p είναι η τιμή του a που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα I_p και β_3 μια σταθερά προς προσδιορισμό. Η τιμή του β_3 μεταβάλλεται, έτσι, ώστε να εξασφαλίζεται ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρεύματος, τόσο πιο αργά το a θα ανακτήσει την αρχική του τιμή (a_0). Στο **Σχήμα 1.8** παρουσιάζεται η συμπεριφορά του a , καθώς το ρεύμα μεταβάλλεται.



Σχήμα 1.8 Η μεταβολή του συντελεστή a καθώς μεταβάλλεται το εγχεόμενο ρεύμα [1.28].

Εφ' όσον έχουν ορισθεί οι παράμετροι του μοντέλου, μπορεί να γίνει μία συνοπτική περιγραφή του. Καθώς το εγχεόμενο στο έδαφος ρεύμα αυξάνει, ορίζονται οι εξής περιοχές: η περιοχή, εντός της οποίας η πυκνότητα ρεύματος είναι μικρότερη της κρίσιμης πυκνότητας που προκαλεί ιονισμό ($J < J_c$) και η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή και ίση με ρ_{soil} . Στην περίπτωση που, η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί την κρίσιμη ένταση ιονισμού, τότε μπορούν να θεωρηθούν δυο διακριτές περιοχές: η περιοχή, στην οποία εκδηλώνεται ο ιονισμός του εδάφους ($r < r_{ion}$ και $J \leq J_c < J_s$), όπου και η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τον τύπο (1.5)(β), και η περιοχή, στην οποία εκδηλώνεται διάσπαση του εδάφους ($r < r_{ion}$ και $J \geq J_s$), στην οποία αυτή (η ειδική αντίσταση του εδάφους) μηδενίζεται.

Καθώς το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται διαμορφώνονται τέσσερις διακριτές περιοχές:

Η περιοχή 1, όπου $r > r_{ion}$ και $J < J_c$, στην οποία το έδαφος δεν ιονίστηκε καθόλου και, επομένως, η τιμή της ειδικής αντίστασης παρέμεινε σταθερή (ρ_{soil}).

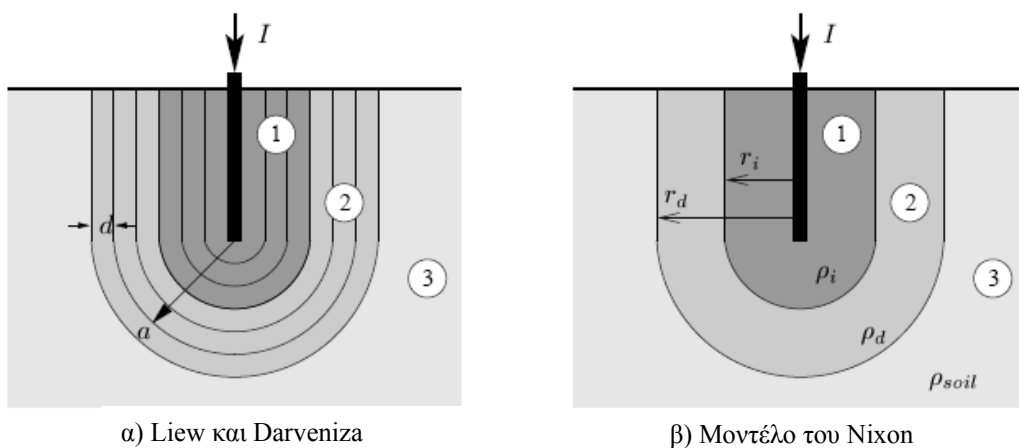
Η περιοχή 2, όπου $r < r_{ion}$ και $J < J_c$. Σε αυτήν την περιοχή η πυκνότητα του ρεύματος είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή ιονισμού και η τιμή της ειδικής αντίστασης ανακτά την αρχική τιμή της σύμφωνα με τον τύπο (1.7).

Η περιοχή 3, όπου $r < r_{ion}$ και $J_s > J \geq J_c$. Σε αυτήν την περιοχή θα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα ο ιονισμός μέχρι τη στιγμή που $J = J_c$ οπότε και θα ξεκινήσει η διαδικασία απιονισμού.

Η περιοχή 4, όπου $r < r_{ion}$ και $J \geq J_s$ στην οποία εμφανίζονται τόξα και η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μηδενική.

Μειονεκτήματα αυτού του μοντέλου αποτελούν η εισαγωγή και άλλων παραμέτρων, που θα πρέπει να προσδιοριστούν, καθιστώντας το δύσχρηστο, αλλά και η σύνδεση των παραμέτρων με τη φυσική διάσταση του φαινομένου.

Το 2006 ο K.J. Nixon [1.23] πρότεινε μία απλοποίηση του μοντέλου των Liew και Darveniza [1.19]. Το μοντέλο των Liew και Darveniza υπέθετε ότι η ζώνη ιονισμού (απιονισμού αντίστοιχα) αποτελείται από στοιχειώδη κελύφη, στα οποία η πυκνότητα ρεύματος μεταβάλλεται κάθε στιγμή, και συνεπώς για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η αντίσταση κάθε κελύφους. Ο Nixon εκτίμησε ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) μπορεί να θεωρηθεί ίδια σε όλο τον όγκο της ζώνης και μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα ρεύματος που ρέει στο εξωτερικό όριο της ζώνης. Στο **Σχήμα 1.9** μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαφορά μεταξύ του μοντέλου των Liew και Darveniza [1.19] και του μοντέλου που πρότεινε ο Nixon.

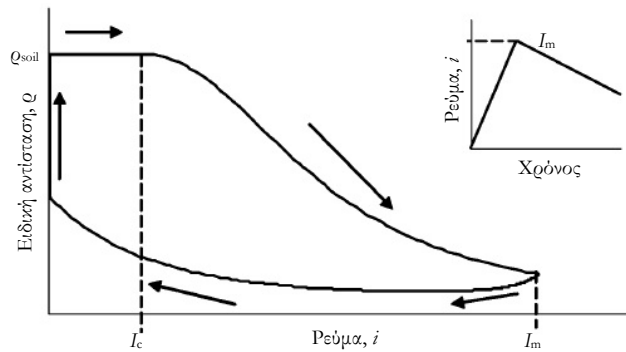


Σχήμα 1.9 Διαφορές μεταξύ του μοντέλου των Liew και Darveniza (2.7a) και του μοντέλου του Nixon (2.7b). (1) Περιοχή ιονισμού, (2) Περιοχή απιονισμού, (3) Περιοχή όπου δεν έχει λάβει χώρα ο ιονισμός [1.23].

Όπως προέκυψε από συγκρίσεις που έκανε ο Nixon με το μοντέλο των Liew και Darveniza, αλλά και από πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο του είναι αρκετά ακριβές [1.23].

1.4.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του ιονισμού έχει προταθεί από τους Sekioka et al. [1.29]. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας, εφ' όσον η ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με τις εκφορτίσεις στον αέρα. Ο Hayashi [1.30] περιγράφει την ανάπτυξη των ζωνών ιονισμού και αντιστοιχίζει τα χαρακτηριστικά τους με αυτά της διάσπασης στον αέρα. Στην εργασία [1.13] επιβεβαιώνεται η ομοιότητα μεταξύ του ιονισμού του εδάφους και της διάσπασης του ιονισμένου αέρα. Συνεπώς, ο ιονισμός του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος εκφόρτισης και μπορεί να παρομοιαστεί με το φαινόμενο τόξου που εμφανίζεται στο εσωτερικό των διακοπών. Έτσι, η αποκτηθείσα εμπειρία στη μοντελοποίηση των τόξων σε διακόπτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού στο έδαφος και τον προσδιορισμό της ζώνης ιονισμού. Στο **Σχήμα 1.10** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην περιοχή, όπου λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους.



Σχήμα 1.10 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του ρεύματος [1.29].

Με βάση την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου και την εξίσωση του Mayr [1.31] προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση (1.14):

$$\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{Q_0} (\mu i - P) \xrightarrow[\sigma=\sigma^{-1}]{\frac{\mu i - P}{Q_0} = a, \text{ σταθερά}} \sigma = \sigma_{\text{soil}} \exp(-at) \quad (1.14)$$

όπου μ είναι η τάση εκφόρτισης, i είναι το ρεύμα εκφόρτισης, P είναι οι απώλειες ισχύος (W/m), $\sigma = K \exp\left(\frac{Q}{Q_0}\right)$ είναι η αγωγιμότητα του τόξου (Sm), Q είναι η αποθηκευμένη ενέργεια (J/m), t είναι ο χρόνος (sec), K (Sm) και Q_0 (J/m) είναι σταθερές.

Η απώλεια ισχύος οφείλεται στην απώλεια θερμότητας, και γι' αυτόν το λόγο θα πρέπει να θεωρηθεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από το ηλεκτρόδιο, η θερμοκρασία στην περιοχή του ιονισμού μειώνεται και η απώλεια θερμότητας μπορεί να φθάνει και έξω από την περιοχή ιονισμού. Αυτό οδηγεί στην απώλεια ισχύος. Έτσι, η απώλεια ενέργειας στο προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη προς τον όγκο S κάθε τμήματος σύμφωνα με το μοντέλο του Cassie [1.32] για το τόξο και να περιγραφεί από την εξίσωση

$$P = \lambda S \quad (1.15)$$

όπου λ (W/m³) σταθερά.

Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, η ειδική αντίσταση του εδάφους ϱ , όταν το εγχεόμενο ρεύμα υπερβεί μια κρίσιμη τιμή I_c αρχίζει να μειώνεται. Ωστόσο, μετά τη μείωση του ρεύματος η ειδική αντίσταση δεν αρχίζει να αυξάνεται άμεσα, αλλά παρουσιάζεται μία υστέρηση λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας $E_n - N$, όπου $E_n = \int u i dt$ (1.16) (J/m) και $N = \int p dt$ (1.17) (J/m), που εξακολουθεί να είναι αποθηκευμένη σε κάθε στοιχειώδες κέλυφος. Η ειδική αντίσταση αρχίζει να αυξάνεται για να ανακτήσει την αρχική τιμή της κατά τον απιονισμό του εδάφους όταν $ui < P$.

Θεωρώντας $i = g u$ η γενική έκφραση του προτεινόμενου μοντέλου είναι:

$$\varrho = \varrho_{\text{soil}} \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \left[1 + \frac{1}{g_0 Q_0} \int i^2 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt \right]^{-1} \quad (1.18)$$

όπου ο χρόνος t είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει ιονισμός σε ένα στοιχειώδες κέλυφος και $\tau = Q_0 / P$ μια χρονική σταθερά που εκφράζει την επαναφορά της τιμής της ειδικής αντίστασης στην αρχική της τιμή (ϱ_{soil}).

Συγκρίνοντας τις προτεινόμενες εξισώσεις με αυτές των Liew και Darveniza παρατηρούμε ότι η εξίσωση (1.5)(β) για τη φάση του ιονισμού είναι ίδια με αυτήν των Liew και Darveniza, ενώ για τη φάση του απιονισμού οι εξισώσεις διαφοροποιούνται. Η σταθερά χρόνου για τη φάση του απιονισμού είναι:

$$\tau_d = \begin{cases} \tau[-\ln k - (1-k)] \approx \tau \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(1-k)^n}{n} & \text{προτεινόμενο μοντέλο} \\ \tau_2(1-k) & \text{μοντέλο Liew και Darveniza} \end{cases} \quad (1.19)$$

όπου $k = \rho_i / \rho_{\text{soil}}$, με ρ_i την τιμή της ειδικής αντίστασης, όταν εκδηλώνεται ο ιονισμός.

Για τιμές του k πολύ μικρότερες της μονάδας, παρατηρούμε ότι η σταθερά χρόνου απιονισμού των Liew και Darveniza είναι μερικές φορές μεγαλύτερη από τη σταθερά του προτεινόμενου μοντέλου για την ίδια τιμή του τ_d . Επομένως, η μεταβολή της ειδικής αντίστασης κατά τη φάση του απιονισμού βάσει του μοντέλου των Liew και Darveniza, θεωρώντας μεγαλύτερη τιμή σταθεράς απιονισμού, είναι ίδια με αυτή του προτεινόμενου μοντέλου. Πλεονέκτημα του προτεινόμενου μοντέλου είναι ότι δίδεται φυσική σημασία στα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της αντίστασης γείωσης, εξαιτίας του ιονισμού και του απιονισμού του εδάφους.

Οι Cooray et al. [1.33] εισήγαγαν ένα φυσικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων. Στο μοντέλο τους λαμβάνουν υπ' όψιν τη δημιουργία ιονισμένων οχετών εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση αυτών των οχετών, ως συνάρτηση της ροής του ρεύματος μέσω αυτών, διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν την παραγωγή θερμότητας και την απαγωγή της από τους οχετούς και την εξαρτημένη από τη θερμοκρασία αγωγιμότητα του αέρα. Φυσικά, όπως σε κάθε μοντέλο έτσι και στο συγκεκριμένο, οι συγγραφείς υιοθέτησαν, χάριν απλότητας, κάποιες προσεγγίσεις. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες:

- Οι ισοδυναμικές επιφάνειες που περιβάλλουν την εμπηγμένη ράβδο μπορούν να απεικονιστούν από κυλινδρικά τμήματα με μία ημισφαιρική απόληξη, που διατηρούνται και κατά τη διάρκεια του ιονισμού του αέρα στο χώμα.
- Η διαδικασία ιονισμού σε ένα δεδομένο στοιχειώδες κέλυφος θα αρχίσει όταν το ηλεκτρικό πεδίο σε αυτό ξεπεράσει μία ορισμένη κρίσιμη τιμή. Δεδομένου ότι κάθε κέλυφος υποτίθεται ότι οριοθετείται από τις ισοδυναμικές επιφάνειες, ο ιονισμός πραγματοποιείται σε ολόκληρο το κέλυφος ταυτόχρονα.
- Η διαδικασία διάσπασης στο χώμα είναι δυνατό να αποτελείται από μια σειρά ηλεκτρικών εκκενώσεων που πραγματοποιούνται στα κενά αέρα μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Οι μελέτες ηλεκτρικών εκκενώσεων από χιλιοστομετρική σε

εκατοστομετρική κλίμακα στον αέρα δείχνουν ότι η διαδικασία διάσπασης αποτελείται από δύο φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τη διάδοση των θυσάνων στο διάκενο και την ανακατανομή της φόρτισης στους θυσάνους, με αποτέλεσμα μια κατάσταση αίγλης, τη θέρμανση και διαστολή του θυσάνου. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου η θερμοκρασία μπορεί να ανέλθει σε μερικές χιλιάδες βαθμούς Κέλβιν. Στη δεύτερη φάση, το ρεύμα και η θερμοκρασία στον οχετό αρχίζουν να αυξάνονται, ο θερμικός ιονισμός επικρατεί και σχηματίζονται σπινθήρες που οδηγούν στην περαιτέρω θέρμανση της περιοχής εκκένωσης. Στο μοντέλο η πρώτη φάση υποτίθεται ότι πραγματοποιείται στιγμιαία δημιουργώντας ένα κανάλι εκκένωσης, με θερμοκρασία T_0 και αυξημένη αγωγιμότητα. Από αυτό το σημείο και μετά, η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας των οχετών εκκένωσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας πειραματικά στοιχεία, που αφορούν στην αγωγιμότητα του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας [1.34], [1.35], και υποθέτοντας ότι η ενέργεια, που εκλύεται στους οχετούς, χρησιμοποιείται εξ ολοκλήρου για τη θέρμανσή τους. Στην πραγματικότητα, ένα μέρος αυτής της ενέργειας διασπά μόρια αζώτου και οξυγόνου, ένα μέρος προκαλεί ιονισμό και ένα άλλο μέρος διεγείρει τα μόρια του αέρα.

- Ο όγκος του θερμαινόμενου αέρα, εντός του οποίου εκδηλώνεται ιονισμός, είναι ποσοστό F του συνολικού όγκου του εδάφους και παραμένει σταθερός, καθώς η εκφόρτιση εξελίσσεται ακτινωτά γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση απαιτεί την αύξηση του αριθμού των οχετών εκκένωσης, καθώς η εκκένωση απομακρύνεται από τον αγωγό. Αυτό δεν απέχει από την πραγματικότητα, επειδή, γενικά, οι ηλεκτρικές εκκενώσεις διακλαδίζονται και επεκτείνονται πλευρικά γύρω από τα ηλεκτρόδια υψηλής τάσεως. Εν τούτοις, το μέγεθος F δεν χρειάζεται να παραμείνει σταθερό, καθώς η εκκένωση αναπτύσσεται. Η ροή ρεύματος μέσω αυτού του θερμανθέντος όγκου του αέρα θα συμβάλει στην έκλυση περισσότερης ενέργειας προκαλώντας περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας του αέρα. Τέλος, έχει γίνει η υπόθεση ότι η έκλυση ενέργειας από τους οχετούς στον περιβάλλοντα χώρο είναι ανάλογη προς τον θερμανθέντα όγκο αέρα και τη θερμοκρασία του (έστω S η σταθερά αναλογίας). Εάν οι διάμετροι των οχετών εκκένωσης είναι ίδιες σε ολόκληρη την περιοχή ιονισμού, τότε ο ιονισμένος όγκος αερίου είναι ανάλογος προς την επιφάνεια των οχετών. Αυτό επικυρώνει την

υπόθεση, επειδή η έκλυση θερμότητας είναι ανάλογη προς την επιφάνεια των οχετών εκκένωσης. Στην πραγματικότητα, η έκλυση θερμότητας από τους οχετούς είναι ανάλογη προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των καναλιών εκκένωσης και των μορίων του εδάφους με τα οποία έρχεται σε επαφή ο οχετός. Επομένως, η υπόθεση ισχύει μόνο εάν η θερμότητα, που απορροφάται από το χώμα, απάγεται γρήγορα από την περιοχή επαφής, έτσι, ώστε η θερμοκρασία του εδάφους στα σημεία επαφής να παραμένει μικρότερη από τη θερμοκρασία των οχετών. Στο μοντέλο αυτό, τα T_0 , F και S είναι οι παράμετροι, που πρέπει να καθοριστούν συγκρίνοντας τα πειραματικά στοιχεία με τις προσομοιώσεις.

Το προτεινόμενο μοντέλο περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια:

Έστω ένας όγκος πάχους dr που βρίσκεται σε μια ακτινωτή απόσταση r από τη θαμμένη ράβδο. Η πυκνότητα του ρεύματος που περνά μέσω αυτού του στοιχείου σε χρόνο t δίνεται από τη σχέση (1.20):

$$J(t) = \frac{I(t)}{2\pi r l + 2\pi r^2} \quad (1.20)$$

όπου $I(t)$ είναι το ρεύμα που εισέρχεται στη ράβδο, l το μήκος της ράβδου.

Υποτίθεται ότι, ο ιονισμός του αέρα σ' αυτό το στοιχείο, θα αρχίσει όταν η πυκνότητα του ρεύματος, που περνά μέσω αυτού, υπερβεί μια κρίσιμη τιμή (J_c). Αυτή δίνεται από τη σχέση (1.3).

Για μια δεδομένη τιμή κορυφής του εισερχομένου ρεύματος I_p , η κρίσιμη ακτίνα r_{ion} , πέρα από την οποία δεν πραγματοποιείται ιονισμός του χώματος υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης (1.21):

$$J_c = \frac{I_p}{2\pi r_{ion} l + 2\pi r_{ion}^2} \quad (1.21)$$

Τότε, η αντίσταση των στοιχείων του όγκου, που βρίσκονται πέραν της κρίσιμης ακτίνας, δίνεται από την (1.22):

$$dR_s = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi r l + 2\pi r^2)} \quad \text{για } r \geq r_{ion} \quad (1.22)$$

όπου σ_s η αγωγιμότητα του χώματος.

Για έναν στοιχειώδη όγκο, ο οποίος βρίσκεται εντός του στερεού (κυλίνδρου με ημισφαιρική απόληξη), που ορίζει η κρίσιμη ακτίνα, ο ιονισμός του αέρα αρχίζει τη χρονική στιγμή t_0 , κατά την οποία, η πυκνότητα του ρεύματος του στοιχειώδους όγκου

ξεπερνά την κρίσιμη τιμή J_c . Για τις τιμές $t \leq t_0$, η αντίσταση του στοιχείου δίνεται από την (1.23):

$$dR(t < t_0) = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad \text{για } r \leq r_{\text{ion}} \quad (1.23)$$

Όταν εκδηλωθεί ιονισμός (τη χρονική στιγμή $t=t_0$), η θερμοκρασία ενός όγκου αέρα μεγέθους ίσου με F , που αποτελεί ποσοστό του στοιχειώδους όγκου $(2\pi rl + 2\pi r^2) \cdot dr$ αυξάνεται σε κάποια τιμή T_0 . Κατά συνέπεια, η αντίσταση του στοιχείου για $t=t_0$ θα δίνεται από τη σχέση (1.24):

$$dR(t = t_0) = \frac{dr}{[\sigma_s + \sigma_a(T_0) \cdot F(T_0 / T_a)] \cdot (2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad (1.24)$$

όπου σ_a είναι η αγωγιμότητα του αέρα, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και T_a η θερμοκρασία του όγκου του αέρα, προ του ιονισμού.

Η μεταβολή της αγωγιμότητας του αέρα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας προκύπτει από τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία [1.34], [1.35]. Στην παραπάνω εξίσωση, θεωρείται ότι, το F είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα και ο θερμός αέρας βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση.

Στο χρονικό διάστημα $t=t_0$ μέχρι $t=t_0+dt$ εκλύεται στο στοιχειώδη όγκο θερμότητα Joule, που δίνεται από τη σχέση (1.25):

$$dH = \frac{I^2(t_0) dr dt}{[\sigma_s + \sigma_a(T_0) \cdot F(T_0 / T_a)] \cdot (2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad (1.25)$$

ενώ η ενέργεια που εκλύεται από τον όγκο του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο δίνεται από τη σχέση (1.26),

$$dU = SF(T_0 / T_a) \cdot (2\pi rl + 2\pi r^2) T_0 dr dt \quad (1.26)$$

Επομένως, η αύξηση της θερμοκρασίας του όγκου του αέρα, στο χρονικό διάστημα dt , υπολογίζεται από τη σχέση (1.27):

$$dT = \frac{dH - dU}{F(T_0 / T_a) \cdot (2\pi rl + 2\pi r^2) dr \delta(T) C_p} \quad (1.27)$$

όπου $\delta(T)$ είναι η πυκνότητα του αέρα σε θερμοκρασία T και πίεση ίση με την ατμοσφαιρική και C_p η θερμοχωρητικότητα του αέρα σε σταθερή πίεση.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί, ώστε να εκτιμηθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του όγκου του αέρα ως συνάρτηση του χρόνου και να υπολογιστεί, στη συνέχεια, η χρονική μεταβολή της αντίστασης του όγκου του αέρα. Η ίδια διαδικασία

εφαρμόζεται σε κάθε στοιχειώδη όγκο από $r=n$ (όπου n είναι η ακτίνα του αγωγού) μέχρι $r=\infty$. Συνεπώς, η συνολική αντίσταση του ηλεκτροδίου συναρτήσει του χρόνου, $R(t)$, μπορεί έτσι να ληφθεί από τη σχέση (1.28):

$$R(t) = \int_{r_0}^{r_{\text{ion}}} dR(t)dr + \int_{r_{\text{ion}}}^{\infty} dR_s dr \quad (1.28)$$

Οι Ala et al. [1.36], αποδεχόμενοι ότι, το παραπάνω μοντέλο περιγράφει με φυσικούς όρους τον ιονισμό του εδάφους, ανέπτυξαν μεθοδολογία κατάλληλη για την περιγραφή του φαινομένου, βασιζόμενοι στη γνώση της μεταβατικής αντίστασης, δίχως να είναι απαραίτητη, ούτε η γνώση της γεωμετρίας της περιοχής ιονισμού, ούτε η έντασή της. Στο μοντέλο, που υλοποιούν με τη χρήση Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (Finite Difference Time Domain, FDTD), το σύστημα γείωσης και το έδαφος χωρίζονται σε στοιχειώδη τμήματα. Η αγωγιμότητα του εδάφους θεωρείται χρονικά μεταβαλλόμενη και απαρτίζεται από δύο παράγοντες: την αγωγιμότητα του εγκλωβισμένου, μεταξύ των κόκκων του χώματος, αέρα και την αγωγιμότητα των συστατικών του εδάφους. Η αγωγιμότητα του αέρα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, ενώ, εκείνη των κόκκων του χώματος, διαμορφώνεται από την υγρασία, που θεωρείται αμετάβλητη. Κατά συνέπεια, το ρεύμα, που διαρρέει το έδαφος, μπορεί να ακολουθήσει δύο διακριτές διαδρομές και η συνισταμένη αγωγιμότητα υπολογίζεται από τη σχέση (1.29).

$$\sigma(T) = \{\sigma_s \Delta V_s + \sigma_A(T) \Delta V_A(T/T_a)\} / (\Delta V_s + \Delta V_A) \quad (1.29)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του αέρα, σ_s η τιμή της αγωγιμότητας σε μόνιμη κατάσταση, ΔV_s ο στοιχειώδης όγκος του χώματος, $\sigma_A(T)$ η αγωγιμότητα του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας, ΔV_A ο στοιχειώδης όγκος αέρα και T_a η θερμοκρασία του αέρα, πριν εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού ($T_a=25^\circ\text{C}$).

Αρχικά, υπολογίζεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Στην περίπτωση που είναι μικρότερη από την κρίσιμη ένταση ιονισμού, το πρόγραμμα προχωρά στον υπολογισμό της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αν, όμως, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβαίνει την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού, τότε υπολογίζεται η παραγόμενη από τα τόξα ενέργεια. Ένα μέρος αυτής θερμαίνει τον όγκο του παγιδευμένου αέρα και η υπόλοιπη διαχέεται στον όγκο του εδάφους. Δεδομένης της θερμοκρασίας του αέρα και με τη χρήση πινάκων θερμοκρασίας - αγωγιμότητας, διαθέσιμων στη βιβλιογραφία, προσδιορίζεται η νέα τιμή της ειδικής αγωγιμότητας του

αέρα. Ακολουθώντας, γίνεται υπολογισμός της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται προκειμένου να εκτιμηθεί η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όταν σε αυτό εγχέεται κρουστικό ρεύμα.

1.5 Συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης κατά την εκδήλωση ιονισμού του εδάφους

Η συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, που διεγείρονται από υψηλής τιμής κρουστικά ρεύματα (όπως τα κεραυνικά ή τα οφειλόμενα σε σφάλματα), διαφέρει, ουσιαστικά, από εκείνη, που παρατηρείται για ρεύματα μικρών συχνοτήτων και χαμηλής τιμής και έχει αποτελέσει πεδίο εκτεταμένης έρευνας από πλήθος ερευνητών. Το κρίσιμο μέγεθος, που καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης σε κεραυνικά ρεύματα ή ρεύματα σφάλματος, είναι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση, ή, αλλιώς, κρουστική αντίσταση του συστήματος γείωσης. Πολλοί ερευνητές [1.37]-[1.45] έχουν μελετήσει τη μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης, πραγματοποιώντας πειράματα με την έγχυση κρουστικών ρευμάτων και τάσεων, τόσο σε συγκεντρωμένα, όσο και σε εκτεταμένα συστήματα γειώσεων. Από τα πειράματα έχει παρατηρηθεί ότι, η κρουστική αντίσταση γείωσης λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από την τιμή της αντίστασης γείωσης μόνιμου καταστάσεως. Από την άλλη, σε πλήθος πειραμάτων, που έχουν διεξαχθεί σε συγκεντρωμένα συστήματα γείωσης, τα οποία θα παρουσιασθούν στη συνέχεια (π.χ. κατακόρυφες ράβδους και οριζόντιες με μήκος $< 3\text{m}$), έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο η μεταβατική σύνθετη αντίσταση γείωσης να εμφανίζει τιμές μικρότερες από τις τιμές της μόνιμης κατάστασης. Η συμπεριφορά αυτή έχει αποδοθεί στον ιονισμό και στη διάσπαση του εδάφους.

Αναλυτικότερα, το 1928 ο Towne [1.46] πραγματοποίησε εγχύσεις κρουστικών ρευμάτων σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια. Διαπίστωσε ότι, η αντίσταση γείωσης σε κρουστικό ρεύμα είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση γείωσης στη μόνιμη κατάσταση. Μάλιστα, όσο αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, τόσο μειώνεται η τιμή της μεταβατικής αντίστασης. Ο συγγραφέας απέδωσε τούτο στη μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, την οποία απέδωσε στη γεφύρωση, μέσω τόξων, της υψηλής αντίστασης, που εμφανίζονται μεταξύ των κόκκων αυτού. Το συμπέρασμα αυτό

αποτελέσει το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα των χαρακτηριστικών των συστημάτων γείωσης, καθώς και του εδάφους, υπό μεταβατικές συνθήκες.

Ο Bellaschi σε εργασία του [1.21] συνέκρινε τη συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης σε μόνιμη κατάσταση με τη συμπεριφορά τους σε μεταβατική κατάσταση. Προς τούτο, διεξήγαγε πειράματα σε τρεις διαφορετικές εποχές του χρόνου, υπολόγισε τον λόγο της κρουστικής αντίστασης προς την αντίσταση γείωσης στη μόνιμη κατάσταση και παρατήρησε τη μείωση της μεταβατικής τιμής της αντίστασης, όσο το επιβαλλόμενο κρουστικό ρεύμα αυξάνεται. Απέδωσε αυτή τη συμπεριφορά στη βραχυκύκλωση μέσω τόξων της αντίστασης επαφής μεταξύ των αγώγιμων συστατικών του εδάφους στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Έτσι, καθώς η εφαρμοζόμενη στο ηλεκτρόδιο γείωσης τάση αυξάνεται, η τιμή της αντίστασής του παραμένει σταθερή μέχρις ότου η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Τότε εμφανίζονται εκκενώσεις και η αντίσταση μειώνεται.

Η μοντελοποίηση της επίδρασης των φαινομένων ιονισμού και διάσπασης στη διαμόρφωση της αντίστασης γείωσης, έχει απασχολήσει τους ερευνητές, οι οποίοι προτείνουν τα μοντέλα που αναλύονται στη συνέχεια.

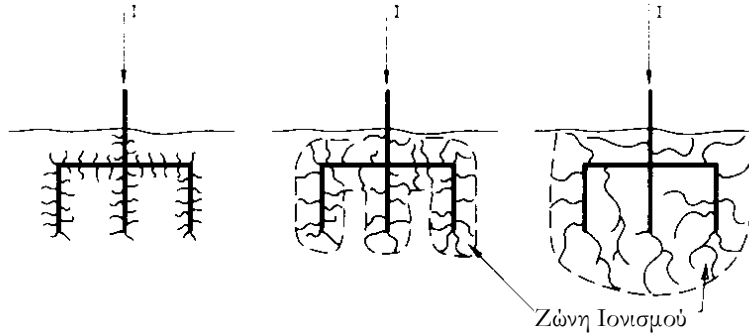
Το 1958 ο Korsuncev [1.47] εφήρμοσε τη μέθοδο ομοιότητας (similitude method) για τον υπολογισμό των μεταβατικών χαρακτηριστικών διαφορών ηλεκτροδίων. Ο Korsuncev υπέθεσε ότι, η ζώνη εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο και η κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_0) ορίζει την περιοχή εντός της οποίας η ειδική αντίσταση θεωρείται μηδενική και αγνόησε φαινόμενα της χρονικής υστέρησης. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.11**, καθώς το εγγεόμενο κρουστικό ρεύμα αυξάνεται, η ζώνη ιονισμού γύρω από το σύστημα γείωσης συνεχώς επεκτείνεται. Τελικά όλο το σύστημα γείωσης βρίσκεται εντός του ιονισμένου όγκου του εδάφους και το σχήμα του ηλεκτροδίου παύει να παίζει ρόλο. Έτσι, ο Korsuncev εισήγαγε την έννοια της χαρακτηριστικής διάστασης (δ), η οποία ορίζεται ως η απόσταση του γεωμετρικού μέσου του ηλεκτροδίου από το πιο απομακρυσμένο σημείο του.

Σύμφωνα με το μοντέλο του Korsuncev, η σύνθετη μεταβατική αντίσταση ενός ηλεκτροδίου γείωσης μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια των αδιάστατων παραμέτρων που δίδονται από τους τύπους (1.30) και (1.31):

$$\pi_1 = \frac{R_i \cdot S}{\varrho} \quad (1.30)$$

$$\pi_2 = \frac{\varrho \cdot I}{S^2 \cdot E_0} \quad (1.31)$$

όπου R_i είναι η κρουστική αντίσταση γείωσης (Ω), S η χαρακτηριστική διάσταση του ηλεκτροδίου (m), ϱ η ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm), I το εγχεόμενο ρεύμα (A) και E_0 η κρίσιμη ένταση (V/m).



Σχήμα 1.11 Ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού γύρω από ηλεκτρόδιο [1.17].

Η παράμετρος π_1 ορίζεται ως η κανονικοποιημένη σύνθετη αντίσταση, ή ως η σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα ειδικής αντίστασης, για μοναδιαίο μήκος ηλεκτροδίου και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου. Η παράμετρος π_2 περιγράφει την αναλογία του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου προς την E_0 και είναι ανεξάρτητη της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου.

Στο **Σχήμα 1.12** παρουσιάζονται σε διάγραμμα τα ζεύγη τιμών των παραμέτρων π_1 και π_2 για διάφορους τύπους ηλεκτροδίων, που εξετάστηκαν σε εργασίες των Korsuncen και Popolansky [1.48].

Για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, όταν αυτή διαρρέεται από κεραυνικό ρεύμα, υπολογίζονται, αρχικά, οι τιμές των παραμέτρων π_1 και π_2 , με τη βοήθεια των εξισώσεων (1.30) και (1.31). Στη συνέχεια, δεδομένου του π_2 , υπολογίζεται μία νέα τιμή για την παράμετρο π_1 , η οποία προκύπτει από τις σχέσεις (1.32) έως και (1.35)[1.49].

$$\pi_1 = 0,2965 \cdot \pi_2^{-0,2867} \text{ για } \pi_2 \leq 5 \quad (1.32)$$

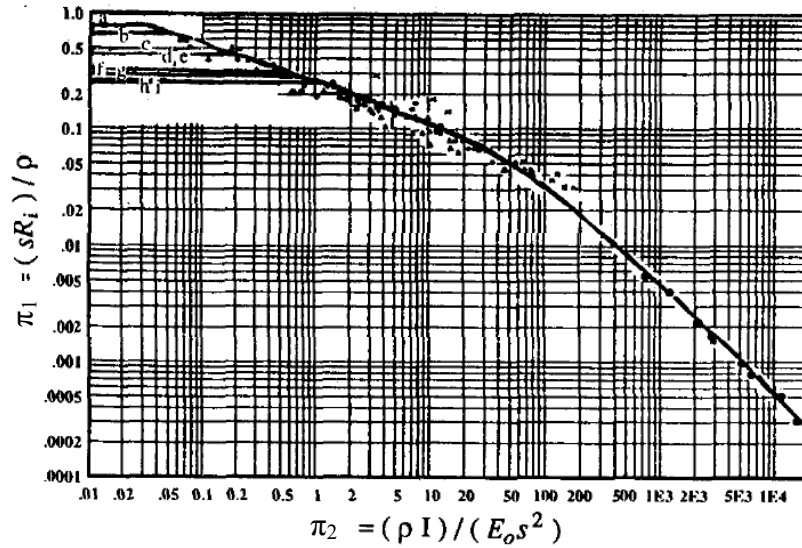
$$\pi_1 = 0,4602 \cdot \pi_2^{-0,6009} \text{ για } 5 < \pi_2 \leq 50 \quad (1.33)$$

$$\pi_1 = 0,9534 \cdot \pi_2^{-0,7536} \text{ για } 50 < \pi_2 \leq 500 \quad (1.34)$$

$$\pi_1 = 1,8862 \cdot \pi_2^{-0,8693} \text{ για } \pi_2 > 500 \quad (1.35)$$

Αν η νέα τιμή της π_1 είναι μικρότερη από την προκύπτουσα από την (1.30), τότε η τιμή της κρουστικής αντίστασης (R_i) προκύπτει, από τον τύπο (1.30). Διαφορετικά, η

αντίσταση γείωσης παραμένει ίση με την αρχική. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε τιμή του επιβαλλόμενου κρουστικού ρεύματος.



Σχήμα 1.12 Μεταβολή της π_1 συναρτήσει της π_2 [1.51].

Οι Chisholm και Janischewskyj [1.50], χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των Korsunecv και Popolansky και εισάγοντας το μέγεθος S^2/A , όπου S είναι η χαρακτηριστική διάσταση του ηλεκτροδίου και A είναι η συνολική επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το χώμα ($A=2\pi rS$ για κατακόρυφο ηλεκτρόδιο και $A=2\pi S^2$ για ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο), παρήλλαξαν τις εξισώσεις του Rudenberg [1.51] για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, καταλήγοντας στις ακόλουθες σχέσεις:

$$\pi_{1_{rod}} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4\pi S^2}{A} = 0,4028 + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{S^2}{A} \quad (1.36)$$

$$\pi_{1_{hemisphere}} = \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \ln e = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{2\pi S^2 e}{4} = 0,4517 + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{S^2}{A} \quad (1.37)$$

Διεπίστωσαν, μάλιστα, ότι, το σφάλμα υπολογισμού του π_1 για κατακόρυφο ηλεκτρόδιο, εάν, αντί του τύπου (1.36), χρησιμοποιηθεί ο (1.37), είναι μόλις της τάξεως του 6%. Για τον λόγο αυτόν, στην εργασία τους χρησιμοποίησαν τον (1.37).

Υπολογίζοντας τη χαρακτηριστική διάσταση του ηλεκτροδίου και το εμβαδόν της επιφάνειάς του είναι δυνατό να υπολογισθεί η τιμή του π_1 . Με εφαρμογή, στη συνέχεια, του τύπου (1.37) υπολογίζεται η αντίσταση R_i . Στον **Πίνακα 1.2** παρουσιάζονται οι τιμές για το π_1 όπως έχουν προκύψει από την εφαρμογή των τύπων που έχουν προταθεί από τους Korsunecv, Rudenberg και Chisholm και Janischewskyj.

Διάταξη Ηλεκτροδίων	s^2/A	π_1 [Korsuncev]	π_1 [Rudenberg]	π_1 (Εξίσωση 1.36)
Οριζόντιο ηλεκτρόδιο μήκους 30m	477		1,76	1,43
Οριζόντιο ηλεκτρόδιο μήκους 10m	174		1,23	1,27
Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο μήκους 2,5m	40	0,78	0,99	1,04
Ταινία μήκους 3,5m	17	0,68	0,90	0,91
2 ηλεκτρόδια σε απόσταση 0,5m	2,5	0,50	0,68	0,60
3 ηλεκτρόδια σε απόσταση 0,5m	1,63	0,45	0,57	0,53
Δακτύλιος 7m	1,27	0,32	0,40	0,49
4 ηλεκτρόδια σε απόσταση 0,5m	1,19		0,48	0,48
Crowfoot	0,51	0,45		0,34
Δίσκος διαμέτρου 10m	0,40		0,25	0,30
Επιφανειακός Δίσκος Διαμέτρου 10m	0,32		0,25	0,27
Δακτύλιος διαμέτρου 7m με 3 κατακόρυφα ηλεκτρόδια	0,25	0,29		0,23
Δακτύλιος διαμέτρου 9m με 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια	0,22	0,26		0,22
Δακτύλιος διαμέτρου 12m με 6 κατακόρυφα ηλεκτρόδια	0,22	0,26		0,22
Ημισφαίριο διαμέτρου 10m	0,16		0,16	0,16

Πίνακας 1.2 Αρχικά χαρακτηριστικά αντίστασης ηλεκτροδίου γείωσης (όλες οι ράβδοι έχουν ακτίνα 0,01m, μήκος 2,5m, ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι 0,5m) [1.50].

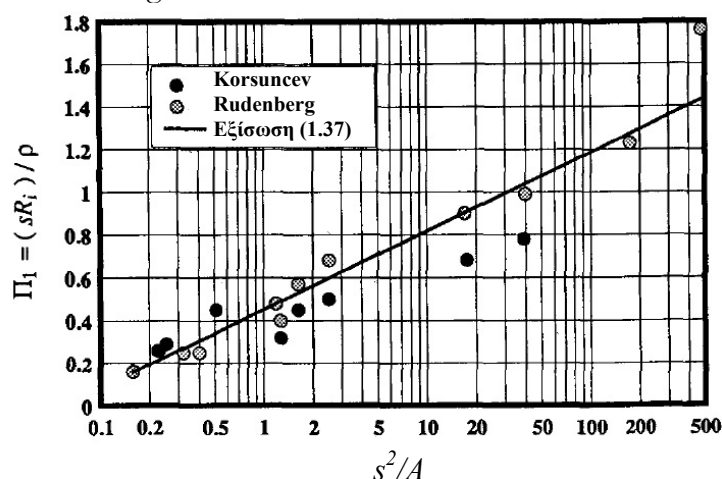
Στο **Σχήμα 1.13** παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του π_1 συναρτήσει του λογαρίθμου του λόγου S^2/A . Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα μοντέλα των Korsuncev και Rudenberg, προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις:

$$\pi_1 = 0,410 + 0,091 \ln \frac{S^2}{A} \quad (1.38)$$

για τις τιμές του Korsuncev και

$$\pi_1 = 0,439 + 0,18 \ln \frac{S^2}{A} \quad (1.39)$$

για τις τιμές του Rudenberg.



Σχήμα 1.13 Κοινό γράφημα των δεδομένων των Korsuncev και Rudenberg μαζί με την ευθεία (1.37) [1.50].

Όταν λάβει χώρα ιονισμός, το σχήμα του ηλεκτροδίου παύει να παίζει ρόλο και όλα τα ηλεκτρόδια συμπεριφέρονται ως ημισφαίρια. Η κρίσιμη ένταση ιονισμού στο μοντέλο

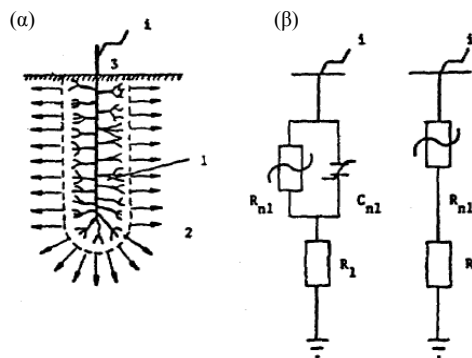
Korsuncev αντιστοιχεί στη μέση ένταση του πεδίου εντός της (ημισφαιρικής γεωμετρίας) ιονισμένης περιοχής.

Η εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στην καμπύλη των π_1 - π_2 (**Σχήμα 1.12**), για τιμές του οριζόντιου άξονα από 0,3 έως 10m, δίνει την παρακάτω σχέση, που υπακούει σε νόμο δύναμης [1.50]:

$$\pi_1 = 0,2631 \cdot \pi_2^{-0,3082} \quad (1.40)$$

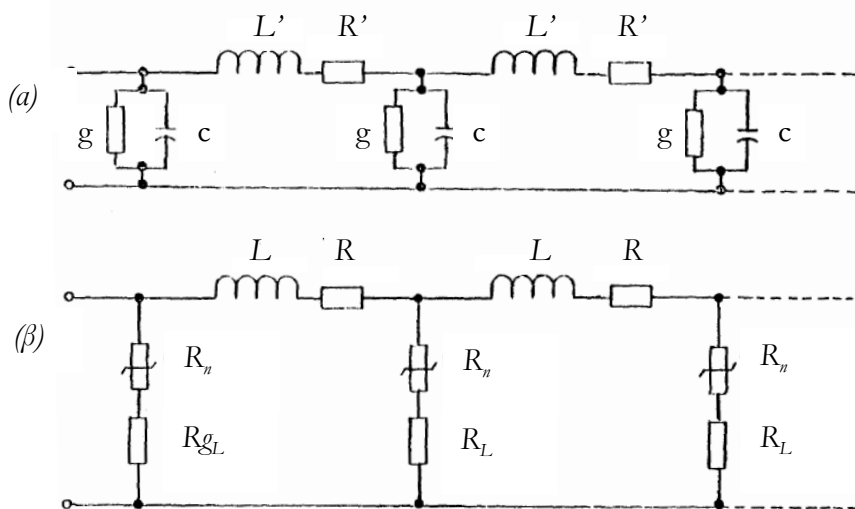
Συνεπώς, για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, όταν το σύστημα διαρρέεται από κρουστικό ρεύμα, ακολουθείται διαδικασία όμοια με αυτή των εξισώσεων του Korsuncev.

Οι Kosztaluk et al. [1.52] πρότειναν ένα αναλογικό μοντέλο υπολογισμού της κρουστικής αντίστασης γείωσης, που λαμβάνει υπ' όψιν του, τόσο τον θερμικό μηχανισμό όσο και τον μηχανισμό ιονισμού. Βασική υπόθεση του μοντέλου είναι ότι, το μήκος του ηλεκτροδίου (l_{rod}) είναι πολύ μικρότερο του γινομένου της ταχύτητας διάδοσης (θ) του ρεύματος επί το χρόνο κορυφής της κυματομορφής του ρεύματος (T_{cr}) ($l_{rod} \leq \theta T_{cr}$). Έτσι, η κρουστική αντίσταση αναπαρίσταται από ένα μη γραμμικό στοιχείο Z_n , που περιγράφει τη ζώνη όπου εκδηλώνονται τόξα, και ένα γραμμικό στοιχείο R_1 εν σειρά με το Z_n , το οποίο προσομοιώνει τον ηλεκτρολυτικό μηχανισμό. Στο **Σχήμα 1.14** παρουσιάζονται οι ζώνες και τα ισοδύναμα κυκλώματά τους. Το μη γραμμικό στοιχείο Z_n μοντελοποιείται από μία μη γραμμική αντίσταση R , παράλληλα με έναν μη γραμμικό πυκνωτή C_n (η συμβολή του οποίου μπορεί να αμεληθεί).



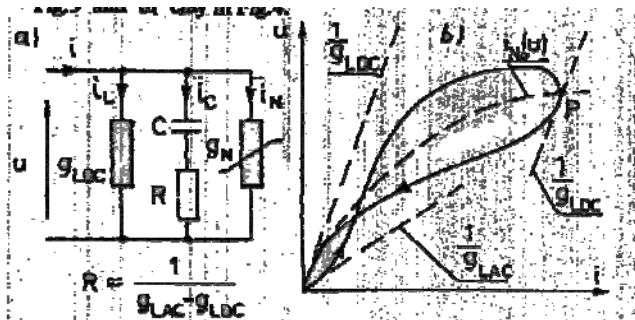
Σχήμα 1.14 Σχηματική αναπαράσταση της ζώνης εκδήλωσης τόξων (1) και της ζώνης εκδήλωσης του θερμικού μηχανισμού (2) ενός απλού ηλεκτροδίου (α) και κυκλωματικά ισοδύναμα αυτών (β) [1.52].

Στην περίπτωση ενός ηλεκτροδίου, με μήκος μεγαλύτερο των 15m, γίνεται αναπαράσταση του ηλεκτροδίου με τη βοήθεια κατανεμημένων παραμέτρων, που αντιστοιχούν στην ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή (L'), αντίσταση του ηλεκτροδίου (R'), ενώ τα g και c αντιστοιχούν στην ανά μονάδα μήκους αγωγιμότητα και χωρητικότητα του εδάφους. Στο **Σχήμα 1.15** παρουσιάζεται η κυκλωματική προσέγγιση του ηλεκτροδίου ως γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους.

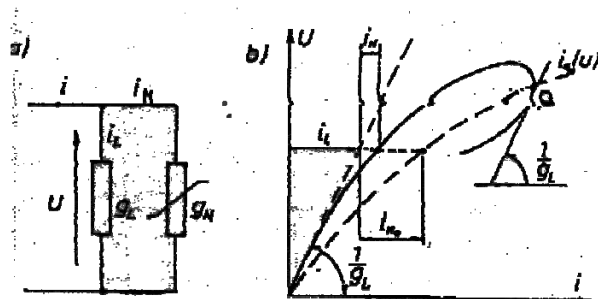


Σχήμα 1.15 Προσέγγιση ηλεκτροδίου ως γραμμής μεγάλου μήκους, με κατανεμημένες σταθερές (α) και το ισοδύναμο κύκλωμα (β) [1.52].

Οι Loboda και Pochanke [1.24] και Kalat et al [1.53], αξιοποιώντας αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων σε δείγμα άμμου και πηλού, προχώρησαν στη μοντελοποίηση της μεταβατικής αντίστασης και πρότειναν τα κυκλωματικά μοντέλα, που παρουσιάζονται στα ακόλουθα **Σχήματα 1.16** και **1.17**. Θα πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί, ότι, τα εν λόγω μοντέλα δεν αποσκοπούν στη φυσική περιγραφή του φαινομένου της διάσπασης, αλλά στην κυκλωματική μοντελοποίηση των πειραματικών καμπυλών.



Σχήμα 1.16 Κυκλωματικό ισοδύναμο και $V-I$ χαρακτηριστική δείγματος άμμου [1.53].



Σχήμα 1.17 Κυκλωματικό ισοδύναμο και $V-I$ χαρακτηριστική δείγματος αργίλου [1.53].

Οι Velazquez και Mukhedkar [1.54] πρότειναν ένα γενικευμένο μοντέλο για τη μεταβατική ανάλυση συστημάτων γείωσης. Για την επιβεβαίωση, μάλιστα, της αξιοπιστίας του μοντέλου τους, συνέκριναν τα αποτελέσματα που αυτό έδωσε, με πειραματικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών [1.19], [1.55], [1.56], [1.57], [1.58].

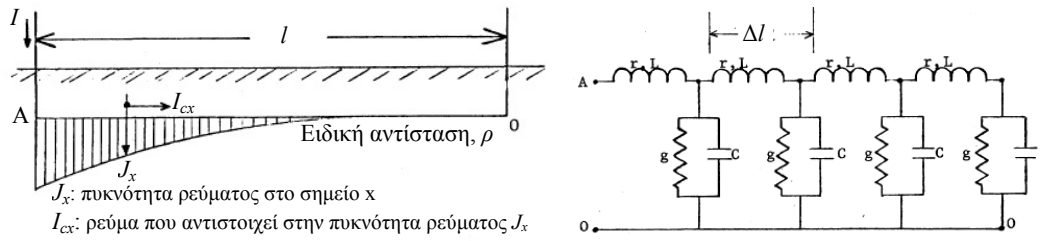
Για την ανάπτυξη του μοντέλου τους υπέθεσαν, αρχικά, ότι, η αγωγιμότητα, η διαπερατότητα και η επιτρεπτότητα του εδάφους παρέμεναν σταθερές. Υιοθετώντας το μοντέλο των ομοιόμορφα κατανεμημένων παραμέτρων (**Σχήμα 1.18**), προσδιόρισαν τις μαθηματικές εκφράσεις του ρεύματος και της τάσης, συναρτήσει του χρόνου και, συνεπώς, τη μαθηματική έκφραση της κρουστικής αντίστασης οριζόντιου αγωγού γείωσης μήκους l . Στη συνέχεια, μοντελοποίησαν τον αγωγό γείωσης, με μικρά τμήματα συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Κάθε τμήμα, με κατάλληλο ορισμό των οριακών συνθηκών, μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητο. Με την υπόθεση ότι, η ζώνη εκκινώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από τον αγωγό, μοντελοποίησαν το φαινόμενο της διάσπασης. Η περιοχή, εντός της οποίας εκδηλώνεται η διάσπαση του εδάφους, υπολογίζεται βάσει του τύπου (1.41):

$$r_c = \frac{I\rho}{2\pi lE_b} \quad (1.41)$$

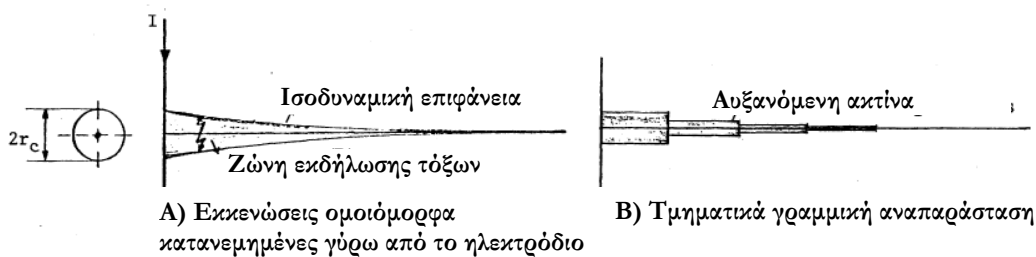
όπου I είναι το εγχεόμενο ρεύμα, ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους, l το μήκος του ηλεκτροδίου και E_b η κρίσιμη ένταση διάσπασης.

Στις περιπτώσεις ηλεκτροδίων μεγάλου μήκους, το ρεύμα δεν έχει την ίδια τιμή καθ' όλο το μήκος αυτών. Η ακτίνα της περιοχής, εντός της οποίας εκδηλώνονται τόξα, επομένως, πρέπει να υπολογισθεί χωριστά, για κάθε ένα τμήμα, κατά μήκος του οποίου η τιμή του ρεύματος είναι η ίδια (**Σχήμα 1.19**). Συνεπώς, για κάθε τμήμα, υπολογίζονται οι τιμές των παραμέτρων, όπως αυτές διαμορφώνονται από την τιμή της ακτίνας, εντός της οποίας εκδηλώνονται τόξα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, καθίσταται

δυνατή η εκτίμηση της κρουστικής αντίστασης ηλεκτροδίου μεγάλου μήκους.



Σχήμα 1.18 Αναπαράσταση του οριζώντιου αγωγού γείωσης ως γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους [1.54].



Σχήμα 1.19 Απλοποιημένο μοντέλο ηλεκτροδίου με αυξημένες διαστάσεις, υποθέτοντας ισοδυναμική επιφάνεια (Α) και τμηματικά γραμμική αναπαράσταση (Β) [1.54].

Η Oettle [1.17], το 1988, πρότεινε μία καμπύλη, με τη βοήθεια της οποίας, είναι δυνατό να εκτιμηθεί η μεταβατική σύνθετη αντίσταση ηλεκτροδίων γείωσης. Η καμπύλη αυτή αποτελεί επέκταση της καμπύλης, που είχε προταθεί από τον Korsuncev. Για την εκτίμηση αυτής της καμπύλης, η E_o θεωρήθηκε, απλώς, ως ένας παράγοντας, που δεν σχετίζεται με τη διάσπαση ή το είδος του εδάφους, και, έτσι, η τιμή της λήφθηκε αυθαίρετα ίση με 1000kV/m, για όλα τα είδη εδάφους, εφ' όσον δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ της E_o και της χαρακτηριστικής διάστασης των ηλεκτροδίων ή της τιμής του εγχεόμενου ρεύματος. Η μεταβατική αντίσταση υπολογίσθηκε από τον τύπο (1.42):

$$Z = \frac{V_{t=6\mu s}}{I_{t=6\mu s}} \quad (1.42)$$

όπου $V_{t=6\mu s}$ είναι η τάση τη χρονική στιγμή 6μs, $I_{t=6\mu s}$ η ένταση ρεύματος τη χρονική στιγμή 6μs.

Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα των Berger [1.55], Bellaschi [1.21], Vainer [1.59], Liew [1.19], Oettle [1.60]. Επιπλέον, η Oettle εισήγαγε

έναν διαφορετικό ορισμό της χαρακτηριστικής διάστασης του ηλεκτροδίου. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτόν, η χαρακτηριστική διάσταση b ορίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

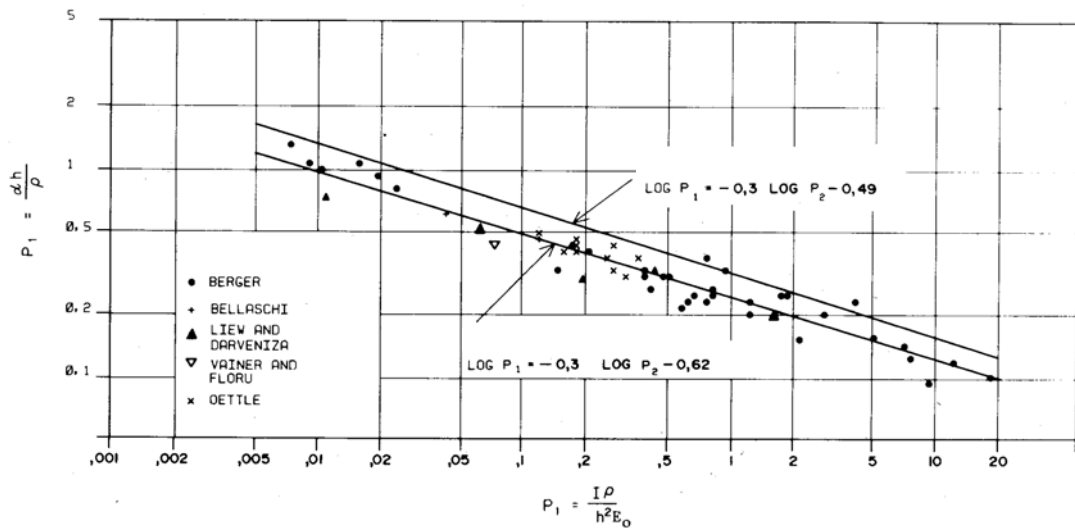
$$b = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + d^2} \quad (1.43)$$

όπου h_1 είναι η μεγαλύτερη οριζόντια διάσταση του συστήματος ηλεκτροδίων, h_2 η μεγαλύτερη διάσταση, που είναι κάθετη της μεγαλύτερης οριζόντιας διάστασης του συστήματος ηλεκτροδίων, d είναι το βάθος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων.

Με τη χρήση όλων αυτών των δεδομένων προτάθηκε η ακόλουθη καμπύλη

$$\log P_1 = -0,3 \cdot \log P_2 - 0,62 \quad (1.44)$$

η οποία παρουσιάζεται γραφικά, μαζί με τα δεδομένα, στο **Σχήμα 1.20**. Οι παράμετροι P_1 και P_2 προκύπτουν από τους τύπους (1.30) και (1.31), με αντικατάσταση του S από το b . Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και μια δεύτερη καμπύλη, πιο πάνω από την καμπύλη της εξίσωσης (1.44), η οποία έχει επιλεγεί έτσι, ώστε, για το 95% των δεδομένων, οι πραγματικές τιμές P_1 να είναι μικρότερες από τις εκτιμώμενες.



Σχήμα 1.20 Μεταβολή της P_1 συναρτήσει της P_2 [1.17].

Ερευνητική ομάδα υπό τον Weck [1.61], αφού μελέτησε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, διατύπωσε την άποψη ότι, η αντίσταση ενός συστήματος γείωσης δεν μπορεί να υπολογίζεται μόνο από έναν τύπο. Έτσι, στην περίπτωση των ημισφαιρικών ηλεκτροδίων, η τιμή της αντίστασης γείωσης διατηρεί την τιμή μονίμου καταστάσεως, μέχρι την έναρξη του ιονισμού. Μετά την έναρξη του ιονισμού η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα προς την τετραγωνική ρίζα του εγχεόμενου ρεύματος. Στην περίπτωση των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, μετά την έναρξη του ιονισμού, η αντίσταση

μεταβάλλεται ανάλογα προς τον λογάριθμο του ρεύματος. Αποδεχόμενοι, μάλιστα, οι ερευνητές την άποψη ότι, υπό υψηλά κρουστικά ρεύματα, το σχήμα του ηλεκτροδίου παύει να διαδραματίζει ρόλο στην τιμή της αντίστασης, συνάγεται ότι, η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα προς το τετράγωνο του ρεύματος. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον τύπο (1.45):

$$R_i = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_o}}} \quad (1.45)$$

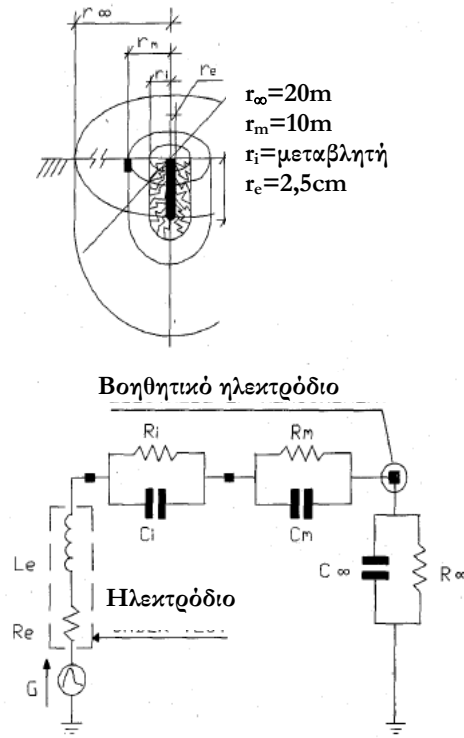
όπου R_o είναι η αντίσταση μονίμου καταστάσεως, I το επιβαλλόμενο ρεύμα και $I_o = \frac{E_o \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot R_o^2}$ με $E_o = 400 \text{ kV/m}$.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι, ο παραπάνω τύπος βρίσκει εφαρμογή σε συγκεντρωμένα συστήματα γειώσεων. Στην περίπτωση, που υπάρχουν οριζόντιοι αγωγοί, τότε αυτοί χωρίζονται σε μικρότερα τμήματα, σε καθένα από τα οποία εφαρμόζεται η παραπάνω σχέση, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους χρόνους διάδοσης των κυμάτων.

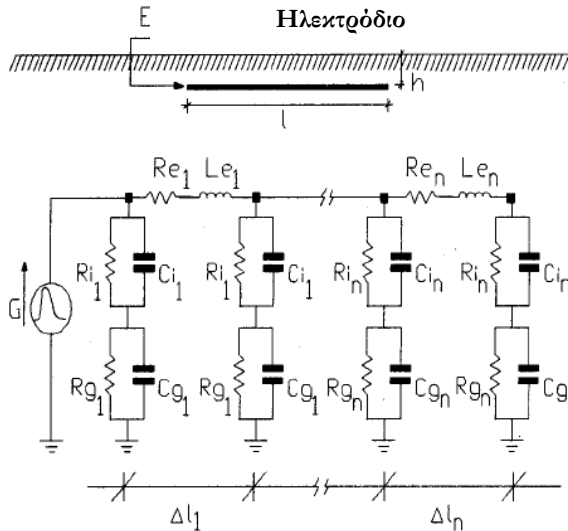
Οι Geri et al [1.38] έλαβαν υπ' όψιν την εκδήλωση μη γραμμικών φαινομένων, τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων, καθώς και του εδάφους, και ανέπτυξαν μοντέλα μεταβατικής ανάλυσης κατακορύφου και οριζόντιου ηλεκτροδίου γείωσης. Στο **Σχήμα 1.21** παρουσιάζεται η γεννήτρια κρουστικού ρεύματος (G), το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του κατακορύφου ηλεκτροδίου, αποτελούμενο από τα στοιχεία R_e και L_e . R_i και C_i είναι οι παράμετροι που περιγράφουν τον ιονισμό, R_m και C_m οι του εδάφους, ενώ R_∞ και C_∞ είναι οι παράμετροι του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, οι τιμές των χωρητικότητων και των αυτεπαγωγών μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίζονται από τους τύπους (1.46) έως και (1.50), που παρατίθενται δεξιά του **Σχήματος 1.21**. Αντιστοίχως, στο **Σχήμα 1.22** παρουσιάζεται η κυκλωματική αναπαράσταση οριζόντιου ηλεκτροδίου και οι τύποι υπολογισμού των παραμέτρων του κυκλώματος (σχέσεις (1.51) έως και (1.54)).

Στα **Σχήματα 1.21** και **1.22** και στις συνοδές αυτών εξισώσεις, ρ_e είναι η ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου, η ρ_i λαμβάνεται ίση με την ειδική αντίσταση του υλικού του ηλεκτροδίου, ρ_g είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους, η οποία θεωρείται σταθερή

και η ακτίνα r_i δίδεται από τους τύπους (1.50) ή (1.54), κατά περίπτωση, I_g, I_{gi} είναι το εγγερόμενο ρεύμα, στο κατακόρυφο ηλεκτρόδιο, στην είσοδο του i -οστού ισοδυναμού στοιχειώδους π-δικτυώματος αναπαράστασης του οριζοντίου ηλεκτροδίου, κατά περίπτωση, ενώ η κρίσιμη ένταση E_o υπολογίζεται από τον τύπο $E_o = 241 \cdot \rho_g^{0,215}$ (E_o σε kV/m, για ρ_g σε Ωm).



Σχήμα 1.21 Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο και το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης [1.38].

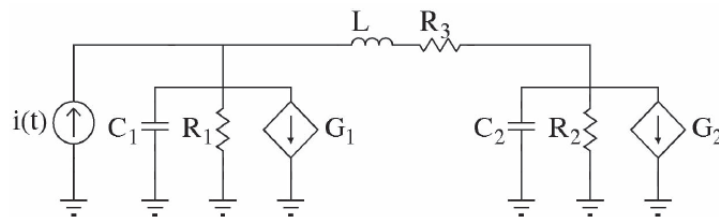


Σχήμα 1.22 Οριζόντιο ηλεκτρόδιο και κυκλωματική προσέγγιση αναπαράστασής του [1.38].

Ο Geri [1.62] πρότεινε ένα μαθηματικό μοντέλο, βασιζόμενο σε κυκλωματική προσέγγιση, για την εκτίμηση της κρουστικής συμπεριφοράς ενός συστήματος γείωσης.

Το μοντέλο αυτό μπορεί να προσομοιώσει με επιτυχία τη συμπεριφορά σύνθετων συστημάτων γείωσης, όταν λαμβάνουν χώρα μη γραμμικά φαινόμενα ιονισμού του εδάφους. Η προσομοίωση του ιονισμού έγινε θεωρώντας ότι, η ζώνη ιονισμού εκτείνεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο, είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και εντός αυτής η ειδική αντίσταση του εδάφους λαμβάνει τιμή ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου (ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων). Η αξιοπιστία του παραπάνω μοντέλου ελέγχθηκε, μέσω της σύγκρισής του με αποτελέσματα πειραμάτων, για ρεύματα διέγερσης με μικρό και μεγάλο πλάτος.

Οι Gatta et al. [1.63] εισήγαγαν, στο κυκλωματικό μοντέλο προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης πυλώνων, τον ιονισμό, τοποθετώντας πηγές ρεύματος παράλληλα προς τις αντιστάσεις R_1 και R_2 , όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.23**.



Σχήμα 1.23 Ισοδύναμο π κύκλωμα του συστήματος γείωσης [1.63].

Μειονέκτημα της προσέγγισής τους αποτελεί το γεγονός ότι, οι τιμές των παραμέτρων του κυκλώματος δεν έχουν κάποια φυσική σημασία, αλλά έχουν επιλεγεί στοχευμένα, ώστε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης να επαληθεύει τα πειραματικά δεδομένα.

Οι Hoki και Mita [1.64] πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση για την περιγραφή της αντίστασης γείωσης:

$$R(i) = \frac{R_o}{1 + A \cdot (R_o \cdot i)^B} \quad (1.55)$$

όπου i είναι η στιγμιαία τιμή του ρεύματος και R_o η αντίσταση μονίμου καταστάσεως, ενώ A και B είναι σταθερές προς προσδιορισμό.

Μειονέκτημα, ωστόσο, της παραπάνω έκφρασης της αντίστασης είναι το γεγονός ότι, φαινόμενα υστέρησης δεν λαμβάνονται υπ' όψιν. Για το λόγο αυτό, οι Sekioka et al. [1.65] πρότειναν ένα μη γραμμικό μοντέλο, στο οποίο συσχετίζεται η μεταβολή της αντίστασης με την ενέργεια που εκλύεται στο σύστημα γείωσης. Προς επίτευξη τούτου, εκμεταλλεύθηκαν την ομοιότητα της συμπεριφοράς της αντίστασης γείωσης με τη

συμπεριφορά του καθοδικού αλεξιεραιώνου και τροποποίησαν το μοντέλο των Kojima et al. [1.65]. Συνεπώς, η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από το εγγερόμενο ρεύμα και την ενέργεια που εκλύεται και δίνεται από τη σχέση (1.56):

$$R(i, En) = R(i) \cdot f(En) \quad (1.56)$$

όπου $f(En)$ είναι συνάρτηση της ενέργειας, εκφρασμένη σε Joule, τέτοια, ώστε $f(0)=1$, $R(i)$, δε, είναι η τιμή της αντίστασης, όπως υπολογίζεται από τον τύπο (1.55).

Σύμφωνα με το μοντέλο μεταβολής της αντίστασης συναρτήσει της ενέργειας, η $R(i)$ εξαρτάται από τη διαδικασία του ιονισμού του αέρα, μεταξύ των κόκκων του εδάφους και η $f(En)$ εξαρτάται από το ποσοστό της θερμότητας (i^2R), που εκλύεται κατά τη διαδικασία. Μια έκφραση για την $f(En)$, στην οποία κατέληξαν οι ως άνω ερευνητές, είναι η (1.57):

$$f(En) = \frac{1}{1 + 2,5 \cdot 10^{-5} En} \quad (1.57)$$

όπου $En = \int u \cdot idt$.

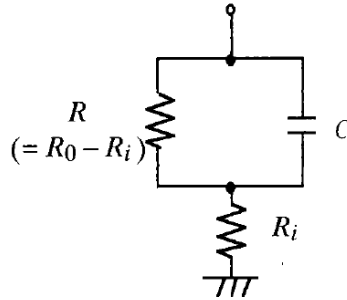
Οι Cidras et al., σε άρθρο τους [1.66], περιγράφουν τον αλγόριθμο, που ανέπτυξαν για την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, στην οποία συμπεριέλαβαν και το φαινόμενο του ιονισμού. Η μέθοδος επιλύει, στο πεδίο της συχνότητας, το σύστημα ως ηλεκτρικό δίκτυο και, στη συνέχεια, η απόκριση λαμβάνεται με εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier. Για να είναι δυνατή η προσομοίωση του ιονισμού, μεταβάλλεται η ακτίνα των αγωγών, όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά την κρίσιμη τιμή.

Οι Yasuda et. al [1.67], βασιζόμενοι σε πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν από μετρήσεις της αντίστασης γείωσης ενός πυλώνα 500kV, πρότειναν τη σχέση (1.58) για την περιγραφή της αντίστασης της γείωσης πυλώνα, σχέση, η οποία αποτελεί παραλλαγή της σχέσης, που είχε προταθεί από τον Weck.

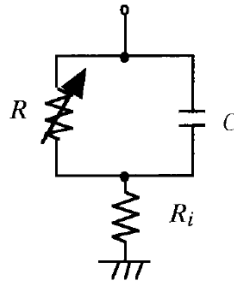
$$R(I) = \begin{cases} R_o & \text{για } I < I_o \\ \frac{R_o}{\sqrt{\frac{I}{I_o}}} & \text{για } I \geq I_o \end{cases} \quad (1.58)$$

Το I_o , εν προκειμένω, προσδιορίζεται από το νόμο του Ohm δεδομένης της κρίσιμης έντασης ιονισμού και της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Ωστόσο, η μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, πέραν του ωμικού χαρακτήρα, παρουσιάζει χωρητικό και επαγωγικό χαρακτήρα, στην περίπτωση, μάλιστα, εδαφών με πολύ υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης, ο χωρητικός χαρακτήρας είναι πολύ έντονος. Γι' αυτόν τον λόγο, οι συγγραφείς πρότειναν το χωρητικό μοντέλο, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.24** και προχώρησαν στη σύνθεση του συνδυαστικού μοντέλου, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.25**.



Σχήμα 1.24 Μοντέλο ωμικής-χωρητικής συμπεριφοράς [1.67].



Σχήμα 1.25 Συνδυαστικό μοντέλο [1.67].

Οι Asaoka et al. [1.68] τροποποίησαν τη μέθοδο υπολογισμού της μεταβατικής αντίστασης συναρτήσει του ρεύματος, που είχε προταθεί από τον Weck, έτσι, ώστε, να μπορεί να εφαρμοσθεί σε κατακόρυφα ηλεκτροδία γείωσης, και πρότειναν τον τύπο (1.59):

$$\frac{R}{R_o} = \frac{\ln \left(1 + \frac{2}{-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{k+1}{k^2} \frac{I}{I_c}}} \right)}{\ln(1+k)} \quad (1.59)$$

με $k = \frac{l}{r_o}$, όπου l είναι το μήκος του ηλεκτροδίου, r_o η ακτίνα του ηλεκτροδίου, R_o η αντίσταση μονίμου καταστάσεως, I το επιβαλλόμενο ρεύμα και I_c το κρίσιμο επίπεδο ρεύματος από το οποίο ξεκινά ο ιονισμός.

Δεδομένου ότι, σε υψηλές συχνότητες ή/και σε εδάφη με υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης, το σύστημα γείωσης (έδαφος και ηλεκτροδία γείωσης) συμπεριφέρεται ως διηλεκτρικό με απώλειες, η μεταβατική συμπεριφορά του επηρεάζεται, κατά κύριο λόγο, από τη συχνότητα και τις ηλεκτρικές εκκινώσεις, που εκδηλώνονται στο έδαφος.

Ο Chowdhury [1.69], προκειμένου να μοντελοποιήσει τη μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης, προτείνει την σχέση (1.60):

$$Z = k \cdot I_p^a \quad (1.60)$$

όπου Z είναι η μεταβατική αντίσταση, I_p το μέγιστο του κρουστικού ρεύματος, τα k, a παράμετροι προς προσδιορισμό, που επηρεάζονται από το σύστημα γείωσης και το είδος του εδάφους, για δεδομένη κυματομορφή ρεύματος.

Οι Nor et al. [1.70] διεξήγαγαν πειράματα σε δείγμα χώματος με στόχο την ποσοτικοποίηση της επίδρασης του ιονισμού στην τιμή της μεταβατικής τιμής της αντίστασης του ηλεκτροδίου. Παρατήρησαν ότι, για υψηλές τιμές της τάσης, οι χρόνοι μετώπου της τάσης και του ρεύματος ήταν αρκετά μικροί και, μάλιστα, η κυματομορφή του ρεύματος παρουσίαζε δύο μέγιστες τιμές. Αυτή η δεύτερη κορυφή της κυματομορφής του ρεύματος εμφανίζεται με κάποια χρονική καθυστέρηση και αποτελεί ένδειξη ιονισμού του εδάφους. Από την κυματομορφή του ρεύματος είναι δυνατό να υπολογιστούν δύο χρόνοι t_1 και t_2 , που αντιστοιχούν στη στιγμή έναρξης του ιονισμού και στο δεύτερο μέγιστο του ρεύματος. Καθώς, μάλιστα, αυξάνεται η αγωγιμότητα του χώματος και η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, οι χρόνοι αυτοί μειώνονται. Βάσει των ανωτέρω, όρισαν δύο τιμές αντίστασης: μία τιμή που περιγράφει την αντίσταση, πριν την εκδήλωση του ιονισμού ($R_1(i)$) και μία, που αντιστοιχεί στη μεταβατική αντίσταση, όταν έχει συμβεί ο ιονισμός και, μάλιστα, έχει λάβει τη μέγιστη έκτασή του ($R_2(i)$). Οι τιμές αυτές περιγράφονται από τους τύπους:

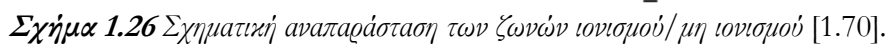
$$R_1 = \frac{V_{I_{peak1}}}{I_{peak1}} \quad (1.61)$$

$$R_2 = \frac{V_{I_{peak2}}}{I_{peak2}} \quad (1.62)$$

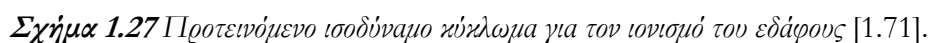
όπου I_{peak1} είναι η πρώτη και I_{peak2} η δεύτερη μέγιστη τιμή του ρεύματος, $V_{I_{peak1}}$ η τάση, τη στιγμή που συμβαίνει το πρώτο και $V_{I_{peak2}}$ η τάση, τη στιγμή που συμβαίνει το δεύτερο μέγιστο του ρεύματος.

$$R(i) = R_1(i) \left(\frac{R_2(i)}{R_1(i)} + e^{-\left(\frac{t}{\tau_i}\right)} \right) \quad (1.63)$$

όπου R_1 είναι η αντίσταση πριν τον ιονισμό και R_2 η τιμή της μετά τον ιονισμό.



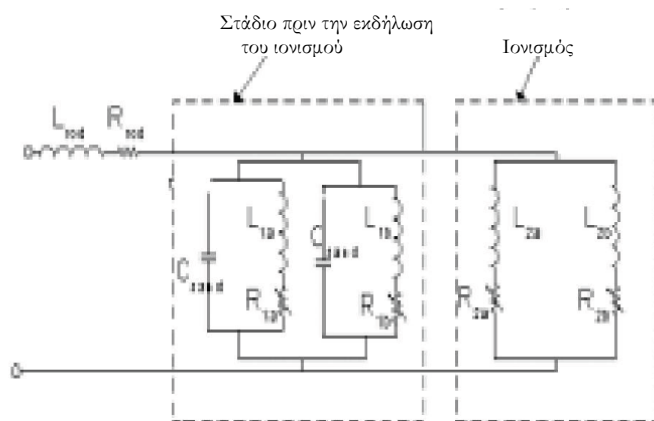
A circuit diagram showing a rod with inductance L_{rod} and resistance R_{rod} connected to a voltage source $\mathcal{E}$ and a switch S . The rod is represented by a series combination of an inductor and a resistor.



40 Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους

παράλληλη σύνδεση πυκνωτή - αντίστασης και ο άλλος η εν σειρά σύνδεση αυτεπαγωγής - αντίστασης. Στον κλάδο πυκνωτή - αντίστασης, η αντίσταση (R_1) είναι εκείνη που παρουσιάζει πολύ έντονη μη γραμμική χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος. Ειδικά όσον αφορά στη μεταβλητή αντίσταση R_1 , κατά τον ιονισμό, το ρεύμα, που τη διαρρέει είναι εκείνο που κυριαρχεί και, έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι, υποβαθμίζεται ο ρόλος του πυκνωτή.

Η Nor [1.72], εκμεταλλευόμενη την ομοιότητα της διαδικασίας ιονισμού του εδάφους με τη συμπεριφορά των καθοδικών αλεξικεράνων, πρότεινε ένα βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους, που περιλαμβάνει αυτεπαγωγές και στα δύο παράλληλα δίκτυα, έτσι, ώστε, να μοντελοποιηθεί η χρονική υστέρηση μεταξύ τάσης και ρεύματος. Το νέο αυτό βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο **Σχήμα 1.28**, όπου για την προσομοίωση του σταδίου πριν την εκδήλωση του ιονισμού, υψηλές τιμές αυτεπαγωγών (L_{1b} και L_{2b}) τοποθετούνται εν σειρά με τις R_{1b} και R_{2b} . Για την αναπαράσταση του ιονισμού, κατά τη διάρκεια του οποίου το ρεύμα αυξάνεται, χρησιμοποιούνται αυτεπαγωγές (L_{1a} και L_{2a}) μικρών τιμών, εν σειρά με τις R_{1a} και R_{2a} . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, οι τιμές R_{1a} , R_{2a} , R_{1b} , R_{2b} προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 1.28 Βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους [1.72].

Ολοκληρώνοντας την παρούσα παράγραφο, θα πρέπει να επισημάνουμε τις προσπάθειες που γίνονται τα τελευταία χρόνια, τόσο από το Πανεπιστήμιο Πατρων [1.73], [1.74], όσο και από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης [1.75], για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης πυλώνων γραμμών μεταφοράς, υποσταθμών και ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπ' όψιν τον ιονισμό του εδάφους.

1.6 Προσδιορισμός των κρίσιμων τιμών της πεδιακής έντασης ιονισμού και διάσπασης του εδάφους

Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η κρίσιμη ένταση ιονισμού και η κρίσιμη ένταση διάσπασης αποτελούν τα θεμελιώδη μεγέθη για την περιγραφή των αντιστοιχών φαινομένων. Για τον λόγο αυτόν, οι επιστήμονες έχουν καταβάλει και συνεχίζουν να καταβάλουν προσπάθειες για τον προσδιορισμό τους, ιδίως της αριθμητικής τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Ο προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι άμεσα συσχετισμένος με τον προσδιορισμό των αντιστοιχών κρίσιμων τιμών τάσης. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι μεθοδολογίες, που κατά καιρούς έχουν εφαρμοσθεί, για την επίτευξη αυτού του στόχου.

Προκειμένου να προσδιορισθεί το επίπεδο της τάσης, πάνω από την οποία εκδηλώνεται ιονισμός του εδάφους, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορες προσεγγίσεις.

Οι Bellaschi et al. [1.22] και Armstrong [1.76] υπολόγισαν τον λόγο της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (=πηλίκο της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος) προς την αντίσταση μονίμου καταστάσεως (R_0) και, στη συνέχεια, χάραξαν, για διαφορετικά επίπεδα τάσης, τη γραφική του λόγου προς τον λογάριθμο του ρεύματος. Στη χαρακτηριστική, που προέκυπτε, προσδιόρισαν το σημείο, στο οποίο, ο λόγος της κρουστικής αντίστασης προς την αντίσταση μονίμου καταστάσεως ισούται με τη μονάδα και έλαβαν την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος ως την κρίσιμη τιμή πάνω από την οποία εκδηλώνεται ο ιονισμός. Εν συνεχεία, δεδομένης της διάταξης των ηλεκτροδίων και χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, προσδιόρισαν την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_0).

Στη μη γραμμικότητα της καμπύλης I-V βασίζεται και ο Πετρόπουλος [1.18], ο οποίος επισημαίνει ότι, πάνω από ένα κρίσιμο επίπεδο επιβαλλόμενης τάσης, που αντιστοιχεί στην κρίσιμη τάση ιονισμού (V_0), η καμπύλες I-V παύουν να είναι γραμμικές. Για να προσδιορίσει τη V_0 , βασίσθηκε στην παρατήρηση ότι, η εκδήλωση φαινομένων ιονισμού και διάσπασης προκαλεί μείωση της μεταβατικής τιμής της αντίστασης. Έτσι, προχώρησε στη χάραξη των καμπυλών αντίστασης, συναρτήσε της τάσης, για διάφορα επίπεδα τάσης δοκιμής. Εν συνεχεία, σε κάθε μια καμπύλη, αναφερόμενη σ' ένα επίπεδο τάσης, προσδιόρισε την ελάχιστη τιμή της αντίστασης και συνένωσε μεταξύ τους τα σημεία ελαχίστου. Η κρίσιμη τάση καθορίζεται από το σημείο, στο οποίο η

καμπύλη αυτή (των ελαχίστων) τέμνει την καμπύλη της αντίστασης μόνιμης κατάστασης. Επιπλέον, έχοντας ολοκληρώσει πειράματα υπό κρουστική τάση θετικής και αρνητικής πολικότητας, διαπίστωσε ότι, η τιμή της κρίσιμης τάσης έναρξης του ιονισμού υπό θετική πολικότητα είναι χαμηλότερη από την κρίσιμη τάση έναρξης του ιονισμού υπό αρνητική πολικότητα, καθώς και ότι, η κρουστική αντίσταση υπό θετική πολικότητα λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες απ' ό,τι υπό αρνητική πολικότητα.

Οι Loboda και Scuka [1.77], για να προσδιορίσουν την κρίσιμη τάση ιονισμού, βασίσθηκαν στην παρατήρηση ότι, η εκδήλωση μη γραμμικών φαινομένων σε δείγματα χρώματος εκδηλώνεται ως χρονική υστέρηση μεταξύ της μέγιστης τιμής της κυματομορφής του ρεύματος και της μέγιστης τιμής της κυματομορφής της τάσης ($\Delta t = t_d - t_U$). Η τάση, πέραν της οποίας το μέγιστο της τάσης και του ρεύματος δεν ταυτοχρονίζονται λαμβάνεται ως η κρίσιμη τάση έναρξης του ιονισμού και, για τον υπολογισμό της αντίστοιχης έντασης, της E_0 προσδιορίζεται η πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, οπότε, με εφαρμογή του νόμου του Ohm, προκύπτει η τιμή της έντασης.

Οι Armstrong [1.76], Nor [1.78], Lima and Visacro [1.79] και Lee et al. [1.80] καθόρισαν την τάση έναρξης του ιονισμού ως το επίπεδο της τάσης πάνω από το οποίο η χαρακτηριστική της τάσης συναρτήσεως του ρεύματος σχηματίζει '8'. Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της E_0 οι ερευνητές Lima and Visacro χρησιμοποίησαν τον ακόλουθο τύπο:

$$E_0 = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{r_e}{r}} \quad (1.64)$$

όπου $r = r_e^{(1-Z_i/Z_0)} \cdot r_i^{(Z_i/Z_0)}$, r_e η εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου, r_i ακτίνα του ηλεκτροδίου, Z_0 η αντίσταση προ της εκδήλωσης του ιονισμού και Z_i η τιμή της σύνθετης αντίστασης, όταν εκδηλωθεί ιονισμός, που υπολογίζεται από τις μετρούμενες τιμές της τάσης και του ρεύματος.

Οι Lee et al. [1.80] και Nor et al. [1.81] παρατήρησαν, επίσης, ότι, όταν εκδηλώνεται ιονισμός, τότε εμφανίζονται στην κυματομορφή του ρεύματος δύο κορυφές και θεώρησαν ως V_0 την ελάχιστη τάση, που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη κυματομορφή του ρεύματος.

Μία διαφορετική προσέγγιση ακολούθησαν οι Mousa [1.13], Loboda and Scuka [1.77] και Lima [1.79] προκειμένου να προσδιορίσουν την κρίσιμη ένταση ιονισμού: η προσέγγισή τους βασίζεται στην παρατήρηση ότι, όταν εκδηλώνονται τα φαινόμενα του ιονισμού και διάσπασης, η σύνθετη αντίσταση του συστήματος γείωσης μειώνεται. Έχοντας κανείς στη διάθεσή του παλμογράφηματα τάσης και ρεύματος, είναι δυνατό να υπολογίσει τη χρονικά μεταβαλλόμενη σύνθετη αντίσταση και να εντοπίσει την ελάχιστη τιμή, που αυτή μπορεί να λάβει. Δεδομένης της τιμής αυτής και της γεωμετρίας του συστήματος γείωσης, καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της ακτίνας της περιοχής ιονισμού, και, στη συνέχεια, με εφαρμογή του νόμου του Ohm, προσδιορίζεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Οι Loboda και Pochanke [1.24] υπολόγισαν την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού με χρήση των τύπων (1.65) και (1.66):

$$R = \frac{U}{I_m} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_e}{r_{ion}} \quad (1.65)$$

$$E_o = \frac{I_m \rho}{2\pi l r_{ion}} \quad (1.66)$$

όπου I_m είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος, ρ η τιμή της ειδικής αντίστασης, l το μήκος του ηλεκτροδίου, r_e είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου και r_{ion} η νοητή ακτίνα της περιοχής, εντός της οποίας εκδηλώνονται τόξα.

Ο Geri [1.61], στηριζόμενος σε αποτελέσματα πειραμάτων που είχε διεξάγει με χρήση κατακορύφου ηλεκτροδίου τοποθετημένου σε ομοιογενές έδαφος, υπολόγισε την κρίσιμη ένταση E_o εφαρμόζοντας 3 μεθόδους. Πριν αναλυθούν οι τρεις μέθοδοι, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, λόγω των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου εδάφους, στο οποίο ήταν τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο, η μέγιστη τιμή της τάσης και του ρεύματος συνέπιπταν χρονικά και, επομένως, η μεταβατική αντίσταση υπολογίσθηκε από το λόγο της μέγιστης τάσης προς την τιμή του ρεύματος τη χρονική στιγμή της μέγιστης τάσης.

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης με την πρώτη μέθοδο μετρήθηκε η αντίσταση μονίμου καταστάσεως (R) και υπολογίσθηκε η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ). Με τη βοήθεια του τύπου (1.67) υπολογίζεται η ακτίνα ιονισμού:

$$r_{ion} = \frac{l}{e^{\left(2R, \pi \frac{l}{\rho}\right)} - 1} \quad (1.67)$$

όπου l είναι το μήκος του ηλεκτροδίου, R_i η μεταβατική αντίσταση γείωσης και ϱ η ειδική αντίσταση του εδάφους.

Τότε, η κρίσιμη ένταση δίνεται από τον τύπο:

$$E_o = \varrho \frac{I}{2\pi r_{\text{ion}} l + 2\pi r_{\text{ion}}^2} \quad (1.68)$$

όπου I είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος και r_{ion} η ακτίνα ιονισμού.

Μειονέκτημα, ωστόσο, αυτής της μεθόδου είναι ότι, δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση και η ανακρίβεια της μέτρησης, που εισάγει η εγγύτητα του ηλεκτροδίου μέτρησης. Η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού της E_o διορθώνει αυτήν την ανακρίβεια χρησιμοποιώντας τον τύπο (1.69) για την εκτίμηση της ακτίνας ιονισμού.

$$r_{\text{ion}} = \frac{l}{\exp\left(\frac{\varrho \ln\left(\frac{l+r_c}{r_c}\right) + 2R_i \pi l}{\varrho}\right) - 1} \quad (1.69)$$

όπου r_c είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου

Αντικαθιστώντας την (1.69) στον τύπο (1.68), προκύπτουν τιμές της E_o υψηλότερες από αυτές που υπολογίζονται με την πρώτη μέθοδο.

Η τρίτη μέθοδος υπολογισμού αφορά, περισσότερο, σε κατανεμημένα συστήματα γείωσης, αλλά ο συγγραφέας τη χρησιμοποιεί και για την απλή διάταξη ενός ηλεκτροδίου. Η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι, η ιονισμένη περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας κύλινδρος που το περιβάλλει. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της E_o είναι οι (1.70), (1.71) και (1.72):

$$\varrho = \frac{R}{\frac{1}{2\pi l} \left\{ \ln \left[\frac{l}{r_c} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r_c}\right)^2} \right] + \frac{r_c}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r_c}{l}\right)^2} + \ln(2) \right\}} \quad (1.70)$$

$$R_i = \frac{\varrho}{2\pi l} \left\{ \ln \left[\frac{l}{r_{\text{ion}}} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r_{\text{ion}}}\right)^2} \right] + \frac{r_{\text{ion}}}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r_{\text{ion}}}{l}\right)^2} + \ln(2) \right\} \quad (1.71)$$

$$E_o = \varrho \frac{I}{2\pi r_{\text{ion}} l} \quad (1.72)$$

Οι Nor et. al [1.81] πρότειναν, ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης έναρξης ιονισμού να γίνεται μέσα από δοκιμές διάσπασης των δειγμάτων χώματος σε ομογενή πεδία, που παράγονται από διατάξεις παραλλήλων πλακών. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, για την εκτίμηση της τιμής της V_o , αρκεί ο προσδιορισμός της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στο Πρότυπο IEC 60060-1 [1.82]. Εν συνεχεία, ο προσδιορισμός της E_o γίνεται μέσω του εύχρηστου τύπου:

$$E_o = \frac{U_{50\%}}{d} \quad (1.73)$$

όπου $U_{50\%}$ είναι η τάση διάσπασης 50%, d η απόσταση μεταξύ των παραλλήλων πλακών.

Οι Liu et al [1.83], προκειμένου να μελετήσουν τις φυσικές αρχές που διέπουν τον ιονισμό, πραγματοποίησαν πειράματα χρησιμοποιώντας ένα ημισφαιρικό δοχείο, όμοιο με αυτό που είχε χρησιμοποιήσει ο Πετρόπουλος, το οποίο γέμισαν, διαδοχικά, με εδαφικά δείγματα. Ένα ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε στη μέση της διάταξης, ώστε να επιβληθεί η κρουστική τάση στο συγκεκριμένο δείγμα χώματος. Βασική υπόθεση για τον προσδιορισμό της τιμής της E_o είναι ότι η ζώνη ιονισμού κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο εντός μιας ακτίνας r_{ion} , πέραν της οποίας δεν εκδηλώνεται ιονισμός. Έτσι, το εδαφικό δείγμα 'χωρίζεται' σε δύο ζώνες: μία εντός της οποίας εκδηλώνεται ιονισμός και η τιμή της ειδικής αντίστασης λαμβάνει τιμή μικρότερη (ρ_{res}) από την τιμή μονίμου καταστάσεως (ρ), και μια δεύτερη ζώνη, στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί ιονισμός και, εντός της οποίας, η τιμή της ειδικής αντίστασης παραμένει σταθερή (ρ). Υπολογίσθηκε ότι, η ρ_{res} κυμαίνεται μεταξύ 3-8,3% της αρχικής τιμής της, η δε ακτίνα της ζώνης ιονισμού δίδεται από τη σχέση (1.74):

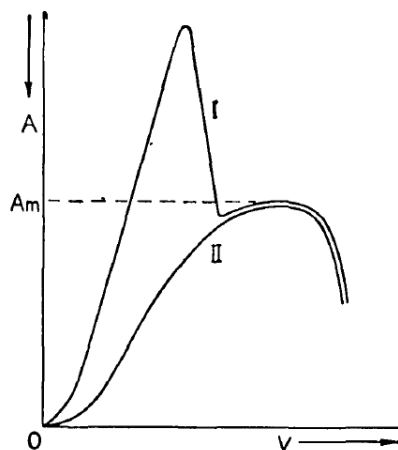
$$r_{ion} = \sqrt{\frac{\rho I}{2\pi E_o}} \quad (1.74)$$

όπου ρ είναι η τιμή μονίμου καταστάσεως της ειδικής αντίστασης, I το εγχεόμενο ρεύμα και E_o η κρίσιμη τιμή της έντασης ιονισμού.

Αναφορικά με την κρίσιμη ένταση διάσπασης (E_b), ο προσδιορισμός της γίνεται με τη βοήθεια παλμογραφημάτων τάσης και ρεύματος. Όταν εκδηλώνεται διάσπαση, παρατηρείται μία απότομη μείωση στην κυματομορφή της τάσης, ενώ στην κυματομορφή του ρεύματος εμφανίζεται απότομη αύξηση. Διάσπαση του χώματος

σημαίνει, ουσιαστικά, ότι, μέσω του χώματος, δημιουργείται αγώγιμος δρόμος (τόξο), που συνδέει το ηλεκτρόδιο, στο οποίο επιβάλλεται η τάση, με το γειωμένο ηλεκτρόδιο.

Οι Davis and Johnston [1.84] παρατήρησαν φαινόμενα διάσπασης του εδάφους, καθώς το εγχεόμενο ρεύμα αυξανόταν και προσδιόρισαν την κρίσιμη ένταση διάσπασης βασιζόμενοι σε διαγράμματα ρεύματος συναρτήσει της τάσης και στον νόμο του Ohm. Για χαμηλές τιμές του εγχεόμενου ρεύματος η χαρακτηριστική I-V ήταν γραμμική. Καθώς η τιμή του ρεύματος αυξάνεται, η καμπύλη I-V παύει να είναι γραμμική, όπως φαίνεται και στην καμπύλη II του **Σχήμα 1.29**. Περαιτέρω αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε διάσπαση και η καμπύλη I-V μοιάζει με την καμπύλη I του ίδιου Σχήματος.



Σχήμα 1.29 Χαρακτηριστική ρεύματος/τάσης, παρουσία (καμπύλη I) και απουσία διάσπασης (καμπύλη II) [1.84].

Αξίζει να σημειώσουμε ότι, οι ερευνητές παρατήρησαν, επίσης, επιφανειακά τόξα στα δείγματα, ενώ συσχέτισαν τη μετάβαση από τη γραμμικότητα στη μη γραμμικότητα της καμπύλης I-V με τη μείωση της αντίστασης.

Οι Loboda και Scuka [1.77] προσδιόρισαν την κρίσιμη ένταση διάσπασης (E_b), με τη βοήθεια παλμογραφημάτων τάσης και ρεύματος. Το χαμηλότερο επίπεδο τάσης, η οποία επιβαλλομένη στο δοκίμιο το διασπά (παρατηρείται απότομη μείωση στην κυματομορφή της τάσης), λαμβάνεται ως η κρίσιμη τάση διάσπασης και, στη συνέχεια, η E_b υπολογίζεται από τον νόμο του Ohm.

Στους **Πίνακες 1.3** και **1.4**, που ακολουθούν, καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα των ερευνητών, που έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη των φαινομένων του ιονισμού και της διάσπασης του εδάφους, επίσης, παρατίθενται στοιχεία για το είδος

του χώματος, την πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε, και τις τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού και διάσπασης, αντίστοιχα.

Πίνακας 1.3 Τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_o).

Ερευνητής	Πειράματα*	Πειραματική διάταξη	Τύπος εδάφους	ρ (Ωm)	E_o (kV/m)
Towne [1.13],[1.46]	F	Ηλεκτρόδια	Χαλίαι	130-686	29-104
Bellaschi [1.21]	F	Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ακτίνας 1,27cm και μήκους 228cm	Σχιστόλιθος, άργιλος, χαλίαι και άμμος	101,5 99,5	307 271
Bellaschi [1.22]	F	Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ακτίνας 1,27cm και μήκους 295cm	Άργιλος	87,2	127
		Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ακτίνας 1,27cm και μήκους 295cm	Άργιλος	76,8	221
		Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ακτίνας 0,8cm και μήκους 885cm	Άργιλος	102,5	247
		Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ακτίνας 0,8cm και μήκους 236cm	Άμμος	289	424
Liew [1.19]	F	Ηλεκτρόδιο μήκους 1,83m και διατομής 2,34cm ²	Άργιλος	50,5	300
			Άργιλος και χαλίαι	50	110
Dick [1.13], [1.85]	F	Ηλεκτρόδια (διαμέτρου 5/8in και μήκους 8ft)	**	12-25	13-221
Geri [1.61]	F	Ηλεκτρόδιο μήκους 1m, ακτίνας 2,5cm	Φυτόχωμα	43,5	167,5-458,04 29,72-306,91
		Οριζόντιος αγωγός μήκους 5m και ακτίνας 0,4cm		40,5	
Asaoka [1.68]	F	Rods	Άμμος	487	1040
			Λάσπη	228	1330
			Χαλίαι	2056	1430
			Λάσπη	365	1240
Norinder [1.18]	E	Κυλινδρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 45cm, διάμετρος ηλεκτροδίου 2,7cm, μήκος 28cm	Φυτόχωμα	**	327
			Κόκκινος πηλός	**	360
Berger [1.18]	E	Ημισφαρική διάταξη	**	795	497
				502	490
				405	497
				315	525
				255	530
				231	537

συνέχεια στην επόμενη σελίδα

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα									
Ερευνητής	Πειράματα*	Πειραματική διάταξη	Τύπος εδάφους	ρ (Ω m)	E_o (kV/m)				
Petropoulos [1.18]	E	Ημισφαιρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 60cm, διάμετρος σφαιρικού ηλεκτροδίου 5cm	Calcinary	290	800(+)/860(-)				
Armstrong [1.76]	E	Ημισφαιρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 8", διάμετρος ηλεκτροδίου 2 ½"	Άμμος	495 245	396 466				
			Άργιλος	140 80	476 432				
			Μείγμα άμμου και αργίλου	180 100 52	522 470 442				
Flanagan [1.14]	E	Παράλληλες πλάκες διαμέτρου 5 και 10cm σε απόσταση 0,5 έως 3cm	Χώμα με υγρασία 4% κατά βάρος	**	4050				
			Χώμα με υγρασίας 0% κατά βάρος		12000				
Dabkowski [1.9]	E	Παράλληλες πλάκες	Άμμος	**	720-810				
Korsuncev [1.17]	E	**	**	470 180 100	1200 1000 800				
Loboda [1.24]	E	Κυλινδρική διάταξη, θετική και αρνητική πολικότητα	Άμμος	750 620 400 330	280-410				
			Άργιλος	100 60 30	150-500				
			Μείγμα Humus, άμμου και πηλού	160	300-450				
Oettle [1.17]	E	Παράλληλες πλάκες διαμέτρου 20cm σε απόσταση 2,5 έως 3,5cm	Άμμος	180000 19200 8000 3500 2000 960 900 680 610 470 380	1700 1850 1620 1600 1500 1650 900 1080 1280 1000 750				
				Κόκκινη άργιλος	340000 500 330 200 70	1800 900 600 1130 800			
					Μαύρη άργιλος	3100 800 170 50 65	1300 1180 800 710 700		
						Μείγμα διαφόρων χωμάτων	525 180 50	1280 830 850	
							συνέχεια στην επόμενη σελίδα		

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα					
Ερευνητής	Πειράματα*	Πειραματική διάταξη	Τύπος εδάφους	ρ (Ω m)	E_o (kV/m)
Loboda [1.77]	E	Κυλινδρική διάταξη (διάμετρος εξωτερικού κυλίνδρου 0,1m, διάμετρος εσωτερικού ηλεκτροδίου 0,0125m, μήκος ηλεκτροδίου 60cm), θετική και αρνητική πολικότητα	Άμμος	750 2150	680 900
			Άργιλος	50 70	710 560
			Οργανικό χώμα	40 200	830 820
Liu [1.83]	E	Ημισφαιρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 25cm, εσωτερική διάμετρος 6,3cm	Άμμος αναμειγμένη με αλάτι	174 256	328 385
		Ημισφαιρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 25cm, εσωτερική διάμετρος 3cm		279 827	481 516
Espel [1.86]	E	Παράλληλες πλάκες διαμέτρου 4,8cm σε απόσταση 1cm	**	<1000 1000-25000 >25000	800 800-1700 1700
Lima [1.87]	E	Παράλληλες πλάκες (χρόνος μετώπου 1μs ή 3μs) διάμετρος πλακών 19,3cm απόσταση μεταξύ των πλακών 2cm	Soil type I	250 350 600	550/610 600/630 930/900
			Soil type II	80 240 600 1090	420/500 520/530 580/570 950/600
			Soil type III	2000 7000 10000	370 500 530/550
			Soil type IV	3000 5000 10000	1000/900 1200/1160 1420/1440
		Κυλινδρική διάταξη (χρόνος μετώπου 1μs ή 3μs) διάμετρος εξωτερικού κυλίνδρου 1,44cm, διάμετρος εσωτερικού κυλίνδρου 44,5cm, μήκος ηλεκτροδίου 19,5cm)	Soil type I	250 350 600	547/339 674/468 882/820
			Soil type II	80 240 600 1090	400/350 490/450 450 790/590
			Soil type III	2000 7000 10000	**
			Soil type IV	3000 5000 10000	**
			Άμμος	134,3 169,1 208,4 336,5	1650 1250 1100 1000

συνέχεια στην επόμενη σελίδα

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα					
Ερευνητής	Πειράματα*	Πειραματική διάταξη	Τύπος εδάφους	ρ (Ωm)	E_o (kV/m)
Nor [1.70]	E	Ημισφαιρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 47,5cm, διάμετρος ηλεκτροδίου 6,25cm, θετική και αρνητική πολικότητα	Άμμος	2,3-5,5	550(+), 660(-)
		Παράλληλες πλάκες σε απόσταση 3cm, διαμέτρου 24,7cm, θετική και αρνητική πολικότητα			790(+), 900(-)
He [1.88]	E	Σφαιρικά ηλεκτρόδια διαμέτρου 30cm, σε απόσταση 1,5cm	Humus soil	**	341
			Άργιλος		504
			Άμμος και άργιλος		602
			Άμμος		991
Manna [1.89]	E	Παράλληλες πλάκες (απόσταση πλακών 5cm, διάμετρος πλάκας 10cm)	Soil type I	203	641
				638	711
				2296	880
				6707	1093
			Soil type II	23	560
				168	696
				942	849
				5977	1040
			Soil type III	1705	987
				6219	1226
				11013	1304
				30211	1433

*Πειράματα: E=εντός εργαστηρίου, F= σε εξωτερικό χώρο, **: δεν παρέχεται οποιαδήποτε σχετική πληροφορία.

Πίνακας 1.4 Τιμές της κρίσιμης έντασης διάσπασης (E_b).

Ερευνητής	Πειράματα*	Πειραματική διάταξη	Τύπος εδάφους	ρ (Ωm)	E_b (kV/m)
Davis [1.84]	E	Ηλεκτρόδιο διαμέτρου 1cm και μήκους 50cm τοποθετημένο σε δεξαμενή 1,19×1,51×1,18m	Αμμοχάλικο	1010	1730
		Σφαιρικό ηλεκτρόδιο διαμέτρου 12,7cm τοποθετημένο σε δεξαμενή 1,19×1,51×1,18m		5640	1430
		Ηλεκτρόδιο διαμέτρου 1cm και μήκους 50cm τοποθετημένο σε δεξαμενή 1,19×1,51×1,18m	Άργιλος	29	700-1600
συνέχεια στην επόμενη σελίδα					

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα					
Ερευνητής	Πειράματα*	Πειραματική διάταξη	Τύπος εδάφους	ρ (Ωm)	E_b (kV/m)
Eaton [1.9]	E	Διάκενο ακίδας – πλάκας	Χαλί	**	670 320
			Άμμος	**	660 430
		Διάκενο σφαίρας – σφαίρας, διαμέτρου 12,5cm	Χαλί	**	720
			Χαλί - άμμος	**	1570 1310 1300 1080
Flanagan [1.15]	E	Διάκενο σφαίρας ακτίνας 5cm – πλάκας, σε απόσταση 0,8m	DWP-25	70-8000	169-240
			SVBO	70-2000	144-235
Leadon [1.12]	E	Διάκενο σφαίρας διαμέτρου 2,5cm – πλάκας, διαμέτρου 46cm	Άμμος	50 1000 50000	760 1160 3500
		Διάκενο σφαίρας διαμέτρου 15cm – πλάκας διαμέτρου 46cm		50 1000 50000	97 140 471
Snowden [1.90]	E	Διάκενο ακίδας – πλάκας	Άμμος	500000 192 625 59	248 189 265 139
Cabrera [1.91]	E	Κυλινδρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος κυλίνδρου 20cm, διάμετρος ηλεκτροδίου 0,5cm, μήκος κυλίνδρου 60cm	Άμμος Α	8,5·10 ⁹ 4·10 ⁶ 12000 240	7,6(+)/9,3(-) 7,4(+)/9(-) 3,8(+)/4,6(-) 3,6
				Άμμος Β	1,4·10 ¹¹ 4,5·10 ⁶ 4800 260
			Άμμος Γ		24·10 ⁹ 3,5·10 ⁶ 6500 240
Gonos [1.92]	E	Κυλινδρική διάταξη	Χώμα Α	150 200 600 800 1300	500 650 1000 1200 1300
				Χώμα Β	150 250 650 1000
Nor [1.81]	E	Κυλινδρική διάταξη (εξωτερική διάμετρος 30cm, διάμετρος ηλεκτροδίου 1,2cm, μήκος ηλεκτροδίου 15cm), θετική και αρνητική πολικότητα	Άμμος	20-1000	1820-3600
συνέχεια στην επόμενη σελίδα					

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα					
Ερευνητής	Πειράματα*	Πειραματική διάταξη	Τύπος εδάφους	ρ (Ωm)	E_o (kV/m)
Nor [1.93]	E	Ημισφαιρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 47,5cm, διάμετρος ηλεκτροδίου 6,25cm, θετική και αρνητική πολικότητα	Άμμος	2,3-5,5	940(+), 980(-)
Lee [1.80]	E	Ημισφαιρική διάταξη, εξωτερική διάμετρος 30cm, διάμετρος ηλεκτροδίου 2,54cm, θετική πολικότητα	Άμμος	134,3 169,1 208,4 336,5	2450 2400 2200 2100

*Πειράματα: E=εντός εργαστηρίου, **: δεν παρέχεται οποιαδήποτε σχετική πληροφορία.

Θα πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι, μολονότι οι τιμές των κρίσιμων εντάσεων διαφέρουν μεταξύ διαφορετικών ειδών χώματος, αλλά και για το ίδιο είδος χώματος, όταν η περιεκτικότητα αυτού σε υγρασία διαφοροποιείται, συχνά οι ερευνητές υιοθετούν μία αντιπροσωπευτική τιμή. Έτσι, η CIGRE [1.61] έχει υιοθετήσει αυθαίρετα την τιμή 400kV/m. Οι Liew και Darveniza [1.19] χρησιμοποίησαν την τιμή των 300kV/m. Ο Mousa [1.13], επίσης, προτείνει την τιμή των 300kV/m για την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Τέλος, ο Gonos [1.43], [1.92] διαπίστωσε ότι, μια τιμή της τάξης των 200kV/m για την κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού μπορεί να είναι αποδεκτή.

Πέραν των μεθοδολογιών, που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, άλλοι ερευνητές έχουν προτείνει στη διεθνή βιβλιογραφία εξισώσεις για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού, βασιζόμενοι σε πειραματικά αποτελέσματα, είτε δικά τους, είτε άλλων επιστημόνων. Κατ' αυτόν τον τρόπο η γνώση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του εδάφους (π.χ. της ειδικής αντίστασης, της διηλεκτρικής αντοχής, κ.τ.λ.) μπορεί να προσφέρει μία απ' ευθείας εκτίμηση της κρίσιμης έντασης, απαλλάσσοντάς μας από την ανάγκη διεξαγωγής κοπιαστικών πειραμάτων.

Η Oettle [1.60] πρότεινε την εξίσωση (1.75) για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της E_o :

$$E_o = 241 \cdot \rho^{0,215} \quad (1.75)$$

όπου E_o είναι η κρίσιμη ένταση σε kV/m, ρ είναι η ειδική αντίσταση σε Ωm .

Ο Manna [1.89] θεωρώντας, όπως η Oettle, ότι, η υιοθέτηση μίας αντιπροσωπευτικής τιμής για την E_o είναι λανθασμένη, πρότεινε, βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων, μία

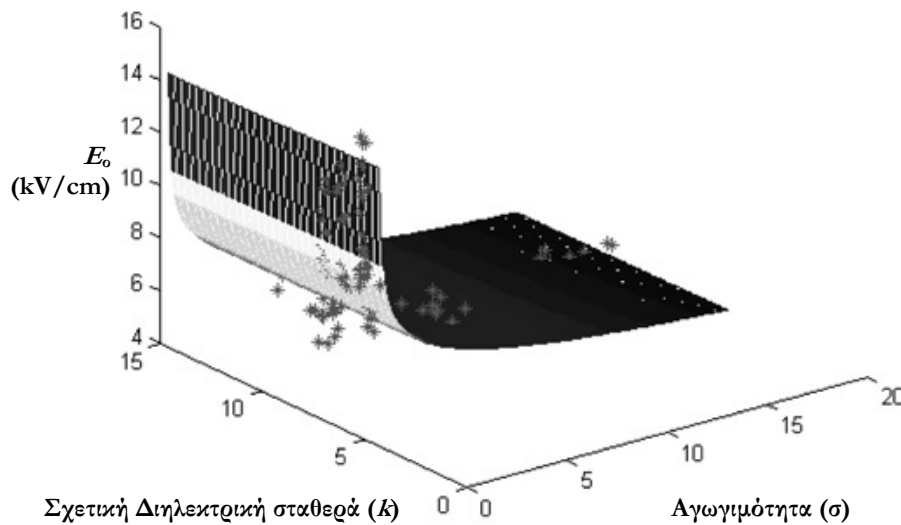
εξίσωση για την E_o , συναρτήσει της ειδικής αντίστασης (ρ) και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς (k) του εδάφους. Για την επίτευξη αυτού του στόχου διεξήγαγε πειράματα, χρησιμοποιώντας δείγματα χώματος, στα οποία μετέβαλε την ειδική αντίσταση, μέσω της αλλαγής της περιεκτικότητας σε υγρασία. Αφού μέτρησε τις δύο αυτές παραμέτρους, επέβαλε στα δείγματα – δοκίμια, κρουστικές τάσεις των μορφών 0,1/50μs, 1,2/50μs, 5/50μs, κατέγραψε την τάση διάσπασης, πραγματοποίησε ανάλυση συσχέτισης (ANOVA) και διαπίστωσε ότι η μορφή της επιβαλλόμενης τάσης δεν επηρεάζει την τιμή της E_o . Μετά την εφαρμογή ενός πολυμεταβλητού παλινδρομικού μοντέλου πρότεινε τις ακόλουθες εξισώσεις για την εκτίμηση της E_o :

$$E_o = 8,432 \cdot \sigma^{-0,124} \quad (1.76)$$

$$E_o = 8,6083 \cdot k^{-0,0103} \cdot \sigma^{-0,1526} \quad (1.77)$$

όπου k είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά (αδιάστατη παράμετρος), σ η ειδική αγωγιμότητα σε mmho/m, E_o σε kV/cm.

Στο **Σχήμα 1.30** απεικονίζεται γραφικά η συνάρτηση, μαζί με τα πειραματικά δεδομένα, από τα οποία προέκυψε.



Σχήμα 1.30 Μεταβολή της κρίσιμης έντασης συναρτήσει της ειδικής αγωγιμότητας και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς [1.89].

1.7 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1

- [1.1] E.D. Sunde, “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, Dover Publications, New York, 1968.
- [1.2] K. Βουργάνης – Γ. Κονταξής, «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Αθήνα, 1997.
- [1.3] Megger, “Getting down to earth”, A practical guide to earth resistance.

- [1.4] G.F. Tagg, "Earth Resistances", George Newnes Limited, London, 1964.
- [1.5] ANSI/IEEE Std 80-1986: IEEE guide for safety in AC substation grounding, 1986.
- [1.6] ANSI/IEEE Std 80-2000: IEEE guide for safety in AC substation grounding, 2000.
- [1.7] J.H. Scott, "Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soil", Note 18, Electromagnetic Pulse Theoretical Notes, AFWL EMP 2-1, April 1971.
- [1.8] C.L. Longmire, K.S. Smith, "A Universal Impedance for Soils", DNA report 3788T, October 1975.
- [1.9] A.M. Mousa, "Breakdown gradient of the soil under lightning discharge conditions", International aerospace and Ground conference on Lightning and static Electricity, 1992, Atlantic City, New Jersey, USA, pp.67-1 - 67-12.
- [1.10] J.W. Erler, D.P. Snowden, "High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 6, December 1983, pp. 4564-4567.
- [1.11] D.P. Snowden, J.W. Erler, "Initiation of Electrical Breakdown of Soil by Water Vaporization", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 6, December 1983, pp. 4568-4571.
- [1.12] R.E. Leadon, T.M. Flanagan, T.M. Mallon, R. Denson, "Effect of Ambient Gas on Arc Initiation Characteristics in Soil", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 6, December 1983, pp. 4572-4576.
- [1.13] A.M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, July 1994, pp. 1669-1677.
- [1.14] T.M. Flanagan, C.E. Mellon, R. Denson, R.E. Leadon, "Electrical Breakdown Properties of Soil", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-28, No. 6, December 1981, pp. 4432-4439.
- [1.15] T.M. Flanagan, C.E. Mallon, R. Denson, "Electrical Breakdown Characteristics of Soil", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-29, No. 6, December 1982, pp. 1887-1890.
- [1.16] E.E. Oettle, "The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil", Transactions on the South African IEE, December 1983, pp. 63-70.
- [1.17] E.E. Oettle, "A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 2020-2029.
- [1.18] G.M. Petropoulos, "The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances", Journal IEE, Vol. 95, Part II, 1948, pp. 59-70.
- [1.19] A.C. Liew, M. Darveniza, "Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths", Proc. IEE, Vol. 121, No. 2, February 1974, pp. 123-135.
- [1.20] N.M. Nor, A. Ramli, "Electrical Properties of Dry Soil under High Impulse Currents", Journal of Electrostatics, Vol. 67, 2007, pp. 500-505.
- [1.21] P.L. Bellaschi, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds", Transactions of American Institute of Electrical Engineer, Vol. 60, March 1941, pp. 123-128.

- [1.22] P.L. Bellaschi, R.E. Armington, A.E. Snowden, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, Part II", Transactions of American Institute of Electrical Engineer, Vol. 61, 1942, pp. 349-363.
- [1.23] K.J. Nixon, "The lightning transient behavior of a driven rod earth electrode in multi-layer soil", Διδακτορική Διατριβή, Ιούλιος 2006.
- [1.24] M. Loboda, Z. Pochanke, "Experimental Study of Electric Properties of Soil with Impulse Current Injections", 18th International Conference on Lightning Protection, 1985, Munich, pp. 191-198.
- [1.25] M.E. Almeida, M.T. Correia de Barros, "Accurate modeling of rod driven tower footing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp. 1606-1609.
- [1.26] Z. Song, M.R. Raghuveer, J. He, "Influence of the nature of impulse current propagation in soils on transient impedance characteristics", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 739-742, 2000.
- [1.27] Z. Song, H. Jingliang, M.R. Raghuveer, "Experimental study on lightning breakdown channels in the soils", presented at the IEE High Voltage Engineering Symposium, 1999, No. 467, pp. 2.426-2.429.
- [1.28] J. Wang, A.C. Liew, M. Darveniza, "Extension of Dynamic model of Impulse Behavior of concentrated Grounds at High Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 2160-2165.
- [1.29] S. Sekioka, M.I. Lorentzou, M.P. Philippakou, J.M. Prousalidis, "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 194-201.
- [1.30] M. Hayashi, "Observation of streamer in the soil by surge current", JIEE, Vol 87-14, 1967, pp. 133-141.
- [1.31] O. Mayr, "Beitrage zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens", Arch. für Elektrotechnik, Vol. 37, 1943, pp. 588-608.
- [1.32] A.M. Cassie, "Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory," CIGRE, Paris, France, Report No. 102, 1939.
- [1.33] V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y. Liu, "Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization", Journal of Electrostastics, 60, 2004, pp. 193-202.
- [1.34] J.M. Yos, "Transport properties of nitrogen, hydrogen, and air to 30,000 K", Tech. Mem. AVCO-RAD-TM-63-1, AVCO Corp., March, 1963.
- [1.35] J.E. Borovsky, "An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: guided wave propagation along conducting cylindrical channels", Journal of Geophysics. Res. 100 (1995), pp. 2697-2726.
- [1.36] G. Ala, M.L.D. Silvestre, F. Viola, "Soil ionization due to high impulse transient currents leaked by earth electrodes", Progress in Electromagnetic Research B, Vol. 14, 2009, pp. 1-21.
- [1.37] K.J. Nixon, I.R. Jandrell, "Quantifying the lightning transient performance of an earth electrode", IEEE 6th Africon Conference 2002, Vol. 2, 2nd-4th October, pp. 665-670.
- [1.38] A. Geri, M.G. Veca, E. Garbagnati, G. Sartorio, "Non-linear behavior of ground electrodes under lightning surge currents: computer modeling and comparison with experimental results", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 2, March 1992, pp. 1442-1445.

- [1.39] Z.M. Stojkovic, "Modelavanje impulsne impedanse uzemljivača u analizi zaštite razvodnih postrojenja od atmosferskih prenapona", Διδακτορική διατριβή, Beograd, 1995.
- [1.40] E.J. Rogers, J.F. White, "Mutual coupling between finite lengths parallel or angled horizontal earth return conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989, pp. 103-113.
- [1.41] B.R. Gupta, B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids", IEEE Transactions on Apparatus and System, PAS 99, 6, Nov/Dec 1980, pp. 2357-2362.
- [1.42] B.R. Gupta, V.K. Singh, "Impulse impedance of rectangular grounding grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 214-217.
- [1.43] Ι.Φ. Γκόνοϋ, «Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων γείωσης», Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2002.
- [1.44] M. Ramamoorthy, M.M. Babu Narayanan, S. Parameswaran, D. Mukhedkar, "Transient performance of grounding grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 2053-2059.
- [1.45] H. Rochereau, "Response of earth electrodes when fast fronted currents are flowing out", EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Serie B, 2, 1988, pp. 13-22.
- [1.46] H.M. Towne, "Impulse characteristics of driven grounds", Gen. Elect. Rev., Vol. 31, No. 11, November 1928, pp. 605-609.
- [1.47] A.V. Korsuncev, "Application of the method of Similarity for the Calculation of Impulse Characteristics of Concentrated Electrodes", Elektrichestvo, NOS, 1958, pp. 31-35.
- [1.48] F. Popolansky, "Determination of Impulse Characteristics of Concentrated Earth Electrodes", CIGRE SC33-86 (WG 01) IWD 22, Munich, August 1986.
- [1.49] P. Chowdhuri, "Grounding for the protection against lightning", in Electromagnetic Transients in Power Systems, Research Studies Press Ltd, John Wiley & sons inc., New York, 1996, pp. 104-113.
- [1.50] W.A. Chisholm, W. Janischewskyj, "Lightning Surge response of Ground Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1329-1337.
- [1.51] R. Rudenberg, "Grounding Principles and Practices I - Fundamental Considerations on Ground Currents", Electrical Engineering, Vol. 64, January 1945, pp. 1-13.
- [1.52] R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar, "Experimental study of Transient Ground Impedances", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11, November 1981, pp. 4653-4660.
- [1.53] W. Kalat, M. Loboda, Z. Pochanke, "Implementation of the dynamic model of surge soil conduction for transient behavior of grounding electrodes simulations using ATP version of EMTP", 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest 1994.
- [1.54] R. Velazquez, D. Mukhedkar, "Analytical modeling of grounding electrodes transient behaviour", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-103, No. 6, July 1984, pp. 1314-1322.
- [1.55] K. Berger, "Das Verhalten von Erdungen unter hohen Strossstromen", Bull. Assoc. Suisse elek., 1946, 37, p. 197.

- [1.56] K. Berger, “Le Comportement des Prises de Terre Sous Courants de Choc de Grande Intensité”, CIGRE Paper No. 215, 11th. Session, Part III, 1946.
- [1.57] E.J. Riabkova, V.M. Mishkin, “Impulse Characteristics of Earthings for transmission Line Towers”, ELEKTRICHESTVO' No. 8, 1976, pp. 67-70.
- [1.58] E. Giudice, G.B. Lo Piparo, “Comportement des, Prises de terre, La Foudre et les Installations de telecommunications”, Electronica e telecomunicazioni, No. 2, 1972.
- [1.59] A.L. Vainer, V.N. Floru, “Experimental study and method of calculation of the impulse characteristics of deep earthings”, Elektrichestvo, No. 5, 1971, pp. 18-22.
- [1.60] E.E. Oettle, “Results of impulse tests done on practical electrodes at the National Electrical Engineering Research Institute's Outdoor High Voltage Laboratory”, NEERI Internal report, Library No. I ELEK 267, November 1986.
- [1.61] CIGRE Working Group on Lightning, “Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines”, CIGRE, Paris, France, October 1991.
- [1.62] A. Geri, “Behavior of grounding systems excited by high Impulse Currents: the model and its validation”, IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 1008-1017.
- [1.63] F.M. Gatta, A. Geri, M. Maccioni, “Equivalent lumped parameter Π -network of typical grounding systems for linear and non-linear transient analysis”, IEEE Power tech Conference, Bucharest, June 28th - July 2nd 2009.
- [1.64] S. Hoki, N. Mita, “Insulation and flashover Protection”, OHM Pub., 1951.
- [1.65] S. Sekioka, T. Hara, A. Ametani, “Development of a nonlinear model of a concrete pole grounding resistance”, International Conference on Power System Transients, Lisbon, September 1995, pp. 463-468.
- [1.66] J. Cidras, A.F. Otero, C. Garrido, “Nodal frequency analysis of grounding systems considering the soil ionization effect”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp. 103-107.
- [1.67] Y. Yasuda, Y. Hirakawa, K. Shiraishi, T. Hara, “Sensitivity analysis on grounding models for 500kV transmission lines”, Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan.
- [1.68] Y. Asaoka, H. Motoyama, H. Mathubara, “Development of calculation model for grounding resistance of rod electrodes exposed to large lightning impulse current”, 28th International Conference on Lightning Protection, Kawazawa 2006, pp. 692-697.
- [1.69] P. Chowdhury, “Impulse impedance tests on laboratory model grounding systems”, IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, Vol. 105, No. 4, July 2003, pp. 427-433.
- [1.70] N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, “Characterization of Ionization Phenomena in Soils under Fast Impulses”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 353-361.
- [1.71] N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, “Determination of Threshold Electric Field E_c of Soil Under High Impulse Currents”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 2108-2113.

- [1.72] N.M. Nor, "Simulation of earthing systems under high impulse conditions", 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, 2006, pp. 347-352.
- [1.73] M. Vasilaki, E. Pyrgioti, "Simullation of transient behavior of grounding grids", 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), September 2010, Cagliari (Italy).
- [1.74] E. Pyrgioti, V. Bakogiannis, "Lightning impulse performance of a wind turbine grounding grid considering soil ionization", 7th Asia-Pacific Lightning Conference, November 2011, Chengdu (China).
- [1.75] Z.G. Datsios, P.N. Mikropoulos, T.E. Tsovilis, "Impulse resistance of concentrated tower grounding systems simulated by an ATPDraw Object", International Conference on Power Systems Transients (IPST 2011), 14-17 June, 2011, Delft (the Netherlands).
- [1.76] H.R. Armstrong, "Grounding electrode characteristics from model tests", AIEE Trans., Vol. 72, No. 2, January 1953, pp. 1301-1306.
- [1.77] M. Loboda, V. Scuka, "On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes in soil", 23rd International Conference on Lightning Protection (ICLP) September 1996, Firenze (Italy), pp. 539-544.
- [1.78] N.M. Nor, "Ionization gradient of low resistivity soil and liquids", in Proc. 17th Int. Zurich Symp. on EMC, 2006, pp. 409-412.
- [1.79] J.L.C. Lima, S. Visacro, "Experimental developments on soil ionization", in Proc. Int. Conf. Grounding and Earthing & 3rd Int. Conf. Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, November 2008, pp. 174-179.
- [1.80] B.H. Lee, G.H. Park, H.G. Kim, K.S. Lee, "Analysis of soil ionization under Impulse Currents", J. Elect. Eng. and Technol., Vol. 4, No. 1, 2009, pp. 98-105.
- [1.81] N.M. Nor, A. Ramli, "Effects of moisture content, impulse polarity and earth electrode's dimension on dry and wet sand under high voltage conditions", Europ. Trans. Electric. Power, Vol. 18, No. 5, June 2007, pp. 461-475.
- [1.82] IEC 60060-1 ed3.0: High Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, 2010.
- [1.83] Y. Liu, N. Theethayi, R.M. Gonzalez, R. Thottappillil, "The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results", in Proc. 2003 IEEE Int. Symp. on EMC, Boston, USA, pp. 794-799.
- [1.84] R. Davis, J.E.M. Johnston, "The surge characteristics of tower and tower-footing impedances", Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part I: General, Vol. 88, No. 11, November 1941, pp. 453-465.
- [1.85] W.K. Dick, H.R. Holliday, "Impulse and alternating current tests on grounding electrodes in soil environment", IEEE Transactions on Power Application Systems, Vol. PAS-97, No. 1, January 1978, pp. 102-108.
- [1.86] P. Espel, R.R. Diaz, A. Bonamy, J.N. Silva, "Electrical Parameters Associated with Discharges in Resistive Soils", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 119, No. 3, July 2004, pp. 1174-1182.
- [1.87] J.L.C. Lima, "Avaliacao experimental sobre o efeito de ionizacao do solo devido a injecao de correntes impulsivas", Μεταπτυχιακή Εργασία, Αύγουστος 2008.

- [1.88] J. He, Y. Gao, R. Zeng, B. Zhang, X. Liang, “Soil ionization phenomenon around grounding electrode under lightning impulse”, in Proc. VIII Int. Symp. Lightning Protection, Brazil, 2005.
- [1.89] T.K. Manna P. Chowdhuri, “Generalized equation of soil critical electric field E_c based on the impulse tests and measured soil electrical parameters”, IET Generation Transmission and Distribution, Vol. 1, No. 5, September 2007, pp. 811-817.
- [1.90] D.P. Snowden, E.S. Beale, V.A.J. van Lint, “The effect of gaseous ambient on the initiation of the breakdown in the soil”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 33, No. 6, December 1986, pp. 1669-1674.
- [1.91] V.M. Cabrera, M.S. Lundquist, V. Cooray, “On the physical properties of discharges in sand under lightning impulses”, Journal of Electrostatics, Vol. 30, No. 40, May 1993, pp. 17-28.
- [1.92] I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Soil ionization under lightning impulse voltages”, IEE Proceedings Science Measurement and Technology, Vol. 151, No. 5, September 2004, pp. 343-346.
- [1.93] N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, “Factors Affecting Soil Characteristics Under Fast Transients”, International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA.

Κεφάλαιο 2

Μετρητικές διατάξεις - Πειραματική διαδικασία

2.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους γύρω από ένα σύστημα γείωσης, όταν το τελευταίο διαρρέεται από ρεύματα σφάλματος ή κεραυνικά ρεύματα. Στις περιπτώσεις συγκεντρωμένων συστημάτων γείωσης παρατηρείται το φαινόμενο η μεταβατική αντίστασή τους να λαμβάνει τιμές μικρότερες από τις τιμές μονίμου καταστάσεως. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στην εκδήλωση φαινομένων ιονισμού και διάσπασης του εδάφους, η οποία, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, εξαρτάται από το είδος του εδάφους, τη συγκεντρωμένη σ' αυτό υγρασία, τη μορφή του επιβαλλόμενου ρεύματος και το είδος των ηλεκτροδίων. Ο ιονισμός του εδάφους εκδηλώνεται, όταν το αναπτυσσόμενο ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το ηλεκτρόδιο υπερβεί μία κρίσιμη τιμή E_0 . Περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης, οδηγεί σε ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους. Η αντίστοιχη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη τιμή διάσπασης (E_b).

Ο προσδιορισμός των τιμών των δύο αυτών παραμέτρων είναι πολύ σημαντικός για την περιγραφή των αντίστοιχων φαινομένων, αν ληφθεί, μάλιστα, υπ' όψιν ότι, οι κρίσιμες τιμές E_0 και E_b διαφέρουν, όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών ειδών χώματος, αλλά και για το ίδιο είδος χώματος, όταν αυτό έχει διαφορετικά επίπεδα περιεκτικότητας σε υγρασία. Για το λόγο αυτόν, κρίνεται ότι, η υιοθέτηση μόνο μίας τιμής, ως αντιπροσωπευτικής για καθένα μέγεθος, από τα ως άνω δύο κρίσιμα μεγέθη (E_0 , E_b), είναι λανθασμένη και, μάλιστα, είναι απαραίτητη η μελέτη δειγμάτων χώματος

διαφορετικής σύστασης, υπό συνθήκες ομογενούς και μη ομογενούς πεδίου, ώστε να διαπιστωθεί το εύρος των τιμών και η επίδραση της μορφής του ηλεκτρικού πεδίου στις τιμές της έντασης ιονισμού και διάσπασης. Προκειμένου να επιτευχθεί ο υπολογισμός των κρίσιμων τιμών έντασης ιονισμού και διάσπασης, είναι απαραίτητο να προσδιορισθούν οι αντίστοιχες τιμές τάσεων.

Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, διεξάγονται, κατ' αρχάς, δοκιμές με χρήση δύο διατάξεων (παράλληλων πλακών και κυλινδρικής), προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του είδους του πεδίου στις τιμές της τάσης ιονισμού / διάσπασης διαφορετικών δειγμάτων χώματος, με τη χρήση του διακριβωμένου εξοπλισμού του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Επιπλέον, τα αποτελέσματα του ομογενούς πεδίου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων.

Επίσης, όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 1, η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Καθώς η περιεκτικότητα του χώματος σε υγρασία αυξάνεται, μειώνεται η τιμή της ειδικής αντίστασής του. Συνεπώς, η τιμή της αντίστασης γείωσης οποιουδήποτε συστήματος γείωσης δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από μία σταθερή τιμή: μεταβάλλεται εποχιακά, αλλά και μέσα στην ίδια εποχή ανάλογα με την υγρασία. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των καιρικών συνθηκών στη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης γείωσης, μελετάται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου κατά τη διάρκεια του έτους και παράλληλα καταγράφονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης σε διαφορετικά βάθη.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο πειραματικός εξοπλισμός και αναλύονται οι πειραματικές διαδικασίες, που ακολουθήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων.

2.2 Πειραματική διαδικασία για τη μελέτη του ιονισμού σε εδαφικά δείγματα

2.2.1 Εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή των δοκιμών / μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο, στη συνέχεια, καταγραφόμενος εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

- λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας Messwandler-Bau GmbH MWB/SPR 0.5/5 Trg
- τράπεζα χειρισμών MWB StAG 616

- σταθεροποιητής τάσης Wandel und Goltermann/ WS-30 (3kW)
- καταγραφέας κρουστικού ρεύματος (Current Monitor) Pearson 8260
- διάνναλος ψηφιακός παλμογράφος Tektronix TDS 3052 (500MHz)
- ψηφιακό μετρητικό σύστημα Heafely DIAS 733
- διαφορικός καταμεριστής Schaffner MD 200
- ομοαξονικά καλώδια ECOFLEX 10 χαμηλών απωλειών 50 Ω
- κλωβός Faraday, κατασκευής Siemens
- ψηφιακό ισχύόμετρο (digital power meter) Yokogawa WT210
- υγρόμετρο – θερμόμετρο TESTO 625
- βαρόμετρο TESTO 511

2.2.2 Εδαφικά δείγματα

Αναφορικά με την προετοιμασία των εδαφικών δειγμάτων, αυτή περιλαμβάνει, αρχικά, κοσκίνισμα του δείγματος, ώστε να απομακρυνθούν ξένα σώματα και, στη συνέχεια, ξήρανσή του στους 105°C, για 48 ώρες. Προτού το δείγμα τοποθετηθεί στο δοχείο, το αφήνουμε να έλθει σε θερμοκρασία δωματίου. Για ν' αποκτήσει το εδαφικό δείγμα την επιθυμητή περιεκτικότητα κατά βάρος σε υγρασία, προσθέτουμε απιονισμένο νερό και ανακατεύουμε το μείγμα, ώστε να ομογενοποιηθεί. Στα **Σχήματα 2.1(i)** έως και **2.1(iii)** παρουσιάζονται τα εδαφικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

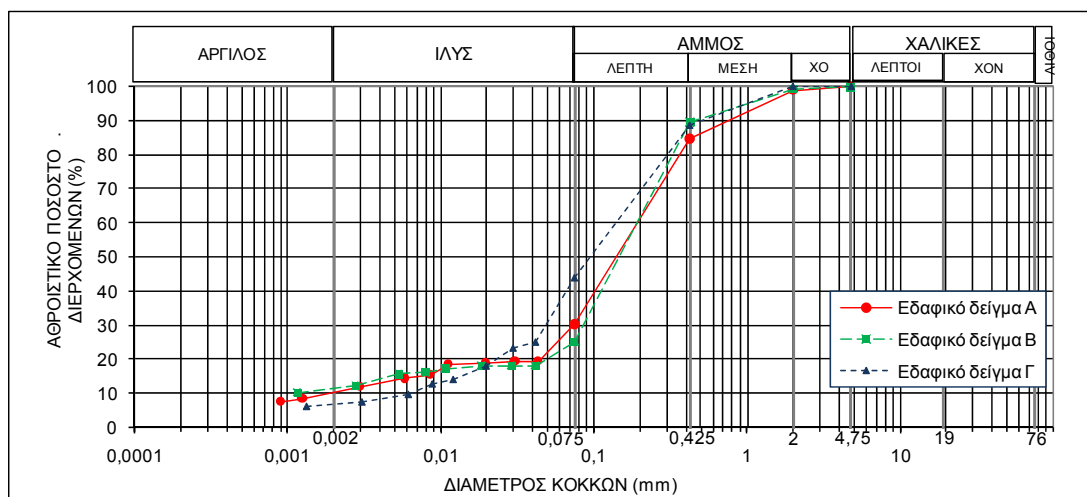


Σχήμα 2.1 Εδαφικά δείγματα i) Δείγμα Α, ii) Δείγμα Β, iii) Δείγμα Γ.

Η σύσταση των εδαφικών δειγμάτων, όπως αυτή προέκυψε μετά από κοκκομετρική ανάλυση [2.1] παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.1**. Επιπλέον, στο **Σχήμα 2.2** παρουσιάζονται οι αθροιστικές κοκκομετρικές καμπύλες κάθε δείγματος. Θα πρέπει, τέλος, να σημειωθεί ότι, το δείγμα χώματος Γ περιέχει τύρφη σε ποσοστό 50%, χαλκό (150mg/kg), ψευδάργυρο (500mg/kg), άζωτο (1,2%) και άνθρακα (37%).

	Δείγμα χώματος Α	Δείγμα χώματος Β	Δείγμα χώματος Γ
Χάλικες (%)	0	0	0
Άμμος (%)	70	75	56
Λεπτόκοκκο Ιλύς (%)	20	14	38
Αργίλος(%)	10	11	7

Πίνακας 2.1 Κοκκομετρική ανάλυση εδαφικών δειγμάτων.



Σχήμα 2.2 Αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη εδαφικών δειγμάτων.

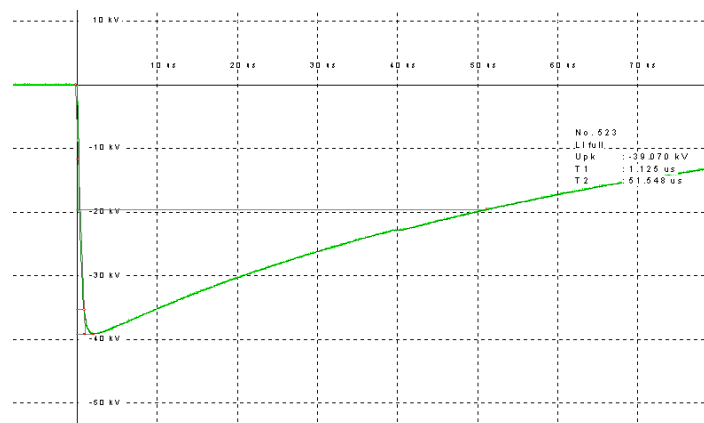
2.2.3 Πειραματικές διατάξεις

Οι δοκιμές, που διεξήχθησαν, αφορούσαν στην επιβολή κρουστικής τάσης (θετικής και αρνητικής πολικότητας) σε εδαφικά δείγματα, με σκοπό τον προσδιορισμό της τάσης έναρξης του ιονισμού (με χρήση κυλινδρικής διάταξης) και της τάσης διάσπασης (με χρήση διάταξης παραλλήλων πλακών). Προς επίτευξη τούτου, χρησιμοποιήθηκε η λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας, που φαίνεται στο **Σχήμα 2.3**. Ο έλεγχός της πραγματοποιείται μέσω της τράπεζας χειρισμών, η οποία τροφοδοτείται από το δίκτυο χαμηλής τάσης της Δ.Ε.Η. μέσω του σταθεροποιητή τάσης.



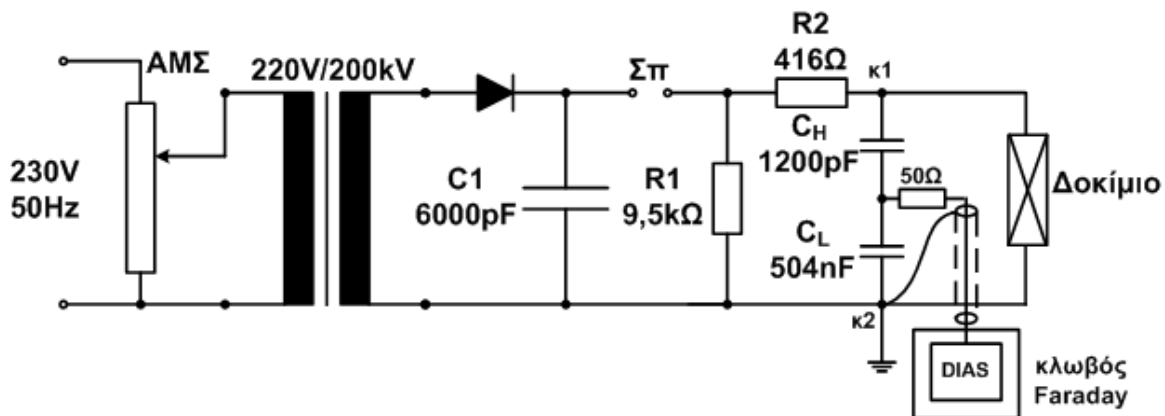
Σχήμα 2.3 Ανόρμη μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια.

Η επιλογή των αντιστάσεων και των πυκνωτών, που συνθέτουν την κρουστική γεννήτρια, έγινε κατάλληλα, ώστε η παραγόμενη εν κενώ τάση να είναι της μορφής 1,2/50μs. Προς επιβεβαίωση τούτου, πριν την έναρξη των δοκιμών, ελέγχεται στο DIAS 733 η μορφή της παραγόμενης κρουστικής τάσης εν κενώ και η συμφωνία της με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 60060-1 [2.2]. Στο **Σχήμα 2.4** παρουσιάζεται η κυματομορφή της παραγόμενης τάσης για εν κενώ λειτουργία της γεννήτριας.



Σχήμα 2.4 Κυματομορφή παραγόμενης τάσης στην έξοδο της κρουστικής γεννήτριας.

Για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης, με χρήση της διάταξης παραλλήλων πλακών, χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.5**. Το ψηφιακό καταγραφικό σύστημα Heafely DIAS 733, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.6**. Το μετρητικό σύστημα DIAS 733 παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής τάσεων μέχρι 1kV, χωρίς να απαιτείται οποιοσδήποτε περαιτέρω υποβιβασμός της τάσης.



Σχήμα 2.5 Πειραματική διάταξη παραλλήλων πλακών.



Σχήμα 2.6 Ψηφιακό σύστημα καταγραφής κρουστικών τάσεων Heafely DIAS 733.

Η διάταξη παραλλήλων πλακών, εντός της οποίας τοποθετούνται τα εδαφικά δείγματα, αποτελείται από δύο χάλκινα ηλεκτρόδια διαμέτρου 19,2cm. Τα ηλεκτρόδια αυτά αποτελούν τις βάσεις πλαστικού κυλίνδρου εντός του οποίου τοποθετείται το εδαφικό δείγμα. Για να αποφευχθεί η ύπαρξη κενών μεταξύ του χώματος και των μεταλλικών επιφανειών της διάταξης, το χώμα συμπιέζεται, με ενιαίο τρόπο, μετά την τοποθέτησή του στο δοχείο και, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η καλή επαφή του άνω ηλεκτροδίου με το χώμα εξασφαλίζεται με την πίεση που ασκεί βάρος 2kg στο δοκίμιο. Στο *Σχήμα 2.7* φαίνεται η διάταξη παραλλήλων πλακών.



Σχήμα 2.7 Διάταξη παραλλήλων πλακών.

Για τον προσδιορισμό της τάσης έναρξης του ιονισμού, με χρήση της κυλινδρικής διάταξης, είναι απαραίτητη η μέτρηση και η καταγραφή της επιβαλλόμενης στο δοκίμιο τάσης, καθώς και του ρεύματος που το διαρρέει. Προκειμένου το σήμα της τάσης να υποβιβασθεί, ώστε να είναι καταγράψιμο, χρησιμοποιήθηκε ο διαφορικός καταμεριστής Schaffner MD 200 (**Σχήμα 2.8**), σε συνδυασμό με χωρητικό καταμεριστή, με λόγο υποβιβασμού 421:1.

Για τη μέτρηση του ρεύματος χρησιμοποιήθηκε, ο καταγραφέας κρουστικού ρεύματος (Current Monitor) Pearson 8260, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.9**. Για την καταγραφή και την αποθήκευση των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος, κατασκευής Tektronix, τύπου TDS 3052 (**Σχήμα 2.10**), ο οποίος είναι τοποθετημένος εντός κλωβού Faraday, κατασκευής Siemens, με εξασθένηση 50dB μέχρι τη συχνότητα του 1GHz.

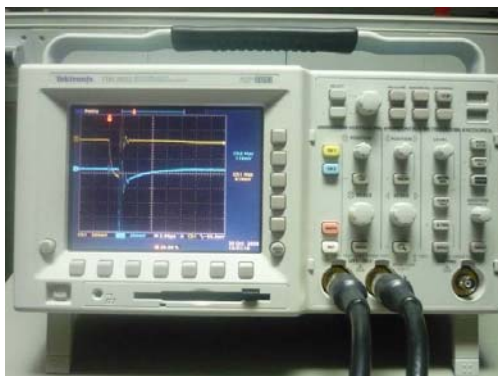
Στο **Σχήμα 2.11** δίνεται το κυκλωματικό μοντέλο της πειραματικής διάταξης.



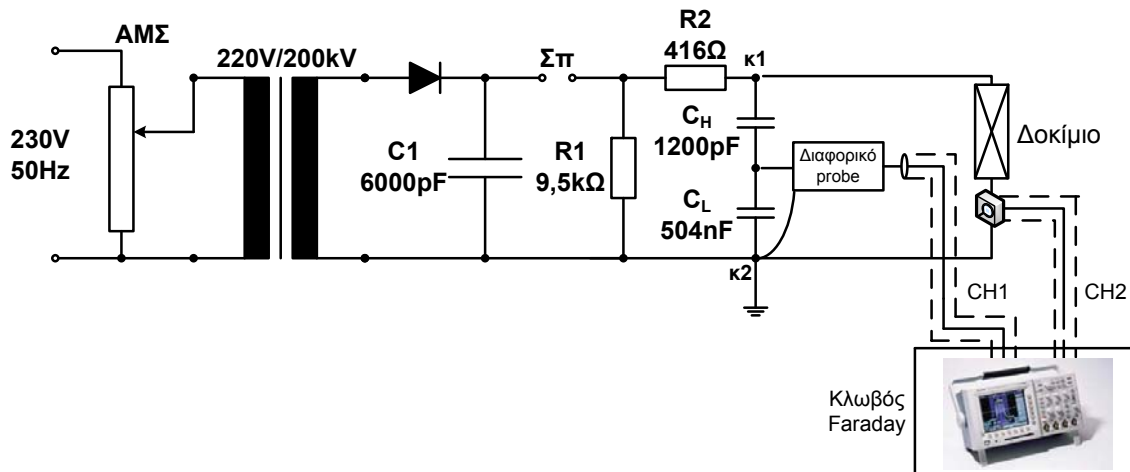
Σχήμα 2.8 Διαφορικός καταμεριστής Schaffner MD200.



Σχήμα 2.9 Καταγραφέας ρεύματος.



Σχήμα 2.10 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052.



Σχήμα 2.11 Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της τάσης έναρξης του ιονισμού.

Τα εδαφικά δείγματα τοποθετούνται εντός χαλυβδίνου κυλινδρικού δοχείου (**Σχήμα 2.12**) με διάμετρο 25cm και ύψος 19cm. Κατά τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του τοποθετείται το χάλκινο ηλεκτρόδιο διαμέτρου 0,5cm, μέσω του οποίου επιβάλλεται η κρουστική τάση στο εδαφικό δείγμα. Δύο ξύλινα κυλινδρικά καλύμματα (καπάκια) αποτελούν τις βάσεις του κυλίνδρου. Θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι, για να αποφευχθεί η ύπαρξη κενών μεταξύ του χώματος και των μεταλλικών επιφανειών της διάταξης, το χώμα συμπιέζεται, με ενιαίο τρόπο, μετά την τοποθέτησή του στο δοχείο.



Σχήμα 2.12 Κυλινδρική διάταξη.

Οι επικρατούσες, στο χώρο του εργαστηρίου, κλιματικές συνθήκες, κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων, καταγράφονται με τη βοήθεια του υγραμέτρου – θερμομέτρου TESTO 625 και του βαρομέτρου TESTO 511.

2.2.4 Προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού σε διάταξη παραλλήλων πλακών

Όπως αναλύθηκε και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην περίπτωση χρήσης της διάταξης παραλλήλων πλακών, η τάση διάσπασης $U_{50\%}$ ταυτίζεται με την τάση έναρξης του ιονισμού, συνεπώς, ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης ιονισμού ταυτίζεται με τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ του δοκιμίου. Ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60060-1 [2.2] πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου της αυξομείωσης της τάσης (up-and-down method), η οποία επιτρέπει την εύρεση της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$, χρησιμοποιώντας μικρό, σχετικά, αριθμό μετρήσεων. Στο **Σχήμα 2.13** παρουσιάζεται, με τη μορφή διαγράμματος, το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα εδαφικά δείγματα υπό θετική πολικότητα. Δεδομένου ότι, η διάταξη παραλλήλων πλακών χρησιμοποιείται για τη μελέτη του ιονισμού σε συνθήκες ομογενούς πεδίου και, προκειμένου να εξασφαλισθεί αυτή η συνθήκη, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και υπό αρνητική πολικότητα για ξηρά δείγματα χώματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (όπως αυτά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3) επιβεβαιώνουν την ομοιομορφία του πεδίου.



Σχήμα 2.13 Δοκιμές διάσπασης, με τη χρήση της διάταξης παραλλήλων πλακών, για τα εδαφικά δείγματα Α, Β και Γ και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%, 5% και 10%.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυξομείωσης της τάσης, αρχικά επιλέγεται ένα επίπεδο τάσης U_i όσο το δυνατόν πιο κοντά στην, έστω εμπειρικά ή και με χονδροειδή εκτίμηση, αναμενόμενη $U_{50\%}$ και δοκιμάζεται μία φορά, για να διαπιστωθεί, κατά πόσον θα προκαλέσει διάσπαση ή όχι του δοκιμίου. Αν γίνει διάσπαση, η επόμενη δοκιμή γίνεται κατά ένα βήμα τάσης χαμηλότερα, αν όχι, κατά ένα βήμα υψηλότερα.

Έστω ότι, τα επίπεδα τάσης που εφαρμόστηκαν διατεταγμένα κατά αύξουσα τάξη μεγέθους, είναι $U_0, U_1, \dots, U_m$. Επίσης, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καταβάλλεται

προσπάθεια τα επίπεδα τάσεων δοκιμής να ισαπέχουν μεταξύ τους κοινή απόσταση d . Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων ιδιαίτερη σημασία έχει η λεγόμενη «πρώτη σημαντική κρούση», η οποία είναι η πρώτη κρούση από την έναρξη εφαρμογής της μεθόδου, κατά την οποία το αποτέλεσμα διαφέρει από τα αποτελέσματα όλων των προηγούμενων.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, με m_i συμβολίζεται ο αριθμός των αντοχών σε ένα επίπεδο τάσης U_i (δηλαδή κατά την επιβολή αυτής της τάσης στο δοκίμιο δεν συνέβη διάσπαση), με n_i ο αριθμός των διασπάσεων στο ίδιο επίπεδο τάσης και τέλος με M και N το συνολικό πλήθος των αντοχών και των διασπάσεων, αντίστοιχα.

Η εκτίμηση της μέσης τιμής $\hat{U}_{50}$ και της τυπικής απόκλισης $\hat{\sigma}$ της τάσης διάσπασης δίνονται από τις σχέσεις [2.3]:

$$\text{αν } N \leq M$$

$$\hat{U}_{50} = U_0 + d \left(\frac{A_1}{N} - \frac{1}{2} \right) \quad (2.1)$$

$$\hat{\sigma} = 1.62d \left(\frac{NB_1 - A_1^2}{N^2} + 0.029 \right) \quad (2.2)$$

$$A_1 = \sum_i i n_i \quad (2.3)$$

$$B_1 = \sum_i i^2 n_i \quad (2.4)$$

$$\text{αν } N > M$$

$$\hat{U}_{50} = U_0 + d \left(\frac{A_1}{M} + \frac{1}{2} \right) \quad (2.5)$$

$$\hat{\sigma} = 1.62d \left(\frac{MB_0 - A_0^2}{M^2} + 0.029 \right) \quad (2.6)$$

$$A_0 = \sum_i i m_i \quad (2.7)$$

$$B_0 = \sum_i i^2 m_i \quad (2.8)$$

Ένας, σαφώς, απλούστερος τρόπος υπολογισμού της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ όταν το πλήθος των μεμονωμένων μετρήσεων είναι ίσο ή μεγαλύτερο του 20, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωσή μας, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση του τύπου:

$$U_{50\%} = \frac{\sum w_i \cdot U_i}{\sum w_i} \quad (2.9)$$

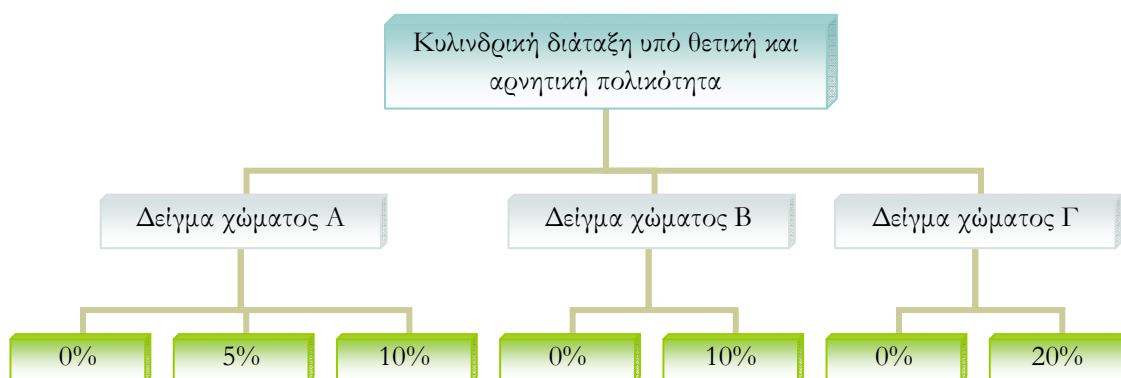
όπου w_i είναι το πλήθος των κρούσεων σε κάθε επίπεδο τάσης U_i [2.4].

2.2.5 Προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού σε κυλινδρική διάταξη με τη μέθοδο των I-V καμπυλών

Η χρήση της μεθόδου των I-V καμπυλών, για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τάσης έναρξης του ιονισμού, έχει εφαρμοσθεί από ερευνητές, όπως οι Armstrong [2.5], Lima

[2.6] και Lee et al. [2.7]. Βάση της μεθόδου αποτελεί η αλλαγή της μορφής της καμπύλης I-V του εδαφικού δείγματος αυξανόμενου του πλάτους της επιβαλλόμενης τάσης. Για χαμηλά επίπεδα κρουστικής τάσης, η καμπύλη I-V προσομοιάζει στην καμπύλη I-V ενός κυκλώματος αντίστασης εν παραλλήλω με πυκνωτή, όταν εφαρμόζεται κρουστική τάση. Καθώς η επιβαλλόμενη τάση αυξάνεται, η καμπύλη αρχίζει να αποκτά τη μορφή κεκλιμένου '8'. Το επίπεδο τάσης για το οποίο παρατηρείται αλλαγή της μορφής της καμπύλης I-V ορίζεται ως η τάση έναρξης ιονισμού.

Στην παρούσα εργασία, προσδιορίζεται η τάση έναρξης του ιονισμού εδαφικών δειγμάτων, με τη μέθοδο των I-V καμπυλών, χρησιμοποιώντας την κυλινδρική διάταξη, που περιγράφηκε προηγουμένως, και επιβολή κρουστικής τάσης, τόσο θετικής, όσο και αρνητικής πολικότητας. Με τη βοήθεια του παλμογράφου, καταγράφονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος, για αυξανόμενα επίπεδα τάσης, σχεδιάζονται οι καμπύλες I-V και καθορίζεται η τάση έναρξης του ιονισμού. Στο **Σχήμα 2.14** παρουσιάζεται το σύνολο των μετρήσεων που ελήφθησαν.



Σχήμα 2.14 Δοκιμές ιονισμού, με τη χρήση κυλινδρικής διάταξης, για τα εδαφικά δείγματα Α, Β και Γ και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%, 5%, 10% και 20%.

2.3 Πειραματική διαδικασία για τη μελέτη της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στην τιμή της αντίστασης γείωσης

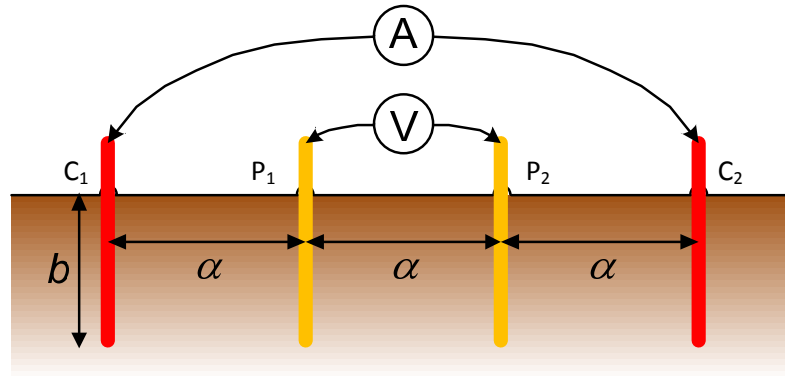
Στο πλαίσιο της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στον αύλειο χώρο του Τ.Ε.Ι. Αθήνας [2.8], [2.9]. Σκοπός των μετρήσεων είναι η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης κατακορύφων ηλεκτροδίων, ώστε να μελετηθεί η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης, συναρτήσει των καιρικών συνθηκών (και συγκεκριμένα της

θερμοκρασίας και του ύψους βροχοπτώσης). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 15 βοηθητικά ηλεκτρόδια, μήκους 45cm και ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο μήκους 1,5m, τοποθετημένα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.15**. Οι μετρήσεις έγιναν, με χρήση του γειωσομέτρου NORMA 1805 GB 2 D/E, σύμφωνα με τη μέθοδο Wenner, για μεταβαλλόμενες αποστάσεις μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων και επαναλαμβάνονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να ελεγχθεί η επίδραση των καιρικών συνθηκών. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προέκυψαν από το μέσο όρο των μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών Μενιδίου, Άνω Λιοσίων και Γαλατσίου, που είναι οι πλησιέστεροι, στην τοποθεσία της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 2.15 Χώρος πραγματοποίησης των μετρήσεων (οι αριθμοί 3...40 αντιπροσωπεύουν την απόσταση a του ηλεκτροδίου από το σημείο αναφοράς 0) [2.9].

Σύμφωνα με τη μέθοδο Wenner [2.10], χρησιμοποιούνται τέσσερα μικρού μήκους ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντια απόσταση a μεταξύ τους και σε βάθος b (όχι μεγαλύτερο από $0,1a$), όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.16**. Η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια C_1 και C_2 , ενώ η τάση μετράται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια P_1 και P_2 .



Σχήμα 2.16 Διάταξη Wenner.

Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως η φαινόμενη αντίσταση R και εξαρτάται από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ϱ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (2.10) [2.10]:

$$\varrho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2 + 4b^2)}} - \frac{2a}{\sqrt{(4a^2 + 4b^2)}}} = \frac{4\pi a R}{n} \quad (2.10)$$

όπου το n εξαρτάται από τον λόγο b/a και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.

Στην περίπτωση που $a \ll b$ η φαινόμενη ειδική αντίσταση σε βάθος a δίνεται από τη (2.11):

$$\varrho = 4\pi a R \quad (2.11)$$

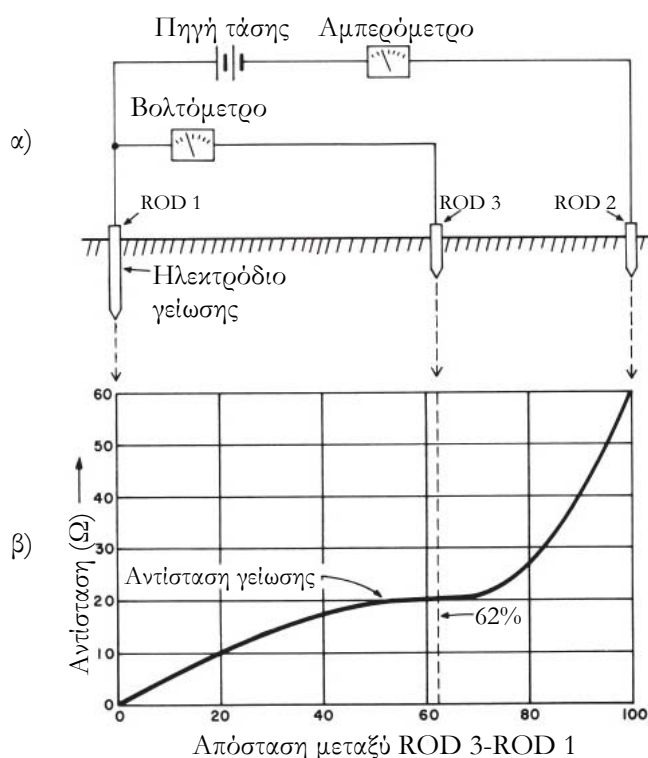
ενώ, αν $b \ll a$, τότε η (2.10) απλοποιείται στην ακόλουθη έκφραση:

$$\varrho = 2\pi a R \quad (2.12)$$

Για να μελετήσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους, μεταβάλλουμε τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, διατηρούμενης της συμμετρίας τους ως προς το κέντρο της διάταξης.

Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης επιλέχθηκε η μέθοδος της πτώσης δυναμικού και εφαρμόστηκε ο κανόνας του 62% [2.11]. Η μέθοδος της πτώσης του δυναμικού συνίσταται στη μέτρηση της μεταβολής του δυναμικού, κατά μήκος του εδάφους, που προκαλείται από την έγχυση ρεύματος μέσω κάποιου ηλεκτροδίου γείωσης. Πιο αναλυτικά, για την πραγματοποίηση της μέτρησης χρησιμοποιείται η διάταξη μέτρησης που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.17**. Η διαφορά δυναμικού (V) μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης (ROD 1) και του βοηθητικού ηλεκτροδίου (ROD 3) μετράται με

ένα βολτόμετρο, ενώ με ένα αμπερόμετρο μετράται το ρεύμα (I) στο βοηθητικό ηλεκτροδίο (ROD 2). Με χρήση του νόμου του Ohm υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης. Μετακινώντας το βοηθητικό ηλεκτροδίο ROD 3 καταγράφονται οι τιμές της αντίστασης για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ του ROD 1 και του ROD 3. Εν συνεχεία, σχεδιάζεται η καμπύλη της αντίστασης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων (ROD 1 και ROD 3) και προκύπτει καμπύλη αντίστοιχη προς αυτή του **Σχήματος 2.17β**. Η τιμή της αντίστασης η οποία αντιστοιχεί στο επίπεδο τμήμα της καμπύλης λαμβάνεται ως η τιμή της αντίστασης γείωσης. Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των μετρήσεων, για τις ανάγκες του πειράματος εφαρμόζεται ο (καθιερωμένος) κανόνας του 62%, δηλαδή το βοηθητικό ηλεκτροδίο τάσης (ROD 3) τοποθετείται στο 62% της απόστασης μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος και του υπό δοκιμή ηλεκτροδίου. Εν προκειμένω, η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος (ROD 2) και του κατακορύφου ηλεκτροδίου (ROD 1) είναι 40m, ενώ το βοηθητικό ηλεκτροδίο (ROD 3) τοποθετείται σε απόσταση 24m από το ηλεκτροδίο ROD 1.



Σχήμα 2.17 Συνδεσμολογία μέτρησης της ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων [2.11].

2.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2

- [2.1] ΦΕΚ Β' 955/31 Δεκεμβρίου 1986, Προδιαγραφές και επί τόπου δοκιμές εδαφομηχανικής.
- [2.2] IEC 60060-1 ed3.0: High Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, 2010.
- [2.3] W. Hauschild, W. Mosch, "Statistical Techniques for High-Voltage Engineering", Peter Peregrinus Ltd., Institution of Engineering and Technology, English Edition, January 1, 1992.
- [2.4] D. Kind, "An Introduction to High-Voltage Experimental Technique", Vieweg Verlag, Braunschweig, 1978.
- [2.5] H.R. Armstrong, "Grounding electrode characteristics from model tests", AIEE Trans., Vol. 72, No. 2, January 1953, pp. 1301-1306.
- [2.6] J.L.C. Lima, S. Visacro, "Experimental developments on soil ionization", in Proc. Int. Conf. Grounding and Earthing & 3rd Int. Conf. Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, November 2008, pp. 174-179.
- [2.7] B.H. Lee, G.H. Park, H.G. Kim, K.S. Lee, "Analysis of soil ionization under Impulse Currents", J. Elect. Eng. and Technol., Vol. 4, No. 1, 2009, pp. 98-105.
- [2.8] I.F. Gonos, A.X. Moronis, I.A. Stathopoulos, "Variation of soil resistivity and ground resistance during the year", 28th International Conference on Lightning Protection, 2006, Kanazawa, Japan, pp. 740-744.
- [2.9] Αρχιμήδης ΙΙ: Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων στα ΤΕΙ, Υπόεργο 13, «Ανάπτυξη σύγχρονων μεθοδολογιών μέτρησης και προσομοίωσης συστημάτων γείωσης με χρήση νέων τεχνολογιών», ΤΕΙ Αθήνας, Αθήνα 2007.
- [2.10] G.F. Tagg, "Earth Resistances", George Newnes Limited, London, 1964.
- [2.11] IEEE Std 81-1983: IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system, 11 March 1983.
- [2.12] Megger, "Getting down to earth", A practical guide to earth resistance.

Κεφάλαιο 3

Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού εδάφους

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης έναρξης του ιονισμού, βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων, που προέκυψαν με χρήση διατάξεων παραλλήλων πλακών αφ' ενός και κυλινδρικής, αφ' ετέρου.

Για την περίπτωση των πειραμάτων με τη διάταξη παραλλήλων πλακών, παρουσιάζεται η διαδικασία εκτίμησης της αβεβαιότητας, που σχετίζεται με τα μεγέθη της ηλεκτρικής διάσπασης δειγμάτων χώματος και, συγκεκριμένα, με την τάση διάσπασης 50% ($U_{50\%}$), τη στιγμιαία τιμή της τάσης διάσπασης (U_{break}), το χρόνο διάσπασης (t_{break}) και την κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_0). Δεδομένου ότι, τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται βάσει παλμογραφημάτων, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, οι υπολογιζόμενες τιμές πρέπει να συνοδεύονται από εκτίμηση της αβεβαιότητας, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα, τόσο των μετρήσεων όσο και της πειραματικής διαδικασίας. Το γεγονός ότι, ο διατιθέμενος από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. και χρησιμοποιούμενος για τις ανάγκες των πειραμάτων, εξοπλισμός διακριβώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μεγεθών. Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου, αναλύονται οι παράγοντες συστηματικής αβεβαιότητας, γίνεται εκτίμηση της τυχαίας αβεβαιότητας βάσει των μετρήσεων και υπολογίζεται η συνολική αβεβαιότητα κάθε μεγέθους. Υπενθυμίζεται, επίσης, το γεγονός ότι, η μέθοδος αυξομείωσης της τάσης παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού και της τυπικής απόκλισης της τάσης

διάσπασης, ενώ στη, σχετική με το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, διεθνή βιβλιογραφία δεν εντοπίστηκε οποιαδήποτε αναφορά στην τυπική απόκλιση της τάσης διάσπασης. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται η τυπική απόκλιση των μετρήσεων, για τον υπολογισμό της τυχαίας αβεβαιότητας των μετρήσεων της τάσης διάσπασης, και, επιπλέον, υπολογίζεται η συνολική αβεβαιότητα, λαμβάνοντας υπ' όψιν και το συστηματικό σφάλμα, το οποίο υπεισέρχεται στις μετρήσεις λόγω του εξοπλισμού, της μεθόδου μέτρησης, κ.λπ.

Από την τιμή της τάσης διάσπασης 50% είναι δυνατός ο άμεσος υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Δεδομένης της αβεβαιότητας, τόσο της τάσης διάσπασης, όσο και του μήκους του διακένου, είναι εύκολος ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας της κρίσιμης έντασης διάσπασης. Θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι, στη βιβλιογραφία, μέχρι σήμερα, παρουσιάζονται οι τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού, για διαφορετικά εδαφικά δείγματα, χωρίς ωστόσο να υπάρχει οποιαδήποτε ένδειξη για την τυπική απόκλιση ή την αβεβαιότητα αυτών των τιμών. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η παρουσιάζόμενη στην παρούσα διατριβή πρόταση για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της τάσης ιονισμού και της κρίσιμης έντασης ιονισμού [3.1], [3.2], έρχεται να καλύψει ένα σημαντικό κενό της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, πέραν του προσδιορισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού με τη χρήση διάταξης παραλλήλων πλακών, κρίνεται απαραίτητη η μελέτη του ιονισμού του εδάφους, υπό συνθήκες μη ομογενούς πεδίου, δυνατότητα που μας παρέχει η κυλινδρική διάταξη. Κατ' αυτόν τον τρόπο καθίσταται εφικτή η 'προσομοίωση' συνθηκών, που επικρατούν σ' ένα πραγματικό σύστημα γείωσης. Δεδομένης της απουσίας μιας κοινώς αποδεκτής μεθόδου προσδιορισμού της τάσης έναρξης ιονισμού, ο προσδιορισμός της υπό συνθήκες μη ομογενούς πεδίου αποτελεί πρόκληση. Επιπλέον, ο υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού περιπλέκεται, εξαιτίας των διαφορετικών μεθοδολογιών που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Για τους παραπάνω λόγους, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται, πέραν του προσδιορισμού της τάσης έναρξης, εφαρμογή και σύγκριση των προταθειών κατά καιρούς στη βιβλιογραφία μεθοδολογιών, για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης.

3.2 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού εδαφικών δειγμάτων τοποθετημένων σε διάταξη παραλλήλων πλακών

3.2.1 Προσδιορισμός της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$

Για τον προσδιορισμό της τάσης έναρξης ιονισμού σε εδαφικά δείγματα, υπό συνθήκες ομογενούς πεδίου, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη παραλλήλων πλακών και εφαρμόστηκε η μέθοδος αυξομείωσης της τάσης (up-and-down method) [3.3]. Χρησιμοποιήθηκαν τα εδαφικά δείγματα, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για δείγματα που περιείχαν υγρασία σε ποσοστά 5% και 10% κατά βάρος, καθώς και για ξηρά δείγματα.

Δείγμα Χώματος	Πολικότητα	Περιεκτικότητα σε υγρασία	$U_{50\%}$ (kV)	σ (kV)
Α	+	0%	37,89	1,66
		5%	50,33	3,49
		10%	41,40	2,19
	-	0%	35,20	0,93
Β	+	0%	67,69	6,27
		5%	66,05	1,21
		10%	43,60	1,22
	-	0%	70,74	8,04
Γ	+	0%	62,92	1,02
		5%	51,37	3,84
		10%	46,85	0,77
	-	0%	62,89	4,07

Πίνακας 3.1 Τιμές των τάσεων διάσπασης για τα τρία είδη χώματος με διαφορετικές περιεκτικότητες σε υγρασία.

Στον **Πίνακα 3.1** καταγράφονται οι μέσες τιμές της $U_{50\%}$, μαζί με την τυπική απόκλιση, όπως αυτές υπολογίζονται από τους τύπους (2.1) έως και (2.8). Για δείγματα ξηρού χώματος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές, τόσο υπό θετική, όσο και υπό αρνητική κρουστική τάση. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν, ώστε να γίνει έλεγχος της ομοιογένειας του ηλεκτρικού πεδίου, που παραγόταν από τις παράλληλες πλάκες, η κατάληξη, δε, του ελέγχου υπήρξε θετική. Κατόπιν αυτής της διαπιστώσεως, οι μετρήσεις με εδαφικά δείγματα περιέχοντα υγρασία, πραγματοποιήθηκαν μόνον υπό θετική κρουστική τάση. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων στα εδαφικά δείγματα Β και Γ, επιλέχθηκε απόσταση 7cm, μεταξύ των πλακών, η οποία έγινε 5cm, για τη διεξαγωγή των πειραμάτων στο εδαφικό δείγμα Α.

3.2.2 Υπολογισμός της αβεβαιότητας μέτρησης

Με τον όρο αβεβαιότητα προσδιορίζεται το εύρος τιμών εκατέρωθεν ($\pm$) της μετρούμενης από το όργανο τιμής, μέσα στο οποίο βρίσκεται η «αληθινή» ή «πραγματική» τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης) [3.4]. Το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στις πληροφορίες ποσοτικού προσδιορισμού ενός μεγέθους, επισημαίνει στον χρήστη του αποτελέσματος της μέτρησης το ενδεχόμενο ύπαρξης σφαλμάτων.

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης συναπαρτίζεται, γενικά, από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: στην αβεβαιότητα τύπου Α και στην αβεβαιότητα τύπου Β. Οι συνιστώσες τύπου Α προκύπτουν μέσω της στατιστικής επεξεργασίας σειρών μετρήσεων και λόγω της τυχαιότητάς τους ακολουθούν κανονική κατανομή. Κάθε παράγων τυχαιάς αβεβαιότητας χαρακτηρίζεται από την τυπική απόκλιση των μετρούμενων τιμών. Οι συνιστώσες τύπου Β, δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, αλλά από πιστοποιητικά διακρίβωσης του εξοπλισμού, δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις, χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης, αλλά και την εμπειρία και την υποκειμενική κρίση του μετρολόγου.

3.2.2.1 Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης τύπου Α

Οι αβεβαιότητες τύπου Α υπολογίζονται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και, για λόγους πρακτικούς, όσο και στατιστικούς, προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή. Για μικρό πλήθος μετρήσεων υπολογίζεται μέσω της σχέσης [3.4]:

$$U_r = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

όπου ο συντελεστής t Student επιλέγεται, από πίνακες, ανάλογα με το επίπεδο εμπιστοσύνης (για την περίπτωση μας, επιλέχθηκε διάστημα εμπιστοσύνης 95%) και το πλήθος των μετρήσεων. Η τυπική απόκλιση, για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της στιγμιαίας τάσης διάσπασης (U_{break}) και της αντίστοιχης χρονικής στιγμής (t_{break}), προκύπτει από τον τύπο (3.2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (3.2)$$

όπου u_i είναι οι μετρούμενες τιμές και $\bar{u}$ η μέση τιμή των μετρήσεων.

Οι τιμές της τυχαίας αβεβαιότητας που προκύπτουν για τα τρία ως άνω μεγέθη εκφράζονται στις μονάδες του εκάστοτε μεγέθους. Συνήθως, παρίσταται η ανάγκη έκφρασης αυτών των τιμών (και) ως ποσοστό της μέσης τιμής. Για τον λόγο αυτόν, χρησιμοποιείται ο τύπος (3.3):

$$U_{r\%} = \frac{\sigma \cdot t}{\sqrt{n \cdot \bar{u}}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

3.2.2.2 Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης τύπου B

Για την εκτίμηση της αβεβαιότητας τύπου B (U_s), χρησιμοποιείται κάθε διαθέσιμη για τον πειραματικό εξοπλισμό και την πειραματική διάταξη πληροφορία, η οποία προέρχεται από πιστοποιητικά διακρίβωσης, δεδομένα προηγούμενων μετρήσεων, χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις [3.5]. Βάσει του πιστοποιητικού διακρίβωσης [3.6] του ψηφιακού συστήματος καταγραφής κρουστικών τάσεων DIAS 733 η αβεβαιότητα για τη μέγιστη τιμή αποκομμένης κρουστικής τάσης είναι 0,6% και για την καταγραφή του χρόνου 1%, με διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

3.2.2.3 Εκτίμηση ολικής αβεβαιότητας μέτρησης

Δεδομένων των παραμέτρων τυχαίας και συστηματικής αβεβαιότητας, για διάστημα εμπιστοσύνης μεγαλύτερο και ίσο του 95%, υπολογίζεται η ολική αβεβαιότητα με τη βοήθεια του τύπου:

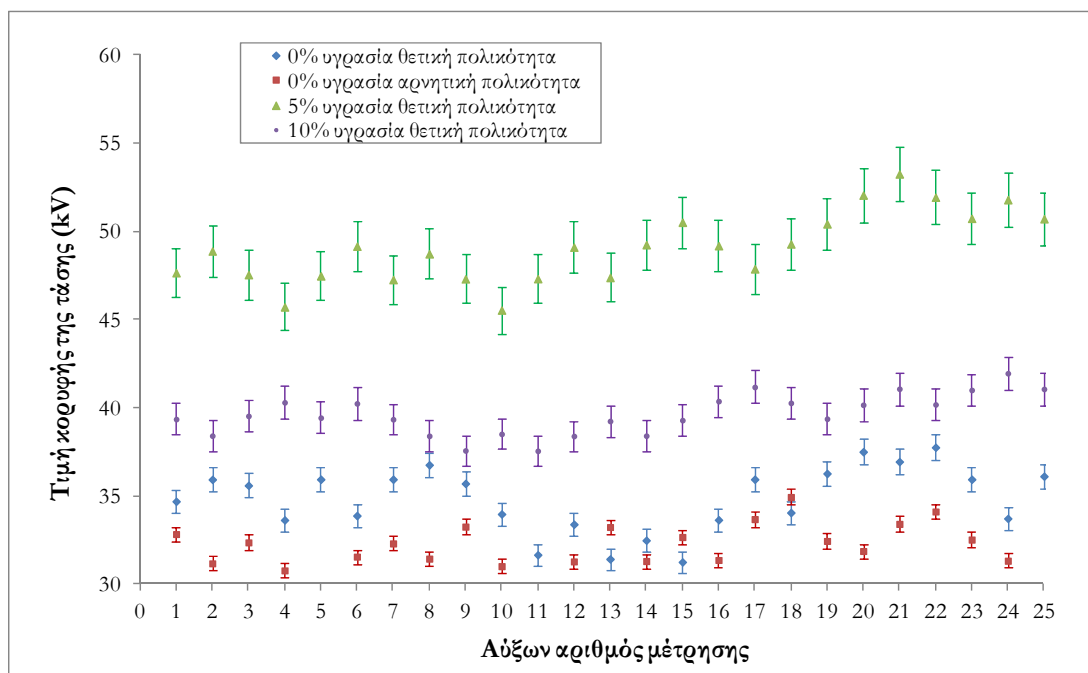
$$U = \sqrt{U_s^2 + U_r^2} \quad (3.4)$$

Στον **Πίνακα 3.2** παρατίθενται οι ολικές αβεβαιότητες της τάσης διάσπασης 50% για όλα τα δείγματα χρώματος, που μελετήθηκαν. Για τον υπολογισμό της τυχαίας αβεβαιότητας (U_r) χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (3.3) για τις τιμές της τυπικής απόκλισης που παρουσιάστηκαν στον **Πίνακα 3.1** και πλήθος n ίσο προς τον αριθμό των χρήσιμων κρούσεων.

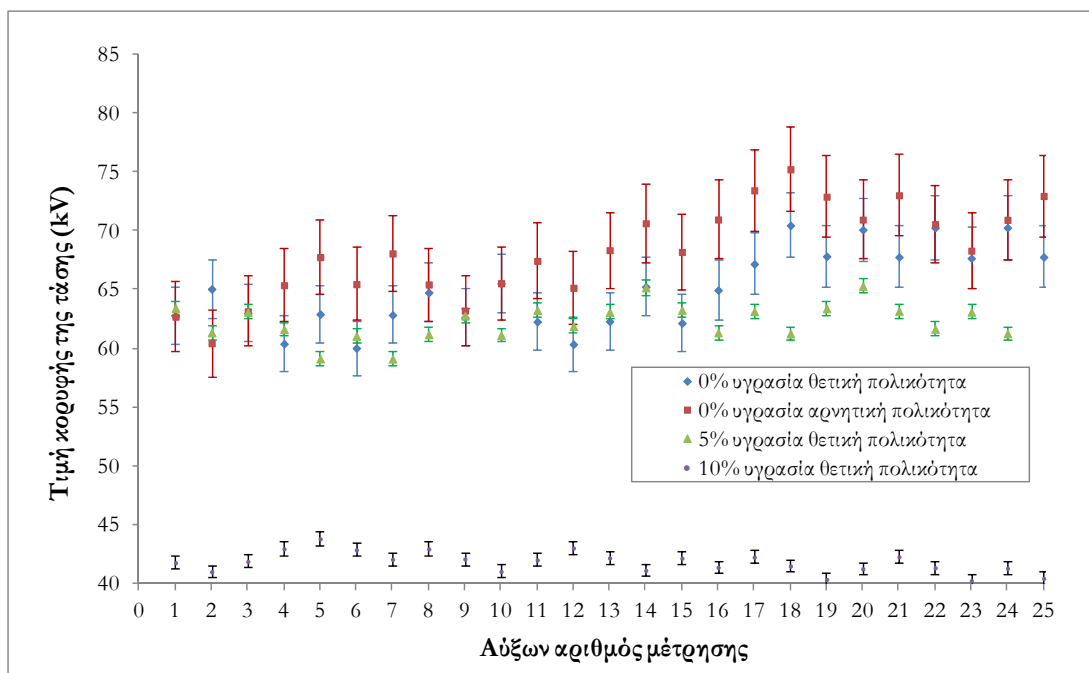
Δείγμα Χώματος	Πολικότητα	Περιεκτικότητα σε υγρασία	$U_{50\%}$ (kV)	U_r (%)	U (%)
Α	+	0%	37,89	1,82	1,92
		5%	50,33	2,87	2,93
		10%	41,40	2,18	2,26
	-	0%	35,20	1,13	1,28
Β	+	0%	67,69	3,82	3,87
		5%	66,05	0,76	0,97
		10%	43,60	1,16	1,30
	-	0%	70,74	4,69	4,73
Γ	+	0%	62,92	0,67	0,90
		5%	51,37	3,09	3,14
		10%	46,85	0,68	0,91
	-	0%	62,89	2,67	2,74

Πίνακας 3.2 Τιμές της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$, τυχαία αβεβαιότητα και ολική αβεβαιότητα της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ για τα εδαφικά δείγματα.

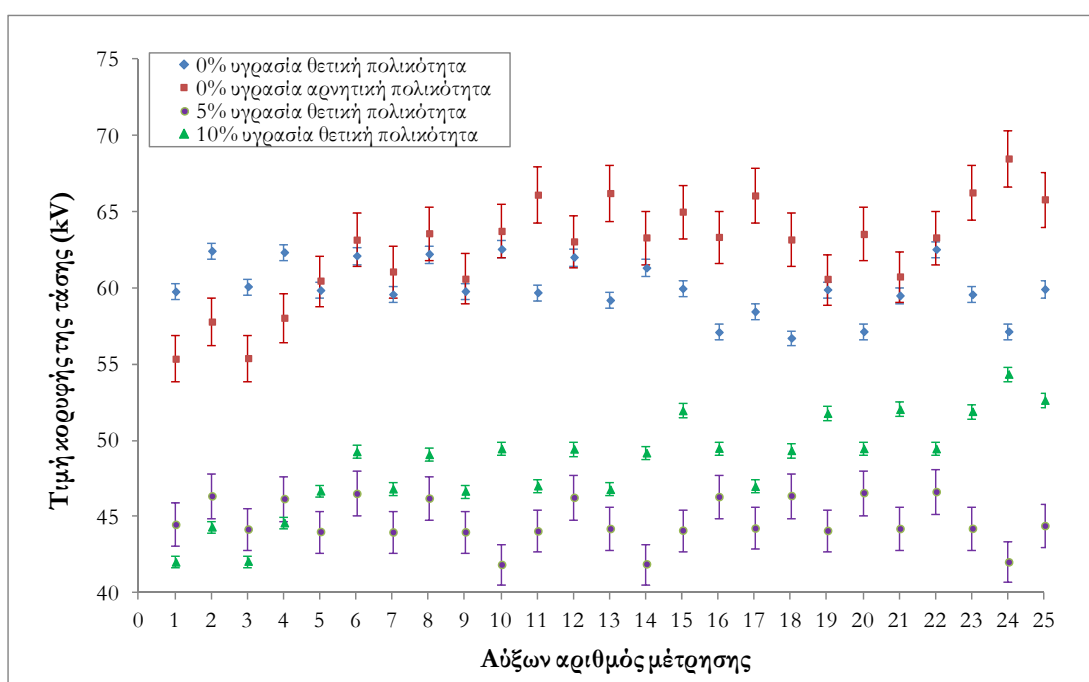
Στα **Σχήματα 3.1** έως και **3.3**, που παρατίθενται στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης στο δοκίμιο, μαζί με την αβεβαιότητά τους για το σύνολο των χρήσιμων κρούσεων, που πραγματοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυξομείωσης της τάσης για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$.



Σχήμα 3.1 Τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης στο δοκίμιο, για το δείγμα χώματος Α, με τη συνολική αβεβαιότητα.



Σχήμα 3.2 Τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης στο δοκίμιο, για το δείγμα χώματος Β, με τη συνολική αβεβαιότητα.



Σχήμα 3.3 Τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης στο δοκίμιο, για το δείγμα χώματος Γ, με τη συνολική αβεβαιότητα.

Πέραν της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$, η οποία καθορίζει την κρίσιμη ένταση έναρξης του ιονισμού, ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η τιμή της στιγμιαίας τάσης διάσπασης (U_{break}) καθώς και η αντίστοιχη χρονική στιγμή (t_{break}). Στους **Πίνακες 3.3** έως και **3.14**, που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη ταξιμονημένα ανά επίπεδο συνεχούς τάσης φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας, μαζί με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας					
	$U_- = 42,5\text{kV}$		$U_- = 45,0\text{kV}$		$U_- = 47,5\text{kV}$	
	$U_{break}(\text{kV})$	$t_{break}(\mu\text{s})$	$U_{break}(\text{kV})$	$t_{break}(\mu\text{s})$	$U_{break}(\text{kV})$	$t_{break}(\mu\text{s})$
	33,4	3,2	35,6	1,7	36,0	1,1
	33,2	1,7	35,4	1,9	36,0	1,8
	32,5	1,2	35,5	2,8	36,6	1,2
			35,7	2,2	37,4	1,5
					37,6	1,5
U_r	1,17	2,54	0,21	0,79	0,96	0,36
$U_r(\%)$	3,55	125,98	0,58	36,90	2,60	25,59
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	3,60	125,98	0,83	36,91	2,67	25,61

Πίνακας 3.3 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Α, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας					
	$U_- = 40,0\text{kV}$		$U_- = 42,5\text{kV}$		$U_- = 45,0\text{V}$	
	$U_{break}(\text{kV})$	$t_{break}(\mu\text{s})$	$U_{break}(\text{kV})$	$t_{break}(\mu\text{s})$	$U_{break}(\text{kV})$	$t_{break}(\mu\text{s})$
	30,9	1,6	33,0	1,4	34,8	1,4
	30,9	1,6	32,5	1,2	34,3	1,2
			32,4	1,2		
			33,2	1,9		
			33,0	1,6		
			32,4	1,4		
			32,5	1,4		
			32,6	1,4		
U_r	0,00	0,13	0,26	0,17	3,18	1,21
$U_r(\%)$	0,00	7,89	0,81	12,09	9,19	95,38
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	0,60	7,95	1,01	12,13	9,21	95,38

Πίνακας 3.4 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Α, υπό αρνητική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας							
	$U_- = 83,5\text{kV}$		$U_- = 86,0\text{kV}$		$U_- = 88,5\text{kV}$		$U_- = 91\text{kV}$	
	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)
	46,8	1,4	47,8	1,5	49,8	1,3	51,8	1,1
	42,7	2,2	48,2	1,3	46,3	2,2	48,6	1,9
			48,5	1,0				
			47,6	1,6				
			43,3	2,5				
U_r	26,03	5,27	2,66	0,71	22,23	5,40	20,32	5,02
U_r (%)	58,18	290,39	5,66	45,20	46,25	307,55	40,48	326,81
U_s (%)	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
U (%)	58,18	290,39	5,69	45,21	46,26	307,55	40,48	326,81

Πίνακας 3.5 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Α, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 5%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας							
	$U_- = 106,5\text{kV}$		$U_- = 109,0\text{kV}$		$U_- = 111,5\text{kV}$		$U_- = 114,0\text{kV}$	
	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)	U_{break} (kV)	t_{break} (μs)
	33,7	1,4	31,8	1,8	36,0	1,3	38,3	1,1
	34,7	1,3	31,3	1,9	37,6	1,1	34,6	1,6
			29,8	2,0	32,0	1,9	39,3	1,0
U_r	6,35	0,95	2,53	0,31	7,16	1,01	6,15	0,76
U_r (%)	18,57	70,30	8,19	16,32	20,34	71,91	16,43	62,91
U_s (%)	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
U (%)	18,58	70,30	8,21	16,35	20,35	71,92	16,45	62,92

Πίνακας 3.6 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Α, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας					
	$U_- = 77,0\text{kV}$		$U_- = 79,5\text{kV}$		$U_- = 84,5\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	61,7	3,2	64,9	1,9	69,6	2,3
	61,5	3,4	63,5	3,7	69,9	2,6
	61,9	2,5	63,6	4,2	68,0	4,2
			64,6	2,9	66,9	5,3
U_r	0,50	1,20	1,12	1,60	2,24	2,24
$U_r(\%)$	0,80	39,69	1,75	51,21	3,26	62,46
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	1,00	39,70	1,85	51,22	3,32	62,47

Πίνακας 3.7 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος B, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας					
	$U_- = 83,5\text{kV}$		$U_- = 86,0\text{kV}$		$U_- = 88,5\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	67,7	1,8	70,2	2,4	72,7	2,7
	67,4	2,8	70,0	2,2	71,5	3,7
	65,4	4,0				
U_r	3,10	2,82	1,27	1,40	7,62	6,35
$U_r(\%)$	4,64	98,39	1,81	60,22	10,57	198,44
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	4,68	98,39	1,91	60,22	10,59	198,44

Πίνακας 3.8 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος B, υπό αρνητική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας					
	$U_- = 85,0\text{kV}$		$U_- = 87,5\text{kV}$		$U_- = 90,0\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	51,0	5,8	59,1	3,1	60,7	3,0
	47,2	7,6	46,7	8,3	55,2	5,2
	46,0	8,2	54,7	4,7		
			38,2	1,4		
			48,1	7,7		
			48,2	7,7		
			58,0	3,5		
			52,0	5,2		
U_r	6,51	3,18	5,70	2,09	34,93	14,03
$U_r(\%)$	13,55	44,19	11,26	40,15	60,27	340,21
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	13,56	44,20	11,27	40,16	60,27	340,21

Πίνακας 3.9 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος B, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 5%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας					
	$U_- = 106,5\text{kV}$		$U_- = 109,0\text{kV}$		$U_- = 111,5\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	23,5	3,5	23,5	3,5	26,2	3,2
	23,6	3,5	20,2	4,4	28,2	2,6
	19,9	4,3	29,5	2,3	31,4	2,1
			13,9	6,3		
			28,2	2,6		
			25,3	3,2		
U_r	5,20	1,20	6,02	1,53	6,51	1,27
$U_r(\%)$	23,30	31,94	25,69	41,03	22,77	48,09
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	23,30	31,96	25,69	41,04	22,78	48,10

Πίνακας 3.10 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος B, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας			
	$U_- = 73,5\text{kV}$		$U_- = 76,0\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	59,3	3,3	61,2	3,3
	58,4	1,5	62,2	1,8
	58,8	3,9	61,2	2,4
	59,4	2,1	62,2	1,9
			60,0	5,8
			62,0	2,0
			61,1	1,4
			62,0	3,0
U_r	0,74	1,73	0,64	1,16
$U_r(\%)$	1,25	64,73	1,04	43,27
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	1,39	64,74	1,20	43,28

Πίνακας 3.11 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Γ, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας			
	$U_- = 76,0\text{kV}$		$U_- = 78,5\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	63,2	1,9	65,8	3,2
	63,5	2,4	66,0	2,2
	62,9	2,2	64,9	1,4
	62,7	3,5	63,4	5,7
			65,8	1,6
U_r	0,52	1,08	1,35	2,16
$U_r(\%)$	0,82	43,77	2,06	77,06
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	1,01	43,78	2,15	77,07

Πίνακας 3.12 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Γ, υπό αρνητική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας			
	$U_- = 64,5\text{kV}$		$U_- = 67,0\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	48,4	4,0	50,8	4,2
	48,4	3,7	51,2	3,5
	47,6	5,3	51,1	4,1
	47,5	5,5	51,6	3,8
	46,5	6,7		
U_r	0,53	0,48	0,98	1,51
$U_r(\%)$	1,03	12,46	2,05	30,04
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	1,19	12,50	2,14	30,06

Πίνακας 3.13 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Γ, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 5%.

	Συνεχής τάση φόρτισης (U_-) της κρουστικής γεννήτριας			
	$U_- = 58,0\text{kV}$		$U_- = 60,5\text{kV}$	
	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$	$U_{\text{break}}(\text{kV})$	$t_{\text{break}}(\mu\text{s})$
	41,5	4,4	43,8	4,1
	36,6	9,0	42,8	4,9
	39,1	6,7	44,3	3,9
			41,5	5,6
			38,6	8,5
			43,3	4,6
			39,5	7,8
			44,5	3,8
			38,4	8,9
U_r	6,08	5,71	1,89	1,57
$U_r(\%)$	15,57	85,35	4,51	27,07
$U_s(\%)$	0,60	1,00	0,60	1,00
$U(\%)$	15,58	85,36	4,55	27,09

Πίνακας 3.14 Μετρήσεις, για το δείγμα χρώματος Γ, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%.

3.2.3 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_o) και της αντίστοιχης αβεβαιότητας μέτρησης

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε στην παράγραφο 1.6, η εφαρμογή της μεθόδου της αυξομείωσης της τάσης, για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ (που ταυτίζεται με την τάση έναρξης ιονισμού) σε διάταξη παραλλήλων πλακών, επιτρέπει τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης E_o , ταυτιζομένης, εν προκειμένω, με την πεδιακή ένταση διάσπασης E_b , με τη βοήθεια του τύπου:

$$E_o = \frac{U_{50\%}}{d} \quad (3.5)$$

όπου $U_{50\%}$ είναι η τάση διάσπασης 50% και d η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Η αβεβαιότητα της κρίσιμης πεδιακής έντασης (U_{E_o}) υπολογίζεται από τον τύπο (3.6) βάσει του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων [3.5]:

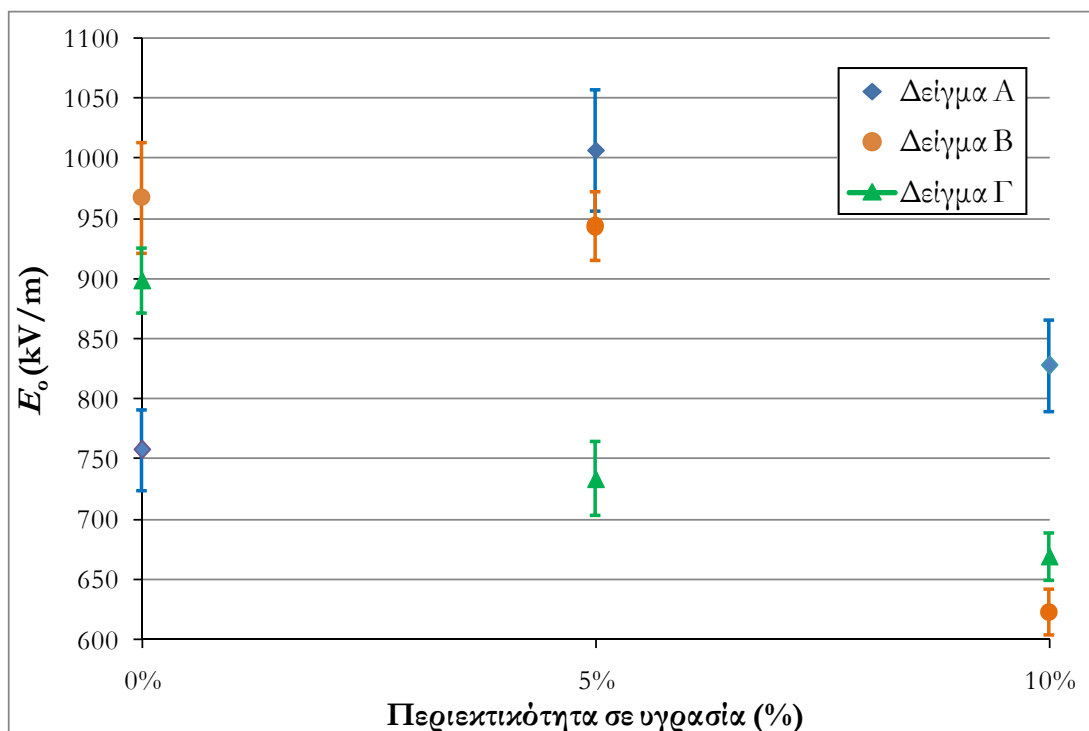
$$U_{E_o} = \frac{U_{50\%}}{d} \sqrt{\frac{U_{U_{50\%}}^2}{U_{50\%}^2} + \frac{U_d^2}{d^2}} \quad (3.6)$$

όπου $U_{50\%}$ η τάση διάσπασης 50% σε kV, d η απόσταση μεταξύ των παράλληλων πλακών σε m, $U_{U_{50\%}}$ η αβεβαιότητα της τάσης διάσπασης σε kV και U_d η αβεβαιότητα της απόστασης μεταξύ των δύο παράλληλων πλακών σε m.

Στον **Πίνακα 3.15** παρατίθενται οι τιμές της τάσης διάσπασης (όπως έχουν, ήδη, καταγραφεί στον **Πίνακα 3.2**) και της κρίσιμης έντασης E_o , μαζί με τις τιμές των ολικών αβεβαιοτήτων, όπως υπολογίσθηκαν, από την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας, και στο **Σχήμα 3.4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Δείγμα Χώματος	Πολικότητα	Περιοικτικότητα σε υγρασία	$U_{50\%} \pm U_{U_{50\%}}$ (kV)	$E_o \pm U_{E_o}$ (kV/m)
Α	+	0%	$37,89 \pm 0,73$	$757,80 \pm 33,61$
		5%	$50,33 \pm 1,47$	$1006,60 \pm 29,57$
		10%	$41,40 \pm 0,94$	$828,00 \pm 49,91$
	-	0%	$35,20 \pm 0,45$	$704,00 \pm 38,04$
Β	+	0%	$67,69 \pm 2,62$	$967,00 \pm 46,52$
		5%	$66,05 \pm 0,64$	$943,57 \pm 28,47$
		10%	$43,60 \pm 0,57$	$622,86 \pm 19,55$
	-	0%	$70,74 \pm 3,35$	$1010,57 \pm 55,84$
Γ	+	0%	$62,92 \pm 0,57$	$898,86 \pm 26,93$
		5%	$51,37 \pm 1,61$	$733,86 \pm 31,15$
		10%	$46,85 \pm 0,43$	$669,29 \pm 20,07$
	-	0%	$62,89 \pm 1,72$	$898,43 \pm 35,57$

Πίνακας 3.15 Τιμές της τάσης διάσπασης και της κρίσιμης έντασης, με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες.



Σχήμα 3.4 Γραφική παράσταση της κρίσιμης πεδιακής έντασης, για τα τρία εδαφικά δείγματα, με περιεκτικότητες κατά βάρος σε υγρασία 0%, 5% και 10%, υπό θετική πολικότητα.

3.2.4 Συμπεράσματα για την τάση διάσπασης $U_{50\%}$

Σύμφωνα με τη μέχρι σήμερα πραγματοποιηθείσα έρευνα [3.7]-[3.18], η τάση διάσπασης αναμένεται να μειώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του εδαφικού δείγματος σε υγρασία, εφ' όσον αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία συμβάλλει στη μείωση της ειδικής αντίστασης του δείγματος. Βάσει των **Σχημάτων 3.1** έως και **3.3** και των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στον **Πίνακα 3.1** παρατηρούμε ότι, για τα δείγματα χρώματος Β και Γ, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία, όντως η τάση διάσπασης μειώνεται. Στην περίπτωση του δείγματος Α παρατηρείται το φαινόμενο η τάση διάσπασης για ξηρό δείγμα να είναι μικρότερη από την τάση διάσπασης όταν το δείγμα περιέχει υγρασία. Πιο αναλυτικά, όταν προστίθεται υγρασία 5% κατά βάρος η τάση διάσπασης 50% αυξάνεται από 37,89kV σε 50,33kV. Καθώς προστίθεται νερό και επιτυγχάνεται υγρασία 10%, η τάση διάσπασης 50% μειώνεται στα 41,40kV, παραμένοντας παρ' όλα αυτά μεγαλύτερη της τάσης διάσπασης 50% του ξηρού δείγματος. Παρόμοια συμπεριφορά είχαν παρουσιάσει και εδαφικά δείγματα στην εργασία [3.14] των Nor et al. Οι συγγραφείς όμως, δεν προβαίνουν σε σχολιασμό του συγκεκριμένου φαινομένου.

Σε μία προσπάθεια ερμηνείας των πειραματικών δεδομένων στρεφόμαστε στη διαφοροποίηση της σύστασης των εξεταζομένων εδαφικών δειγμάτων. Όπως προκύπτει από την κοκκομετρική ανάλυση, το εδαφικό δείγμα Γ περιέχει το μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού (54%). Το δείγμα Α, περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκων στοιχείων (30%) εν συγκρίσει με το δείγμα Β (25%). Βέβαια, το δείγμα Γ περιείχε κατά βάρος και πολλά οργανικά στοιχεία (π.χ. τύρφη), τα οποία αφαιρούνται κατά τη διαδικασία της κοκκομέτρησης, ενώ στις δοκιμές αυξομείωσης της τάσης ελέγχεται το σύνολο του δείγματος. Κατά συνέπεια η τελική περιεκτικότητα του δείγματος Γ σε λεπτόκοκκο υλικό εκτιμάται ότι, είναι μικρότερη από 25%. Στη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα στοιχεία (ιλύς, άργιλος) ενδεχομένως να οφείλεται η συμπεριφορά των υγρών εδαφικών δειγμάτων υπό κρουστική τάση σε συνθήκες ομογενούς πεδίου.

Σύμφωνα με τις αναφορές [3.19], [3.20] στα λεπτόκοκκα εδάφη (ιλύς, άργιλος) οι κόκκοι είναι πεπλατυσμένοι και έχουν τη μορφή πλακιδίων σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα εδάφη (άμμος, χάλικες), στα οποία οι κόκκοι είναι σφαιροειδείς. Οι επιφάνειες των πεπλατυσμένων κόκκων (πλακιδίων) είναι ηλεκτρικά φορτισμένες και επικρατούσες δυνάμεις μεταξύ τους είναι οι ηλεκτρικές δυνάμεις έλξης και άπωσης. Η παρουσία του νερού στο έδαφος επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά των πλακιδίων, λόγω της ηλεκτρικής αλληλεπίδρασης του νερού με τις φορτισμένες επιφάνειες των πλακιδίων. Τα δίπολα μόρια του νερού έλκονται από την ηλεκτρικά φορτισμένη επιφάνεια των πλακιδίων και προσροφώνται σ' αυτήν. Η έλξη των διπόλων του νερού προς τα πλακίδια είναι πολύ ισχυρή με αποτέλεσμα, γύρω από την επιφάνεια του πλακιδίου, να δημιουργείται μία ζώνη, στην οποία το προσροφημένο νερό έχει ιδιότητες πολύ διαφορετικές από το ελεύθερο νερό που βρίσκεται έξω από τη ζώνη αυτή. Η ζώνη (στρώση) του προσροφημένου νερού γύρω από το πλακίδιο ονομάζεται διπλή στρώση (double layer), της οποίας η ύπαρξη και το μέγεθος καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδαφικού δείγματος.

Επιπλέον, η κατανομή των λεπτόκοκκων υλικών μέσα στο δείγμα διαμορφώνει θύλακες, που πληρούνται από αέρα ή νερό. Οι θύλακες αυτοί, διακρίνονται σε πόρους και 'στενώματα' (throats), αναλόγως της αποστάσεως μεταξύ των γειτονικών κόκκων. Στα στενώματα οι επιφάνειες των κόκκων/πλακιδίων βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το ηλεκτρικό φορτίο των πλακιδίων να εμποδίζει την κίνηση των

ηλεκτρονίων του αέρα ή του νερού υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό έχει ως συνέπεια να απαιτείται υψηλότερη ενέργεια, προκειμένου να ιονισθεί ο, παγιδευμένος στους πόρους, αέρας και να προκληθεί, τελικά, ηλεκτρική διάσπαση του εδαφικού δείγματος.

Βέβαια, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του δείγματος σε νερό, οι ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ των πλακιδίων και του νερού εξασθενούν και, τελικά, η διπλή στρώση παύει να υφίσταται. Σ' αυτό το φαινόμενο, πιθανώς, οφείλεται η μείωση της τάσης διάσπασης του δείγματος A , όταν το ποσοστό υγρασίας αυξάνεται από 5% σε 10%.

Συνεπώς, όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα, για χαμηλά ποσοστά υγρασίας, αύξηση της περιεκτικότητας του εδαφικού δείγματος σε υγρασία δεν συνεπάγεται, απαραίτητως και μονοδρομικά, τη μείωση της τάσης διάσπασης. Για υψηλότερα ποσοστά υγρασίας, βέβαια, παρατηρείται σαφής μείωση της $U_{50\%}$ με την αύξηση της υγρασίας.

Η διάσπαση χαρακτηρίζεται από στοχαστικότητα και ο μηχανισμός εξέλιξής της στο εσωτερικό του εδάφους επηρεάζεται από το πλήθος και το μέγεθος των διακένων αέρα, την περιεκτικότητα του εδάφους σε λεπτόκοκκια και χονδρόκοκκια συστατικά, το πορώδες, την περιεκτικότητα σε υγρασία και την κατανομή αυτής μεταξύ των κόκκων του εδάφους.

3.2.5 Συμπεράσματα για τις αβεβαιότητες

Βάσει των αποτελεσμάτων, που παρατέθηκαν στους *Πίνακες 3.3* έως και *3.14*, προκύπτουν να εξής συμπεράσματα:

- Η τάση διάσπασης $U_{50\%}$ παρουσιάζει τιμές αβεβαιότητας μικρότερες από 5% και, συνεπώς, παρουσιάζει επαναληψιμότητα, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες παραμέτρους.
- Τόσο η χρονική στιγμή της διάσπασης (t_{break}), όσο και η στιγμιαία τάση διάσπασης (U_{break}) παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές αβεβαιοτήτων, για το σύνολο των εδαφικών δειγμάτων που εξετάστηκαν. Η στιγμιαία τάση διάσπασης U_{break} έχει μικρότερη αβεβαιότητα από την t_{break} . Στα αποτελέσματα αυτά συμβάλλει, κατά κύριο λόγο, η στοχαστικότητα του φαινομένου της διάσπασης, η κατανομή και συμπεριφορά του παγιδευμένου νερού μέσα στο χώμα (για τα δοκίμια με περιεκτικότητες σε υγρασία 5% και 10%) και το πλήθος των

μετρήσεων που έχουν γίνει για κάθε επίπεδο τάσης, το οποίο, όμως, δεν είναι ίδιο για όλα τα επίπεδα τάσης, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια συγκρίσιμα αποτελέσματα. Βέβαια, θα πρέπει κανείς να λάβει υπ' όψιν του το γεγονός ότι, αύξηση του αριθμού των κρούσεων σε κάθε επίπεδο τάσης, έχει ως αποτέλεσμα την καταπόνηση των δοκιμίων από τις αλληπάλληλες κρούσεις (μεταξύ δύο κρούσεων μεσολαβεί διάστημα 2 min) και την αλλοίωση της σύνθεσής τους: αυτό γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό στα δείγματα υγρού χρώματος, στα οποία η θερμότητα, που παράγεται από κάθε κρούση, θερμαίνει το δείγμα και οδηγεί στην εξάτμιση ποσότητας νερού. Η αντικατάσταση του δοκιμίου με καινούργιο δείγμα μετά από κάθε κρούση ως λύση κρίνεται μη αποδοτική, δεδομένου ότι, η κατανομή των κόκκων του χρώματος στο νέο δείγμα δεν είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου. Επιπλέον, η διαδικασία γίνεται χρονοβόρα.

- Η συστηματική αβεβαιότητα του εξοπλισμού συμβάλλει σε ποσοστό από 12,7% (δείγμα χρώματος Β με 0% περιεκτικότητα σε υγρασία υπό αρνητική πολικότητα) έως 66,7% (δείγμα χρώματος Γ με μηδενική περιεκτικότητα σε υγρασία υπό θετική πολικότητα) στην τιμή της ολικής αβεβαιότητας της τάσης διάσπασης 50% ($U_{50\%}$). Συνεπώς, επ' ουδενί μπορεί να αγνοηθεί, αντιθέτως προς ό,τι γινόταν, για λόγους, πάντως, αδιευκρίνιστους, μέχρι σήμερα, στη διεθνή βιβλιογραφία.

Εν κατακλείδι, μπορεί να σημειωθεί ότι, η εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις ηλεκτρικής διάσπασης του εδάφους είναι απαραίτητη, ώστε να εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας την αξιολόγηση, τόσο των μετρήσεων, όσο και της πειραματικής διαδικασίας, που εφαρμόζεται, και οδηγώντας, εφ' όσον προκύψει ανάγκη, σε τεκμηριωμένες προτάσεις βελτίωσης της πειραματικής διάταξης και της αντίστοιχης διαδικασίας.

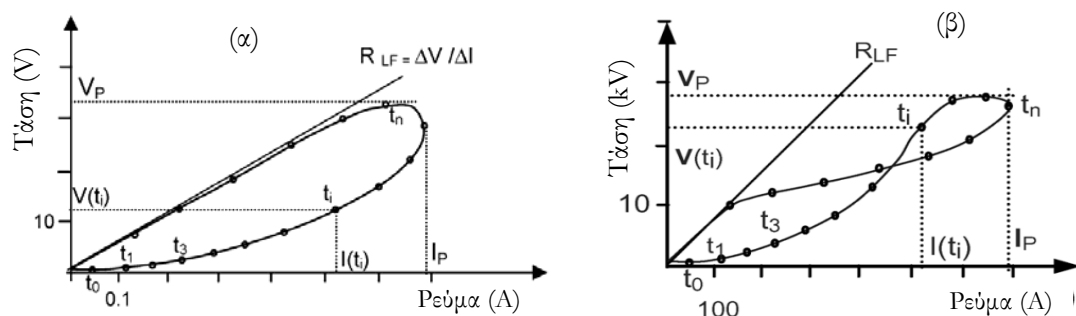
3.3 Υπολογισμός κρίσιμης έντασης ιονισμού σε κυλινδρική διάταξη

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού δειγμάτων χρώματος, τα οποία έχουν τοποθετηθεί σε κυλινδρική διάταξη, απαιτείται ο προσδιορισμός της αντίστοιχης τιμής της τάσης. Στη διεθνή βιβλιογραφία απαντώνται διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Στις επόμενες παραγράφους

πραγματοποιείται σύγκριση της αποτελεσματικότητας μεθόδων, που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, και νέων, που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μέσω της εφαρμογής τους στα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, βάσει της πειραματικής διαδικασίας, που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.2.5.

3.3.1 Προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού με χρήση καμπυλών I-V

Ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης φαινομένων ιονισμού στο χώμα με τη χρήση των καμπυλών I-V αποτελεί μία μέθοδο, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς από τον Armstrong [3.21], τη Nor [3.14]-[3.17], τους Lima και Visacro [3.18] και τους Lee et al. [3.10]. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η εμφάνιση κεκλιμένου '8' στην καμπύλη I-V αποτελεί ένδειξη έναρξης του ιονισμού. Για χαμηλά επίπεδα επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης, για τα οποία ο ιονισμός δεν έχει εκδηλωθεί, η I-V χαρακτηριστική μοιάζει με την απόκριση ενός κυκλώματος RC εν παραλλήλω σε υψηλές συχνότητες, αντίστοιχα προς την καμπύλη του **Σχήματος 3.5**.

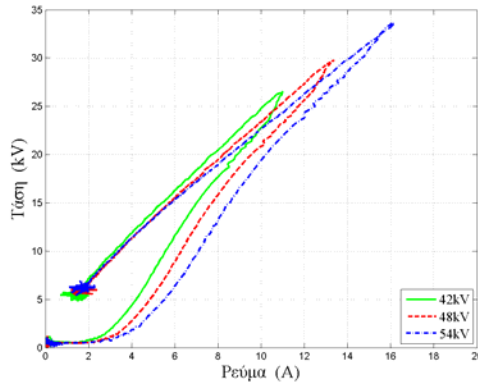


Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστική I-V εδαφικού δείγματος για κρουστικά ρεύματα απουσία (α) και παρουσία ιονισμού (β) [3.22].

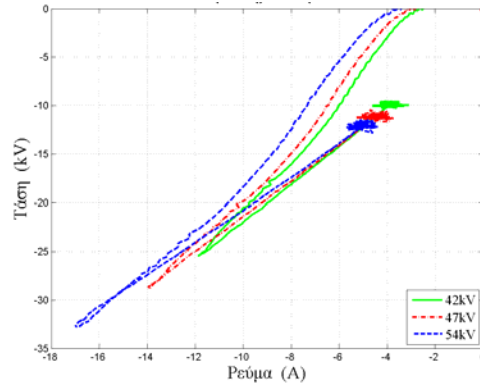
Καθώς η επιβαλλόμενη τάση αυξάνεται, η RC χαρακτηριστική αρχίζει να μεταβάλλεται, εξαιτίας του γεγονότος ότι η χωρητική συμπεριφορά του δοκιμίου γίνεται πιο έντονη. Επομένως, παρουσιάζεται υστέρηση μεταξύ της ωμικής και της χωρητικής συνιστώσας του ρεύματος με αποτέλεσμα τη δημιουργία του κεκλιμένου '8'.

Στα **Σχήματα 3.6** έως και **3.9** που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες I-V για τα δείγματα χώματος A, B και Γ με διαφορετικές περιεκτικότητες σε υγρασία, για θετική και αρνητική πολικότητα της κρουστικής τάσης και διάφορα επίπεδα της τάσης φόρτισης, οδηγούνται (κόκκινες και μπλε καμπύλες) και μη (πράσινες καμπύλες) σε ιονισμό. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι, στην περίπτωση δειγμάτων ξηρού χώματος, δεν κατέστη δυνατή η χάραξη των I-V καμπυλών, εξ αιτίας της υψηλής τιμής της αντίστασης του δοκιμίου, που οδηγούσε σε πολύ μικρή τιμή του καταγραφόμενου

ρεύματος. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, η μέθοδος των καμπυλών I-V δεν είναι δυνατό να εφαρμοσθεί στην περίπτωση που η αντίσταση το δοκιμίου είναι πολύ υψηλή και η ενέργεια της κρουστικής γεννήτριας δεν είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μπορεί παράγει και υψηλή τάση και υψηλό ρεύμα.

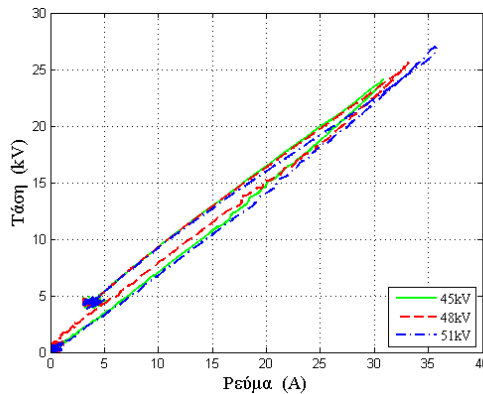


(α)

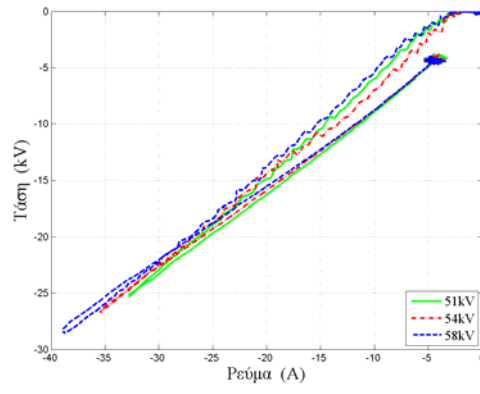


(β)

Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστικές I-V εδαφικού δείγματος A, με 5% υγρασία, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs, θετικής (α) και αρνητικής (β) πολικότητας.

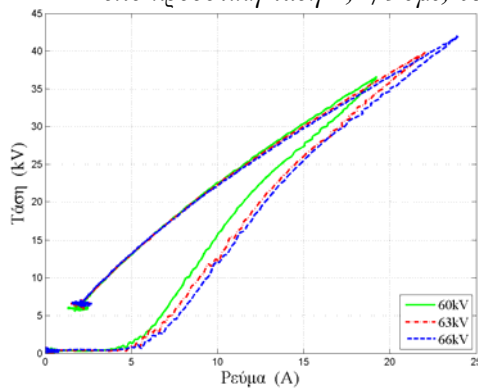


(α)

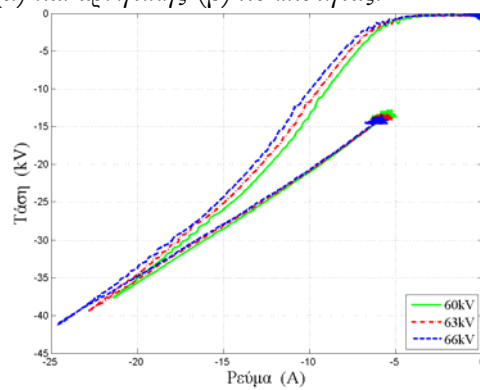


(β)

Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστικές I-V εδαφικού δείγματος A, με 10% υγρασία, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs, θετικής (α) και αρνητικής (β) πολικότητας.

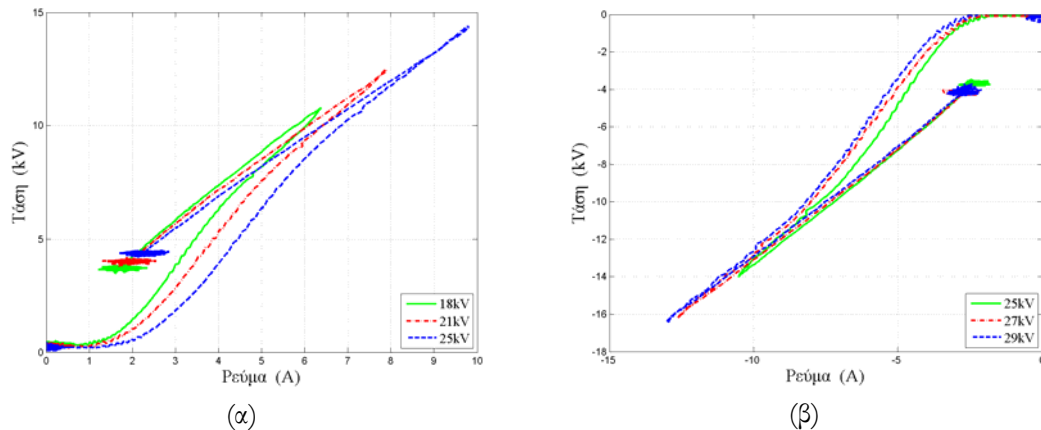


(α)



(β)

Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικές I-V εδαφικού δείγματος B, με 10% υγρασία, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs, θετικής (α) και αρνητικής (β) πολικότητας.



(α) (β)
Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστικές I-V εδαφικού δείγματος Γ, με 20% υγρασία, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs, θετικής (α) και αρνητικής (β) πολικότητας.

Λαμβάνοντας ως επίπεδο έναρξης του ιονισμού το επίπεδο της τάσης για την οποία η καμπύλη I-V αρχίζει να αλλάζει μορφή, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.16**.

Όπως προκύπτει από την περιγραφή της παραπάνω διαδικασίας, ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού εμπεριέχει υποκειμενικούς παράγοντες, αναφερόμενους στην, υπό των ερευνητών, θεώρηση και κριτική αξιολόγηση των καμπυλών I-V.

Είδος χώματος	Περιεκτικότητα σε υγρασία	Πολικότητα τάσης	Συνεχής τάση φόρτισης της γεννήτριας (kV)	Τάση εξόδου U_o (kV)
Δείγμα Α	5%	Θετική	48	29,8
		Αρνητική	47	28,7
	10%	Θετική	48	24,4
		Αρνητική	54	26,8
Δείγμα Β	10%	Θετική	63	39,7
		Αρνητική	63	43
Δείγμα Γ	20%	Θετική	21	12,5
		Αρνητική	27	16,2

Πίνακας 3.16 Τιμές της τάσης διάσπασης, με τη μέθοδο των I-V καμπυλών.

3.3.2 Μέθοδοι υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού

Απώτερος στόχος του προσδιορισμού της κρίσιμης τάσης έναρξης του ιονισμού (E_o) είναι ο υπολογισμός της κρίσιμης έντασης. Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, εφαρμόζονται και αξιολογούνται, ως προς την αποτελεσματικότητά τους, διάφορες μεθοδολογίες υπολογισμού της E_o .

Οι μέθοδοι, που εφαρμόζονται, για την εκτίμηση της E_o είναι οι εξής:

1^η Μέθοδος

Η εκτίμηση της E_o πραγματοποιείται με χρήση της εξίσωσης, την οποία έχει προτείνει η Oettle [3.23] και συνδέει την κρίσιμη ένταση ιονισμού με την ειδική αντίσταση του εδαφικού δείγματος:

$$E_o = 241 \cdot \rho^{0,215} \quad (3.7)$$

όπου E_o είναι η κρίσιμη ένταση σε kV/m και ρ είναι η ειδική αντίσταση σε Ωm .

2^η Μέθοδος

Για τον υπολογισμό της E_o χρησιμοποιείται η σχέση που προτείνει ο Manna [3.9]:

$$E_o = 843,2 \cdot \sigma^{-0,124} \quad (3.8)$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα σε mmho/m και E_o σε kV/m.

3^η Μέθοδος

Δεδομένης της κυλινδρικής συμμετρίας του δοχείου, εντός του οποίου τοποθετούνται τα εδαφικά δείγματα, η E_o μπορεί να υπολογισθεί από τον τύπο [3.18], [3.24]:

$$E_o = \frac{U_o}{r_{\text{ion}} \cdot \ln \frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{ion}}}} \quad (3.9)$$

όπου U_o είναι το κατώφλι ιονισμού, r_{out} η ακτίνα του κυλίνδρου (0,125 m) και r_{ion} είναι η ακτίνα της περιοχής ιονισμού.

Καθίσταται, επομένως, προφανής η ανάγκη προσδιορισμού της περιοχής, γύρω από το ηλεκτρόδιο, εντός της οποίας εκδηλώνεται ο ιονισμός. Σύμφωνα με τον Lima [3.24] ο προσδιορισμός της ακτίνας ιονισμού βασίζεται στη συνέπεια του ιονισμού, που είναι η μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης. Έτσι, λοιπόν, εντοπίζοντας για την τάση έναρξης του ιονισμού την ελάχιστη τιμή της κρουστικής αντίστασης και υπό την προϋπόθεση ότι, η περιοχή ιονισμού εκτείνεται ομοιόμορφα γύρω από το εσωτερικό ηλεκτρόδιο, μπορεί να υπολογισθεί η r_{ion} με τη βοήθεια του τύπου:

$$\frac{Z_d}{Z_o} = \frac{\ln \left(\frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{in}}} \right)}{\ln \left(\frac{r_{\text{ion}}}{r_{\text{in}}} \right)} \Rightarrow r_{\text{ion}} = r_{\text{out}} \left(1 - \frac{Z_d}{Z_o} \right) \cdot r_{\text{in}}^{\frac{Z_d}{Z_o}} \quad (3.10)$$

όπου Z_d είναι η τιμή της κρουστικής αντίστασης στα 9μs, όταν η επιβαλλόμενη τάση ισούται με τη U_o , Z_o η τιμή της κρουστικής αντίστασης, για το χαμηλότερο επίπεδο επιβαλλόμενης τάσης, r_{out} η εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου (0,125m) και r_{ion} η ακτίνα της ιονισμένης περιοχής.

4^η Μέθοδος

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι, η επιλογή της τιμής της κρουστικής αντίστασης στα 9μs γίνεται από τον Lima αυθαίρετα, δίχως κάποια αιτιολόγηση. Στο παρόν εδάφιο της διδακτορικής διατριβής προτείνεται μία παραλλαγή (4^η Μέθοδος) του τύπου (3.10), βάσει της οποίας, ως Z_d χρησιμοποιείται η ελάχιστη τιμή της κρουστικής αντίστασης, για το επίπεδο τάσης που ξεκινά ο ιονισμός (U_o). Αυτή η επιλογή για τη Z_d βασίζεται στο γεγονός ότι, η ελάχιστη τιμή της αντίστασης ταυτοχρονίζεται με τη μέγιστη έκταση της περιοχής ιονισμού.

5^η Μέθοδος

Σύμφωνα με το μοντέλο των Liew και Darveniza [3.25], κατά την εκδήλωση ιονισμού εδάφους, σε κάποια, μεν, τμήματα του εδάφους εκδηλώνεται ιονισμός και η ειδική αντίσταση μειώνεται, στο υπόλοιπο, δε, έδαφος η ειδική αντίσταση διατηρεί την αρχική τιμή της. Σε πρόσφατη εργασία του ο Nixon [3.26] απλοποίησε το μοντέλο, θεωρώντας ότι, η ζώνη ιονισμού μπορεί να περιγραφεί, κάθε χρονική στιγμή, από μία χαρακτηριστική τιμή ειδικής αντίστασης. Έρευνες των Loboda et al. [3.27] κατέδειξαν ότι, εντός της περιοχής ιονισμού, η ειδική αντίσταση δεν μηδενίζεται, εκτίμηση που υιοθετείται από πλήθος ερευνητών, προκειμένου να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί. Περαιτέρω διερεύνηση από την Liu et al. [3.28] κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, εντός της ζώνης ιονισμού, η ειδική αντίσταση μπορεί να μειωθεί τόσο, ώστε να λάβει τιμή γύρω στο 7% της ονομαστικής (αρχικής) τιμής της.

Η μέθοδος για την εκτίμηση της E_o , που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, έχει ως βάση το απλοποιημένο από τον Nixon μοντέλο των Liew και Darveniza. Σύμφωνα με αυτό, η ελάχιστη αντίσταση του εδαφικού δείγματος αποτελείται από δύο συνιστώσες, την αντίσταση της ιονισμένης περιοχής (Z_{ion}) και την αντίσταση της περιοχής, στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού ($Z_{non-ion}$). Συνεπώς, η ελάχιστη κρουστική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$Z_{\min} = Z_{\text{ion}} + Z_{\text{non-ion}} = \frac{\rho_{\text{ion}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \left(\frac{r_{\text{ion}}}{r_{\text{in}}} \right) + \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \left(\frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{ion}}} \right) \quad (3.11)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση σε Ωm , ρ_{ion} η ειδική αντίσταση στην ιονισμένη περιοχή, r_{in} η ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου (0,0025m), r_{out} η εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου (0,125m) και r_{ion} η ακτίνα της ιονισμένης περιοχής.

Στον τύπο (3.11) υπάρχουν δύο άγνωστες παράμετροι προς προσδιορισμό, η ειδική αντίσταση της ιονισμένης περιοχής και η ακτίνα ιονισμού. Για την επίλυση της εξίσωσης καταφεύγουμε στη χρήση τού Γενετικού Αλγορίθμου.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν μία μέθοδο παραμετρικής βελτιστοποίησης, για την επίλυση προβλημάτων με ή χωρίς περιορισμούς, βασίζονται, δε, στους μηχανισμούς της φυσικής επιλογής και της θεωρίας εξέλιξης των ειδών.

Η πρώτη εμφάνισή τους χρονολογείται στις αρχές της δεκαετίας του 1950, όταν επιστήμονες από τον χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν τους υπολογιστές για την προσομοίωση πολύπλοκων βιολογικών συστημάτων και διαδικασιών. Το 1975 ο J. Holland ανέπτυξε ένα υπολογιστικό μοντέλο, που μπορούσε να λύνει προβλήματα βελτιστοποίησης: προς τούτο, διετύπωσε έναν αλγόριθμο, ο οποίος μιμείται τη φύση και, για το λόγο αυτό, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από τον χώρο της βιολογίας.

Έχει αποδειχθεί ότι, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι υπολογιστικά απλοί και ταυτόχρονα ισχυροί στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης και δεν περιορίζονται από υποθέσεις για το χώρο αναζήτησης (συνέχεια, ύπαρξη παραγώνων, ύπαρξη ενός μόνο μεγίστου). Μάλιστα, λόγω της διαδικασίας της εξέλιξης, δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα, όπως συμβαίνει με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης.

Ένας απλός Γενετικός Αλγόριθμος βασίζεται στις διαδικασίες της αναπαραγωγής, της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation), για την επίτευξη του ολικού ή μερικώς-ολικού βελτίστου. Αρχικά, δημιουργείται, με τη βοήθεια μίας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, ο αρχικός πληθυσμός, που αποτελείται από P_s άτομα. Κάθε μέλος/χρωμόσωμα του πληθυσμού αναπαριστάται με συμβολοσειρές (ακολουθίες 0 και 1), ισάριθμες του πλήθους των ανεξάρτητων μεταβλητών του προβλήματος. Τα ζευγάρια γονέων/λύσεων αναπαράγονται και μέσω της διαδικασίας της διασταύρωσης

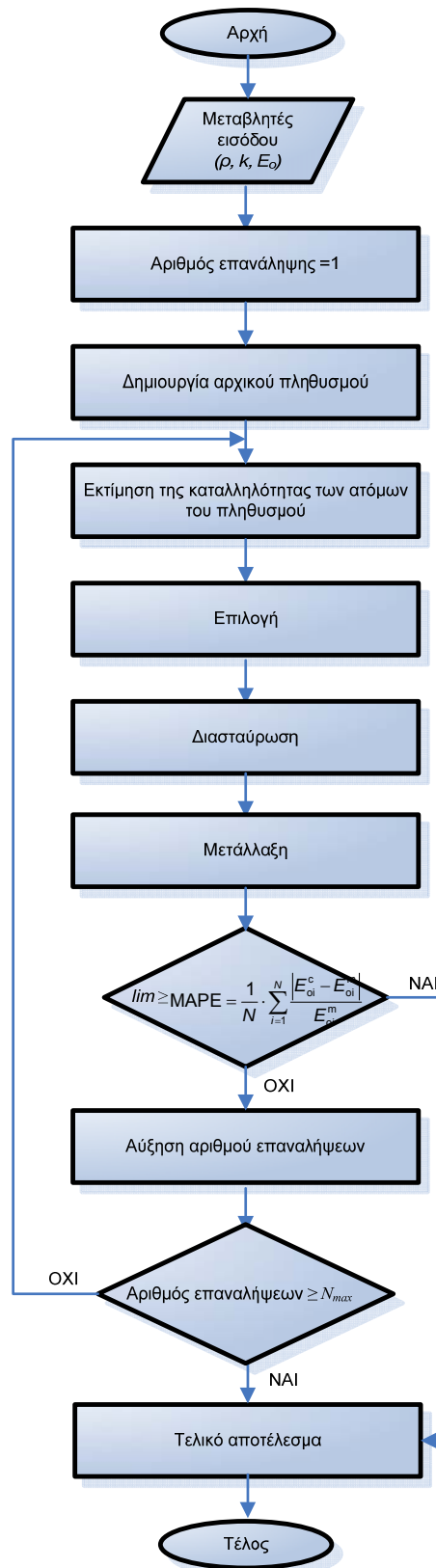
ανταλλάσσουν N_p τμήματα του γενετικού τους υλικού. Κάθε ζεύγος γονέων δίνει N_c παιδιά και ο πληθυσμός αποτελείται πλέον από $P_s + N_c \cdot P_s / 2$ μέλη (οι γονείς θεωρούνται, πάντα, μέρος του πληθυσμού (ευγονισμός), για να μην χάνεται η προηγούμενη πληροφορία). Βέβαια, μετά τη διασταύρωση υπάρχει πιθανότητα P_m σε κάποια θέση του χρωμοσώματος να μεταλλαχθεί η συμβολοσειρά (δηλ. κάποιο '0' να γίνει '1' και το αντίστροφο). Συνεπώς, η μετάλλαξη μπορεί να προκαλέσει απώλεια χρήσιμου γενετικού υλικού, αλλά επιτυγχάνει τον απεγκλωβισμό της λύσης από τοπικά ακρότατα της συνάρτησης και συμβάλλει στην ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση.

Ακολουθώντας, εφαρμόζεται η διαδικασία της φυσικής επιλογής, δηλαδή γίνεται αξιολόγηση της καταλληλότητας κάθε μέλους, ως πιθανής λύσης του προβλήματος. Τα μέλη, με τον μεγαλύτερο βαθμό καταλληλότητας, επιλέγονται μέσω της διαδικασίας της φυσικής επιλογής προς αναπαραγωγή, που οδηγεί στην επιβίωση μόνο P_s μελών. Για το πρόβλημά μας, ως κριτήριο καταλληλότητας λαμβάνεται η ελαχιστοποίηση του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος (mean absolute percentage error, MAPE) μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων, από το μοντέλο, τιμών της κρίσιμης έντασης.

Συνεχίζοντας τις επαναλήψεις της αναπαραγωγής με τις διασταυρώσεις, τις μεταλλάξεις και τη φυσική επιλογή, οι βέλτιστες τιμές του πληθυσμού συγκλίνουν στη λύση που αντιστοιχεί στο ελάχιστο MAPE. Κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου αποτελούν είτε η βελτίωση της μέσης τιμής του MAPE στον αποτελούμενο από P_s μέλη πληθυσμό (αν δεν παρατηρείται βελτίωση της τιμής του MAPE, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται), είτε ο αριθμός των επαναλήψεων (αν γίνει μεγαλύτερος από τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό επαναλήψεων N_{max} ο αλγόριθμος τερματίζεται). Στο **Σχήμα 3.10** παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του Γενετικού Αλγορίθμου, για τον οποίο έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικότερος στην αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης διαφόρων τύπων [3.29] - [3.34].

3.3.3 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού

Με τη βοήθεια των μεθόδων, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Στις παραγράφους, που ακολουθούν, αναλύεται η εφαρμογή καθεμιάς μεθόδου.



Σχήμα 3.10 Διάγραμμα ροής του Γενετικού Αλγορίθμου.

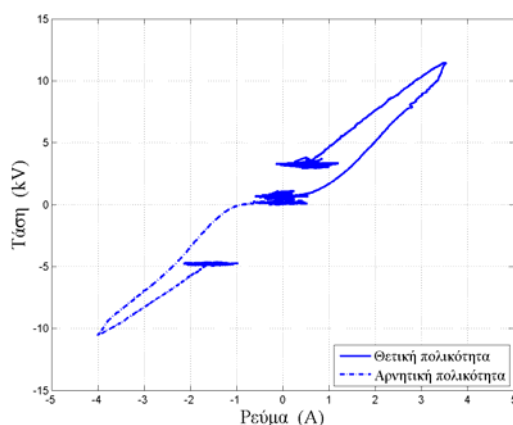
Τόσο η 1^η, όσο και η 2^η Μέθοδος, αποτελούν, ουσιαστικά, την ίδια προσέγγιση για την εκτίμηση της E_o , μέσω προσεγγιστικών εξισώσεων που έχουν προταθεί στη

βιβλιογραφία. Γι' αυτόν τον λόγο, η ανάλυση και οι υπολογισμοί θα παρουσιαστούν μαζί. Η 4^η Μέθοδος αποτελεί παραλλαγή της 3^{ης} Μεθόδου και θα αναλυθούν στην ίδια παράγραφο. Τέλος, σε χωριστή παράγραφο θα αναλυθεί η 5^η Μέθοδος (Γενετικός Αλγόριθμος).

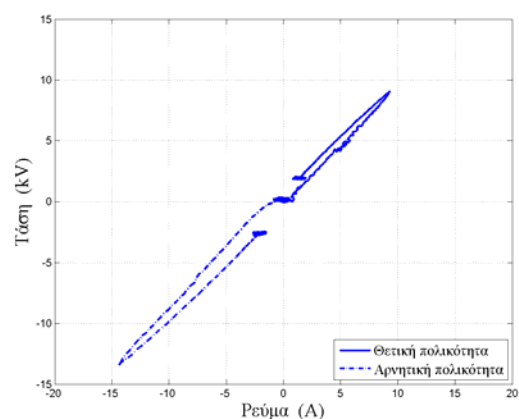
3.3.3.1 Υπολογισμός με χρήση προσεγγιστικών εξισώσεων

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού, με τη βοήθεια των σχέσεων (3.7) και (3.8), απαιτείται η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Μέσω ανάλυσης ευαισθησίας στη μεταβολή της E_o , προκύπτει ότι, η τιμή της, που υπολογίζεται από τον τύπο της Oettle, μεταβάλλεται κατά 0,21%, όταν το ρ μεταβάλλεται κατά 1%. Της αυτής τιμής (1%) μεταβολή της ειδικής αντίστασης, οδηγεί σε 0,12% μεταβολή στην τιμή της E_o , που υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο του Manna.

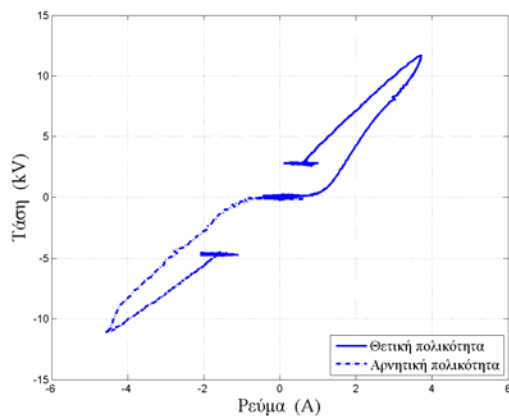
Για τα δείγματα χώματος, που εξετάστηκαν στην κυλινδρική διάταξη, οι τιμές της ειδικής αντίστασης προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια των I-V καμπυλών για το χαμηλότερο επίπεδο τάσης. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.5** από την κλίση της καμπύλης I-V μπορεί να προσδιοριστεί η αντίσταση χαμηλής συχνότητας (R_{LF}) και, κατά συνέπεια, η ειδική αντίσταση του εδαφικού δείγματος. Στα **Σχήματα 3.11** έως και **3.14** δίνονται οι χαρακτηριστικές για τα εδαφικά δείγματα, που εξετάστηκαν, και στον **Πίνακα 3.17** καταγράφονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης των δειγμάτων, καθώς και οι τιμές της κρίσιμης έντασης που προέκυψαν από την εφαρμογή των τύπων της Oettle και του Manna.



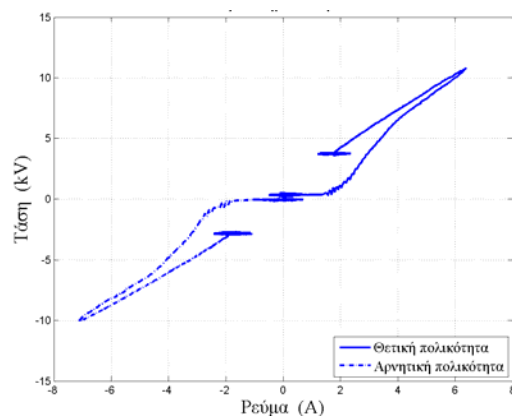
Σχήμα 3.11 Χαρακτηριστική I-V εδαφικού δείγματος A, με περιεκτικότητα 5% κατά βάρος σε υγρασία, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.



Σχήμα 3.12 Χαρακτηριστική I-V εδαφικού δείγματος A, με περιεκτικότητα 10% κατά βάρος σε υγρασία, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.



Σχήμα 3.13 Χαρακτηριστική I-V
εδαιφικού δείγματος Β, με περιεκτικότητα
10% κατά βάρος σε υγρασία, υπό κρουστική
τάση 1,2/50μs.



Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστική I-V
εδαιφικού δείγματος Γ, με περιεκτικότητα
20% κατά βάρος σε υγρασία, υπό κρουστική
τάση 1,2/50μs.

Δείγμα Χώματος	Περιεκτικότητα σε υγρασία (%)	ρ (Ωm)	Τύπος της Oettle (kV/m)	Τύπος του Manna (kV/m)
Α	5	792	1012	819
	10	297	820	725
Β	10	808	1017	821
Γ	20	452	897	764

Πίνακας 3.17 Τιμές της ειδικής αντίστασης, για τα τρία είδη χώματος, με διαφορετικές
περιεκτικότητες σε υγρασία.

3.3.3.2 Υπολογισμός βάσει της γεωμετρίας της διάταξης

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού, η οποία προτείνεται από τον Lima [3.24] και περιγραφηκε ως 3^η μέθοδος, προκύπτουν τα αποτελέσματα, που καταγράφονται στον **Πίνακα 3.18**.

Δείγμα Χώματος	Περιεκτικότητα σε υγρασία (%)	$Z_o(\Omega)$		$Z_{9\mu s}(\Omega)$		$E_o(\text{kV/m})$	
		+	-	+	-	+	-
Α	5	5760	2957	2450	2245	757	1507
	10	1340	1180	942	867	1110	1321
Β	10	3750	2750	2205	1944	1378	1976
Γ	20	2150	1562	1810	1422	818	1281

Πίνακας 3.18 Τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού για $Z_d = Z_{9\mu s}$.

Όπως επισημάνθηκε και στην παράγραφο 3.3.2, η επιλογή της κρουστικής αντίστασης στα 9μs ως Z_d , δεν έχει φυσική αιτιολογία. Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα διατριβή, προτείνεται η χρήση της ελάχιστης κρουστικής αντίστασης, που παρατηρείται στο κρίσιμο επίπεδο τάσης έναρξης του φαινομένου. Η επιλογή αυτή γίνεται βάσει του

γεγονότος ότι, η μέγιστη επέκταση της ζώνης ιονισμού συμβάλλει στη μέγιστη μείωση της αντίστασης και τα αποτελέσματα, που προέκυψαν, καταγράφονται στον **Πίνακα 3.19**.

Δείγμα Χώματος	Περιεκτικότητα σε υγρασία (%)	$Z_o(\Omega)$		$Z_{min}(\Omega)$		$E_o(kV/m)$	
		+	-	+	-	+	-
Α	5	5760	2957	2230	2020	716	1244
	10	1340	1180	775	746	829	1028
Β	10	3750	2750	1800	1620	1106	1496
Γ	20	2150	1562	1445	1270	602	981

Πίνακας 3.19 Τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού για $Z_d = Z_{min}$.

Από τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στους **Πίνακες 3.18** και **3.19**, παρατηρείται ότι, η κρίσιμη ένταση έναρξης του φαινομένου του ιονισμού, για το ίδιο δείγμα χώματος υπό αρνητική πολικότητα είναι υψηλότερη από την κρίσιμη ένταση ιονισμού υπό θετική πολικότητα. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τις παρατηρήσεις που είχε κάνει η Nor στις εργασίες της και ενισχύει το επιχείρημα ότι, ο ιονισμός είναι ο βασικός μηχανισμός, που συμβάλλει στη μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης, αλλά και, γενικότερα, σύμφωνα με το παλαιόθεν γνωστό φαινόμενο πολικότητας.

Επιπλέον, με σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από την εφαρμογή της 3^{ης} και της 4^{ης} Μεθόδου, παρατηρείται ότι, στην περίπτωση που λαμβάνεται $Z_d = Z_{min}$, οι τιμές της κρίσιμης πεδιακής έντασης είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για $Z_d = Z_{9\mu s}$.

3.3.3.3 Υπολογισμός με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου

Η ελάχιστη τιμή της κρουστικής αντίστασης δίνεται από τον τύπο:

$$Z_{min} = \frac{A}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln\left(\frac{B}{r_{in}}\right) + \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot 0,19} \ln\left(\frac{r_{out}}{B}\right) \quad (3.12)$$

(ρ είναι η ειδική αντίσταση σε Ωm , r_{in} η ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου (0,0025m), r_{out} η εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου (0,125m) και A και B σταθερές). Ο Γενετικός Αλγόριθμος, που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 3.2.2, χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων A και B της εξίσωσης (3.12).

Με δεδομένη τη Z_{min} , για το επίπεδο της τάσης έναρξης του ιονισμού, για κάθε δείγμα χώματος, και τους περιορισμούς ότι, η ακτίνα ιονισμού δεν μπορεί να είναι μικρότερη

από την εσωτερική ακτίνα του ηλεκτροδίου, αλλά ούτε και μεγαλύτερη από την ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου, η, δε, ειδική αντίσταση στην περιοχή ιονισμού λαμβάνει τιμές μικρότερες από την αντίσταση μονίμου καταστάσεως, εκτελείται ο Γενετικός Αλγόριθμος πολλές φορές, με μεταβολή κάθε φορά του πλήθους των γονέων και του αριθμού των επαναλήψεων. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ένας τυχαία παραγόμενος πληθυσμός P_s χρωμοσωμάτων/γονέων/ατόμων ($P_s = 50$). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από n μεταβλητές ($n=2$) και κάθε μεταβλητή αναπαριστάται από 20 bit. Κατά τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων, το κάθε χρωμόσωμα διαιρείται σε N_p τμήματα και γίνεται ανταλλαγή γενετικού υλικού. Μετά από κάθε διασταύρωση υπάρχει πιθανότητα μετάλλαξης 7%. Ως συνάρτηση προς βελτιστοποίηση επιλέχθηκε το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ της πειραματικής τιμής της $Z_{\min}$ και της υπολογιζόμενης $Z_{\min}$ από την εξίσωση (3.12), συναρτήσει των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων της (A και B). Η διαδικασία σταματά όταν ολοκληρωθεί συγκεκριμένος (μέγιστος επιτρεπτός) αριθμός επαναλήψεων (50).

Στους **Πίνακες 3.20** έως και **3.23** παρουσιάζονται οι τιμές της ακτίνας ιονισμού, όπως προέκυψαν από διαδοχικές επαναλήψεις του Γενετικού Αλγορίθμου, καθώς και οι τιμές της ειδικής αντίστασης στην περιοχή, όπου λαμβάνει χώρα ιονισμός του εδάφους.

A/A επανάληψης	1		2		3		4		5		Μέση τιμή	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
r_{ion} (cm)	4,1	3,8	5,0	2,8	5,2	2,9	5,1	4,0	4,2	3,8	4,7	4,1
ρ_{ion} (Ωm)	655	455	635	498	636	340	626	485	513	456	613	541

Πίνακας 3.20 Τιμές της ακτίνας και της ειδικής αντίστασης της περιοχής ιονισμού, για το εδαφικό δείγμα A, με περιεκτικότητα υγρασίας 5%, υπό θετική και αρνητική πολικότητα.

A/A επανάληψης	1		2		3		4		5		Μέση τιμή	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
r_{ion} (cm)	5,3	3,4	6,3	4,0	5,1	1,8	5,2	4,8	5,3	4,4	5,4	3,7
ρ_{ion} (Ωm)	226	143	227	169	216	216	222	206	226	186	223	184

Πίνακας 3.21 Τιμές της ακτίνας και της ειδικής αντίστασης της περιοχής ιονισμού, για το εδαφικό δείγμα A, με περιεκτικότητα υγρασίας 10%, υπό θετική και αρνητική πολικότητα.

A/A επανάληψης	1		2		3		4		5		Μέση τιμή	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
r_{ion} (cm)	4,5	3,1	4,3	3,7	4,1	3,7	4,5	3,7	4,6	3,7	4,4	3,6
ρ_{ion} (Ωm)	557	372,5	525	449	502	459	565	458	567	459	543	440

Πίνακας 3.22 Τιμές της ακτίνας και της ειδικής αντίστασης της περιοχής ιονισμού, για το εδαφικό δείγμα B, με περιεκτικότητα υγρασίας 10%, υπό θετική και αρνητική πολικότητα.

A/A επανάληψης	1		2		3		4		5		Μέση τιμή	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
r_{ion} (cm)	6,2	0,7	6,2	5,2	6,2	4,8	5,8	4,6	6,1	4,9	6,1	4,0
ρ_{ion} (Ωm)	436	36	437	365	138	338	439	319	430	343	376	280

Πίνακας 3.23 Τιμές της ακτίνας και της ειδικής αντίστασης της περιοχής ιονισμού, για το εδαφικό δείγμα Γ, με περιεκτικότητα υγρασίας 20%, υπό θετική και αρνητική πολικότητα.

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα των **Πινάκων 3.20** έως και **3.23** στην εξίσωση (3.9), υπολογίζονται οι τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού, για τα δείγματα χώματος που εξετάστηκαν. Οι τιμές που προέκυψαν καταγράφονται στον **Πίνακα 3.24**. Στον ίδιο πίνακα καταγράφονται επίσης, οι τιμές της ελάχιστης αντίστασης για το κρίσιμο επίπεδο τάσης, καθώς και οι τιμές της πεδιακής έντασης στην επιφάνεια του εσωτερικού ηλεκτροδίου.

Δείγμα Χώματος	Περιεκτικότητα σε υγρασία (%)	$Z_{min}(\Omega)$		E_o (kV/m)		E_{r-min} (kV/m)	
		+	-	+	-	+	-
Α	5	2230	2020	648	628	3047	2935
	10	775	746	538	595	2495	2740
Β	10	1800	1620	864	960	4059	4397
Γ	20	1445	1270	286	355	1278	1656

Πίνακας 3.24 Τιμές της ελάχιστης τιμής της κρουστικής αντίστασης, για τα εξεταζόμενα εδαφικά δείγματα, της κρίσιμης έντασης ιονισμού και της πεδιακής έντασης στην επιφάνεια του εσωτερικού ηλεκτροδίου.

Όπως παρατηρείται από τον **Πίνακα 3.24**, οι τιμές της κρίσιμης έντασης υπό αρνητική πολικότητα είναι υψηλότερες από τις τιμές υπό θετική πολικότητα, όπως ακριβώς συνέβη και στην περίπτωση της εφαρμογής της προηγούμενης μεθόδου. Η παρατήρηση αυτή είναι σύμφωνη με αντίστοιχη παρατήρηση των Nor et al.

Στον **Πίνακα 3.25** καταγράφονται, για εποπτικούς λόγους, οι τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή όλων των μεθόδων.

Δείγμα Χώματος	ρ (Ωm)	Τύπος της Oettle (kV/m)	Τύπος του Manna (kV/m)	$E_o(kV/m)$ $Z_{9\mu s}(\Omega)$		$E_o(kV/m)$ $Z_{min}(\Omega)$		$E_o(kV/m)$ ΓΑ	
				+	-	+	-	+	-
Α	792	1012	819	757	1507	716	1244	648	628
	297	820	725	1110	1321	829	1028	538	595
Β	808	1017	821	1378	1976	1106	1496	864	960
Γ	452	897	764	818	1281	602	981	286	355

Πίνακας 3.25 Τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_o) των εδαφικών δειγμάτων εντός κυλινδρικής διάταξης.

3.3.4 Συμπεράσματα από τη χρήση των καμπυλών I-V

Στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των I-V καμπυλών για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τάσης έναρξης του ιονισμού (U_o) σε εδαφικά δείγματα τοποθετημένα εντός κυλινδρικής διάταξης και, στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_o), με την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων. Από τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μέθοδος των I-V χαρακτηριστικών δεν κατέστη δυνατό να εφαρμοσθεί σε ξηρά εδαφικά δείγματα, στο δείγμα Β, με 5% περιεκτικότητα σε υγρασία, και στα δείγματα Γ, με 5 και 10% περιεκτικότητα σε υγρασία, εξ αιτίας της μηδενικής τιμής του καταγραφόμενου ρεύματος, που δεν επέτρεπε τη χάραξη των I-V χαρακτηριστικών.
- Η χρήση των προσεγγιστικών εξισώσεων της Oettle και του Manna, για τον υπολογισμό της E_o , αποτελεί την πιο εύκολη μέθοδο, εφ' όσον δεν απαιτούνται πειράματα, παρό, μόνον, η γνώση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Μάλιστα, η υπολογιζόμενη τιμή της E_o , από την εξίσωση της Oettle, είναι μεγαλύτερη από την τιμή, που προκύπτει από την εξίσωση του Manna.
- Μειονέκτημα της μεθόδου των προσεγγιστικών εξισώσεων αποτελεί το γεγονός ότι, δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η τιμή της τάσης διάσπασης, με αποτέλεσμα να αγνοείται το φαινόμενο πολικότητας.
- Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί είναι σύμφωνοι με το φαινόμενο πολικότητας. Όπως φαίνεται και στα, εκτιθέμενα στον **Πίνακα 3.25**, αποτελέσματα, οι τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού υπό θετική πολικότητα, είναι μικρότερες από τις τιμές υπό αρνητική πολικότητα για όλα τα ελεγχθέντα δείγματα χώματος.
- Οι τιμές της E_o , που προκύπτουν από την εφαρμογή της 3^{ης} Μεθόδου, είναι υψηλότερες εν συγκρίσει με τις τιμές, που υπολογίζονται σύμφωνα με την 4^η Μέθοδο, και οι οποίες, με τη σειρά τους, είναι υψηλότερες των τιμών, που προκύπτουν με την εφαρμογή του Γενετικού Αλγορίθμου. Το συμπέρασμα αυτό καταδεικνύει τον ρόλο, που έχει η επιλογή της τιμής της Z_d για τον υπολογισμό της ακτίνας ιονισμού και, κατ' επέκταση, της E_o .

Δεδομένων των διαφοροποιήσεων μεταξύ των τιμών της E_o , που προκύπτουν ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού, που χρησιμοποιείται, θα πρέπει να οριστεί μία συγκεκριμένη μεθοδολογία, ώστε τα αποτελέσματα όλων των ερευνητών να είναι συγκρίσιμα.

Πέραν, όμως, της σύγκρισης των αποτελεσμάτων, μεταξύ των διαφορετικών μεθοδολογιών, για τον υπολογισμό της E_o , αξίζει να σχολιασθεί, επίσης, το γεγονός ότι, οι τιμές της ειδικής αντίστασης των εδαφικών δειγμάτων Α με 5% περιεκτικότητα και Β με 10% υγρασία είναι παραπλήσιες. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα οι τιμές των E_o που υπολογίζονται από τους τύπους της Oettle και του Manna να είναι πολύ κοντά, ωστόσο κατά την εφαρμογή των υπολοίπων μεθοδολογιών οι τιμές της E_o για το δείγμα Β είναι σαφέστατα υψηλότερες από τις τιμές για το δείγμα χώματος Α, με 5% περιεκτικότητα σε υγρασία. Συνεπώς, οι τιμές της E_o δεν επηρεάζονται μόνο από την περιεκτικότητα σε υγρασία, αλλά και από τη σύσταση του εδάφους, όπως είχε αναφέρει και ο Mousa [3.7].

Συγκρίνοντας, τέλος, τις τιμές της E_o , που προέκυψαν με την εφαρμογή της 3^{ης} και της 4^{ης} Μεθόδου, για δείγμα χώματος Α, με 5% περιεκτικότητα σε υγρασία, με τις τιμές της E_o , για δείγμα του ίδιου χώματος, με 10% περιεκτικότητα σε υγρασία, παρατηρούμε ότι, στην περίπτωση επιβολής θετικής πολικότητας, αυξανόμενης της περιεκτικότητας σε υγρασία αυξάνεται η κρίσιμη ένταση ιονισμού (όπως παρατηρήθηκε, για το ίδιο δείγμα χώματος, και στη διάταξη παραλλήλων πλακών). Αντίθετα, κατά την επιβολή αρνητικής πολικότητας, αυξανόμενης της υγρασίας, μειώνεται η κρίσιμη ένταση ιονισμού.

3.4 Συμπεράσματα

Βασικός στόχος του παρόντος κεφαλαίου ήταν ο υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού διαφόρων εδαφικών δειγμάτων, με ελεγχόμενη περιεκτικότητα σε υγρασία, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή της, καθώς και του είδους του δείγματος στην τιμή της E_o . Προς τούτο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, τοποθετώντας τα εδαφικά δείγματα σε διάταξη παραλλήλων πλακών, το διάκενο της οποίας ρυθμίστηκε κατάλληλα, ώστε να παρέχει ομογενές πεδίο, και σε κυλινδρική διάταξη.

Κρίσιμος παράγοντας για την εκτίμηση της E_o είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου τάσης, στο οποίο εμφανίζεται ο ιονισμός. Για την περίπτωση της διάταξης παραλλήλων

πλακιών, η τάση αυτή διαπιστώθηκε, σε συμφωνία με τα ευρήματα άλλων ερευνητών, ότι, είναι ίση προς την τάση διάσπασης $U_{50\%}$. Για τον προσδιορισμό αυτής της τιμής για κάθε εδαφικό δείγμα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αυξομείωσης της τάσης (up-and-down method). Μετά την εύρεση της $U_{50\%}$ για κάθε δείγμα, εκτιμάται η E_o , με πολύ απλό τρόπο: τον συγκεκριμένο τρόπο εργασίας έχουν ακολουθήσει πολλοί ερευνητές, όπως φάνηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ωστόσο σε καμία εργασία τους δεν παραθέτουν τιμές αβεβαιότητας για τις μετρήσεις τους. Όπως επισημαίνεται και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η αβεβαιότητα της μέτρησης αποτελεί δείκτη αξιοπιστίας της μέτρησης και της μετρητικής διάταξης και διαδικασίας. Προκειμένου να ελεγχθεί και εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των τιμών της E_o , πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την εκτίμηση, τόσο των τυχαίων όσο, και των συστηματικών αβεβαιοτήτων. Τελικά, η αβεβαιότητα της κρίσιμης τάσης διάσπασης 50% προσδιορίστηκε μικρότερη από 5%, γεγονός που αποδεικνύει την επαναληψιμότητα των πειραμάτων. Είναι άξιο επισημάνσης, επίσης, το γεγονός ότι, η συστηματική αβεβαιότητα του εξοπλισμού συμβάλλει σε ποσοστό από 12,7% (δείγμα χρώματος Β με 0% περιεκτικότητα σε υγρασία υπό αρνητική πολικότητα) έως 66,7% (δείγμα χρώματος Γ με μηδενική περιεκτικότητα σε υγρασία υπό θετική πολικότητα) στην τιμή της ολικής αβεβαιότητας της τάσης διάσπασης 50% ($U_{50\%}$). Συνεπώς, επ' ουδενί μπορεί να αγνοηθεί, αντιθέτως προς ό,τι γινόταν, για λόγους, πάντως, αδιευκρίνιστους, μέχρι σήμερα, στη διεθνή βιβλιογραφία.

Υπολογίσθηκαν, επίσης, οι αβεβαιότητες για την στιγμιαία τιμή της τάσης διάσπασης (U_{break}) και της αντίστοιχης χρονικής στιγμής (t_{break}). Η στιγμιαία τάση διάσπασης U_{break} έχει μικρότερη αβεβαιότητα από την t_{break} . Ωστόσο, οι αβεβαιότητες και των δύο παραμέτρων κρίνονται υψηλές. Σ' αυτό το αποτέλεσμα συμβάλλει, κατά κύριο λόγο, η στοχαστικότητα του φαινομένου της διάσπασης, η κατανομή και συμπεριφορά του παγιδευμένου νερού μέσα στο χώμα και το πλήθος των μετρήσεων, που έχουν γίνει για κάθε επίπεδο τάσης, το οποίο, όμως, δεν είναι ίδιο για όλα τα επίπεδα δοκιμής, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Μείωση των τιμών της αβεβαιότητας μπορεί, ενδεχομένως, να επιτευχθεί με αύξηση του αριθμού των κρούσεων, σε κάθε επίπεδο τάσης, κάτι, που, όμως, θα έχει ως συνέπεια την καταπόνηση των δοκιμίων από τις αλληπάλληλες κρούσεις (μεταξύ δύο κρούσεων μεσολαβεί διάστημα 2 min) και την αλλοίωση της σύνθεσής τους. Αυτό γίνεται πιο

εύκολα αντιληπτό αν αναλογισθούμε ότι, στα υγρά δείγματα χρώματος, η θερμότητα, που παράγεται από κάθε μία κρούση, θερμαίνει το δείγμα και οδηγεί στην εξάτμιση ποσότητας νερού.

Η αντικατάσταση του δοκιμίου με καινούργιο δείγμα, μετά από κάθε κρούση, ως λύση, κρίνεται μη αποδοτική, δεδομένου ότι, η κατανομή των ιόντων του χρώματος στο νέο δείγμα δεν είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου. Επιπλέον, η διαδικασία γίνεται χρονοβόρα.

Σε κάθε περίπτωση η μεθοδολογία, που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, φαίνεται να είναι γενικής εφαρμογής, τόσο σε πειράματα υπό κλίμακα, όσο και σε πειράματα, που διεξάγονται σε πραγματικά συστήματα γείωσης σε εξωτερικούς χώρους. Βέβαια, αξίζει να επισημανθεί το γεγονός ότι, η χρήση της διάταξης παραλλήλων πλακών διευκολύνει τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της κρίσιμης έντασης ιονισμού, διότι απαιτείται η γνώση μόνον της $U_{50\%}$ και της απόστασης μεταξύ των πλακών, με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Υπολογισμός της ολικής αβεβαιότητας της κρίσιμης έντασης ιονισμού, για την κυλινδρική διάταξη, δεν πραγματοποιήθηκε, εξ αιτίας του γεγονότος ότι, η μέθοδος των χαρακτηριστικών I-V δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της τυχαίας αβεβαιότητας της κρίσιμης τάσης διάσπασης. Επιπλέον, στην περίπτωση χρήσης κυλινδρικής διάταξης, απαιτείται ο υπολογισμός της σχετιζόμενης με την ακτίνα ιονισμού αβεβαιότητας και των τιμών της μεταβατικής τιμής της αντίστασης, καθιστώντας πολύπλοκους τους υπολογισμούς.

Ως μελλοντική ερευνητική εργασία, αξίζει να εξετασθεί η μελέτη της αβεβαιότητας, που σχετίζεται με τα πειράματα σε μη ομογενή πεδία, ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία των τιμών της E_0 . Προτείνεται, επίσης, η διεξαγωγή πειραμάτων εκτός του χώρου του εργαστηρίου, σε πραγματικά συστήματα γείωσης, με τη βοήθεια κρουστικής γεννήτριας ικανότητας παραγωγής κρουστικού ρεύματος, με εύρος και ενέργεια επαρκή να προκαλέσει ιονισμό ή διάσπαση του μεγάλου εδαφικού όγκου και η συσχέτιση των τιμών που θα προκύψουν με αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων. Ερευνητές, όπως οι Chen et al. [3.11] και He et al. [3.12], καταβάλλουν προσπάθειες, ώστε να συσχετίσουν τις τιμές πειραμάτων υπό κλίμακα με τις τιμές πειραμάτων σε εξωτερικούς χώρους.

Σχετικά με τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού στην κυλινδρική διάταξη, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι, ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης έναρξης του φαινομένου με τη βοήθεια των καμπυλών I-V είναι μία διαδικασία, σχετικώς απλή και ταχεία, η ακρίβεια της οποίας εξαρτάται από το βήμα μεταβολής της τάσης. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της παρούσας διδακτορικής διατριβής εφαρμόστηκαν επίπεδα τάσης από 13kV έως 73kV, με βήμα περί τα 2kV, όταν σε ανάλογη εργασία, ο Lima [3.18] επέλεξε βήμα μεταβολής της τάσης 5kV. Συνεπώς, οι εδώ παρουσιασθείσες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με καλύτερη ακρίβεια ως προς τον εντοπισμό της τάσης έναρξης και εντός εύλογου χρονικού διαστήματος. Ωστόσο, δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε ξηρά εδαφικά δείγματα και στα δείγματα Β με 5% υγρασία και Γ με 5% και 10% υγρασία, λόγω του πολύ μικρού ρεύματος το οποίο διέρρεε το εκάστοτε δοκίμιο με συνέπεια την αδυναμία χάραξης της I-V καμπύλης. Η χρησιμοποίηση στο μέλλον μίας γεννήτριας, η οποία θα παράγει υψηλότερο ρεύμα, το οποίο θα επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου και σε αυτά τα δείγματα, θα συμβάλει στην επίλυση του προβλήματος αυτού.

Έχοντας προσδιορίσει τις τιμές της κρίσιμης τάσης έναρξης του φαινομένου, προβήκαμε σε υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Αυτός πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή μεθοδολογιών που έχουν κατά καιρούς καταγραφεί στη βιβλιογραφία, αλλά και με νέα που προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Η μέθοδος υπολογισμού της E_0 με τη βοήθεια των εξισώσεων που έχουν προταθεί από την Oettle και τον Manna, απαιτεί τη γνώση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Για να εκτιμηθεί η ειδική αντίσταση των εδαφικών δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη I-V για το χαμηλότερο επίπεδο τάσης δοκιμής και η κλίση αυτής της καμπύλης. Σε κάθε περίπτωση, οι δύο αυτές προσεγγιστικές εξισώσεις αποτελούν έναν εύκολο τρόπο εκτίμησης της E_0 , ο οποίος, μάλιστα, δεν απαιτεί τη διεξαγωγή άλλης δοκιμής, εκτός αυτής για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται, το γεγονός ότι, οι εξισώσεις αυτές αποτελούν προσέγγιση πειραματικών δεδομένων, που ελήφθησαν από τους ίδιους τους συγγραφείς (που έκαναν τα πειράματα) και η αδυναμία διάκρισης/διαφοροποίησης της τιμής της κρίσιμης έντασης υπό θετική από την αντίστοιχη τιμή υπό αρνητική πολικότητα (φαινόμενο πολικότητας). Όπως, όμως, επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις μας, οι κρίσιμες εντάσεις ιονισμού υπό θετική πολικότητα είναι χαμηλότερες από τις τιμές υπό αρνητική

πολικότητα. Άρα, οι εύχρηστοι προσεγγιστικοί τύποι δεν δίνουν απαραίτητως ρεαλιστικές τιμές της E_0 .

Οι υπόλοιπες μέθοδοι, που εφαρμόστηκαν, βασίζονται στην εξίσωση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό κυλινδρικής διάταξης. Η 3^η Μέθοδος έχει εφαρμοσθεί από τον Lima και, σύμφωνα μ' αυτή, για τον υπολογισμό της E_0 , χρησιμοποιείται η ακτίνα ιονισμού, η οποία εκτιμάται από την τιμή της κρουστικής αντίστασης στα 9μs ($Z_{9\mu s}$). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η συγκεκριμένη επιλογή κρίνεται ως, μάλλον, αυθαίρετη και αίολη και προτείνεται η χρήση της ελάχιστης τιμής της κρουστικής αντίστασης (Z_{min}), εισάγουσα την 4^η Μέθοδο, η οποία βασίζεται στην απλή παρατήρηση ότι, η αντίσταση γίνεται ελάχιστη, όταν ο ιονισμός έχει φθάσει στο μέγιστο της έντασής του. Οι τιμές της E_0 , που προέκυψαν από την 4^η Μέθοδο, είναι μικρότερες από τις τιμές που δίνει η 3^η Μέθοδος.

Αν και η εφαρμογή, τόσο της 3^{ης}, όσο και της 4^{ης} Μεθόδου, υπερτερεί της εφαρμογής των προσεγγιστικών εξισώσεων, εν τούτοις αγνοούν την παραμένουσα αντίσταση στην περιοχή, εντός της οποίας έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού, βασιζόμενες στην υπόθεση ότι, εντός της ζώνης ιονισμού, η ειδική αντίσταση μηδενίζεται. Μία τέτοια προσέγγιση, ωστόσο, δεν είναι ρεαλιστική. Προκειμένου να δοθεί μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της E_0 , προτείνεται και εφαρμόζεται η 5^η Μέθοδος, η οποία βασίζεται, για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία, στη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου, προς υπολογισμό της παραμένουσας ειδικής αντίστασης και της ακτίνας ιονισμού, δεδομένης της ελάχιστης κρουστικής αντίστασης για το κρίσιμο επίπεδο τάσης. Η τιμή της E_0 , για καθένα από τα ελεγχθέντα εδαφικά δείγματα, είναι μικρότερη από τα αποτελέσματα των υπολοίπων μεθοδολογιών. Μελλοντικά, θα ήταν χρήσιμο να εφαρμοσθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία και σε άλλα είδη εδαφικών δειγμάτων και με διαφορετικές περιεκτικότητες σε υγρασία, ώστε να αξιολογηθεί, και σε ευρύτερο κύκλο δεδομένων, η αποτελεσματικότητά της.

Τελειώνοντας, θα πρέπει να αναφερθούμε και σε κάποιες συμπληρωματικές παρατηρήσεις, σχετιζόμενες με τις μετρήσεις. Σύμφωνα με τις αναφορές πλήθους ερευνητών, αύξηση της περιεκτικότητας του εδαφικού δείγματος σε υγρασία οδηγεί σε μείωση της κρίσιμης πεδιακής έντασης ιονισμού. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για το εδαφικό δείγμα Α σε διάταξη παραλλήλων πλακών

παρατηρήθηκε το ‘παράδοξο’ να σημειώνεται αύξηση της κρίσιμης έντασης με αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία από 0% σε 5%. Αντίστοιχες μετρήσεις είχαν λάβει και η Oettle [3.23] και οι Nor et al.[3.14], χωρίς ωστόσο να γίνεται καμία προσπάθεια ερμηνείας αυτού του ‘παράδοξου’. Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μία προσπάθεια ερμηνείας αυτής της συμπεριφοράς. Έτσι, η αύξηση της E_0 , για μικρή αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία, αποδόθηκε στις ιδιότητες του εδαφικού δείγματος και πιο συγκεκριμένα στην ανάπτυξη της ‘διπλής ζώνης’ γύρω από τα αργιλικά πλακίδια. Το ‘παράδοξο’ αυτό, καθώς και η απόκλιση των τιμών της E_0 μεταξύ των εδαφικών δειγμάτων Α με 5% περιεκτικότητα σε υγρασία ($\rho=792\Omega\text{m}$, $E_0=1006,60\text{kV}$ για τη διάταξη παραλλήλων πλακών) και Β με περιεκτικότητα 10% ($\rho=808\Omega\text{m}$, $E_0=622,86\text{kV}$ για τη διάταξη παραλλήλων πλακών), τα οποία παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή ειδικής αντίστασης, ενισχύουν τη θέση του Mousa [3.7], σύμφωνα με την οποία, η κρίσιμη ένταση ιονισμού επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, εκτός από την ειδική αντίσταση. Τέτοιοι παράγοντες ενδέχεται, μεταξύ των άλλων, να είναι το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων στο έδαφος, το πορώδες, καθώς και η ύπαρξη οργανικών στοιχείων σε αυτό.

Συνεπώς, σε ενδεχόμενες συναφείς μελλοντικές εργασίες θα ήταν, ίσως, σκόπιμο, τα εδαφικά δείγματα, η E_0 των οποίων είναι υπό προσδιορισμό, να χαρακτηρίζονται, όχι μόνο από την τιμή της ειδικής τους αντίστασης, αλλά και από την κοκκομετρική τους ανάλυση, ώστε να είναι δυνατή η διερεύνηση της σχέσης των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους με την κρίσιμη ένταση ιονισμού.

3.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3

- [3.1] F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Estimation of Uncertainty Regarding Soil Breakdown Parameters”, IET Science, Measurement & Technology, Vol. 5, Issue 1, January 2011, pp. 14-20.
- [3.2] F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Uncertainty of Soil Breakdown Voltage”, Proceedings of the International Conference on High-Voltage Engineering and Application (ICHVE 2010), New Orleans, USA, October 11-14, 2010 (paper 7166).
- [3.3] IEC 60060-1 ed3.0: High Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, 2010.
- [3.4] IEC 60060-2 ed2.0: High Voltage Test Techniques Part 2: Measuring Systems, 2010.
- [3.5] Μ.Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Έκδοση Ελληνικής Ένωσης Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.

- [3.6] Heafely πιστοποιητικό διακριβωσης.
- [3.7] A.M. Mousa, "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, 1994, pp. 1669-1677.
- [3.8] J. He, Y. Gao, R. Zeng, B. Zhang, X. Liang, "Soil ionization phenomenon around grounding electrode under lightning impulse", in Proc. International Symposium on Lightning Protection, Brasil, November 2005.
- [3.9] T.K. Manna, P. Chowdhuri, "Generalised equation of the soil critical electric field E_c based on impulse tests and measured soil electrical parameters", IET Generation Transmission and Distribution, Vol. 1, No. 5, 2007, pp. 811-817.
- [3.10] B.H. Lee, G.H. Park, H.G. Kim, K.S. Lee, "Analysis of soil ionization behaviors under impulse currents", Journal of electrical engineering and technology, Vol. 4, No. 1, 2009, pp. 98-105.
- [3.11] Y. Chen, P. Chowdhury, "Correlation between laboratory and field tests on the impulse impedance of rod-type ground electrodes", IEE Proc. – Generation Transmission and Distribution, Vol. 150, No. 4, July 2003, pp. 420-426.
- [3.12] J. He, R. Zeng, Y. Tu, J. Zou, S. Chen, Z. Guan, Z., "Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, July 2003, pp. 994-1001.
- [3.13] I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "Soil ionisation under lightning impulse voltages", IET Proceedings Science, Measurement and Technology, Vol. 151, No. 5, September 2004, pp. 343-346.
- [3.14] N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, "Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 353-361.
- [3.15] N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, "Performance of earthing systems of low resistivity soils", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, October 2006, pp. 2039-2047.
- [3.16] N.M. Nor, A. Ramli, "Electrical properties of dry soil under high impulse currents", Elsevier, Journal of Electrostatics, Vol. 65, 2007, pp. 500-505.
- [3.17] N.M. Nor, A. Ramli, "Effects of moisture content, impulse polarity and earth electrode's dimension on dry and wet sand under high voltage conditions", ETEP Trans. on Electrical Power, 18, June 2007, pp. 461-475.
- [3.18] J.L.C. Lima, S. Visacro, "Experimental developments on soil ionization", in Proc. International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Brasil, 2008, pp. 174-179.
- [3.19] Μ. Καββαδάς, «Στοιχεία Εδαφομηχανικής», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Σεπτέμβριος 2006.
- [3.20] S.R. Brown, "Complex electrical resistivity for monitoring DNAPL contamination", Final report, US Department of Energy, Project no. 70012, 2003.
- [3.21] R. Armstrong, "Grounding electrode characteristics from model tests", AIEE Trans., Vol. 72, No. 2, January 1953, pp. 1301-1306.
- [3.22] S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, January 2007, pp. 381-386.

- [3.23] E.E. Oettle, “Results of impulse tests done on practical electrodes at the National Electrical Engineering Research Institute’s Outdoor High Voltage Laboratory”, NEERI Internal report, Library No. I ELEK 267, November 1986.
- [3.24] J.L.C. Lima, “Avaliacao experimental sobre o efeito de ionizacao do solo devido a injecao de correntes impulsivas”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αύγουστος 2008.
- [3.25] A.C. Liew, M. Darveniza, “Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths”, Proc. IEE, Vol. 121, No. 2, February 1974, pp. 123-135.
- [3.26] K.J. Nixon, “The lightning transient behavior of a driven rod earth electrode in multi-layer soil”, Διδακτορική Διατριβή, Ιούλιος 2006.
- [3.27] M. Loboda, Z. Pochanke, “Experimental Study of Electric Properties of Soil with Impulse Current Injections”, 18th International Conference on Lightning Protection, Munich, 1985, pp. 191-198.
- [3.28] Y. Liu, N. Theethayi, R.M. Gonzalez, R. Thottappillil, “The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results”, Proc. 2003 IEEE Int. Symp. on EMC, Boston, USA, pp. 794-799.
- [3.29] I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Estimation of the multilayer soil parameters using genetic algorithms”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005, pp. 100-106.
- [3.30] I.F. Gonos, N.E. Mastorakis, M.N.S. Swamy, “A genetic algorithm approach to the problem of factorization of general multidimensional polynomials”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I, Vol. 50, No. 1, January 2003, pp. 16-22.
- [3.31] I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos, “A genetic algorithm approach to the modelling of polluted insulators”, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, No. 3, May 2002, pp. 373-376.
- [3.32] G.P. Fotis, F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Parameter evaluation of the equation of the electrostatic discharge current, using genetic algorithms as optimization tool”, Proceedings of the 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2006), Miami, USA, April 30th - May 3rd 2006 (paper PF5-6).
- [3.33] F.E. Asimakopoulou, G.P. Fotis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Parameter Determination of Heidler’s Equation for the ESD Current”, 15th International Symposium on High Voltage Proceedings (ISH), Ljubljana, Slovenia, August 2007.
- [3.34] G.P. Fotis, I.F. Gonos, F.E. Asimakopoulou, I.A. Stathopoulos, “Applying genetic algorithms for the determination of the parameters of the electrostatic discharge current equation”, Institute of Physics Publishing, Measurement, Science and Technology, Vol. 17, No. 10, October 2006, pp. 2819-2827.

Κεφάλαιο 4

Συσχέτιση των ηλεκτρικών παραμέτρων του εδάφους με την κρίσιμη ένταση ιονισμού

4.1 Εισαγωγή

Όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενα σημεία της διατριβής, ο πειραματικός προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού αποτελεί μία επίπονη και χρονοβόρα ερευνητική εργασία, η οποία απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού (κρουστικής γεννήτριας τάσεως ή ρεύματος, παλμογράφου, διαφορικού καταμεριστή, κ.τ.λ.). Ωστόσο, μία εκτίμηση της κρίσιμης τιμής του πεδίου αποτελεί απαραίτητη γνώση κατά τη σχεδίαση και μελέτη των συστημάτων γείωσης των εγκαταστάσεων, εφ' όσον η ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους επιδρά ευεργετικά στην τιμή της αντίστασης του συστήματος γείωσης, όταν αυτό πληγεί από κεραυνικό ρεύμα, συντελώντας, τοιούτοτρόπως, στην αποδοτικότερη και οικονομικότερη κατασκευή του συστήματος γείωσης. Οι προταθείσες, κατά καιρούς, εξισώσεις για τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, συναρτήσει των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του εδάφους, παρέχουν τη δυνατότητα καλής εκτίμησης της κρίσιμης έντασης, όταν είναι αδύνατη η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων.

Στο παρόν κεφάλαιο, ακολουθώντας τα βήματα των Oettle [4.1] και Manna [4.2], [4.3], γίνεται διερεύνηση της συσχέτισης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους (ειδική αντίσταση και σχετική διηλεκτρική σταθερά, εν προκειμένω), με την κρίσιμη ένταση ιονισμού E_0 . Προς επίτευξη τούτου, εφαρμόζεται ένα μη γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο στα πειραματικά δεδομένα της ερευνητικής εργασίας του Manna. Εν συνεχεία,

τα αποτελέσματα του μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου βελτιστοποιούνται, με τη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, αναλύεται η διαδικασία βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της.

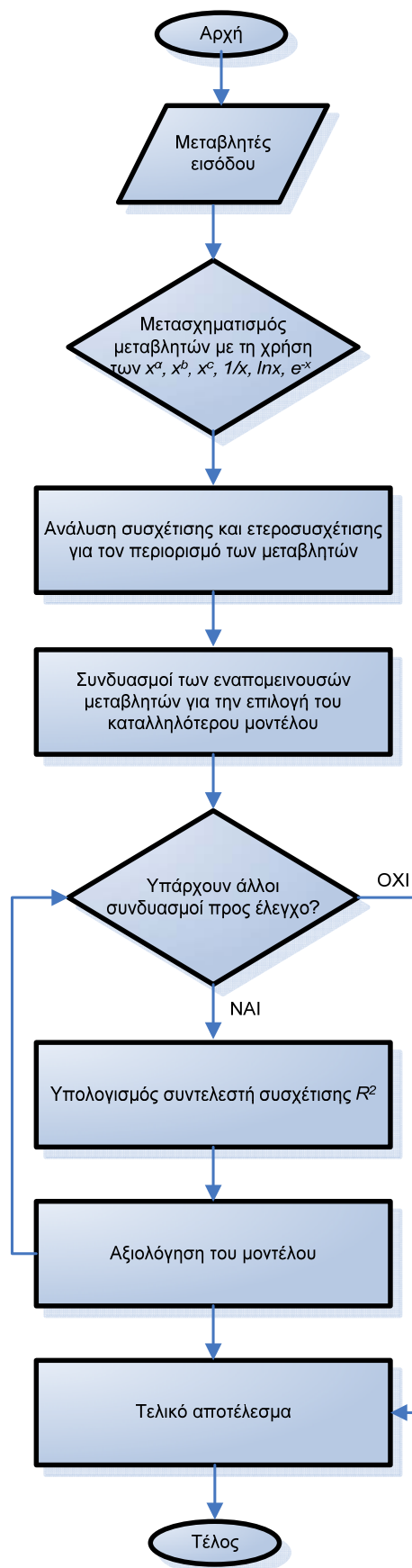
4.2 Μεθοδολογία υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου

Προκειμένου να μελετηθεί η συσχέτιση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς με την κρίσιμη ένταση ιονισμού, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος μη γραμμικής παλινδρόμησης, ο οποίος έχει ήδη εφαρμοσθεί επιτυχώς για τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [4.4], [4.5].

4.2.1 Εφαρμογή του υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου

Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζονται τα βασικά βήματα του αλγορίθμου. Αναλυτικότερα, και ειδικότερα για το πρόβλημά μας, οι ανεξάρτητες μεταβλητές (ειδική αντίσταση και σχετική διηλεκτρική σταθερά), οι οποίες εφ' εξής χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές x_1 και x_2 μετασχηματίζονται με την εφαρμογή των συναρτήσεων x^a , x^b , x^g , $1/x$, $\ln(x)$ και e^{-x} , για κάθε τιμή των ανεξάρτητων μεταβλητών. Κατά συνέπεια, η διάσταση του διανύσματος εισόδου είναι 13 (συμπεριλαμβανομένου και του σταθερού όρου). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι a , b , g λαμβάνουν τιμές από τα σύνολα $A=\{1, 1, 1, \dots, 4\}$, $B=\{0, 2, 0, 201, \dots, 0, 990\}$, $\Gamma=\{0, 001, 0, 002, \dots, 0, 190\}$, αντίστοιχα. Οποιοσδήποτε γραμμικός συνδυασμός των παραπάνω όρων αποτελεί τη βάση ενός υποψήφιου μοντέλου (συνολικός αριθμός συνδυασμών 2^{12}). Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των υποψηφίων συνδυασμών, πραγματοποιείται ανάλυση συσχέτισης, τα βασικά βήματα της οποίας είναι τα ακόλουθα:

- Υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης, ανάμεσα στη μετασχηματισμένη ανεξάρτητη μεταβλητή και στην εξαρτημένη μεταβλητή. Αν η τιμή του συντελεστή αυτού είναι μεγαλύτερη από μία προκαθορισμένη τιμή (στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η τιμή 0,2), τότε ο όρος διατηρείται, ειδάλλως, δεν εξετάζεται στη συνέχεια. Στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζονται οι τιμές της συσχέτισης μεταξύ των όρων $f_k(x_1)$ και y . Εφ' όσον οι απόλυτες τιμές των δεικτών είναι μεγαλύτερες από 0,2, όλοι οι όροι παραμένουν για περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής του μη γραμμικού πολυμεταβλητού παλινδρομικού μοντέλου.

$f_k(x_1)$	Συντελεστής συσχέτισης $f_k(x_i) - y$
$x_1^{1,1}$	0,759639
$x_1^{0,2}$	0,950431
$x_1^{0,189}$	0,950421
$\ln x_1$	0,935405
$1/x_1$	-0,663376
e^{-x_1}	-0,857407

Πίνακας 4.1 Συντελεστής συσχέτισης $f_k(x_i) - y$.

- Πραγματοποιείται ανάλυση ετεροσυσχέτισης, μεταξύ των μετασχηματισμένων ανεξάρτητων μεταβλητών. Αν η τιμή, που προκύπτει, είναι μικρότερη από την προκαθορισμένη τιμή (στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε ίση προς 0,8), τότε διατηρούνται και οι δύο όροι, ειδικά, διατηρείται στο μοντέλο εκείνος ο όρος που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την εξαρτημένη μεταβλητή. Κατ' αυτόν τον τρόπο παραμένουν εκείνες οι μεταβλητές που δεν παρουσιάζουν αλληλοεπικάλυψη πληροφορίας.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να εξηγηθεί μέσω του παραδείγματος του **Πίνακα 4.2**. Εξετάζοντας τον συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των όρων $x_1^{0,2}$ και $x_1^{0,189}$, παρατηρούμε ότι είναι $1,0 > 0,8$, επομένως μόνο ο όρος $x_1^{0,2}$ παραμένει, εφ' όσον ο συντελεστής συσχέτισής του με την y είναι μεγαλύτερος απ' ό,τι ο συντελεστής συσχέτισης του $x_1^{0,189}$ με την y (βλ. **Πίνακα 4.1**).

$f_k(x_i)$	$x_1^{1,1}$	$x_1^{0,2}$	$x_1^{0,189}$	$\ln x_1$	$1/x_1$	e^{-x_1}
$f_k(x_j)$	$x_1^{0,2}$	e^{-x_2}	$x_1^{0,2}$	$x_1^{0,2}$	$\ln x_1$	$x_1^{0,2}$
Συντελεστής Συσχέτισης $f_k(x_i) \cdot f_k(x_j)$	0,8199	0,7884	1,0000	0,9847	0,8037	0,9052
Ποια επικρατεί;	$x_1^{0,2}$	και οι δύο	$x_1^{0,2}$	$x_1^{0,2}$	$x_1^{0,2}$	$x_1^{0,2}$

Πίνακας 4.2 Παράδειγμα δεικτών συσχέτισης $f_k(x_i) \cdot f_k(x_j)$.

Μέσω της εκτεθείσης διαδικασίας, οι όροι που παραμένουν στο μοντέλο είναι οι: $x_1^{0,2}$ και e^{-x_2} . Οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών των όρων αποτελεί και ένα υποψήφιο μοντέλο. Οι $2^2=4$ συνδυασμοί εξετάστηκαν και, τελικά, το μοντέλο, που επιλέχθηκε, ήταν το ακόλουθο:

$$E_o = 1,903 + 6,487 \cdot \rho^{0,2} - 29,463 \cdot e^{-k} \quad (4.1)$$

όπου E_o είναι η κρίσιμη ένταση ιονισμού σε kV/cm, ρ η ειδική αντίσταση σε kΩm και

k η σχετική διηλεκτρική σταθερά, αδιάστατο μέγεθος.

Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν, στη συνέχεια με το μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης που έχει προταθεί από τον Manna [4.2]-[4.3]. Σύμφωνα με αυτό, η E_o δίνεται από τη σχέση (4.2):

$$E_o = 8,6083 \cdot k^{-0,0103} \cdot \rho^{0,1526} \quad (4.2)$$

όπου E_o σε kV/cm, ρ σε kΩm, k αδιάστατο μέγεθος.

Ως κριτήριο για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Το MAPE ορίζεται ως:

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|E_{oi}^c - E_{oi}^m|}{E_{oi}^m} \quad (4.3)$$

όπου N ο αριθμός των στοιχείων (108 στην περίπτωση μας), E_{oi}^c η εκτιμώμενη τιμή από το μοντέλο και E_{oi}^m η πειραματική τιμή.

Ενώ για το προτεινόμενο μοντέλο, που δίνεται από την (4.1), το υπολογιζόμενο MAPE είναι 7,760%, για την εξίσωση (4.2) είναι ελαφρώς μεγαλύτερο, συγκεκριμένα 7,890%.

4.3 Βελτιστοποίηση με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου

Προς βελτιστοποίηση των παραμέτρων των εξισώσεων (4.1) και (4.2), χρησιμοποιήθηκε Γενετικός Αλγόριθμος.

Η προτεινόμενη από το παλινδρομικό μοντέλο εξίσωση είναι της μορφής:

$$E_o = A + B \cdot \rho^C - D \cdot e^{-k} \quad (4.4)$$

ενώ, η γενική μορφή της εξίσωσης, που προτείνεται στην εργασία [4.2], είναι η ακόλουθη:

$$E_o = a \cdot k^b \cdot \rho^c \quad (4.5)$$

όπου E_o είναι η κρίσιμη ένταση σε kV/cm, ρ η ειδική αντίσταση σε kΩm, k η σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους και A, B, C, D, a, b και c σταθερές. Ο Γενετικός Αλγόριθμος, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση των ως άνω σταθερών των εξισώσεων (4.4) και (4.5).

Τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου είναι η κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_o), η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) και η σχετική διηλεκτρική του σταθερά (k). Για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων εκτελέστηκε ο Γενετικός Αλγόριθμος πολλές φορές,

μεταβάλλοντας, κάθε φορά, το πλήθος των γονέων και τον αριθμό των επαναλήψεων. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε τυχαία παραγόμενος πληθυσμός P_s χρωμοσωμάτων/γονέων/ατόμων ($P_s = 20, 30$ ή 50). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από n μεταβλητές ($n=3$ ή 4 για τις εξισώσεις (4.4) και (4.5) αντίστοιχα) και κάθε μεταβλητή αναπαριστάται από 20 bit. Κατά τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων το χρωμόσωμα διαιρείται σε N_p τμήματα και γίνεται ανταλλαγή γενετικού υλικού. Μετά από κάθε διασταύρωση υπάρχει πιθανότητα μετάλλαξης 20%. Ως συνάρτηση προς βελτιστοποίηση επιλέχθηκε το MAPE. Η διαδικασία σταματά όταν ολοκληρωθεί συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων (20, 30 ή 50). Στους **Πίνακες 4.3** και **4.4** παρουσιάζονται οι αρχικές και οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων (4.4) και (4.5), καθώς και τα μέσα απόλυτα ποσοστιαία σφάλματα.

$E_o = A + B \cdot \varrho^C - D \cdot e^{-k}$	A	B	C	D	MAPE (%)
(4.1)	1,903	6,487	0,200	29,463	7,760
(4.6)	1,661	8,123	0,156	22,493	7,477

Πίνακας 4.3 Οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης του παλινδρομικού μοντέλου και οι βελτιστοποιημένες τιμές τους.

$E_o = a \cdot k^b \cdot \varrho^c$	a	b	c	MAPE (%)
(4.2)	8,6083	-0,0103	0,1526	7,890
(4.7)	9,3309	-0,0533	0,2665	7,589

Πίνακας 4.4 Οι τιμές των παραμέτρων της προταθείσης, από τον Μαννα, εξίσωσης και οι βελτιστοποιημένες τιμές τους.

Επομένως, η εξίσωση (4.4) για τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της γίνεται:

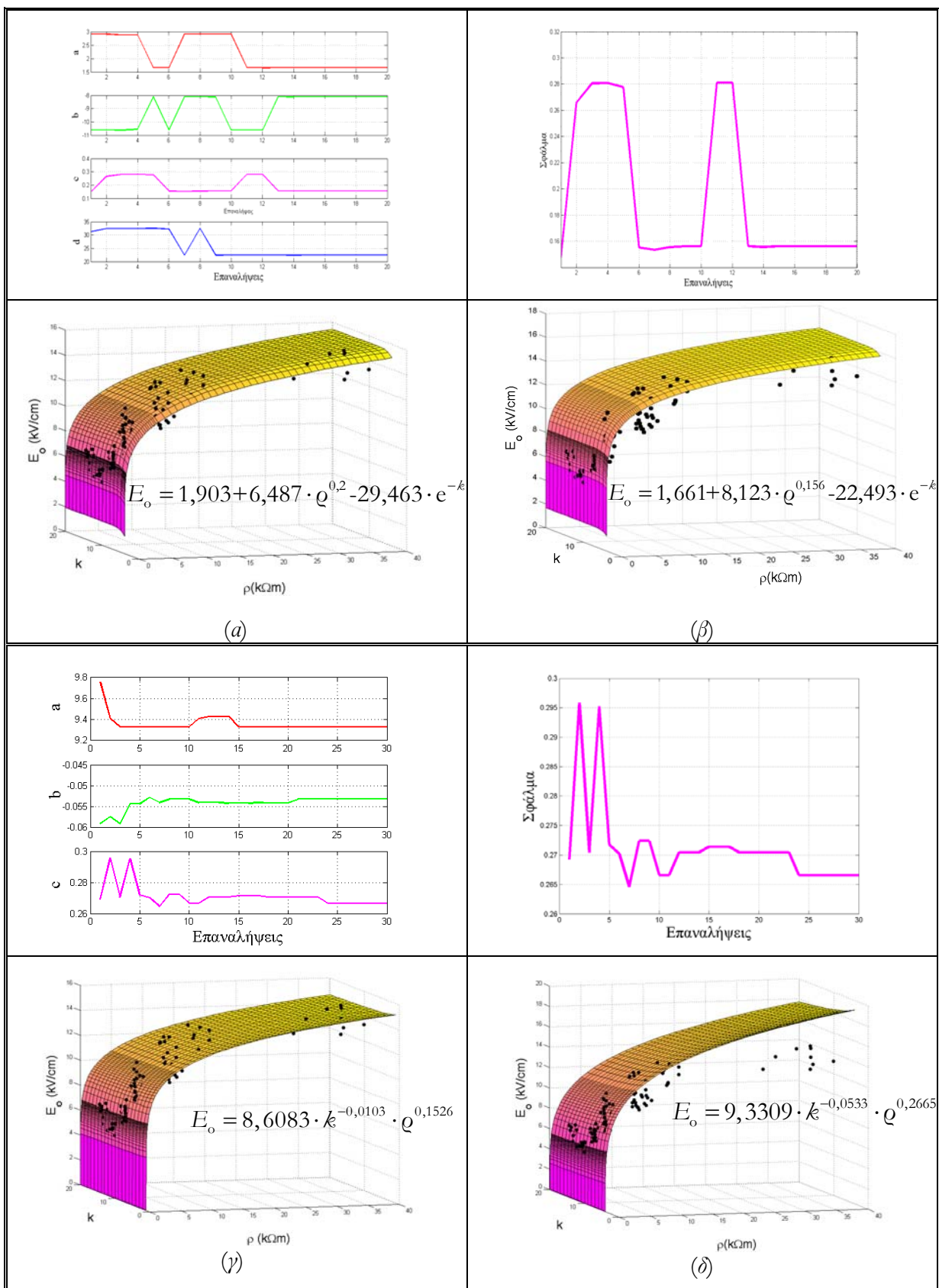
$$E_o = 1,661 + 8,123 \cdot \varrho^{0,156} - 22,493 \cdot e^{-k} \quad (4.6)$$

ενώ η βελτιστοποιημένη μορφή της εξίσωσης (4.5) είναι η:

$$E_c = 9,3309 \cdot k^{-0,0533} \cdot \varrho^{0,2665} \quad (4.7)$$

όπου E_o σε kV/cm, ϱ σε kΩm, k αδιάστατη ποσότητα.

Στα **Σχήματα 4.2(α)** έως και **4.2(δ)** παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του Γενετικού Αλγορίθμου, καθώς και οι πειραματικές τιμές μαζί με τις εξισώσεις (4.1), (4.6), (4.2) και (4.7).



Σχήμα 4.2 Απεικόνιση των εξισώσεων
(α):(4.1), (β):(4.6), (γ):(4.2), (δ):(4.7)
και πειραματικών δεδομένων [4.3].

4.4 Συμπεράσματα

Με την εφαρμογή ενός υβριδικού μη γραμμικού πολυμεταβλητού μοντέλου παλινδρόμησης στα πειραματικά αποτελέσματα των εργασιών [4.2] και [4.3], προέκυψε η νέα εξίσωση (4.1) για την E_o , συναρτήσει της ειδικής αντίστασης και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους, η οποία παρουσιάζει μικρότερο Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (MAPE), εν συγκρίσει με την υπάρχουσα εξίσωση (4.2). Εν συνεχεία, με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου, βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι των δύο αυτών εξισώσεων. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα, η χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου συνέβαλε στη βελτίωση της συμπεριφοράς, τόσο της προταθείσης από τον Manna εξίσωσης (4.2), επιτυγχάνοντας μείωση του MAPE από 7,890% σε 7,589%, όσο και της προταθείσης, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, εξίσωσης (4.1): το MAPE μειώνεται από 7,760% σε 7,477%.

Συνεπώς, η διαδικασία, που προτάθηκε στον παρόν κεφάλαιο, οδήγησε στην εισαγωγή μίας νέας εξίσωσης (4.6), για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ της E_o και ηλεκτρικών παραμέτρων του εδάφους (ρ και k), καταλληλότερης της προϋπάρχουσας (4.2), δεδομένου ότι, η χρήση του υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου και του Γενετικού Αλγορίθμου συνέβαλαν, τελικώς, στη μείωση του MAPE κατά 5,2%. Επιπλέον, με τη νέα προτεινόμενη εξίσωση, προσεγγίζονται αποτελεσματικά τα πειραματικά δεδομένα, ακόμη και για υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Τα συμπεράσματα αυτά, καταδεικνύουν την ανάγκη βελτιστοποίησης, όχι μόνο των συντελεστών της εξίσωσης (4.2), αλλά και της ίδιας της μορφής της εξίσωσης, που εμπλέκει την E_o με τη σχετική διηλεκτρική σταθερά (k) και την ειδική αντίσταση (ρ) του εδάφους.

Θα πρέπει, ωστόσο, να έχουμε πάντα στο νου μας ότι, για τον καθορισμό μιας εξίσωσης, προς περιγραφή της E_o , απαιτούνται πειραματικά αποτελέσματα, για διαφορετικούς τύπους εδαφών. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και να μελετηθεί η επίδραση και άλλων παραγόντων όπως, παραδείγματος χάριν, το πορώδες του εδάφους, το μέγεθος των κόκκων του, κ.ά. και, παράλληλα, να γίνει προσπάθεια φυσικής ερμηνείας των συντελεστών, που εμφανίζονται στις εξισώσεις υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού.

4.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4

- [4.1] E. Oettle, “The characteristics of electrical breakdown and ionization processes in soil”, Trans. SAIEE, December 1988, pp. 63-70.
- [4.2] T.K. Manna, P. Chowdhuri, “Generalized equation of the soil critical electric field E_c based on impulse tests and measured soil parameters”, IET Generation Transmission and Distribution, Vol. 1, No. 5, September 2007, pp. 811-818.
- [4.3] T.K. Manna, “Impulse effects of grounding systems and its effects on tower crossarm voltage”, Διδακτορική διατριβή, Αύγουστος 2006.
- [4.4] G.J. Tsekouras, C.N. Elias, S. Kavatza, G.C. Contaxis, “A hybrid non-linear regression midterm energy forecasting method using data mining”, IEEE Bologna Power Tech. Conference, June 2003, Bologna, Italy.
- [4.5] G.J. Tsekouras, E.N. Dialynas, N.D. Hatziaargyriou, S. Kavatza, “A non-linear multivariable regression model for midterm energy forecasting of power systems”, Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 12, October 2007, pp. 1560-1568.

Κεφάλαιο 5

Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

5.1 Εισαγωγή

Σκοπός οποιουδήποτε συστήματος γείωσης είναι να αποτελεί ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης στα ρεύματα σφαλμάτων και τα κεραυνικά ρεύματα και να εξασφαλίζει την προστασία της ανθρώπινης ζωής, των εγκαταστάσεων και του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η συμπεριφορά του συστήματος γείωσης καθορίζεται, σε μεγάλο βαθμό, από τον τύπο του εδάφους, εντός του οποίου είναι τοποθετημένο στο σύστημα γείωσης, ειδικότερα από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Με τη σειρά της, η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από τους παράγοντες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες, όπως, επί παραδείγματι, η υγρασία και η θερμοκρασία μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, με συνέπεια το σύστημα γείωσης να μην χαρακτηρίζεται από μία και μοναδική τιμή αντίστασης.

Μέχρι σήμερα, έχει πραγματοποιηθεί πλήθος ερευνών για τη μελέτη τη μεταβολής της αντίστασης γείωσης απλών συστημάτων γείωσης, κατά τη διάρκεια του έτους [5.1]-[5.4]. Ωστόσο, στη διεθνή βιβλιογραφία, δεν φαίνεται να έχει γίνει καταγραφή κάποιας μεθόδου για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός συστήματος γείωσης κατά τη διάρκεια του έτους, βάσει μετρήσεων προηγούμενων ετών. Αυτό έγκειται εν μέρει στο γεγονός ότι, οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται συνεχώς και η επίδρασή τους είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Στο σημείο αυτό, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) έρχονται να αντιμετωπίσουν τη συγκεκριμένη πρόκληση, μέσω της ικανότητάς τους να αναγνωρίζουν τις σχέσεις μεταξύ ποσοτήτων, οι οποίες είναι

δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Μέχρι σήμερα ερευνητές, όπως οι Salam et al. [5.5] και ο Ekononou [5.6], έχουν χρησιμοποιήσει επιτυχώς τα ΤΝΔ για να συσχετίσουν το μήκος του ηλεκτροδίου με την τιμή της αντίστασης γείωσης. Οι Amaral et al. [5.7] εφάρμοσαν τα ΤΝΔ, προκειμένου να συσχετίσουν την ειδική αντίσταση, την αντίσταση γείωσης, τη συχνότητα του επιβαλλόμενου ρεύματος και τη μέγιστη τιμή του, με την τιμή της αντίστασης γείωσης. Οι Ezzat et al. [5.8] ανέπτυξαν ένα ΤΝΔ εκπαιδευμένο με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, για να εκτιμήσουν την αντίσταση πλεγμάτων γείωσης και τη μεταβολή της, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων, όπως ο τύπος του πλέγματος (τετράγωνο ή ορθογώνιο), το μέγεθός του, η πυκνότητα και το μήκος των αγωγών.

Οι Gouda et al. [5.9] ανέπτυξαν ΤΝΔ, για τη σχεδίαση συστημάτων γείωσης κατακόρυφων γειωτών. Για το σκοπό αυτόν, το ΤΝΔ που ανέπτυξαν, με εισόδους τις επιθυμητές τιμές της αντίστασης γείωσης και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, έχει εξόδους τον απαιτούμενο αριθμό γειωτών και το μήκος αυτών σε m. Επιπλέον, εφάρμοσαν συνδυασμό δύο ΤΝΔ, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τις διαστάσεις του πλέγματος γείωσης. Το πρώτο ΤΝΔ έχει ως μεταβλητές εισόδου την ειδική αντίσταση του εδάφους και την τιμή του ρεύματος σφάλματος. Οι έξοδοι του πρώτου ΤΝΔ, που αποτελούν την είσοδο του δεύτερου ΤΝΔ, είναι η επιτρεπόμενη τάση επαφής και το συνολικό μήκος των αγωγών. Το δεύτερο ΤΝΔ δίνει ως έξοδο τις βέλτιστες διαστάσεις του πλέγματος γείωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με τα ΤΝΔ είναι όμοια με τα αντίστοιχα δεδομένα συστήματος γείωσης ενός υποσταθμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα ΤΝΔ αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση συστημάτων γείωσης και την εκτίμηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, μειώνοντας, παράλληλα, τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται να επενδυθεί από τον μελετητή - μηχανικό.

Στο παρόν κεφάλαιο ΤΝΔ εκπαιδεύονται και αξιολογούνται, βάσει πειραματικών δεδομένων ειδικής αντίστασης και ύψους βροχοπτώσης, με στόχο την πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης.

5.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) επεξεργάζονται τις πληροφορίες μιμούμενα, τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και λειτουργούν στη βάση της ιδέας μοντελοποίησης του ‘μαύρου κουτιού’. Με τον όρο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο εννοούμε κάθε αρχιτεκτονική υπολογισμού, η οποία περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων απλών νευρωνικών επεξεργαστών, οι οποίοι καλούνται νευρώνες.

Ο νευρώνας αποτελεί τη θεμελιώδη μονάδα επεξεργασίας και απαρτίζεται από ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης (συνάψεις), έναν κόμβο γραμμικής άθροισης και μία συνάρτηση ενεργοποίησης (μη γραμμικότητα). Κάθε συνάψη έχει ένα βάρος, ο κόμβος άθροισης αθροίζει τα σήματα εισόδου πολλαπλασιασμένα με τα αντίστοιχα βάρη των συνάψεων και, τέλος, η συνάρτηση ενεργοποίησης περιορίζει το επιτρεπόμενο πλάτος του σήματος εξόδου σε μία τιμή εντός του διαστήματος $[0,1]$ ή εναλλακτικά $[-1,1]$. Επιπλέον, εφαρμόζεται ένα κατώφλι θ , το οποίο υποβιβάζει την είσοδο της συνάρτησης ενεργοποίησης, ενώ, για την ανάκτηση της αρχικής τιμής της, χρησιμοποιείται ο όρος πόλωσης.

Κάθε νευρωνικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από μία κατάσταση, ένα σύνολο εισόδων με βάρη, που προέρχονται από άλλους νευρώνες και μία εξίσωση, που περιγράφει τη δυναμική λειτουργία του νευρωνικού δικτύου. Τα βάρη του νευρωνικού δικτύου ανανεώνονται (λαμβάνουν νέες τιμές), μέσω της διαδικασίας μάθησης (εκπαίδευσης), η οποία πραγματοποιείται με την ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης κόστους (σφάλματος), ανανεώνοντας, βήμα προς βήμα, τα βάρη. Οι βέλτιστες τιμές των βαρών αποθηκεύονται (ως δυνάμεις συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων) και χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της εργασίας.

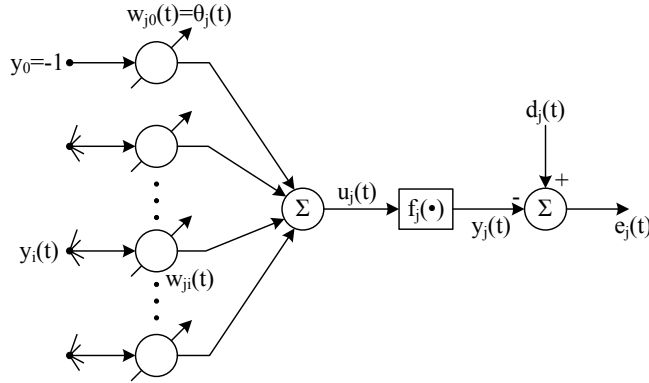
Σε ό,τι αφορά στην τοπολογία των νευρωνικών δικτύων, αυτά αποτελούνται από ένα στρώμα εισόδου, που περιέχει τα στοιχεία του διανύσματος εισόδου, ένα ή περισσότερα κρυμμένα (ενδιάμεσα) στρώματα και το στρώμα εξόδου, που δίνει τη (τις) συνολική (συνολικές) απόκριση (αποκρίσεις) στα διανύσματα εισόδου [5.10].

5.2.1 Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος

Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος (back-propagation) είναι αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης, που ανανεώνει τα συναπτικά βάρη, με σκοπό την

ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (G_{av}), μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών αποκρίσεων, μετά την παρουσίαση κάθε προτύπου στην είσοδο του ΤΝΔ [5.11] -[5.14].

Πιο αναλυτικά, έστω ότι υπάρχει ένα σύνολο εκπαίδευσης αποτελούμενο από N ζεύγη διανυσμάτων εισόδου ($\vec{x}$) και διανυσμάτων επιθυμητών εξόδων ($\vec{d}$) και ότι ο j -οστός νευρώνας εξόδου έχει τη μορφή που φαίνεται στο **Σχήμα 5.1**.



Σχήμα 5.1 Δομή του j -οστού νευρώνα εξόδου.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, τα σφάλματα διαδίδονται μέσω των κρυμμένων στρωμάτων, προς υπολογισμό των διορθωμένων βαρών, με στόχο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος G_{av} για τα N πρότυπα:

$$G_{av} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C} (d_j(n) - y_j(n))^2 \quad (5.1)$$

όπου C είναι το σύνολο των νευρώνων, d_j και y_j η επιθυμητή και η πραγματική, αντίστοιχα, έξοδος του j -οστού νευρώνα εξόδου, μετά την παρουσίαση του n -οστού προτύπου εκπαίδευσης στην είσοδο του δικτύου $\vec{x}(n)$, ($n=1, \dots, N$).

Όπως προκύπτει από το **Σχήμα 5.1**, ο νευρώνας εξόδου j τροφοδοτείται από τα σήματα εξόδου όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου. Συνεπώς, το σήμα $u_j(n)$ δίνεται από τη σχέση:

$$u_j(n) = \sum_{i=0}^p w_{ji}(n) y_i(n) \quad (5.2)$$

όπου p είναι το σύνολο όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου και y_i η έξοδος του i -οστού νευρώνα του προηγούμενου επιπέδου. Το βάρος w_{j0} (για $i=0$) είναι η πόλωση και αντιστοιχεί σε εξωτερική είσοδο $y_0 = -1$. Συνεπώς, το σήμα εξόδου $y_j(n)$ του νευρώνα εξόδου j , κατά την παρουσίαση του n -οστού διανύσματος εισόδου,

δίνεται από την ακόλουθη σχέση, με χρήση της συνάρτησης ενεργοποίησης $\phi(\cdot)$ πάνω στο σήμα $u_j(n)$:

$$y_j(n) = \phi(u_j(n)) \quad (5.3)$$

Ο αλγόριθμος προβαίνει, σε κάθε επανάληψη, σε μία διόρθωση $\Delta w_{ji}(n)$ του βάρους $w_{ji}(n)$, που συνδέει το νευρώνα i με το νευρώνα j του επομένου επιπέδου, βάσει του τύπου:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (5.4)$$

Στην περίπτωση που ο νευρώνας j αποτελεί κόμβο εξόδου, η τοπική κλίση $\delta_j(n)$ ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} \delta_j(n) &= -\frac{\partial G(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial u_j(n)} = e_j(n) \phi'(u_j(n)) \\ e_j(n) &= d_j(n) - y_j(n) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Ο πιο σημαντικός παράγοντας, από τον οποίο εξαρτάται η αναπροσαρμογή των βαρών $\Delta w_{ji}(n)$, είναι το σφάλμα $e_j(n)$ στο νευρώνα j .

Στην περίπτωση που ο νευρώνας j αποτελεί εσωτερικό κόμβο του νευρωνικού δικτύου, ο οποίος έμμεσα επηρεάζει τα σφάλματα εξόδου του δικτύου, δεν υφίσταται κάποια επιθυμητή έξοδος για το συγκεκριμένο νευρώνα και, τότε, η τοπική κλίση $\delta_j(n)$ ορίζεται ως:

$$\delta_j(n) = \phi'(u_j(n)) \cdot \sum_i \delta_i(n) \cdot w_{ji}(n) \quad (5.6)$$

Δηλαδή, η κλίση $\delta_j(n)$ εξαρτάται, τόσο από τη συνάρτηση ενεργοποίησης του συγκεκριμένου νευρώνα j , όσο και από το άθροισμα των γινομένων των τοπικών κλίσεων δ_i του επόμενου επιπέδου με τα αντίστοιχα βάρη, που συνδέουν τον νευρώνα j με το επίπεδο αυτό.

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος [5.10], αρχικοποιούνται τα βάρη και οι πολώσεις σε μικρές τυχαίες τιμές στο διάστημα $[-1,1]$, παρουσιάζεται στο ΤΝΔ το διάνυσμα εκπαίδευσης και το επιθυμητό διάνυσμα εξόδου, υπολογίζονται τα σήματα εξόδου όλων των νευρώνων του δικτύου προς τα εμπρός (ευθύ

‘πέρασμα’), χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες τιμές των συναπτικών βαρών, βάσει των τύπων:

$$y_i(n) = \phi_i(u_i(n)) \quad (5.7)$$

$$u_i(n) = \sum_{l=0}^q w_{il}(n) \cdot y_l(n) \quad (5.8)$$

Για τους νευρώνες του πρώτου κρυμμένου επιπέδου, ισχύει:

$$y_k(n) = x_k(n) \quad (5.9)$$

όπου ο δείκτης k αναφέρεται στην k -οστή είσοδο του διανύσματος εισόδου $\vec{x}$ και για τους νευρώνες του στρώματος εξόδου το $y_j(n)$ είναι η j -οστή πραγματική απόκριση του δικτύου. Εν συνεχεία, ανανεώνονται (βελτιώνονται) τα βάρη, αρχίζοντας από τους νευρώνες εξόδου και προχωρώντας ανάστροφα προς το στρώμα εισόδου (ανάστροφο ‘πέρασμα’), με εφαρμογή της σχέσης:

$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) + \gamma \cdot \delta_j(n) \cdot y_i(n) \quad (5.10)$$

Για να επιταχυνθεί η σύγκλιση, είναι δυνατή η προσθήκη στην (5.10) ενός πρόσθετου όρου ορμής $a \cdot \Delta w_{ji}(n-1)$, όπου η παράμετρος a παίρνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Η διαδικασία των δύο ‘περασμάτων’ εκτελείται για κάθε πρότυπο του συνόλου εκπαίδευσης. Όταν παρουσιαστεί το σύνολο των προτύπων εκπαίδευσης μία φορά το καθένα στο δίκτυο με τυχαίο ή στοχαστικό τρόπο, τότε έχει πραγματοποιηθεί μία εποχή (epoch).

5.2.2 Συνάρτηση ενεργοποίησης και κορεσμός

Για να υπολογισθεί η τοπική κλίση κάθε νευρώνα, απαιτείται η γνώση της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης ενεργοποίησης, οπότε η τελευταία πρέπει να είναι συνεχής και παραγωγίσιμη. Στον **Πίνακα 5.1** καταγράφεται μία σειρά συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται συχνά σε πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα. Γενικά, προτείνεται η χρήση μη γραμμικών συναρτήσεων ενεργοποίησης, ώστε να είναι δυνατή η επίλυση προβλημάτων μη γραμμικής συμπεριφοράς. Βέβαια, ορισμένες από τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται, όπως για παράδειγμα η βηματική, η αναρρίχησης, οι δυαδικές και η ανταγωνιστική, δεν πληρούν, στο πεδίο ορισμού τους, τις ιδιότητες της συνέχειας και της παραγωγισιμότητας. Πάντως, κατά τη χρήση μη γραμμικών συναρτήσεων, με

περιορισμένο πεδίο τιμών, μπορεί να εμφανισθεί πρόβλημα κορεσμού των τιμών της συνάρτησης ενεργοποίησης.

Είδος συνάρτησης ενεργοποίησης	Μαθηματική έκφραση
Γραμμική	$\phi(x) = ax + b$
Σιγμοειδής με πεδίο τιμών $[0,1]$ (λογιστική συνάρτηση)	$\phi(x) = 1 / (1 + e^{-ax})$
Σιγμοειδής με πεδίο τιμών $[-1,1]$ (υπερβολική εφαπτομένη)	$\phi(x) = \tanh(ax + b)$
Γκαουσιανή	$\phi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{v}\right)$
Αναρρίχησης	$\phi(x) = \begin{cases} \gamma, & x \geq \gamma \\ x, & x < \gamma \\ -\gamma, & x \leq -\gamma \end{cases}$
Βηματική	$\phi(x) = \begin{cases} a, & x \geq \gamma \\ b, & x < \gamma \end{cases}$
Δυαδική	$\phi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$
Συμμετρική δυαδική	$\phi(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$
Ανταγωνιστική	$\phi(x) = \begin{cases} 1, & \text{νευρώνας με } \max(x) \\ 0, & \text{υπόλοιποι νευρώνες} \end{cases}$

Πίνακας 5.1 Συναρτήσεις ενεργοποίησης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.

Λύση σ' αυτό το πρόβλημα δίνει η κανονικοποίηση (μετασχηματισμός) των τιμών των μεταβλητών εισόδου, ώστε να λαμβάνουν τιμές από a ως b . Αυτό πραγματοποιείται βρίσκοντας ή ορίζοντας το ελάχιστο $x_{\min}$ και το μέγιστο $x_{\max}$ των τιμών της μεταβλητής εισόδου. Ο ορισμός αυτός είναι απαραίτητος, στην περίπτωση ενός φυσικού μεγέθους, όπου στο σύνολο εκπαίδευσης του ΤΝΔ δεν παρουσιάζονται οι ακραίες τιμές του. Στη συνέχεια, μετασχηματίζονται οι τιμές εισόδου x στις νέες κανονικοποιημένες τιμές $\hat{x}$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\hat{x} = a + \frac{b - a}{x_{\max} - x_{\min}} (x - x_{\min}) \quad (5.11)$$

5.2.3 Τρόποι εκπαίδευσης

Η διαδικασία εκπαίδευσης κατά τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος πραγματοποιείται με την παρουσίαση και εφαρμογή στο νευρωνικό δίκτυο ενός συνόλου διανυσμάτων εκπαίδευσης. Κατά τη συνολική διαδικασία εκπαίδευσης εκτελούνται επαναλήψεις των εποχών, ώσπου τα βάρη του δικτύου να σταθεροποιηθούν σε συγκεκριμένες τιμές, που οδηγούν στη σύγκλιση της μέσης τιμής των σφαλμάτων για όλα τα πρότυπα εκπαίδευσης.

Για ένα δεδομένο σύνολο εκπαίδευσης η διαδικασία μπορεί να εκτελεστεί με τους ακόλουθους τρόπους [5.14]: εκπαίδευση ανά πρότυπο και εκπαίδευση ανά εποχή. Στην περίπτωση της εκπαίδευσης ανά πρότυπο (stochastic training), τα βάρη αναπροσαρμόζονται έπειτα από την παρουσίαση κάθε πρότυπου εκπαίδευσης στο δίκτυο. Στην περίπτωση της εκπαίδευσης ανά εποχή (batch mode), τα βάρη αναnevώνονται έπειτα από την παρουσίαση στο δίκτυο του συνόλου προτύπων της εποχής. Για μία τέτοια εποχή η μέση τιμή των τετραγωνικών σφαλμάτων ορίζεται μέσω της σχέσης (5.1). Το εσωτερικό άθροισμα εφαρμόζεται σε όλους τους νευρώνες εξόδου του δικτύου, ενώ το εξωτερικό σε όλα τα διανύσματα εισόδου. Η αναπροσαρμογή όλων των βαρών γίνεται μια φορά, μετά το τέλος κάθε εποχής.

5.2.4 Κριτήρια τερματισμού

Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, γενικά, δεν συγκλίνει και δεν υφίστανται απόλυτα ορισμένα κριτήρια τερματισμού της λειτουργίας του. Στην πράξη, όμως, εφαρμόζονται κάποια λογικά κριτήρια, τα οποία οδηγούν στον τερματισμό της διαδικασίας εκπαίδευσης [5.14]. Τέτοιου είδους κριτήρια αποτελούν η ευκλείδεια νόρμα του διανύσματος κλίσης, η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του σφάλματος ανά εποχή, η μέση τιμή του σφάλματος ανά εποχή, ο μέγιστος αριθμός εποχών, η σταθεροποίηση των βαρών, κ.ά.

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ολοκληρωμένη τεχνική αξιολόγησης των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται ένα ανεξάρτητο σύνολο προτύπων, που ονομάζεται *σύνολο επικύρωσης ή αξιολόγησης* (validation set) και, βάσει του μεγέθους των σφαλμάτων στο σύνολο αυτό, υπολογίζεται το συνολικό σφάλμα του μοντέλου. Επομένως, αν δίνεται ένας αριθμός μοντέλων, που έχουν εκπαιδευθεί με βάση το ίδιο *σύνολο εκπαίδευσης*, για να επιλεγεί το καλύτερο, υπολογίζεται το σφάλμα

καθενός, για τα δεδομένα του συνόλου επικύρωσης, και επιλέγεται εκείνο με το μικρότερο σφάλμα επικύρωσης. Συνήθως, για τον υπολογισμό του σφάλματος γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου, που τελικά επιλέγεται, χρησιμοποιείται και ένα τρίτο σύνολο δεδομένων, που ονομάζεται *σύνολο ελέγχου* (test set).

5.2.5 Παραλλαγές αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος

Πέραν του βασικού αλγορίθμου, έχει αναπτυχθεί μία σειρά παραλλαγών του, με σκοπό τη βελτίωση της ταχύτητας σύγκλισης και τη μείωση του σφάλματος [5.11]-[5.18], οι οποίοι παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.2**.

5.2.6 Διαστήματα εμπιστοσύνης

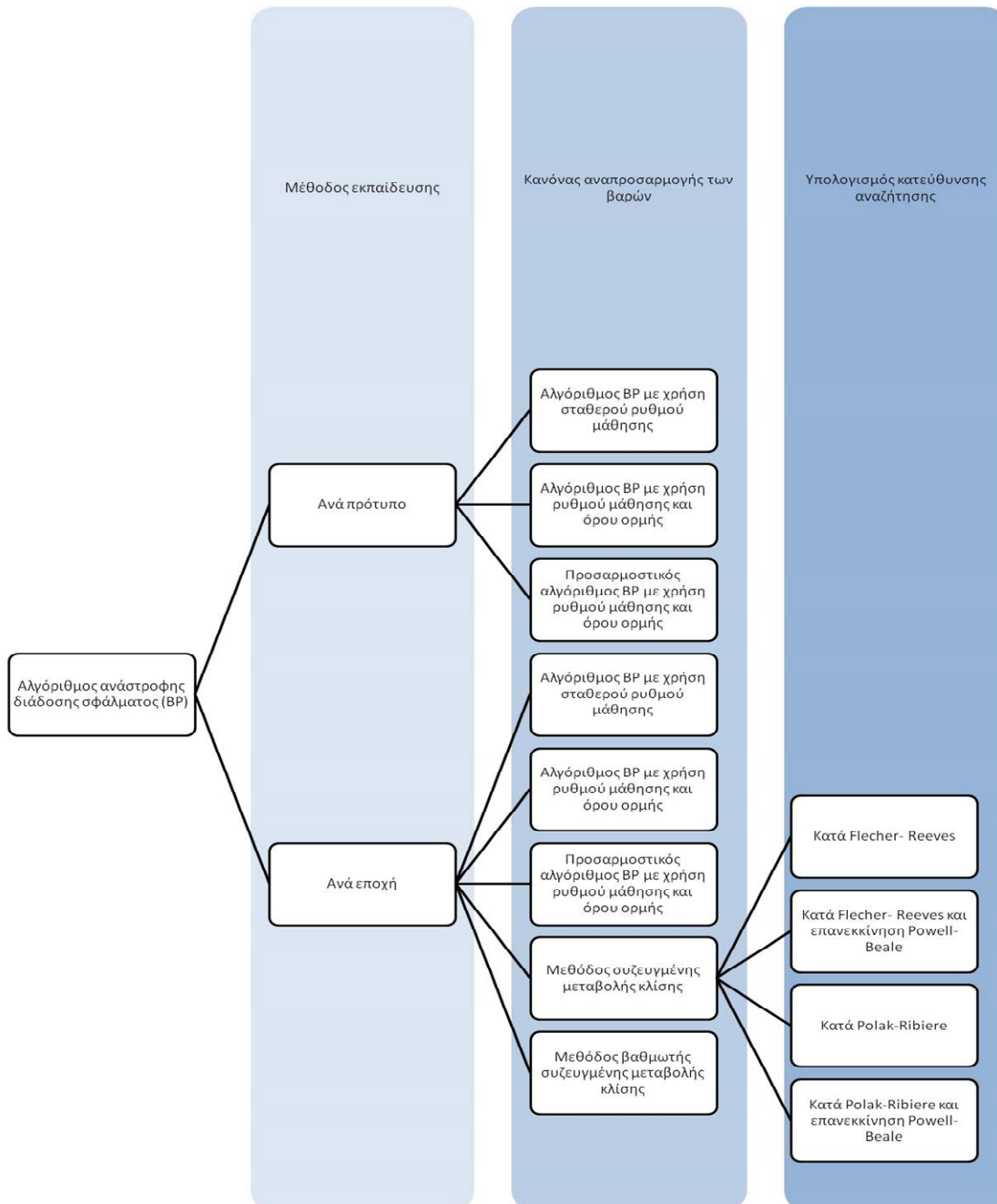
Ο υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης στα νευρωνικά δίκτυα δεν είναι δυνατό να γίνει άμεσα, γι' αυτό χρησιμοποιούνται μεθοδολογίες, όπως η πολυγραμμική παλινδρόμηση, προσαρμοσμένη σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, η επαναδειγματοληψία και η εύρεση σφάλματος του εξόδου [5.19]. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα των Silva et al. [5.19], η μεθοδολογία της επαναδειγματοληψίας, για τον προσδιορισμό του διαστήματος εμπιστοσύνης, είναι η καταλληλότερη για τον προσδιορισμό διαστήματος εμπιστοσύνης με υψηλό βαθμό πιθανότητας.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία συνίσταται στη δειγματοληψία των σφαλμάτων εκτίμησης, για κάθε πρόβλεψη / εκτίμηση. Τα n σφάλματα ταξινομούνται στη σειρά (λαμβάνοντας υπ' όψιν και το αντίστοιχο πρόσημο) και προσδιορίζεται η συνάρτηση αθροιστικής διανομής δείγματος:

$$S_n(\tilde{x}) = \begin{cases} 0, & \tilde{x} < \tilde{x}_1 \\ r/n, & \tilde{x}_r \leq \tilde{x} < \tilde{x}_{r+1} \\ 1, & \tilde{x}_n \leq \tilde{x} \end{cases} \quad (5.12)$$

Όταν το πλήθος n είναι πολύ μεγάλο, η συνάρτηση της σχέσης (5.12) είναι μια καλή προσέγγιση της πραγματικής αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας. Το διάστημα εμπιστοσύνης προσδιορίζεται βρίσκοντας το μέσο $\tilde{x}$, με παράλειψη των ακραίων τιμών σύμφωνα με τον επιθυμητό συντελεστή εμπιστοσύνης. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι, τα διαστήματα προσδιορίζονται, ώστε να είναι συμμετρικά ως προς την πιθανότητα, αλλά δεν είναι, απαραίτητα, συμμετρικά ως προς το $\tilde{x}$. Ο αριθμός των περιπτώσεων, που

απορρίπτονται σε κάθε χρονική στιγμή από την κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης, είναι $n \cdot p$, όπου p είναι η πιθανότητα της ουράς. Από τη στιγμή που το $n \cdot p$ είναι κλασματικός αριθμός, τότε, για λόγους ασφαλείας, το πλήθος των περιπτώσεων, που απορρίπτονται σε κάθε ουρά, είναι $\lfloor n \cdot p \rfloor$.



Σχήμα 5.2 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης του TNΔ με τη χρήση του αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος.

5.3 Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου

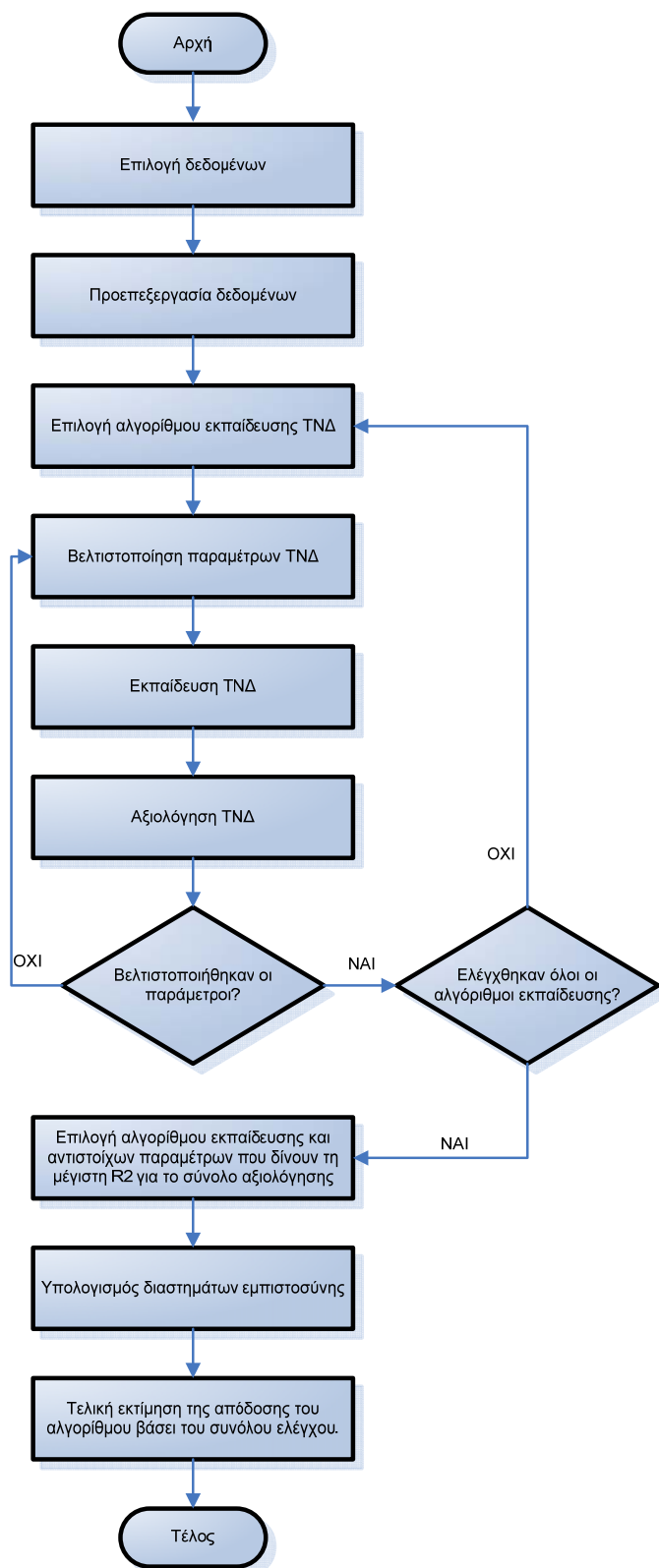
5.3.1 Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Στο πρόβλημα, που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία, τα πρότυπα εισόδου/εξόδου, που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν συνολικά 63. Από τα δεδομένα αυτά, τα σύνολα εκπαίδευσης και αξιολόγησης διαμορφώθηκαν με τυχαίο τρόπο. Το σύνολο ελέγχου περιλαμβάνει 10 διανύσματα, ενώ το σύνολο εκπαίδευσης 53. Η δημιουργία και η εκπαίδευση του ΤΝΔ έγιναν σε κώδικα προγράμματος γραμμένου σε FORTRAN. Στο *Σχήμα 5.3* φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε.

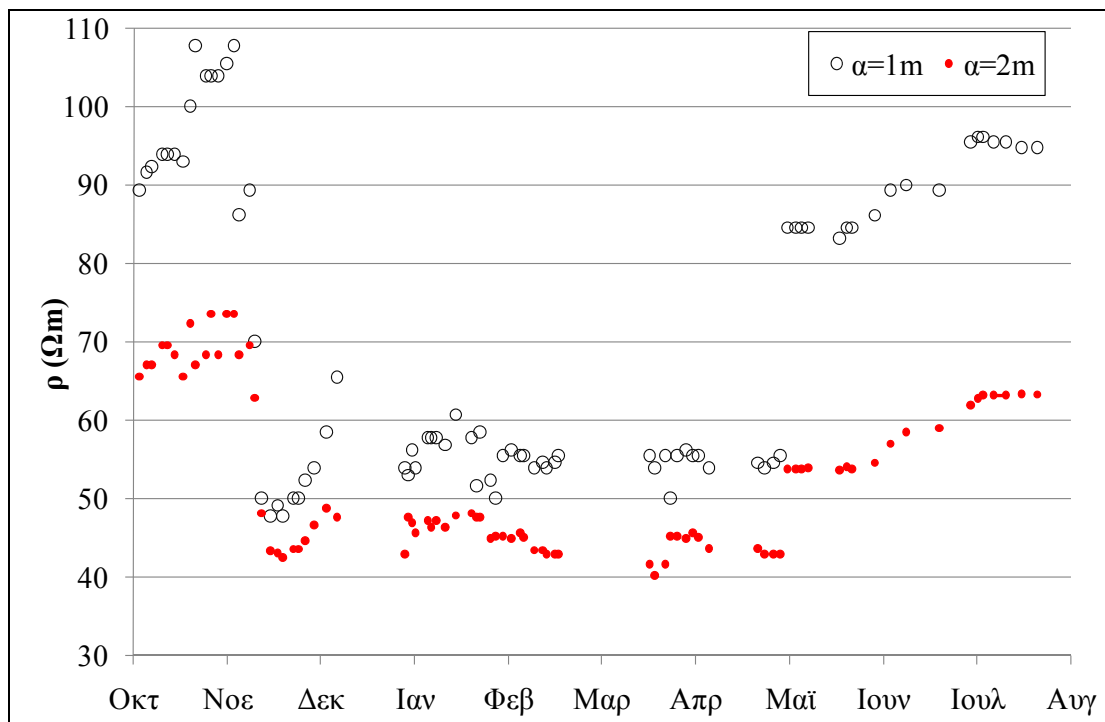
5.3.2 Δεδομένα εκπαίδευσης

Για την εκπαίδευση του ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στον περίβολο του Τ.Ε.Ι. Αθήνας [5.2] και παρουσιάζονται γραφικά στα *Σχήματα 5.4* και *5.5*. Από τις γραφικές αυτές παραστάσεις είναι σαφές ότι, κατά τους καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες η ειδική αντίσταση του εδάφους και η αντίσταση γείωσης λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές. Στο *Σχήμα 5.6* παρουσιάζεται το μέσο ύψος της βροχόπτωσης στο χρονικό διάστημα διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων, όπως προέκυψε από τον μέσο όρο των μετρήσεων των πλησιεστέρων, στο Τ.Ε.Ι. Αθήνας, μετεωρολογικών σταθμών.

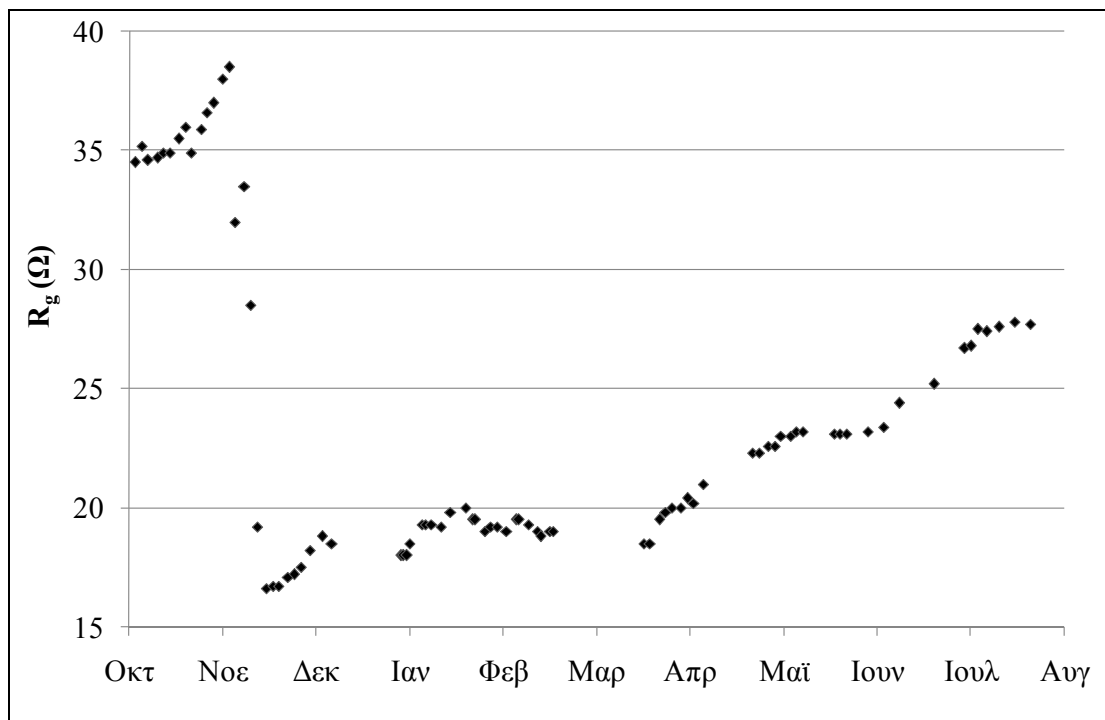
Για την εκπαίδευση του ΤΝΔ, με κάθε αλγόριθμο, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου: η βροχόπτωση της προηγούμενης ημέρας και οι μέσοι όροι, κατά τη διάρκεια των προηγούμενων επτά ημερών, των τιμών της βροχόπτωσης, της ειδικής αντίστασης σε βάθος 1m και 2m και της αντίστασης γείωσης. Έξοδος του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου είναι η τιμή της αντίστασης γείωσης την ημέρα, για την οποία θέλουμε να γίνει η πρόβλεψη.



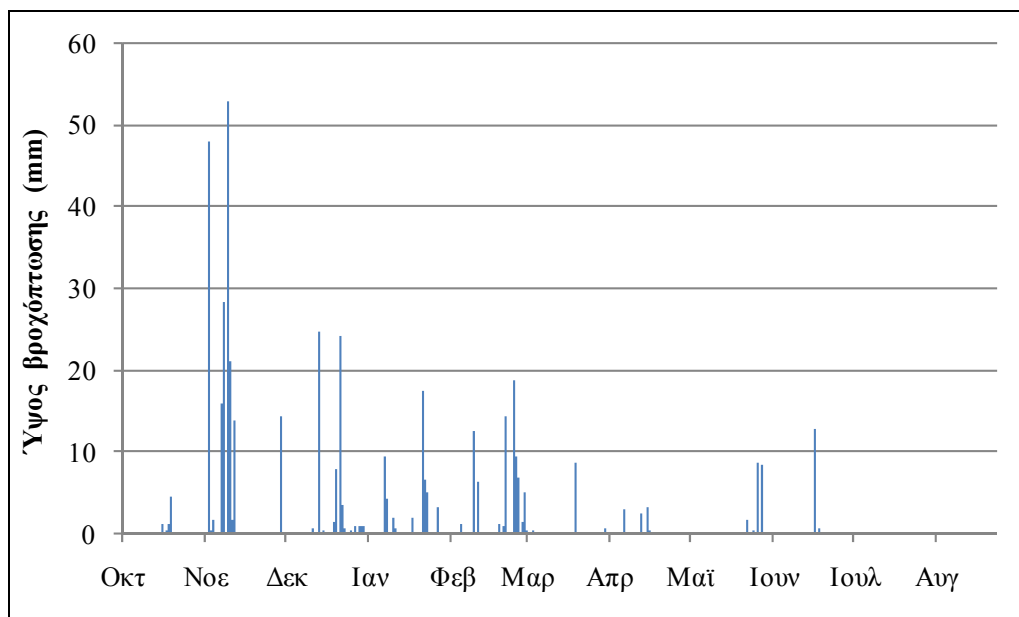
Σχήμα 5.3 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου για τη δημιουργία των TNΔ [5.15].



Σχήμα 5.4 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους για διάφορες αποστάσεις των ηλεκτροδίων μέτρησης.



Σχήμα 5.5 Μετρήσεις της αντίστασης γείωσης.



Σχήμα 5.6 Υψος βροχόπτωσης κατά την περίοδο των μετρήσεων.

5.3.3 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης

Για την εκπαίδευση του ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, καθώς και οι παραλλαγές αυτού, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.2.3. Στον **Πίνακα 5.2** συνοψίζονται οι μέθοδοι εκπαίδευσης που εφαρμόστηκαν. Οι τρεις πρώτοι αλγόριθμοι είναι με εκπαίδευση ανά πρότυπο και οι υπόλοιποι οκτώ με εκπαίδευση ανά εποχή. Οι παράμετροι του κάθε αλγορίθμου βελτιστοποιούνται, μετά από μια σειρά δοκιμών, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Ως κριτήρια σύγκλισης του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

1. η μεταβολή στις τιμές των βαρών του ΤΝΔ από τη μία επανάληψη στην άλλη να μην ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο,
2. ο αριθμός των εποχών να μην ξεπερνά μία μέγιστη τιμή και
3. η μεταβολή στην τιμή της συνάρτησης σφάλματος, από τη μία επανάληψη στην άλλη, να είναι μικρότερη μίας προκαθορισμένης τιμής.

Για καθεμία από τις μεθόδους εκπαίδευσης του ΤΝΔ ακολουθήθηκαν δύο προσεγγίσεις. Στην πρώτη (περίπτωση α) χρησιμοποιήθηκαν και τα τρία προαναφερθέντα κριτήρια, ενώ στη δεύτερη (περίπτωση β) χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δύο πρώτα.

1	Εκπαίδευση ανά πρότυπο, με χρήση ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής (φθίνουσες εκθετικές συναρτήσεις)
2	Εκπαίδευση ανά πρότυπο, με χρήση προσαρμοστικών κανόνων ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής
3	Εκπαίδευση ανά πρότυπο, με χρήση σταθερού ρυθμού εκπαίδευσης
4	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση σταθερού ρυθμού εκπαίδευσης
5	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής (φθίνουσες εκθετικές συναρτήσεις)
6	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση προσαρμοστικών κανόνων ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής
7	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Fletcher-Reeves
8	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Fletcher-Reeves και επανεικκίνηση Powell-Beale
9	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Polak-Ribiere
10	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Polak-Ribiere, επανεικκίνηση Powell-Beale
11	Εκπαίδευση ανά εποχή, με χρήση βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης

Πίνακας 5.2 Περιγραφή μεθόδων εκπαίδευσης ΤΝΔ.

5.3.4 Διαδικασία βελτιστοποίησης

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Αρχικά προσδιορίζεται ο βέλτιστος αριθμός νευρώνων. Εφαρμόζεται ο αλγόριθμος εκπαίδευσης, ενώ όλες οι παράμετροι του δικτύου διατηρούνται σταθερές και μεταβάλλεται το πλήθος των νευρώνων. Πρακτικά, διαπιστώθηκε ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, μεταβολή νευρώνων (N_n) από 2 ως 25 με βήμα 1 είναι αρκετή. Επιλέγεται ως βέλτιστος αριθμός νευρώνων αυτός που δίνει το μικρότερο μέσο σφάλμα, για το σύνολο αξιολόγησης, και ικανοποιητικά μικρές τιμές του σφάλματος, για το σύνολο εκπαίδευσης και ελέγχου.
2. Διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των νευρώνων - όπως αυτός προσδιορίστηκε στο προηγούμενο βήμα - μεταβάλλονται οι παράμετροι του εκάστοτε αλγορίθμου (π.χ. παράμετροι όρου ορμής και ρυθμού μάθησης), ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι (είδος συναρτήσεων ενεργοποίησης, πλήθος εποχών, κ.τ.λ.) διατηρούνται σταθερές. Με κριτήριο, και πάλι, το ελάχιστο σφάλμα του συνόλου αξιολόγησης, επιλέγονται οι κατάλληλες τιμές. Στον **Πίνακα 5.3** παρουσιάζονται οι μεταβολές των παραμέτρων, που έγιναν για κάθε αλγόριθμο.
3. Δοκιμάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των συναρτήσεων ενεργοποίησης (λογιστική, υπερβολική και γραμμική) του κρυμμένου επιπέδου και του επιπέδου εξόδου, ενώ, ταυτόχρονα, μεταβάλλονται οι τιμές των παραμέτρων (a , b) των

συναρτήσεων. Τελικά, επιλέγεται εκείνος ο συνδυασμός, για τον οποίο το σφάλμα του συνόλου αξιολόγησης είναι αρκούντως μικρό και η συσχέτιση των εκτιμώμενων τιμών με τις πραγματικές υψηλή.

Αλγόριθμος	Διαστήματα μεταβολής των παραμέτρων			
1	$a_0=0,1, 0,2...0,9$ $T_a=200, 400...3000$ $\eta_0=0,1, 0,2...0,9$ $T_\eta=200, 400...3000$			
2	$a_0=0,1, 0,2...0,9$ $T_a=200, 400...3000$ $\eta_0=0,1, 0,2...0,9$ $T_\eta=200, 400...3000$			
3	$\eta_0=0,05, 0,1...4$			
4	$\eta_0=0,1, 0,2...4$			
5	$a_0=0,05, 0,1...1$ $T_a=200, 400...4000$ $\eta_0=0,5, 1...4$ $T_\eta=400, 800...6000$			
6	$a_0=0,1, 0,2...1$ $T_a=500, 1000...6000$ $\eta_0=1, 2...5$ $T_\eta=500, 1000...6000$			
7	$s=0,04, 0,1, 0,2$ $T_{bv}=20, 40$ $T_{trix}=50, 100$ $e_{trix}=10^{-5}, 10^{-6}$			
8	$s=0,04, 0,1, 0,2$ $T_{bv}=20, 40$ $T_{trix}=50, 100$ $e_{trix}=10^{-5}, 10^{-6}$ $lim_{orthogonality}=0,1, 0,5, 0,9$			
9	$s=0,04, 0,1, 0,2$ $T_{bv}=20, 40$ $T_{trix}=50, 100$ $e_{trix}=10^{-5}, 10^{-6}$			
10	$s=0,04, 0,1, 0,2$ $T_{bv}=20, 40$ $T_{trix}=50, 100$ $e_{trix}=10^{-5}, 10^{-6}$ $lim_{orthogonality}=0,1, 0,5, 0,9$			
11	$\sigma=10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ $\lambda_0=10^{-6}, 10^{-7}, 5 \cdot 10^{-8}$			
N _n =2...25, max_epochs=7000 για όλους τους αλγόριθμους				

Πίνακας 5.3 Διαστήματα μεταβολής των παραμέτρων για κάθε αλγόριθμο, κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης του ΤΝΔ.

Στον **Πίνακα 5.4** παρουσιάζονται τα μέσα σφάλματα των συνόλων εκπαίδευσης αξιολόγησης και ελέγχου, καθώς και η συσχέτιση των συνόλων αξιολόγησης και ελέγχου, για διαφορετικές μεθόδους εκπαίδευσης του ΤΝΔ. Από τα αποτελέσματα καθίσταται προφανές ότι, η μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμώμενων τιμών επιτυγχάνεται, όταν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος εκπαίδευσης ανά πρότυπο, με τη χρήση των δύο κριτηρίων τερματισμού.

Πίνακας 5.4 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, για κάθε αλγόριθμο.

Αλγόριθμος	N _n	Παράμετροι αλγόριθμου	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	G _{av} εκπαίδευσης ×10 ⁻³	G _{av} αξιολόγησης ×10 ⁻³	G _{av} ελέγχου ×10 ⁻³	R ² εκπαίδευσης	R ² αξιολόγησης	R ² ελέγχου
1α	2	α ₀ =0,9 T _α =1400 η ₀ =0,7 T _η =1000 max_epochs=7000	f ₁ (x)=1/(1+e ^{-1,9x}) f ₂ (x)=0,3x	0,54868	0,52888	0,36193	0,99086	0,99196	0,99533
1β	18	α ₀ =0,5 T _α =1500 η ₀ =0,9 T _η =1600 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,9x) f ₂ (x)=1/(1+e ^{-0,4x})	0,26208	0,31276	0,35950	0,99543	0,99533	0,99612
2α	23	α ₀ =0,4 T _α =1300 η ₀ =0,7 T _η =1500 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,2x) f ₂ (x)=tanh(0,3x)	0,17114	0,19246	0,33767	0,99706	0,99686	0,99531
2β	10	α ₀ =0,5 T _α =1500 η ₀ =0,5 T _η =1400 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,4x) f ₂ (x)=0,2x	0,16848	0,23785	0,36424	0,99766	0,99708	0,99545
3α	7	η ₀ =1,3 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,3x) f ₂ (x)=tanh(0,2x)	0,19230	0,19324	0,35826	0,99692	0,99686	0,99493
3β	9	η ₀ =0,8 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,4x) f ₂ (x)=1/(1+e ^{-0,4x})	0,14617	0,20748	0,33615	0,99748	0,99682	0,99574
4α	2	η ₀ =3,2 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,8x) f ₂ (x)=1/(1+e ^{-0,4x})	0,59653	0,79253	0,55889	0,98961	0,98843	0,99325
4β	9	η ₀ =0,7 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,9x) f ₂ (x)=1/(1+e ^{-0,3x})	0,13764	0,19479	0,32615	0,99764	0,99696	0,99570
5α	2	α ₀ =0,9 T _α =3000 η ₀ =0,9 T _η =3000 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,6x) f ₂ (x)=tanh(0,5x)	0,78269	1,17586	0,65206	0,98637	0,98216	0,99279
5β	2	α ₀ =0,9 T _α =3000 η ₀ =0,9 T _η =3000 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,6x) f ₂ (x)=tanh(0,5x)	0,78269	1,17586	0,65206	0,98637	0,98216	0,99279
6α	3	α ₀ =0,9 T _α =2800 η ₀ =0,9 T _η =2800 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,7x) f ₂ (x)=tanh(0,5x)	0,36665	0,48363	0,46830	0,99361	0,99253	0,99423
6β	3	α ₀ =0,9 T _α =2800 η ₀ =0,9 T _η =2800 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,7x) f ₂ (x)=tanh(0,5x)	0,36665	0,48363	0,46830	0,99361	0,99253	0,99423
Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα									

Συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα									
Αλγόριθμος	N _n	Παράμετροι αλγόριθμου	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	G _{av} εκπαίδευσης ×10 ⁻³	G _{av} αξιολόγησης ×10 ⁻³	G _{av} ελέγχου ×10 ⁻³	R ² εκπαίδευσης	R ² αξιολόγησης	R ² ελέγχου
7α	22	s=0,2 T _{bv} =40 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁵ max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,4x) f ₂ (x)=tanh(0,3x)	0,13591	0,18559	0,37276	0,99764	0,99704	0,99533
7β	22	s=0,2 T _{bv} =40 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁵ max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,6x) f ₂ (x)=tanh(0,2x)	0,12635	0,17666	0,31379	0,99780	0,99716	0,99562
8α	6	s=0,2 T _{bv} =20 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁶ lim _{orthogonality} =0.9 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,8x) f ₂ (x)=tanh(0,4x)	0,21245	0,23956	0,36674	0,99630	0,99616	0,99543
8β	6	s=0,2 T _{bv} =20 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁶ lim _{orthogonality} =0.9 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(2,0x) f ₂ (x)=0,3x	0,16507	0,21616	0,34217	0,99712	0,99668	0,99549
9α	5	s=0,2 T _{bv} =20 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁵ max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,8x) f ₂ (x)=tanh(0,3x)	0,21859	0,23758	0,37167	0,99618	0,99620	0,99531
9β	5	s=0,2 T _{bv} =20 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁵ max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,8x) f ₂ (x)=tanh(0,3x)	0,21858	0,23777	0,37207	0,99618	0,99620	0,99531
10α	5	s=0,2 T _{bv} =20 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁵ lim _{orthogonality} =0.9 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,6x) f ₂ (x)=tanh(0,4x)	0,23993	0,26472	0,37439	0,99582	0,99578	0,99531
10β	5	s=0,2 T _{bv} =20 T _{trix} =50 e _{trix} =10 ⁻⁵ lim _{orthogonality} =0.9 max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,8x) f ₂ (x)=tanh(0,3x)	0,21948	0,23834	0,37220	0,99618	0,99620	0,99529
11α	9	σ=10 ⁻⁴ λ ₀ =10 ⁻⁷ max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(1,9x) f ₂ (x)=0,3x	0,17676	0,20660	0,32483	0,99694	0,99678	0,99560
11β	9	σ=10 ⁻⁴ λ ₀ =10 ⁻⁷ max_epochs=7000	f ₁ (x)=tanh(2,0x) f ₂ (x)=tanh(0,4x)	0,30317	0,32942	0,38109	0,99471	0,99481	0,99564

5.3.5 Αποτελέσματα

Λαμβάνοντας ως κριτήριο επιλογής του καταλληλότερου αλγορίθμου τη συσχέτιση που επιτυγχάνεται μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών της αντίστασης γείωσης για το σύνολο αξιολόγησης, από τις μεθόδους εκπαίδευσης που εφαρμόστηκαν με εκπαίδευση ανά πρότυπο (μέθοδοι 1 έως και 3), τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από τον αλγόριθμο 2β, δηλαδή μέσω εκπαίδευσης ανά πρότυπο με χρήση προσαρμοστικών κανόνων ρυθμού μάθησης, όρου ορμής και δύο κριτήρια τερματισμού. Η συσχέτιση (R^2) μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών που επιτεύχθηκε είναι, για το σύνολο αξιολόγησης 99,71%, για, δε, το σύνολο ελέγχου 99,55%.

Από τις μεθόδους εκπαίδευσης που εφαρμόστηκαν με εκπαίδευση ανά εποχή (μέθοδοι 4 έως και 11), τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με τη χρήση του αλγορίθμου 7β, δηλαδή με εκπαίδευση ανά εποχή με χρήση συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Fletcher-Reeves και δύο κριτήρια τερματισμού. Η συσχέτιση (R^2) μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών που επιτεύχθη είναι, για το σύνολο αξιολόγησης 99,72%, για, δε, το σύνολο ελέγχου 99,56%.

Στον **Πίνακα 5.5** παρουσιάζονται οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες τιμές της αντίστασης γείωσης του συνόλου ελέγχου, όπως προέκυψαν για τους δύο βέλτιστους αλγορίθμους. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και οι τιμές του Μέσου Απόλυτου Ποσοστιάου Σφάλματος MAPE, που δίνεται από τον τύπο:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - E_i}{A_i} \right| \quad (5.13)$$

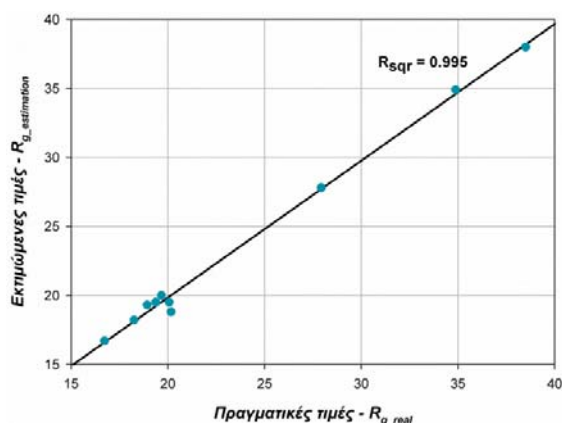
όπου A_i είναι η πραγματική, E_i η εκτιμώμενη τιμή και n το πλήθος τιμών.

Οι υψηλοί συντελεστές συσχέτισης R^2 που επιτυγχάνονται, τόσο για το σύνολο αξιολόγησης, όσο και για το σύνολο ελέγχου, αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των ΤΝΔ στην εκτίμηση της αντίστασης γείωσης.

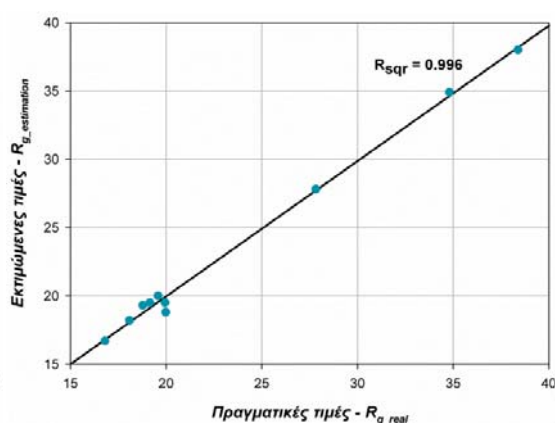
Στα **Σχήματα 5.7** και **5.8** παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες και οι πραγματικές τιμές, για τους δύο αλγορίθμους, μαζί με τους συντελεστές συσχέτισης.

	Αντίσταση γείωσης (Ω)		
A/A	Εκτιμώμενη από τον αλγόριθμο 2β	Εκτιμώμενη από τον αλγόριθμο 7β	Πραγματική
1	34,88	34,81	34,9
2	38,50	38,40	38,0
3	18,93	18,79	19,3
4	19,38	19,16	19,5
5	19,67	19,58	20,0
6	27,94	27,83	27,8
7	16,73	16,81	16,7
8	18,26	18,10	18,2
9	20,07	19,95	19,5
10	20,17	19,99	18,8
MAPE	1,68%	1,78%	

Πίνακας 5.5 Εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές αντίστασης γείωσης, για το σύνολο ελέγχου, με χρήση των αλγορίθμων 2β και 7β.

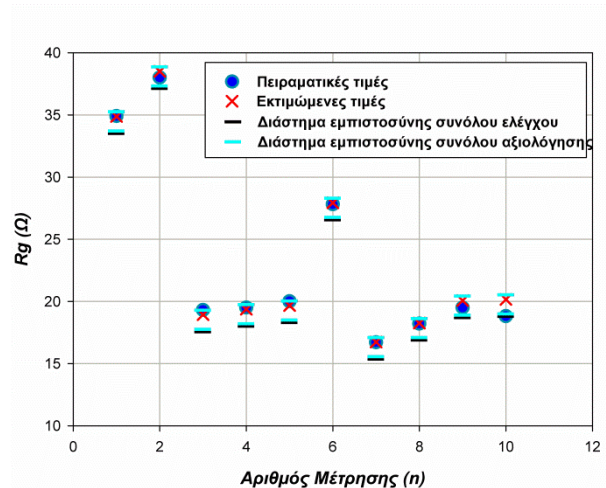


Σχήμα 5.7 Συσχέτιση μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών αντίστασης γείωσης για το TNΔ 2β.

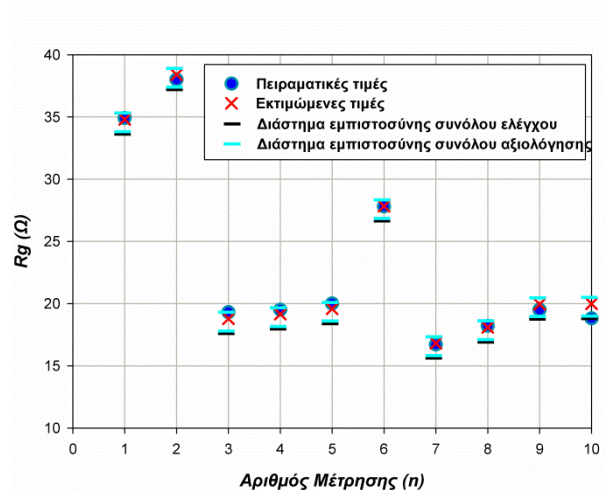


Σχήμα 5.8 Συσχέτιση μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών αντίστασης γείωσης για το TNΔ 7β.

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται τα διαστήματα εμπιστοσύνης των συνόλων εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου, με πιθανότητα ουράς ίση με 5%, ώστε το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης να καλύπτει το 90% του πληθυσμού. Στα **Σχήματα 5.9** και **5.10** φαίνονται οι πραγματικές, οι εκτιμώμενες τιμές, καθώς, επίσης, και το άνω και το κάτω όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης του συνόλου ελέγχου. Στην ίδια γραφική σημειώνονται και τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης. Όπως παρατηρούμε, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εκτιμώμενες τιμές είναι πολύ κοντά στις πραγματικές. Επίσης, οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες τιμές του συνόλου ελέγχου βρίσκονται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης και η περιοχή του συνόλου ελέγχου συμπίπτει, σχεδόν, με την περιοχή του συνόλου αξιολόγησης.



Σχήμα 5.9 Γραφική παράσταση πειραματικών, εκτιμώμενων τιμών και των διαστημάτων εμπιστοσύνης των συνόλων ελέγχου και αξιολόγησης, για τον αλγόριθμο εκπαίδευσης 2β.



Σχήμα 5.10 Γραφική παράσταση πειραματικών, εκτιμώμενων τιμών και των διαστημάτων εμπιστοσύνης του συνόλου ελέγχου, για τον αλγόριθμο εκπαίδευσης 7β.

5.4 Συμπεράσματα

Τα ΤΝΔ αποτελούν ένα εργαλείο για την εκτίμηση της τιμής μεγεθών, που επηρεάζονται από πλήθος παραμέτρων, οι οποίες επιδρούν, είτε με γραμμικό, είτε με μη γραμμικό τρόπο στη διαμόρφωση της τιμής του υπό μελέτη μεγέθους. Η ευελιξία των ΤΝΔ να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος βασίζεται, κατά κύριο λόγο, στη δυνατότητα εκπαίδευσής τους, με τη χρήση διαφορετικών μεθοδολογιών. Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, εφαρμόστηκε, για πρώτη φορά, κατά τα φαινόμενα, στη διεθνή βιβλιογραφία, ΤΝΔ σε πειραματικά δεδομένα ειδικής αντίστασης και ύψους βροχόπτωσης, για την εκτίμηση της εποχιακής μεταβολής της τιμής της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου. Για τον σκοπό

αυτόν, χρησιμοποιήθηκε Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο επιβλεπόμενης μάθησης, που εκπαιδεύεται με τον κανόνα ανάστροφης διάδοσης σφάλματος και παραλλαγές αυτού. Πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση των παραμέτρων του εκάστοτε αλγορίθμου εκπαίδευσης και η απόδοση καθενός αλγορίθμου αξιολογήθηκε, βάσει της συσχέτισης, που επετεύχθη μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών για το σύνολο αξιολόγησης. Τέλος, με τη χρήση του συνόλου ελέγχου, αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα των ΤΝΔ σε δεδομένα, τα οποία δεν έχουν παρουσιασθεί κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Η συσχέτιση, μεταξύ των εκτιμώμενων από το ΤΝΔ και των πραγματικών τιμών, κρίνεται παραπάνω από ικανοποιητική και αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της χρήσης των ΤΝΔ.

Η προταθείσα, στην παρούσα διδακτορική έρευνα, μεθοδολογία συμβάλλει στην αξιόπιστη εκτίμηση/πρόβλεψη της τιμής της ειδικής αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους, εφ' όσον υπάρχουν προηγούμενες μετρήσεις της ειδικής αντίστασης και του ύψους βροχόπτωσης, έτσι, ώστε το ΤΝΔ να μπορεί να εκπαιδευθεί με κατάλληλα δεδομένα ειδικής αντίστασης και αντίστασης γείωσης.

Σε μελλοντική έρευνα θα ήταν αξιόλογο να μελετηθεί, με τη βοήθεια της μεθοδολογίας, που χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς στο παρόν κεφάλαιο, η επίδραση και άλλων παραμέτρων στην τιμή της αντίστασης γείωσης, όπως παραδείγματος χάριν η σύσταση του εδάφους, η θερμοκρασία και το επίπεδο υγρασίας εντός του εδάφους, η ύπαρξη ή όχι βελτιωτικού υλικού του εδάφους, το είδος του συστήματος γείωσης, κ.ά. Για τον σκοπό αυτόν, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μετρήσεων ειδικής αντίστασης και αντίστασης γείωσης, σε συστήματα γείωσης τοποθετημένα σε διάφορους τύπους εδάφους. Εκπαιδεύοντας το ΤΝΔ με τιμές ειδικής αντίστασης και δεδομένα βροχόπτωσης, υγρασίας του εδάφους, τύπο του εδάφους και τη χαρακτηριστική διάσταση του συστήματος γείωσης, για ποικίλα, αντιπροσωπευτικά, συστήματα γείωσης θα είναι δυνατή η εκτίμηση της συμπεριφοράς, κατά τη διάρκεια του έτους, ενός νέου συστήματος γείωσης. Συνεπώς, η ανάπτυξη ενός τέτοιου ευφυούς συστήματος εκτίμησης της αντίστασης γείωσης, κρίνεται ως ιδιαιτέρως σημαντική, εφ' όσον μπορεί να συμβάλει στη μείωση των δοκιμών/μετρήσεων ειδικής αντίστασης, οι οποίες μάλιστα είναι ιδιαιτέρως χρονοβόρες και υψηλού κόστους.

5.5 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 5

- [5.1] Ι.Φ. Γκόνος, «Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.
- [5.2] I.F. Gonos, A.X. Moronis, I.A. Stathopoulos, “Variation of soil resistivity and ground resistance during the year”, 28th International Conference on Lightning Protection, 2006, Kanazawa, Japan, pp. 740-744.
- [5.3] J. Jasni, L.K. Siow, M.Z.A. Ab Kadir, W.F. Wan Ahmad, “Natural materials as grounding filler for lightning protection system”, 30th International Conference on Lightning Protection 2010, Cagliari, Italy.
- [5.4] W.F. Wan Ahmad, M.S. Abdul Rahman, J. Jasni, M.Z.A. Ab Kadir, H. Hizam “Chemical enhancement materials for grounding purposes”, 30th International Conference on Lightning Protection 2010, Cagliari, Italy.
- [5.5] M.A. Salam, S.M Al-Alawi, A.A. Maquashi, “An artificial neural networks approach to model and predict the relationship between the grounding resistance and the length of the buried electrode in soil”, Journal of Electrostatics, 64, 2006, pp. 338-342.
- [5.6] L. Ekonomou, “High Voltage transmission lines studies with the use of artificial intelligence”, Electric Power Systems Research, 79, 2009, pp. 1655-1660.
- [5.7] F.C.L. Amaral, A.N. de Souza, M.G. Zago, “A novel approach to model grounding systems considering the influence of high frequencies”, CLAGTEE 2003, Sao Pedro, Brazil.
- [5.8] A. Ezzat, R. Eisawy, A. Fahmy, “Analysis of power grounding system using Artificial Neural Network”, National Center for Nuclear Safety, Cairo, Egypt 2009.
- [5.9] O.E. Gouda, M.G. Amer, M.T. El Saied, “Optimum design of grounding systems in uniform and non-uniform soils using ANN”, International Journal of Soft Computing, Vol. 1, No. 3, 2006, pp. 175-180.
- [5.10] Σ.Γ. Τζαφέστας, «Υπολογιστική νοημοσύνη, Τόμος Α: Μεθοδολογίες», Αθήνα 2002.
- [5.11] Ι.Κ. Χατζηλάου, Δ. Κουπατσιάρης, Γ.Ι. Τσεκούρας, «Εισαγωγή στα Νευρωνικά Δίκτυα», Ιανουάριος 2008, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων.
- [5.12] Γ.Ι. Τσεκούρας, «Συμβολή στη βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου και ενέργειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μεθόδων αναγνώρισης προτύπων», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Ιούνιος 2006.
- [5.13] Β.Θ. Κονταργύρη, «Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ρυπασμένων μονωτήρων», Διδακτορική Διατριβή, Δεκέμβριος 2007.
- [5.14] Α. Λύκας, «Υπολογιστική Νοημοσύνη», Ιωάννινα, Σεπτέμβριος 1999.
- [5.15] G.E. Asimakopoulou, V.T. Kontargyri, G.J. Tsekouras, F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Artificial neural network optimisation methodology for the estimation of the critical flashover voltage on insulators”, IET Science, Measurement & Technology, Vol. 3, No. 1, 2009, pp. 90-104.
- [5.16] F.E. Asimakopoulou, G.J. Tsekouras, I.F. Gonos, A.X. Moronis, I.A. Stathopoulos, “An Artificial Neural Network for Estimating the Ground Resistance”, International Conference on Grounding and Earthing & 4th

- International Conference on Lightning Physics and Effects GROUND'2010 & 4th LPE, Salvador, Brazil, November 7th-11th, 2010.
- [5.17] F.E. Asimakopoulou, E.A. Kourni, V.T. Kontargyri, G.J. Tsekouras, I.A. Stathopoulos, "Neural network methodology for the estimation of ground resistance", Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems, Corfu, Greece, July 14th-17th, 2011, pp. 453-458.
- [5.18] F.E. Asimakopoulou, G.J. Tsekouras, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "Artificial Neural Network approach on the seasonal variation of soil resistance", Proceeding of the 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, China, November 1st-4th, 2011, pp. 794-799.
- [5.19] A.P.A. Silva, I.S. Moulin, "Confidence intervals for the neural network based short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000, pp. 1191-1196.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα της διατριβής

6.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως αντικείμενο μελέτης το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, το οποίο εκδηλώνεται γύρω από ένα σύστημα γείωσης όταν αυτό διαρρέεται από υψηλή τιμή ρεύματος (ιεραυνικού ή ρεύματος σφάλματος). Καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσω του εδάφους, το οποίο σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από κόκκους και διάκενα (πόρους), πληρωμένα με αέρα ή νερό, δημιουργεί μεταξύ των κόκκων ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο, όταν ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή, οδηγεί στην εκδήλωση, κατ' αρχάς, του ιονισμού του αέρα και, σε περίπτωση ακόμα μεγαλύτερων ρευμάτων, στη διάσπαση του εδάφους. Η παρούσα διατριβή περιλαμβάνει την παρουσίαση της, σχετικής με τον ιονισμό του εδάφους και των συνεπειών αυτού, βιβλιογραφίας, την περιγραφή των διεξαχθέντων πειραμάτων, τον υπολογισμό της κρίσιμης πεδιακής έντασης έναρξης του ιονισμού, με τη χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων της, σε ποικίλα εδαφικά δείγματα, υπό συνθήκες ομογενούς (διάταξη παραλλήλων πλακών) και μη ομογενούς πεδίου (κυλινδρική διάταξη), τον υπολογισμό της αβεβαιότητας εκτίμησης της κρίσιμης έντασης ιονισμού, όπως προέκυψε για τη διάταξη παραλλήλων πλακών, την εφαρμογή και σύγκριση διαφόρων μεθοδολογιών, για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού σε μη ομογενές πεδίο και τη βελτιστοποίηση προτεινόμενων εξισώσεων, που συσχετίζουν την κρίσιμη ένταση ιονισμού με την ειδική αντίσταση και τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδαφικού δείγματος, με τη βοήθεια μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου. Τέλος, στην παρούσα εργασία εξετάζεται, με τη βοήθεια Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), η εποχιακή μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης, στη μόνιμη κατάσταση. Η εξεύρεση αυτής της μεταβολής κρίνεται σκόπιμη, δεδομένου

ότι, η τιμή της αντίστασης γείωσης, στη, μεν, μεταβατική κατάσταση, επηρεάζεται από την εκδήλωση του ιονισμού, στη, δε, μόνιμη κατάσταση, είναι οι καιρικές συνθήκες, που διαμορφώνουν, σε μεγάλο ποσοστό, την τιμή της.

Οι κύριοι άξονες της παρούσας διδακτορικής διατριβής, συνοπτικά, είναι:

- Συγκέντρωση και ταξινόμηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, που αφορά στον ιονισμό του εδάφους, προκειμένου να καταγραφούν, με συστηματικό τρόπο, οι διαθέσιμες για το φαινόμενο αυτό πληροφορίες.
- Διεξαγωγή πειραμάτων, με χρήση εδαφικών δειγμάτων, τοποθετημένων σε διάταξη παραλλήλων πλακών αφ' ενός και σε κυλινδρική διάταξη, αφ' ετέρου, για τη μελέτη της επίδρασης του είδους του εδάφους στην τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού.
- Αξιοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, με χρήση της διάταξης παραλλήλων πλακών, για προσδιορισμό της τάσης διάσπασης 50%, υπολογισμό της κρίσιμης έντασης διάσπασης, η οποία, εν προκειμένω, ταυτίζεται με την κρίσιμη ένταση ιονισμού, καθώς και τον υπολογισμό της αβεβαιότητας εκτίμησης των ως άνω φυσικών μεγεθών.
- Προσδιορισμός της τάσης έναρξης του ιονισμού, με χρήση κυλινδρικής διάταξης, και, εν συνεχεία, υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού, με εφαρμογή διαφόρων μεθόδων.
- Σύγκριση των, ως άνω, διαφόρων μεθόδων υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού και επισήμανση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων εκάστης αυτών.
- Βελτιστοποίηση των παραμέτρων προταθείσας εξίσωσης, για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού, με χρήση υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου, σε συνδυασμό με Γενετικό Αλγόριθμο.
- Εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, για την πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου, με βάση το ύψος βροχόπτωσης και μετρήσεις ειδικής αντίστασης προηγούμενης χρονικής περιόδου. Τα ΤΝΔ εκπαιδεύθηκαν και αξιολογήθηκαν, βάσει πειραματικών δεδομένων ειδικής αντίστασης και μετρήσεων του ύψους βροχόπτωσης, με στόχο την πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης.

Πιο αναλυτικά, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα, σχετικά με τον ιονισμό, τη μοντελοποίησή του, τις συνέπειές του στο σύστημα γείωσης και τις παραμέτρους, από τις οποίες επηρεάζεται. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση καταδεικνύει τη σπουδαιότητα της κρίσιμης έντασης έναρξης του ιονισμού (E_o) και το ενδιαφέρον των ερευνητών να μελετήσουν την επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, στη διαμόρφωση της τιμής της E_o . Όπως προέκυψε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει μία καθολικά εφαρμοζόμενη μεθοδολογία για τη μέτρηση του επιπέδου τάσης, πάνω από το οποίο εκδηλώνεται ο ιονισμός του εδάφους. Αρκετοί συγγραφείς πειραματίζονται με εδαφικά δείγματα, τοποθετημένα σε διάταξη παραλλήλων πλακών: σ' αυτήν τη διάταξη, ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης ιονισμού ταυτίζεται με τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης 50%. Υπάρχουν, όμως, πολλοί ερευνητές, οι οποίοι έχουν πραγματοποιήσει πειράματα με εδαφικά δείγματα τοποθετημένα εντός ημισφαιρικών ή κυλινδρικών διατάξεων. Σ' αυτήν την περίπτωση, ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης του ιονισμού εκτιμάται από το επίπεδο τάσης για το οποίο η χαρακτηριστική I-V του δοκιμίου αρχίζει ν' αποκτά σχήμα κεκλιμένου '8', χωρίς, ωστόσο, αυτό να είναι το μοναδικό κριτήριο, που αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Λόγω, όμως, του γεγονότος ότι, η μέθοδος αυτή, δεν απαιτεί οποιοδήποτε υπολογισμό, θεωρείται ως η πιο εύχρηστη, απ' όλες τις προτεινόμενες μεθόδους και χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή, κατά τη μελέτη εδαφικών δειγμάτων.

Απώτερος σκοπός του προσδιορισμού της τάσης έναρξης του ιονισμού σε συνθήκες ομογενούς και μη ομογενούς πεδίου, είναι ο υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού (E_o). Για τη μεν περίπτωση της διάταξης παραλλήλων πλακών, αυτό αποτελεί μια απλή διαδικασία, για τη δε περίπτωση της κυλινδρικής διάταξης, ανακύπτουν θέματα σχετικά με τη μέθοδο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Για τον λόγο αυτόν στην περίπτωση της κυλινδρικής διάταξης, εφαρμόζονται και συγκρίνονται οι εξής μεθοδολογίες: i) υπολογισμός της E_o με χρήση των προσεγγιστικών εξισώσεων που έχουν προταθεί από τους Oettle και Manna και ii) χρήση της εξίσωσης για την ένταση του πεδίου εντός κυλινδρικής διάταξης, οπότε και εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι για τον προσδιορισμό της ακτίνας εντός της οποίας εκδηλώνεται ο ιονισμός.

Επιπλέον του υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού στη διάταξη παραλλήλων πλακών, έγινε και υπολογισμός της αβεβαιότητας μέτρησης της κρίσιμης τάσης. Η αβεβαιότητα μιας οποιαδήποτε τεχνικής μέτρησης είναι μεγάλης, εν γένει, σημασίας,

εφ' όσον χαμηλές τιμές αβεβαιότητας διασφαλίζουν την αξιοπιστία των μετρήσεων, η οποία, στην αντίθετη περίπτωση, τίθεται εν αμφιβόλω.

Οι τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού που υπολογίσθηκαν, βάσει των ανωτέρω, για κάθε ένα εδαφικό δείγμα, συγκρίθηκαν μεταξύ τους και σχολιάζεται η αποτελεσματικότητα μιας εκάστης αυτών. Από τη σύγκριση αυτή, αναδεικνύονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα κάθε μίας μεθοδολογίας, ενώ καθίσταται προφανής η ανάγκη υιοθέτησης μίας, μόνον, επιστημονικά αποδεκτής μεθόδου.

Αν και, όπως προέκυψε από τη σύγκριση των διαφόρων μεθοδολογιών, η χρησιμοποίηση προσεγγιστικών εξισώσεων δεν είναι η πλέον ασφαλής μέθοδος υπολογισμού της E_0 , εν τούτοις, μπορεί να παρέχει μία αδρή εκτίμηση. Γι' αυτόν τον λόγο, σε επόμενο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής εφαρμόζεται υβριδικό μη γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο, σε πειραματικά δεδομένα ειδικής αντίστασης, σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς και κρίσιμης έντασης ιονισμού, που είχαν ληφθεί από τον Manna, με αποτέλεσμα μία νέα, προτεινόμενη στην παρούσα διατριβή εξίσωση, η οποία, στη συνέχεια, βελτιστοποιήθηκε, με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου.

Τέλος, πέραν της μελέτης του ιονισμού του εδάφους, ο οποίος επιδρά στην τιμή της αντίστασης γείωσης, μελετήθηκε, με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), η επίδραση του ύψους βροχόπτωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην τιμή της αντίστασης γείωσης. Το ΤΝΔ, που χρησιμοποιήθηκε, επιτρέπει την εκτίμηση/πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης κατακορύφου ηλεκτροδίου γείωσης, για το μέλλον, βασιζόμενο σε τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και του ύψους βροχόπτωσης προηγούμενης χρονικής περιόδου.

6.2 Συμβολή – Πρωτοτυπία

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής, στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους και όλων των συνοδών αυτού μεγεθών, όπως της κρίσιμης έντασης ιονισμού, της ειδικής αντίστασης του εδάφους, καθώς και της εποχής και του ύψους βροχόπτωσης, στην αντίσταση γείωσης συγκεντρωμένου συστήματος γείωσης, έγκειται στα ακόλουθα:

- **Εκτίμηση της αβεβαιότητας, που σχετίζεται, με τις τιμές της τάσης έναρξης του ιονισμού, της κρίσιμης έντασης ιονισμού και των παραγώνων μεγεθών.**

Οι υπολογιζόμενες τιμές πρέπει να συνοδεύονται από μία εκτίμηση της αβεβαιότητας, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα, τόσο των μετρήσεων, όσο και της πειραματικής διαδικασίας. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι, η μέθοδος αυξομείωσης της τάσης παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού, πέραν της $U_{50\%}$, και της τυπικής απόκλισης της τάσης διάσπασης, ωστόσο, στη σχετική με το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους διεθνή βιβλιογραφία, δεν καταγράφονται αυτές οι τιμές. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, χρησιμοποιείται η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για τον υπολογισμό της τυχαίας αβεβαιότητας των μετρήσεων της τάσης διάσπασης και, επιπλέον, υπολογίζεται η συνολική αβεβαιότητα, καθώς και το συστηματικό σφάλμα, το οποίο υπεισέρχεται στις μετρήσεις λόγω του εξοπλισμού, υποκειμενικών παραγόντων, σχετιζομένων με τον μετρητή, των χαρακτηριστικών των οργάνων μέτρησης, κ.λπ. Η συστηματική αβεβαιότητα του εξοπλισμού συμβάλλει σε ποσοστό από 12,7% (δείγμα χρώματος Β με 0% περιεκτικότητα σε υγρασία υπό αρνητική πολικότητα) έως 66,7% (δείγμα χρώματος Γ με μηδενική περιεκτικότητα σε υγρασία υπό θετική πολικότητα) στην τιμή της ολικής αβεβαιότητας της τάσης διάσπασης 50% ($U_{50\%}$). Συνεπώς, επ' ουδενί μπορεί να αγνοηθεί, αντιθέτως προς ό,τι γινόταν, για λόγους, πάντως, αδιευκρίνιστους, μέχρι σήμερα, στη διεθνή βιβλιογραφία. Μάλιστα, η τάση διάσπασης $U_{50\%}$, για όλα τα εδαφικά δείγματα, που εξετάστηκαν, παρουσιάζει τιμές αβεβαιότητας μικρότερες από 5% και συνεπώς παρουσιάζει επαναληψιμότητα.

Εκτός από την αβεβαιότητα της τάσης διάσπασης πραγματοποιείται εκτίμηση της αντίστοιχης αβεβαιότητας της κρίσιμης έντασης ιονισμού, με χρήση του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων.

Πέραν της αβεβαιότητας της κρίσιμης τάσης και της κρίσιμης έντασης ιονισμού, υπολογίστηκαν και οι αβεβαιότητες της στιγμιαίας τάσης διάσπασης και της αντίστοιχης χρονικής στιγμής. Οι τιμές των αβεβαιοτήτων που προέκυψαν ήταν ιδιαίτερος υψηλές (έως 25%), με τη στιγμιαία τάση διάσπασης να παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές από την αβεβαιότητα της χρονικής στιγμής, που συμβαίνει η

διάσπαση. Στα αποτελέσματα αυτά συμβάλλει, κατά κύριο λόγο, η στοχαστικότητα του φαινομένου της διάσπασης, η κατανομή και η συμπεριφορά του παγιδευμένου νερού μέσα στο χώμα (για τα δοκίμια με περιεκτικότητες σε υγρασία 5% και 10%) και το πλήθος των μετρήσεων που έχουν γίνει για κάθε επίπεδο τάσης, το οποίο, όμως, δεν είναι ίδιο για όλα τα επίπεδα τάσης, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια συγκρίσιμα αποτελέσματα. Βέβαια, θα πρέπει κανείς να λάβει υπ' όψιν του το γεγονός ότι, αύξηση του αριθμού των κρούσεων σε κάθε επίπεδο τάσης, έχει ως αποτέλεσμα την καταπόνηση των δοκιμίων από τις αλληπάλληλες κρούσεις (μεταξύ δύο κρούσεων μεσολαβεί διάστημα 2 min) και την αλλοίωση της σύνθεσής τους: αυτό γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό στα δείγματα υγρού χώματος, στα οποία η θερμότητα, που παράγεται από κάθε κρούση, θερμαίνει το δείγμα και οδηγεί στην εξάτμιση ποσότητας νερού. Η αντικατάσταση του δοκιμίου με καινούργιο δείγμα μετά από κάθε κρούση ως λύση κρίνεται μη αποδοτική, δεδομένου ότι, η κατανομή των κόκκων του χώματος στο νέο δείγμα δεν είναι ίδια με το προηγούμενο. Επιπλέον, η διαδικασία γίνεται χρονοβόρα.

Εν κατακλείδι, μπορεί να σημειωθεί ότι, η εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις ηλεκτρικής διάσπασης του εδάφους είναι απαραίτητη, ώστε να εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας την αξιολόγηση, τόσο των μετρήσεων, όσο και της πειραματικής διαδικασίας, που εφαρμόζεται, και οδηγώντας, εφ' όσον προκύψει ανάγκη, σε τεκμηριωμένες προτάσεις βελτίωσης της πειραματικής διάταξης και της αντίστοιχης διαδικασίας.

- **Μελέτη της έναρξης του ιονισμού σε μη ομογενές πεδίο και σύγκριση μεθόδων για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού.**

Ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης του φαινομένου του ιονισμού υπό συνθήκες μη ομογενούς πεδίου αποτελεί πρόκληση δεδομένης της απουσίας μίας, κοινά αποδεκτής μεθόδου προσδιορισμού της τάσης έναρξης. Για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης έναρξης του φαινομένου με χρήση κυλινδρικής διάταξης, εφαρμόστηκε η μέθοδος των I-V καμπυλών και, στη συνέχεια, υπολογίστηκε η κρίσιμη ένταση ιονισμού. Το πρόβλημα του υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού περιπλέκεται εξαιτίας των διαφορετικών μεθοδολογιών που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Για τους παραπάνω λόγους, διαφορετικές μεθοδολογίες

τέθηκαν σε εφαρμογή προκειμένου να εκτιμηθεί η E_0 . Ανάμεσα σ' αυτές τις μεθόδους υπήρξαν οι προσεγγιστικές εξισώσεις των Oettle και Manna (1^η και 2^η Μέθοδος), οι οποίες, αν και εύχρηστες, εφ' όσον απαιτούν μόνο τη γνώση της ειδικής αντίστασης του εδαφικού δείγματος, αγνοούν το φαινόμενο της πολικότητας. Μάλιστα, η υπολογιζόμενη τιμή της E_0 από την εξίσωση της Oettle είναι μεγαλύτερη από την τιμή που προκύπτει από την εξίσωση του Manna.

Οι υπόλοιπες μέθοδοι, που εφαρμόστηκαν, βασίζονται στην εξίσωση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό κυλινδρικής διάταξης: η 3^η Μέθοδος έχει εφαρμοσθεί από τον Lima και, σύμφωνα μ' αυτή, για τον υπολογισμό της E_0 , χρησιμοποιείται η ακτίνα ιονισμού, η οποία εκτιμάται από την τιμή της κρουστικής αντίστασης στα 9μs ($Z_{9\mu s}$). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η συγκεκριμένη επιλογή κρίνεται ως, μάλλον, αυθαίρετη και αίολη και προτείνεται η χρήση της ελάχιστης τιμής της κρουστικής αντίστασης (Z_{min}), εισάγουσα την 4^η Μέθοδο, η οποία βασίζεται στην απλή παρατήρηση ότι, η αντίσταση γίνεται ελάχιστη, όταν ο ιονισμός έχει φθάσει στο μέγιστο της έκτασής του. Οι τιμές της E_0 , που προέκυψαν από την 4^η Μέθοδο, είναι μικρότερες από τις τιμές, που δίνει η 3^η Μέθοδος.

Αν και η εφαρμογή, τόσο της 3^{ης}, όσο και της 4^{ης} Μεθόδου, υπερτερεί της εφαρμογής των προσεγγιστικών εξισώσεων, εν τούτοις αγνοούν την παραμένουσα αντίσταση στην περιοχή, εντός της οποίας έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού, βασιζόμενες στην υπόθεση ότι, εντός της ζώνης ιονισμού, η ειδική αντίσταση μηδενίζεται. Μία τέτοια προσέγγιση, ωστόσο, δεν είναι ρεαλιστική. Προκειμένου να δοθεί μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της E_0 , προτείνεται και εφαρμόζεται η 5^η Μέθοδος, η οποία βασίζεται, για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία, στη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου, προς υπολογισμό της παραμένουσας ειδικής αντίστασης και της ακτίνας ιονισμού, δεδομένης της ελάχιστης κρουστικής αντίστασης για το κρίσιμο επίπεδο τάσης.

Οι τιμές της E_0 , που προκύπτουν από την εφαρμογή της 3^{ης} Μεθόδου, είναι υψηλότερες, εν συγκρίσει με τις τιμές, που υπολογίζονται σύμφωνα με την 4^η Μέθοδο, και οι οποίες, με τη σειρά τους, είναι υψηλότερες των τιμών, που προκύπτουν με την εφαρμογή του Γενετικού Αλγορίθμου. Το συμπέρασμα αυτό

καταδεικνύει τον ρόλο, που έχει η επιλογή της τιμής της Z_d για τον υπολογισμό της ακτίνας ιονισμού και, κατ' επέκταση, της E_o .

- **Διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού εδαφικού δείγματος.**

Σύμφωνα με τους ερευνητές, μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους οδηγεί σε μείωση της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Συγγραφείς, όπως η Oettle και η Nor, έχουν παρατηρήσει αύξηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού, για χαμηλά ποσοστά περιεκτικότητας σε υγρασία, χωρίς, ωστόσο, να δίνουν κάποια ερμηνεία για το φαινόμενο αυτό. Παρόμοιο αποτέλεσμα προέκυψε και για το εδαφικό δείγμα Α, όταν η περιεκτικότητα υγρασίας αυξήθηκε, από 0% σε 5%. Η συμπεριφορά αυτή του εν θέματι εδαφικού δείγματος αποδίδεται στα φυσικά χαρακτηριστικά των κόκκων του εδάφους και, πιο συγκεκριμένα, στην ύπαρξη αυξημένων ποσοστών λεπτόκοκκου υλικού, το οποίο οδηγεί στην ανάπτυξη της λεγόμενης 'διπλής στρώσης', γύρω από τα αργιλικά πλακίδια, τα οποία, λόγω του ηλεκτρικού φορτίου τους, συγκρατούν το προσρροφώμενο νερό κοντά στην επιφάνειά τους.

Παρατηρήθηκε επίσης, σημαντική απόκλιση στην κρίσιμη ένταση ιονισμού εδαφικών δειγμάτων με παραπλήσια τιμή ειδικής αντίστασης, αλλά με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν τη θέση του Mousa, σύμφωνα με την οποία, η κρίσιμη ένταση ιονισμού επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, εκτός από την ειδική αντίσταση. Τέτοιοι παράγοντες ενδέχεται, μεταξύ των άλλων, να είναι το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων στο έδαφος, το πορώδες αυτού, καθώς και η ύπαρξη οργανικών στοιχείων σ' αυτό.

- **Μεθοδολογία βελτιστοποίησης της εξίσωσης για την εκτίμηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης και της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του εδαφικού δείγματος με τη χρήση μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου και Γενετικού Αλγορίθμου.**

Ο πειραματικός προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού αποτελεί μία επίπονη και χρονοβόρα ερευνητική εργασία, η οποία απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού (κρουστικής γεννήτριας τάσεως ή ρεύματος, παλμογράφου, διαφορικού καταμεριστή, κ.λπ.). Ωστόσο, μία εκτίμηση της κρίσιμης τιμής του πεδίου αποτελεί απαραίτητη γνώση κατά τη σχεδίαση και μελέτη των συστημάτων

γείωσης των εγκαταστάσεων, εφ' όσον η ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους επιδρά ευεργετικά στην τιμή της αντίστασης του συστήματος γείωσης, όταν αυτό διαρρέεται από κεραινικό ρεύμα, συντελώντας, τοιούτοτρόπως, στην αποδοτικότερη και οικονομικότερη κατασκευή του συστήματος γείωσης.

Οι προταθείσες, κατά καιρούς, εξισώσεις για τον προσεγγιστικό υπολογισμό της κρίσιμης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, συναρτήσει των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του εδάφους, παρέχουν τη δυνατότητα καλής εκτίμησης της κρίσιμης έντασης, όταν είναι αδύνατη η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων. Στην παρούσα εργασία, έγινε διερεύνηση της συσχέτισης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους (ειδική αντίσταση και σχετική διηλεκτρική σταθερά) με την κρίσιμη ένταση ιονισμού. Προς επίτευξη τούτου, εφαρμόσθηκε υβριδικό μη γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο στα πειραματικά δεδομένα της ερευνητικής εργασίας του Manna. Εν συνεχεία, οι παράμετροι, τόσο της εξίσωσης του Manna, όσο και της εξαχθείσας από το υβριδικό μη γραμμικό παλινδρομικό μοντέλο, εξίσωσης, βελτιστοποιήθηκαν με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου. Η χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου συνέβαλε στη βελτίωση της προταθείσας από τον Manna εξίσωσης για την περιγραφή της κρίσιμης έντασης, επιτυγχάνοντας μείωση του Μέσου Απόλυτου Ποσοστιαίου Σφάλματος (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) από 7,890% σε 7,589%. Αντίστοιχη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της νέας, προτεινόμενης εξίσωσης οδήγησε σε μείωση του MAPE από 7,760% σε 7,477%. Συνεπώς, η χρήση του υβριδικού μη γραμμικού παλινδρομικού μοντέλου και του Γενετικού Αλγορίθμου συνέβαλαν, τελικώς, στη μείωση του MAPE κατά 5,2%. Επιπλέον, με τη νέα προτεινόμενη εξίσωση, προσεγγίζονται αποτελεσματικά τα πειραματικά δεδομένα, ακόμη και για υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

- **Χρησιμοποίηση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων για την πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης κατά τη διάρκεια του έτους.**

Όπως είναι γνωστό, η συμπεριφορά του συστήματος γείωσης καθορίζεται, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό, από τον τύπο του εδάφους, εντός του οποίου είναι τοποθετημένο. Παράγοντες, όπως η υγρασία, το ύψος βροχόπτωσης και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ειδική αντίσταση γείωσης. Ωστόσο, οι παράμετροι αυτές μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια

του έτους, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους και, κατά συνέπεια, της αντίστασης γείωσης. Η μεταβολή της αντίστασης των συστημάτων γείωσης, κατά τη διάρκεια του έτους, έχει απασχολήσει τους ερευνητές, ωστόσο, δεν έχει προταθεί κάποια μέθοδος πρόβλεψης της αντίστασης γείωσης κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό έγκειται, εν μέρει, στο γεγονός ότι, οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται συνεχώς και η επίδρασή τους είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Στο σημείο αυτό, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) έρχονται να αντιμετωπίσουν τις συγκεκριμένες προκλήσεις, μέσω της ικανότητάς τους να αναγνωρίζουν τις σχέσεις μεταξύ παραγόντων, οι οποίες είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Για τον λόγο αυτόν, εκπαιδεύθηκε, για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία, ΤΝΔ, το οποίο είχε ως εισόδους πειραματικά δεδομένα ειδικής αντίστασης και ύψους βροχόπτωσης προηγούμενης χρονικής περιόδου και έδινε ως έξοδο την αντίσταση γείωσης την ημέρα για την οποία θέλουμε την εκτίμηση. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιήθηκε ΤΝΔ επιβλεπόμενης μάθησης, που εκπαιδεύεται με τον κανόνα ανάστροφης διάδοσης σφάλματος και παραλλαγές αυτού. Πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελάχιστου αλγορίθμου εκπαίδευσης και η απόδοση καθενός αλγορίθμου αξιολογήθηκε, βάσει της συσχέτισης, που επετεύχθη μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών για το σύνολο αξιολόγησης. Τέλος, με τη χρήση του συνόλου ελέγχου, αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα των ΤΝΔ σε δεδομένα, τα οποία δεν έχουν παρουσιασθεί κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Η συσχέτιση, μεταξύ των εκτιμώμενων από το ΤΝΔ και των πραγματικών τιμών, είναι παραπάνω από ικανοποιητική και αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της χρήσης των ΤΝΔ.

Η προταθείσα, στην παρούσα διδακτορική έρευνα, μεθοδολογία συμβάλλει στον αξιόπιστο προσδιορισμό/εκτίμηση/πρόβλεψη της τιμής της ειδικής αντίστασης, κατά τη διάρκεια του έτους, εφ' όσον υπάρχουν προηγούμενες μετρήσεις της ειδικής αντίστασης και του ύψους βροχόπτωσης έτσι, ώστε, το ΤΝΔ να μπορεί να εκπαιδευθεί με κατάλληλα δεδομένα ειδικής αντίστασης και αντίστασης γείωσης. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος εκτίμησης της αντίστασης γείωσης, κρίνεται ως ιδιαιτέρως σημαντική, εφ' όσον μπορεί να συμβάλει στη μείωση των δοκιμών/μετρήσεων ειδικής αντίστασης, οι οποίες, μάλιστα, είναι ιδιαιτέρως χρονοβόρες και υψηλού κόστους.

6.3 Η επόμενη μέρα

Μετά την παρουσίαση του αντικειμένου μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής και των συμπερασμάτων που προέκυψαν, ως επιτραπεί στη συγγραφέα η διατύπωση κάποιων σκέψεων, που μπορούν, ενδεχομένως, να αποτελέσουν αντικείμενο μιας περαιτέρω, και μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας και δραστηριοποίησης του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, που ασχολείται με τον ιονισμό του εδάφους. Αυτές μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

- Το γεγονός ότι, η τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το είδος του ηλεκτρικού πεδίου (ομογενές ή μη ομογενές), τη μέθοδο προσδιορισμού της κρίσιμης τάσης έναρξης και τη μέθοδο υπολογισμού της έντασης έναρξης, όπως αποδείχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή, σε συνδυασμό με την απουσία μιας κοινά αποδεκτής, καθορισμένης από κάποιο διεθνές σώμα, επιτροπή, κ.λπ., εφαρμοστέας μεθόδου, για την εκτίμηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού, υπογραμμίζουν την ανάγκη του καθορισμού, από την επιστημονική κοινότητα, μίας γενικώς αποδεκτής μεθόδου. Η υιοθέτηση μιας ενιαίας μεθοδολογίας θα επιτρέψει την αποτελεσματικότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων ερευνητών.
- Η εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της αξιοπιστίας τους. Αν αναλογισθεί κανείς ότι, σε πραγματικά συστήματα γείωσης το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται είναι μη ομογενές, κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση της αβεβαιότητας της τιμής της τάσης έναρξης ιονισμού και της κρίσιμης έντασης ιονισμού σε συνθήκες μη ομογενούς πεδίου.
- Προτείνεται η διεξαγωγή πειραμάτων σε πραγματικά συστήματα γείωσης, με χρήση κρουστικής γεννήτριας, ικανής να προκαλέσει ιονισμό σε μεγάλο όγκο εδάφους και η σύγκριση των αποτελεσμάτων, που θα προκύψουν, με αντίστοιχα ενδοεργαστηριακά πειράματα, σε τυπικές, γεωμετρικώς, διατάξεις εδαφικών δειγμάτων.
- Η μελέτη της επίδρασης άλλων παραμέτρων, πέραν των ηλεκτρικών, που σχετίζονται με φυσικές ή χημικές ιδιότητες των εδαφικών δειγμάτων, στην τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού, φαίνεται να είναι άξια περαιτέρω διερεύνησης.

Δεδομένου του πλήθους των παραμέτρων και της ποικιλίας των φυσικών μεγεθών, η μελέτη αυτή θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης (π.χ. Ασαφούς Λογικής).

- Τέλος, θα ήταν ιδιαίτερου ερευνητικού ενδιαφέροντος, η εφαρμογή της μεθόδου των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, για την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης ενός νέου συστήματος γείωσης, με δεδομένα εισόδου του ΤΝΔ πρότυπες γεωμετρικές συστημάτων γείωσης, μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους, ληφθείσες, υπό διάφορα κλιματικά στοιχεία (θερμοκρασία, ύψος βροχόπτωσης, θερμοκρασία εδάφους, υγρασία εδάφους, κ.λπ.) και μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των, ως άνω, γεωμετρικώς πρότυπων, συστημάτων γείωσης.

Βιογραφικό Σημείωμα

ΠΡΟΣΩΠΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Επώνυμο / Όνομα: **Ασημακοπούλου Φανή**
Όνομα πατέρα: **Ηλίας**
Διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου: **faniassim@yahoo.com**

ΣΠΟΥΔΕΣ

2007 - 2011: Διδάκτωρ του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΑΡΙΣΤΑ).
2001 - 2006: Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (κατεύθυνση ενέργειας), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Βαθμός διπλώματος 8,72/10 (ΛΙΑΝ ΚΑΛΩΣ).
2001: Απολυτήριο Λυκείου, Β' Αρσάκειο Εννιαίο Λύκειο Ψυχικού, Βαθμός απολυτηρίου 19,4/20 (ΑΡΙΣΤΑ).

ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

01/2007 – 09/2011: Διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών και μετρήσεων στο Διαπιστευμένο κατά ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025:2005 και Πιστοποιημένο κατά ISO 9001:2000 Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.
01/2007 - 07/2011: Απασχόληση στην επικουρία των μελών ΔΕΠ στην άσκηση των φοιτητών, διεξαγωγή φροντιστηριακών ασκήσεων, εργαστηριακών ασκήσεων, εποπτεία εξετάσεων και διόρθωση ασκήσεων των μαθημάτων «Παραγωγή Υψηλών Τάσεων», «Μετρήσεις και Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων», «Προστασία Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων από Υπερτάσεις» της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π.
07/2006 - σήμερα: Απασχόληση ως ελεύθερη επαγγελματίας
07/2005 - 08/2005: Εκπαιδευόμενη Ηλεκτρολόγος Μηχανικός στην ΔΕΗ, στον τομέα Υλικού και Προμηθειών Διανομής (απασχόληση ως προπτυχιακή φοιτήτρια)

ΓΝΩΣΕΙΣ ΞΕΝΩΝ ΓΛΩΣΣΩΝ

- Αγγλικά: Certificate of Proficiency in English (Επίπεδο C2), University of Michigan, 2005
- Γερμανικά: Zentrale Mittelstufenpruefung (Επίπεδο C1), Goethe Institut, 2008
- Ισπανικά: Επίπεδο B2

ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

- ο Διατριβές
2011: «Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Νοέμβριος 2011.
2009: «Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους». Ενδιάμεση κρίση Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ιούνιος 2009.
2006: «Βελτιστοποίηση των Παραμέτρων της Εξίσωσης του Ρεύματος Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης με Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων». Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Μάρτιος 2006.
- ο Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια

A. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά

1. Asimakopoulou G.E., Kontargyri V.T., Tsekouras G.J., Elias Ch. N., **Asimakopoulou F.E.**, Stathopoulos I.A.: «A Fuzzy Logic Optimization Methodology for the Estimation of the Critical Flashover Voltage on Insulators», Electric Power Systems Research, Vol. 81, Issue 2, pp. 580-588, February 2011.
2. **Asimakopoulou F.E.**, Gonos F.E., Stathopoulos I.A.: «Estimation of Uncertainty Regarding Soil Breakdown Parameters», IET Science, Measurement & Technology, Vol. 5, Issue 1, pp.14-20, January 2011.
3. Asimakopoulou G.E., Kontargyri V.T., Tsekouras G.J., **Asimakopoulou F.E.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Artificial neural network optimisation methodology for the estimation of the critical flashover voltage on insulators», IET Science, Measurement & Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 90-104, 2009.
4. Fotis G.P., Gonos I.F., **Asimakopoulou F.E.**, Stathopoulos I.A.: «Applying genetic algorithms for the determination of the parameters of the electrostatic discharge current equation», Institute of Physics Publishing, Measurement, Science and Technology, Vol. 17, No. 10, pp. 2819-2827, October 2006.

B. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Συνεδρίων με Κρίση στο Πλήρες Κείμενο

1. **Asimakopoulou F.E.**, Tsekouras G.J., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Artificial Neural Network approach on the seasonal variation of soil resistance», 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, China, Nov. 1-4, 2011.
2. **Asimakopoulou F.E.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «IV curves for the determination of the ionization voltage in soil samples», Proceedings of the 17th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2011), Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
3. **Asimakopoulou F.E.**, Kourni E.A., Kontargyri V.T., Tsekouras G.J., Stathopoulos I.A.: «Neural Network Methodology for the Estimation of Ground Resistance», SYSTEMS Special Session: Computational Intelligence and Simulation Tools for Modern Power Systems, 15th WSEAS International Conference on Systems, Corfu, Greece, July 14 -17 2011, pp. 453-458.
4. **Asimakopoulou F.E.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Uncertainty of Soil Breakdown Voltage», Proceedings of the International Conference on High-Voltage Engineering and Application (ICHVE 2010), New Orleans, USA, October 11-14, 2010 (paper 7166).
5. **Asimakopoulou F.E.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Experimental Investigation on Soil Ionization», Proceedings of the 16th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2009), Cape Town, South Africa, August 24-28, 2009 (paper G9-328) (Θωμάϊδείο βραβείο 2009).
6. Christodoulou C.A, **Asimakopoulou F.E.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Simulation of Metal Oxide Surge Arresters Behavior», IEEE 39th Power Electronics Specialists Conference PESC, June 15-19 2008 (TUPO2 Poster Session 2).
7. **Asimakopoulou F.E.**, Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Parameter Determination of Heidler's Equation for the ESD Current», Proceedings of the 15th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2007), Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007 (paper T2-208) (Θωμάϊδείο βραβείο 2007).

Γ. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Συνεδρίων με Κρίση στην Περίληψη

1. Ανδροβιτσάνεας Β.Π., **Ασημακοπούλου Φ.Η.**, Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: «Χρήση βελτιωτικών εδαφους σε συστήματα γείωσης», 5^η Σύνοδος CIGRE, 26-31 Αυγούστου 2012. Έγινε αποδεκτό για δημοσίευση.
2. **Ασημακοπούλου Φ.Η.**, Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: «Αβεβαιότητα στη μέτρηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους», 4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 3-4 Φεβρουαρίου 2012, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα. Έγινε αποδεκτό για δημοσίευση.
3. **Asimakopoulou F.E.**, Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Transient behavior of grounding systems embedded in different earth structures», 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Agia Napa, Cyprus, November 7-11, 2010 (MED10/203).

4. **Asimakopoulou F.E.**, Tsekouras G.J., Gonos I.F., Moronis A.X., Stathopoulos I.A.: «An artificial neural network for estimating the ground resistance», International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects GROUND'2010 & 4th LPE, November 7-11 2010, Salvador, Brazil.
5. **Asimakopoulou F.E.**, Gonos I.F., Tsekouras G.J., Stathopoulos I.A.: «A Hybrid Non-Linear Regression Model for the Estimation of the Correlation between the Electrical Parameters of Soil and the Soil Critical Field», International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects GROUND'2008 & 3rd LPE, November 16-20 2008, Florianopolis, Brazil, pp.180-184. (Θωμαΐδειο βραβείο 2008).
6. **Asimakopoulou F.E.**, Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Influence of the Earth Structure to the Potential Distribution around a Driven Rod», 6th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution (MEDPOWER '08), Thessaloniki, Greece, November 2-5, 2008 (Session W8 Earthing, Med08/122).
7. **Asimakopoulou F.E.**, Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Potential Distribution on the Surface of Multi-Layer Earth Structure», Proceedings of the 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2008), Athens, Greece, May 11-15 2008 (PE2-16).
8. Φώτης Γ.Π., **Ασημακοπούλου Φ.Η.**, Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: «Ατρωσία Ηλεκτροτεχνικού Εξοπλισμού σε Ηλεκτροστατικές Εκφορτίσεις», Πυθαγόρας, Ημερίδα για την επιστημονική έρευνα στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πλωμάρι Λέσβου, 5-8 Ιουλίου 2007.
9. Fotis G.P., **Asimakopoulou F.E.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: «Parameter evaluation of the equation of the electrostatic discharge current, using genetic algorithms as optimization tool», Proceedings of the 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2006), Miami, USA, April 30-May 3 2006 (paper PF5-6).

ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

1. 15th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2007), Ljubljana, Slovenia, August 26th-31st, 2007.
2. 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2008), Athens, Greece, May 11th-15th, 2008.
3. 6th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution (MedPower '08), Thessaloniki, Greece, November 2nd-5th, 2008.
4. International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects GROUND'2008 & 3rd LPE, Florianopolis, Brazil, November 16th-20th, 2008.
5. 16th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2009), Cape Town, South Africa, August 25th-30th, 2009.
6. International Conference on High-Voltage Engineering and Application (ICHVE 2010), New Orleans, USA, October 11th-14th, 2010.
7. 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Agia Napa, Cyprus, November 7th-11th, 2010.
8. 15th WSEAS International Conference on Systems, Corfu, Greece, July 14th -17th, 2011.
9. 17th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2011), Hannover, Germany, August 22nd-26th, 2011.

ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ

1. Μαθήματα για τη φύση, την αξιολόγηση και την καλλιέργεια της δημιουργικής σκέψης στο σχολείο και στην οικογένεια: Πρακτικές εφαρμογές (14 Οκτωβρίου -18 Νοεμβρίου 2009), Ελεύθερο Πανεπιστήμιο της Στοάς του Βιβλίου

2. Εισαγωγή στην ιστορία της ευρωπαϊκής ζωγραφικής (18 Ιανουαρίου – 22 Φεβρουαρίου 2010), Ελεύθερο Πανεπιστήμιο της Στοάς του Βιβλίου

ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ – ΒΡΑΒΕΙΑ

- 2007 - 2009: Υποτροφία του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου
- 2009: Βραβείο Δ. Θωμαΐδη για τη δημοσίευση πρωτότυπης επιστημονικής εργασίας το έτος 2009
- 2008: Βραβείο Δ. Θωμαΐδη για τη δημοσίευση πρωτότυπης επιστημονικής εργασίας το έτος 2008
- 2007: Βραβείο Δ. Θωμαΐδη για τη δημοσίευση πρωτότυπης επιστημονικής εργασίας το έτος 2007
- 1996 - 2001: Αριστεία καθ' όλη τη διάρκεια των μαθητικών χρόνων σε Γυμνάσιο και Λύκειο