

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ρυπασμένων μονωτήρων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Δεκέμβριος 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ρυπασμένων μονωτήρων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασιλικής Θ. Κονταργύρη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 11η Δεκεμβρίου 2007.

Ι. Α. Σταθόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

Ε. Χ. Πυργιώτη Λέκτορας Πανεπιστημίου Πατρών

Αθήνα, Δεκέμβριος 2007

Ε. Ν. Διαλυνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Ν. Σταφυλοπάτης Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασιλική Θ. Κονταργύρη Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασιλική Θ. Κονταργύρη, 2007. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

<u>ПЕРІЛНΨН</u>

Αντικείμενο της Διατριβής είναι η μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων γραμμών μεταφοράς. Για την ολοκληρωμένη μελέτη του ανωτέρω αντικειμένου πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τη μέτρηση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την ανάρτηση γραμμών Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσεως.

Τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και άλλων ερευνητών, αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθοδολογιών (πεδιακή προσέγγιση) και την επικύρωση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών αυτών. Οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μίας μεθόδου υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων, σε αλυσοειδείς μονωτήρες, με χρήση γενετικού αλγορίθμου.

Επίσης, εφαρμόστηκαν τεχνικές τεχνητών νευρωνικών δικτύων και ασαφούς λογικής, προτάθηκε, δε, μία, εδραζομένη επ' αυτών, μεθοδολογία για την εκτίμηση και πρόβλεψη της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης.

Ελέγχθηκε η αξιοπιστία διάφορων μαθηματικών μοντέλων μονωτήρων και έγινε βελτιστοποίηση των σταθερών διάδοσης του τόξου (A, n), με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου, ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, από τα διάφορα μοντέλα, σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές.

Τέλος, αναπτύχθηκε υπολογιστική τεχνική, μέσω πολυκριτηριακών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, για την επιλογή μονωτήρων, με στόχο την ελαχιστοποίηση της υποκειμενικότητας της απόφασης.

<u>ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ</u>

Μονωτήρες, κατανομή τάσης, κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου, πεδιακή προσομοίωση, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, κρίσιμη τάση υπερπήδησης, τεχνητή νοημοσύνη, παράσιτες χωρητικότητες, σταθερές τόξου, γενετικός αλγόριθμος, πολυκριτηριακό σύστημα απόφασης

<u>ABSTRACT</u>

This Ph.D. thesis aims at the study of the electric behavior of the transmission line insulators. For the integrated study of the above subject, experiments were carried out for the voltage and electric field distribution along and in the proximity of insulator strings used in the Hellenic transmission system for the suspension of high and ultra high voltage overhead transmission lines.

The experimental results that have arisen from this thesis, as well as the results of other researchers were used in the development of calculating methods (field approach) and the validation of the results of these methods. The measurements of the voltage distribution were employed for the development of a stray capacitances calculation method in insulator strings, based on Genetic Algorithm.

In addition, a method based on Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic techniques was proposed for the estimation and the prediction of the flashover voltage of insulators under polluted conditions.

The efficiency of various mathematical models was looked into. The arc constants (A, n) were optimized, via Genetic Algorithm, in order to minimize the calculation error between the model-estimated flashover voltage and the corresponded experimental values.

Finally, a calculation technique was developed for the selection of the optimal insulator type by Multicriterial Decision Making. The main goal of this methodology is to minimize the subjectivity in the selection of the most suitable insulator for each examined case.

<u>KEYWORDS</u>

Insulators, voltage distribution, electric field distribution, electric field simulation, finite element method, flashover voltage, artificial intelligence, stray capacitances, arc constants, genetic algorithm, multicriterial decision making

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου κατά τα έτη 2002 έως 2007, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλου και ασχολείται με τη μελέτη και τη διερεύνηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων υψηλής τάσης.

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της μέχρι τώρα επιστημονικής έρευνας επί του συγκεκριμένου αντικειμένου. Στην ανασκόπηση τα άρθρα ομαδοποιούνται, ανάλογα με το περιεχόμενο τους, σε αυτά που αναφέρονται: α) στο μηχανισμό δημιουργίας του φαινόμενου της υπερπήδησης, β) στην επίδραση της επικάθησης ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων, γ) στη μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μονωτήρα, δ) σε φυσικά και μαθηματικά μοντέλα μονωτήρων, ε) σε μεθοδολογίες προσομοίωσης των μονωτήρων και στ) στην ανάπτυξη έμπειρων συστημάτων για τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών σε μονωτήρες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται λεπτομερώς οι πειραματικές διατάξεις και οι μέθοδοι δοκιμών και μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Οι διατάξεις αυτές αφορούν πειράματα για τη μελέτη της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς 150kV, καθώς και της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς 150kV και 400kV. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων πεδιακής προσομοίωσης μονωτήρων. Η διαδικασία βελτιστοποίησης των μοντέλων οδήγησε σε αξιόπιστα αποτελέσματα, όπως προέκυψε από τη σύγκριση των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, καθώς και με αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη των παράσιτων χωρητικοτήτων, που αναπτύσσονται στους αλυσοειδείς μονωτήρες και επιδρούν στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε αυτούς. Η σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων για την κατανομή της τάσης, που λήφθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, και των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από αναλυτικούς τύπους υπολογισμού της, βελτιστοποιήθηκε με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου οδηγώντας στον ακριβέστερο υπολογισμό των παράσιτων χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης με τη χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης. Διάφορες μεθοδολογίες εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων και ασαφών συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους με στόχο τη βελτίωση της συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμούμενων τιμών.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρων σε μία γραμμή μεταφοράς, με τη βοήθεια πολυκριτηριακού συστήματος λήψης απόφασης.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αξιολόγηση διαφόρων μαθηματικών μοντέλων υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, για διάφορα μοντέλα υπολογίστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι του τόξου, ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης από τα διάφορα μοντέλα, σε σχέση με τις πειραματικές τιμές.

Στο όγδοο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και αναδεικνύεται η συμβολή της παρούσας εργασίας στην έρευνα της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων.

Σ' αυτό το σημείο επιθυμώ να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο. Νιώθω βαθιά ευγνωμοσύνη για την ανάθεση της διατριβής και την αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγησή του κατά την ενασχόλησή μου με αυτή. Οι επιστημονικές του γνώσεις, οι πολύτιμες συμβουλές του, το άριστο κλίμα συνεργασίας, η καθοριστική συμβολή του στην υπέρβαση κάθε προβλήματος και στη διασφάλιση των απαιτούμενων μέσων αποτέλεσαν πολύτιμο αρωγό για την επιτυχή εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, για την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και την πολύτιμη συμβολή

του στην εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής. Η ενθάρρυνσή του και τα εποικοδομητικά του σχόλια συνέβαλαν ουσιαστικά στην περάτωση της διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω προς τους Καθηγητές κ.κ. Ευάγγελο Ν. Διαλυνά, Κωνσταντίνο Γ. Καραγιαννόπουλο, Περικλή Δ. Μπούρκα, Ανδρέα Ν. Σταφυλοπάτη για τη διαρκή υποστήριξη τους και την αποδοχή συμμετοχής τους στην τριμελή συμβουλευτική (τον κ. Διαλυνά) και στην επταμελή εξεταστική (τους κ.κ. Καραγιαννόπουλο, Μπούρκα και Σταφυλοπάτη) επιτροπή. Ευχαριστώ ιδιαίτερα, επίσης, τη Λέκτορα του Πανεπιστημίου Πατρών Κυρία Ελευθερία Χ. Πυργιώτη, για την αποδοχή συμμετοχής της στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Θερμά ευχαριστώ τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την υποστήριξή του, τη διαρκή καθοδήγησή του, τη συνεργασία και τις πολύτιμες συμβουλές του. Η πολύχρονη εργαστηριακή του εμπειρία στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, η σφαιρικότητα των γνώσεων του, αλλά και η διαρκής προθυμία του να προσφέρει τη βοήθειά του σε κάθε ανακύπτον πρόβλημα αποτέλεσαν πολύτιμο στήριγμα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στο Διδάκτορα κ. Γεώργιο Ι. Τσεκούρα, που πρόθυμα προσέφερε την αμέριστη συμπαράστασή του και τις εξειδικευμένες γνώσεις του σε θέματα προγραμματισμού των αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης.

Ευχαριστώ, ακόμη, τον Μηχανικό κ. Αλέξανδρο Μιχαηλίδη, στέλεχος της εταιρείας Vector Fields Ltd., για την υποστήριξή του, τη συνεργασία και τις χρήσιμες παρατηρήσεις του σε θέματα πεδιακής επίλυσης των μοντέλων προσομοίωσης.

Ευχαριστίες οφείλω στον Τομεάρχη κ. Μανώλη Κορωνιωτάκη και στο προσωπικό του Τομέα Ηλεκτρολογικών Μελετών Εξοπλισμού και Καλωδιακών Γραμμών Μεταφοράς της Δ.Ε.Η. Α.Ε./ΔΝΕΜ, για την άμεση ανταπόκρισή τους στο αίτημα προμήθειας δοκιμίων (αλυσοειδών μονωτήρων).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Κ. Ηλία για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων και την αμέριστη συμπαράστασή του.

Ιδιαίτερα οφείλω να ευχαριστήσω την Κυρία Νικολέτα Χ. Ηλία, υπεύθυνη του συστήματος ποιότητας του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, για την εργαστηριακή

της βοήθεια, καθώς και τη διαρκή ενθάρρυνση, κατανόηση, συνεργασία και ανεξάντλητη υπομονή της.

Ευχαριστώ, επίσης, τον Διδάκτορα κ. Λάμπρο Οικονόμου για τη συνεργασία και υποστήριξή του, καθώς και τη διευκόλυνσή μου στη λήψη στοιχείων από τη Δ.Ε.Η. Α.Ε..

Θερμά ευχαριστώ τους Υποψήφιους Διδάκτορες του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων κ.κ. Παύλο Σ. Κατσιβέλη, Χρήστο Α. Χριστοδούλου και Κυρία Φανή Η. Ασημακοπούλου για την υποστήριξή τους και τη συμβολή τους στη γλωσσική επεξεργασία του κειμένου.

Στο σημείο αυτό νοιώθω την ηθική υποχρέωση να αναφέρω και ευχαριστήσω θερμά τους φίλους και συνεργάτες μου, Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., που με την εκπόνηση των διπλωματικών τους εργασιών συνέδραμαν σημαντικά στην πραγματοποίηση της παρούσας διατριβής. Ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης, αναφέρω τα ονόματά τους: Λαμπρινή Ν. Πλατή, Σοφία Κ. Ζυγογιάννη, Γεωργία Η. Ασημακοπούλου, Αγγελική Α. Γιαλκέτση, Ηλίας Ε. Γουβαλάρης, Δημήτριος Ι. Αθανασόπουλος, Αθανάσιος Γ. Δρακωτός, Δημήτριος Κ. Πέππας, Φώτιος Α. Σουρτζής, Κωνσταντίνος Ε. Κοντομάρης και Ειρήνη Β. Αλεξοπούλου.

Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποστράτηγο ε.α. κ. Αδάμ Π. Κονταξή και τον κ. Παναγιώτη Α. Κονταξή, για την υποστήριξή τους και την άοκνη συμβολή τους στη γλωσσική επεξεργασία του κειμένου της διατριβής.

Ευχαριστώ, επίσης, την Κυρία Χρύσα Α. Σιγάλα, για τη γραμματειακή υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Τέλος, αισθάνομαι το χρέος να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, χωρίς τη βοήθεια και την ηθική και συναισθηματική στήριξη της οποίας η εκπόνηση της προτεινόμενης διδακτορικής διατριβής θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη.

<u> IEPIEXOMENA</u>

Ιερίληψη	
Ιρόλογος	ii
Ιεριεχόμενα	vi
ζεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Το φαινόμενο της υπερπήδησης	2
1.2.1 Παράγοντες που ευνοούν τη διαδικασία της υπερπήδησης	
1.2.2 Μηχανισμοί υπερπήδησης	(
1.2.3 Τρόποι μετριασμού του φαινομένου της υπερπήδησης	
1.3 Γήρανση πολυμερών μονωτήρων	1
1.4 Φυσικά και μαθηματικά μοντέλα	14
1.5 Δοκιμές ρύπανσης	32
1.5.1 Δοκιμές με φυσική ρύπανσης	32
1.5.2 Δοκιμές με τεχνητή ρύπανσης	3.
1.6 Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου	39
1.7 Μέθοδοι προσομοίωσης – υπολογιστικές μέθοδοι	44
1.8 Μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων	53
1.9 Έμπειρα συστήματα για τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών μονωτήρων	58
1.9.1 Ανάπτυξη τεχνητών νευρωνικών δικτύων	58
1.9.2 Ανάπτυξη ασαφών συστημάτων	59
ζεφάλαιο 2: Δοκιμές και μετρήσεις	61
2.1 Σκοπός και βασικές αρχές των μετρήσεων	6
2.2 Πειραματική διάταξη	62
2.2.1 Μέτρηση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης	62
2.2.2 Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου	65
2.3 Δοκίμια	6'
2.4 Κατανομή τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες	7
2.5 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες	7
2.6 Συμπεράσματα	84

Κεφάλαιο 3: Πεδιακή προσέγγιση	
3.1 Εισαγωγή	
3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	
3.3 Δισδιάστατες προσομοιώσεις μονωτήρων	
3.3.1 Προσομοίωση αλυσοειδούς μονωτήρα	
3.3.2 Προσομοίωση συνθετικού μονωτήρα	
3.4 Τρισδιάστατες προσομοιώσεις μονωτήρων	
3.4.1 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 150kV	
3.4.2 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 400kV	
3.5 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	_
Κεφάλαιο 4: Μελέτη παράσιτων χωρητικοτήτων	
4.1 Εισαγωγή	
4.2 Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες	
4.2.1 Καθαροί αλυσοειδείς μονωτήρες	
4.2.2 Ρυπασμένοι αλυσοειδείς μονωτήρες	
4.3 Μεθοδολογία υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων	
4.3.1 Γενετικός αλγόριθμος	
4.3.1.1 Λειτουργία γενετικού αλγόριθμου	
4.4 Αποτελέσματα υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων	
4.5 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	_
Κεφάλαιο 5: Εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης	
5.1 Εισαγωγή	
5.2 Νευρωνικά δίκτυα	
5.2.1 Μάθηση Νευρωνικών Δικτύων	
5.2.2 Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος	
5.2.3 Παραλλαγές αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος	
5.2.4 Διαστήματα εμπιστοσύνης στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	
5.3 Εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης μέσω τεχνητών νευρωνικών	
δικτύων	
5.3.1 Δεδομένα εκπαίδευσης	
5.3.2 Ανάπτυξη αλγορίθμου σε MATLAB	
5.3.3 Ανάπτυξη αλγορίθμου	

5.3.3.1 Σύγκριση μεθόδων εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού)
Δικτύου	_166
5.4 Ασαφής λογική	_171
5.4.1 Ασαφή συστήματα	_173
5.4.1.1 Γενική αρχιτεκτονική ασαφών συστημάτων	_173
5.5 Εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης μέσω συστήματος ασαφούς	
λογικής	_176
5.5.1 Μέθοδοι εκπαίδευσης ασαφούς συστήματος	_176
5.5.1.1 Σύγκριση μεθόδων εκπαίδευσης του ασαφούς συστήματος	_181
5.6 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	_ 184
Κεφάλαιο 6: Επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα	_ 187
6.1 Γενική μεθοδολογία μοντελοποίησης προβλημάτων απόφασης	_ 187
6.1.1 Η διαδικασία της απόφασης	_ 187
6.1.2 Μεθοδολογία μοντελοποίησης	_187
6.2 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων	_ 190
6.2.1 Οι μέθοδοι ELECTRE	_ 19(
6.2.2 Η μέθοδος ELECTRE Ι	_ 191
6.3 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας	_ 194
6.3.1 Μεθοδολογία επιλογής βέλτιστου τύπου μονωτήρα	_ 194
6.3.2 Κριτήρια για τη λήψη απόφασης	_ 195
6.3.3 Επίλυση του προβλήματος	_ 197
6.4 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	_200
Κεφάλαιο 7: Αξιολόγηση μαθηματικών μοντέλων	_201
7.1 Εισαγωγή	_201
7.2 Πειραματικά δεδομένα	_201
7.3 Μαθηματικά μοντέλα	_ 202
7.3.1 Μοντέλο Neumärker	_ 202
7.3.2 Movτέλο Ghoss και Chatterjee	_ 203
7.3.3 Μοντέλο Dhabi-Megriche και Beroual	_203
7.3.4 Μοντέλο Obenhaus και Boehme	_203
7.3.5 Movτέλo Hurley και Limbourn	_ 204
7.4 Αξιολόγηση μαθηματικών μοντέλων	204

7.5 Αποτελέσματα υπολογισμού των σταθερών Α και n	209		
7.6 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	214		
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα	216		
8.1 Ανακεφαλαίωση της διατριβής	216		
8.2 Συμβολή της διατριβής	220		
8.3 Επέκταση της διατριβής	227		
Βιβλιογραφία	229		
Παράρτημα Α: Περιγραφή πεδιομέτρου και αισθητήρα (probe)			
Παράρτημα Β: Μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης			

Κεφάλαιο 1

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Οι μονωτήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς υψηλής τάσης, πρέπει να καλύπτουν τόσο ηλεκτρικές, όσο και μηχανικές λειτουργικές ανάγκες, οι οποίες συνήθως εμφανίζουν αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις κατά τη σχεδίαση. Ο σημαντικότερος παράγοντας, από τον οποίο πηγάζει η ως άνω πολυπλοκότητα, είναι η αδυναμία δημιουργίας ενός ιδανικά μη αγώγιμου στοιχείου στην πράξη. Όλοι οι μονωτήρες έχουν εξωτερικές επιφάνειες, οι οποίες κατά τη χρήση τους θα ρυπανθούν, σε διαφορετικό, φυσικά, βαθμό ανάλογα με την περιοχή τοποθέτησης τους. Κατά κανόνα, το επιφανειακό στρώμα ενός ρυπασμένου μονωτήρα περιέχει αδρανή ορυκτή ύλη, ηλεκτρικά αγώγιμη σκόνη, όπως άνθρακα ή οξείδια μετάλλου, διαλυτά στο νερό άλατα και υγρασία. Το ρεύμα διαρροής, που μεταφέρεται μέσω του επιφανειακού στρώματος ρύπανσης, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, των ηλεκτροχημικών προϊόντων ηλεκτρόλυσης και των ηλεκτρικών μερικών εκκενώσεων, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην υπερπήδηση του μονωτήρα και το σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου στο περιβάλλον μέσο. Οι παραπάνω επιπτώσεις καθορίζουν τόσο τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι μονωτήρες, όσο και το σχεδιασμό τους, ειδικά στις κατηγορίες των μονωτήρων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικό χώρο, εκτεθειμένοι σε ρύπανση. Συνεπώς, οι ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών, η ικανότητά τους να λειτουργούν κάτω από δυσμενείς συνθήκες και, φυσικά, το κόστος είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τον τρόπο κατασκευής των μονωτήρων [1, 2].

Τα τρία βασικά μέρη των μονωτήρων είναι το μονωτικό (διηλεκτρικό), οι ακροδέκτες, που συνδέουν το διηλεκτρικό με την υπόλοιπη μηχανολογική δομή, και τα ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα, όπως τσιμέντο ή λιπαντικά [1, 2].

Το διηλεκτρικό, που είναι συνήθως πορσελάνη, γυαλί ή πολυμερές, απαιτείται να διατηρεί την εφαρμοσμένη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς να αστοχήσει. Πρέπει, επίσης, να ανθίσταται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπτών του δικτύου, χωρίς να διασπάται. Επειδή οι επιφάνειες των διηλεκτρικών είναι στην πράξη, πάντα, ηλεκτρικά αγώγιμες, εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθήσεων, είναι απαραίτητη μία διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση.

Η βασική χημική δομή των διηλεκτρικών, που χρησιμοποιούνται σε μονωτήρες, με κυριότερους εκπροσώπους τα κεραμικά και τα πολυμερή υλικά, διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό τόσο των ηλεκτρικών, όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων των μονωτήρων. Τόσο τα κεραμικά, όσο και τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από τετρασθενή άτομα, τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών. Το πυρίτιο αποτελεί το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο στην περίπτωση των κεραμικών υλικών και ο άνθρακας στην περίπτωση των πολυμερών.

Η προφανής και θεμελιώδης διαφορά μεταξύ πολυμερών και κεραμικών υλικών βρίσκεται στη σταθερότητα. Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξεως, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και την ευθραυστότητα) και τέλος υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα. Η ύπαρξη των ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια συμβάλλει στην αύξηση της ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη συνάφεια ή δύναμη συνάφειας των επιφανειακών προσμείξεων, και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα.

Αντίθετα οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση. Όμως, όλα τα πολυμερή αποσυντίθεται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, υπόκεινται σε φωτόλυση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών δεσμών τους από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πιθανόν να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, προκαλώντας επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών, πηγάζει από το γεγονός ότι το βασικό στοιχείο τους, ο άνθρακας, αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις ένα καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή προσβολή της επιφανείας, ιδιαίτερα από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγώγιμες επιφανειακές οδούς και είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυμερών υλικών είναι οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές της ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας. Θερμοδυναμικά, το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου, που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στα πολυμερή να ανθίσταται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση, περισσότερο απ' όσο τα κεραμικά υλικά.

Μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1 [3].



Σχήμα 1.1: Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης [3].

1.2 Το φαινόμενο της υπερπήδησης

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μονωτική ικανότητα των μονωτικών υλικών, σε περίπτωση που είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό χώρο, όπως στην περίπτωση των μονωτήρων των γραμμών μεταφοράς, είναι η ρύπανση. Με τον όρο ρύπανση προσδιορίζεται η επικάθηση ακαθαρσιών που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα ή θαλάσσιας άλμης (καθαλάτωση) στην επιφάνεια τους. Η ρύπανση στην επιφάνεια ενός μονωτικού υλικού μπορεί να είναι είτε θαλάσσια, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το μονωτικό βρίσκεται σε παραθαλάσσια περιοχή και οι άνεμοι μεταφέρουν θαλασσινό νερό υπό μορφή σταγονιδίων στην επιφάνεια του όπου επικάθεται και σχηματίζεται ένα λεπτό υγρό αλατούχο επίστρωμα, είτε βιομηχανική, η οποία προέρχεται από τα στερεά κατάλοιπα των βιομηχανιών που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα. Η συνύπαρξη ρύπανσης (θαλάσσιας, βιομηχανικής ή συνδυασμού των προαναφερθέντων) και δροσιάς, ομίχλης ή σιγανής βροχής αποτελεί δυσμενέστατη συνθήκη λειτουργίας των μονωτικών υλικών και μπορεί να υποβιβάσει τη μονωτική τους ικανότητα σε μεγάλο βαθμό, κατά 40% έως 80%, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου [4].

Συνεπώς, η παρατεταμένη ξηρασία, η περιβαλλοντική ρύπανση καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα μεταβάλλουν τη συμπεριφορά των μονωτικών υλικών που εκτίθενται σε αυτές.

Στο Πρότυπο IEC 815/1986 [5], προκειμένου να υπάρχει μία κατηγοριοποίηση των περιοχών, ανάλογα με τη βαρύτητα ρύπανσης, έχουν καθοριστεί ποιοτικά τέσσερα επίπεδα ρύπανσης: ελαφρά, μεσαία, βαριά και πολύ βαριά.

Το φαινόμενο της υπερπήδησης (flashover) μονωτήρων λόγω ρύπανσης αναφέρεται στο γεγονός ότι δημιουργείται γεφύρωση με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του φαινομένου της υπερπήδησης προερχόμενες από ιστοσελίδες Εργαστηρίων Υψηλών Τάσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Φωτογραφίες στις οποίες φαίνεται το φαινόμενο της υπερπήδησης μονωτήρα.

Τα αίτια της υπερπήδησης είναι δύο: α) η εντοπισμένη αφυδάτωση ενός στρώματος

ηλεκτρολύτη αυξάνει τις ασυνέχειες στο αγώγιμο στρώμα – γνωστές ως ξηρές ζώνες – κατά μήκος των οποίων παράγονται ηλεκτρικές καταπονήσεις (stresses) που επαρκούν για να ιονιστεί ο αέρας και β) τα τόξα στον αέρα, από τη στιγμή που δημιουργούνται μπορούν εύκολα να επεκταθούν χωρίς εξασθένηση με σχετικά αργή απομάκρυνση των άκρων μεταξύ των οποίων εμφανίζονται [1].

Για μεγάλο μέρος της ζωής του ένας μονωτήρας θα λειτουργεί με ξηρές ζώνες στην επιφάνειά του, τις οποίες κατά καιρούς διαπερνούν ηλεκτρικές εκκενώσεις. Αυτές οι εκκενώσεις είναι ακίνδυνες, εκτός από τα προβλήματα πιθανής πρόκλησης επιφανειακών βλαβών στο μονωτήρα. Μόνο πολύ σπάνια ο συνδυασμός αγωγιμότητας και ηλεκτρικής τάσης θα είναι τέτοιος που θα επιτρέπει την ανάπτυξη ενός τόξου με τόσο ρεύμα ώστε να αυτο-διατηρείται και να διαδίδεται. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται υπερπήδηση. Το τεχνικό πρόβλημα είναι ότι η επιφανειακή αγωγιμότητα που προκαλεί την υπερπήδηση παραμένει, ακόμα κι όταν το τόξο έχει εξαλειφθεί από τη λειτουργία της προστασίας, γεγονός που επιτρέπει να ακολουθήσουν κι άλλες υπερπηδήσεις.

1.2.1 Παράγοντες που ευνοούν τη διαδικασία της υπερπήδησης

Συνηθισμένοι παράγοντες που ευνοούν την υπερπήδηση μονωτήρων λόγω ρύπανσης είναι οι παρακάτω [1]:

- Η πτώση σχεδόν καθαρού νερού, όπως σταγόνες, βροχή ή ομίχλη, σε ένα μονωτήρα, πάνω στον οποίο βρίσκεται ποσότητα ρύπανσης που περιλαμβάνει διαλυτά ιοντικά στοιχεία, όπως το κοινό αλάτι.
- Η εναπόθεση σταγονιδίων θαλάσσιας ή βιομηχανικής ομίχλης, ή άλλου συνδυασμού νερού και ηλεκτρολύτη.
- 3. Η συγκέντρωση παγετού, παγετώδους ομίχλης ή πάγου στη βρώμικη επιφάνεια ενός μονωτήρα. Τότε, τα ιοντικά συστατικά των ρύπων ενεργούν ώστε να μειώσουν το σημείο ψύξης του νερού κι έτσι επιτρέπουν την ύπαρξη υγρού διαλύματος στο σημείο επαφής των δύο επιφανειών.
- Η ένταξη στο δίκτυο ενός τμήματος γραμμής μεταφοράς, που αναρτάται από μονωτήρες υπό συνθήκες ρύπανσης.
- 5. Η εμφάνιση μιας παροδικής υπέρτασης, ή μιας μεταβατικής αιχμής, σε ένα μονωτήρα υγρό, βρώμικο και πιθανόν ήδη ενεργοποιημένο.

Από αυτές τις περιπτώσεις, η πρώτη περίπτωση είναι η πιο συνηθισμένη. Κυρίως στην έρημο, τα περιστατικά υπερπηδήσεων συσχετίζονται με περιόδους υγρασίας και πρωινής πάχνης, ενώ στις θαλάσσιες περιοχές οι επικίνδυνες ώρες είναι αυτές της ομίχλης με άπνοια. Ταυτόχρονη εναπόθεση νερού και διαλυμένων ουσιών συμβαίνει σε καταιγίδες. Η περίπτωση της παγετώδους ομίχλης έχει προκαλέσει μερικά απ' τα πιο σοβαρά περιστατικά, όπως ήταν το 1962 τα πολλαπλά προβλήματα και η προσωρινή διακοπή στο δίκτυο μεταφοράς της Αγγλίας [1]. Το στρώμα ηλεκτρολύτη που προκαλεί το πρόβλημα είναι κολλημένο πάνω στο μονωτήρα και απαιτείται η αφαίρεσή του με καθαρισμό. Η τέταρτη και η πέμπτη περίπτωση είναι λιγότερο συνηθισμένες.

1.2.2 Μηχανισμοί υπερπήδησης

Μονωτήρες πορσελάνης

Τα βασικά στάδια της διαδικασίας της υπερπήδησης λόγω ρύπανσης σε μονωτήρες πορσελάνης είναι τα εξής [6]:

- Εναπόθεση ρύπανσης. Ο αέρας οδηγεί σκόνη ή/και άλλα αγώγιμα σωματίδια στην επιφάνεια του μονωτήρα.
- 2. <u>Ύγρανση της επιφάνειας</u>. Μεγάλη υγρασία, δροσιά, ομίχλη ή ασθενής βροχή υγραίνουν την επιφάνεια δημιουργώντας έναν αγώγιμο ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι συνεχής ή σχεδόν συνεχής κατά μήκος του μονωτήρα. Όταν σχηματιστεί ο ηλεκτρολύτης, η επιφανειακή αντίσταση μειώνεται και ένα υπολογίσιμο ρεύμα διαρροής κυκλοφορεί.
- 3. <u>Θερμότητα (ωμική)</u>. Το ρεύμα διαρροής, κυκλοφορώντας μέσω του ηλεκτρολύτη, προκαλεί μείωση στην αντίσταση και αντίστοιχη αύξηση στο ρεύμα, μέχρι ο ηλεκτρολύτης να αποκτήσει αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας στην αντίστασή του. Υπάρχει συσσώρευση θερμικής ενέργειας (∫i²(t)Rdt), η οποία προκαλεί εξάτμιση νερού και οδηγεί, τελικά, σε αιφνίδια αύξηση του βαθμού ξηρότητας.
- 4. <u>Σχηματισμός ξηρής ζώνης</u>. Η απώλεια ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας προέρχεται από την ηλεκτρική τάση και την πυκνότητα ρεύματος. Οι περιοχές της επιφάνειας με τη μεγαλύτερη απώλεια ισχύος ξηραίνονται πρώτα. Η

γεωμετρία του μονωτήρα παίζει ουσιαστικό ρόλο, καθώς η πυκνότητα ρεύματος τείνει να συγκεντρωθεί σε περιοχές με τα μικρότερα τμήματα, στα οποία η ξήρανση επιταχύνεται. Η ξήρανση αυξάνει την απώλεια ισχύος, επειδή αυξάνει την ειδική αντίσταση και οδηγεί σε ασταθείς συνθήκες. Καθώς οι ξηρές ζώνες είναι απομονωμένες, η απώλεια ισχύος συνεχίζεται μέσα στην περιοχή της ζώνης, έως ότου οι ξηρές ζώνες αποκτήσουν επαρκές μήκος, ώστε να αντέχουν την εφαρμοζόμενη τάση.

5. <u>Μερικές εκκενώσεις και υπερπήδηση</u>. Υπερπήδηση λαμβάνει χώρα εάν μία εκκένωση ξηρής ζώνης επεκταθεί στην εναπομένουσα υγρή επιφάνεια του μονωτήρα. Οι μερικές εκκενώσεις εξαλείφονται λίγο πριν το μηδενισμό της τάσης. Εάν, παρ' όλα αυτά, η τιμή της τάσης και του ρεύματος διαρροής είναι αρκετά υψηλή, οι εκκενώσεις μπορεί να επεκταθούν σε ολόκληρο το μήκος του μονωτικού και να αρχίσει το φαινόμενο της υπερπήδησης. Η ορατή δραστηριότητα στην επιφάνεια δεν σημαίνει ότι θα συμβεί, πάντα, υπερπήδηση, καθώς το ρεύμα διαρροής μπορεί να εξαλειφθεί εάν υπάρχει ανεπαρκής απώλεια ισχύος.

Οι παραπάνω μηχανισμοί πρέπει να ενεργοποιηθούν διαδοχικά, προκειμένου να συμβεί υπερπήδηση. Το πλύσιμο, το οποίο μπορεί να συμβεί για παράδειγμα λόγω βροχής, μεταβάλλει την επιφάνεια και, συνεπώς, η αγωγιμότητα της επιφανειακής ρύπανσης μειώνεται. Εάν η υγρασία οφείλεται σε εναπόθεση δροσιάς, η παρουσία του ήλιου μειώνει την υγρασία. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δυνατό να παρατηρηθούν ξηρές ζώνες, οι οποίες όμως δεν θα οδηγήσουν σε υπερπήδηση γιατί ο μηχανισμός θα έχει διακοπεί.

<u>Πολυμερείς μονωτήρες</u>

Η ανάλυση εργαστηριακών δεδομένων και η βιβλιογραφική έρευνα οδηγούν σε αρκετά συμπληρωματικά στάδια στη διαδικασία της υπερπήδησης ενός υδρόφοβου πολυμερούς μονωτήρα, σε σχέση με τα στάδια που προαναφέρθηκαν για το φαινόμενο της υπερπήδησης σε μονωτήρες πορσελάνης [6].

- Εναπόθεση ρύπανσης. Πραγματοποιείται με την ίδια διαδικασία, όπως στους μονωτήρες πορσελάνης.
- <u>Υγρανση.</u> Μεγάλη υγρασία, δροσιά, ομίχλη ή ασθενής βροχή υγραίνουν την επιφάνεια σχηματίζοντας σταγονίδια εξαιτίας των υδροφοβικών ιδιοτήτων του

υλικού. Τα σταγονίδια κυλούν εξαιτίας της βαρύτητας. Όταν η βαρύτητα δεν είναι ικανή να ενισχύσει την κίνηση των σταγονιδίων, τότε αυτά παραμένουν διαχωρισμένα στις θέσεις τους. Άλατα και/ή αγώγιμη ρύπανση διαλύονται στις σταγόνες νερού αυξάνοντας την αγωγιμότητα του υγρού.

- 3. <u>Σχηματισμός αγώγιμου στρώματος</u>. Η παραμένουσα ξηρή επιφάνεια ρύπανσης σταδιακά υγραίνεται μέσω της μετακίνησης σταγονιδίων. Αυτό σχηματίζει ένα αγώγιμο στρώμα ισχυρά ωμικής συμπεριφοράς, με αποτέλεσμα το ρεύμα διαρροής να μεταβάλλεται από χωρητικό σε ωμικό.
- 4. <u>Ανάπτυξη θερμότητας (ωμικής).</u> Πραγματοποιείται με την ίδια διαδικασία όπως στους μονωτήρες πορσελάνης.
- 5. <u>Επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου σε υδροφοβική επιφάνεια.</u> Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί την ένωση των σταγονιδίων, που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, σε μία μεγάλη σταγόνα νηματοειδούς μορφής. Ο μηχανισμός της υπερπήδησης διαρκεί περισσότερο σε μία υδροφοβική επιφάνεια, εξαιτίας του χρόνου που απαιτείται για να σχηματιστεί μία αγώγιμη διαδρομή με νηματοειδείς σταγόνες. Επίσης, το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να έχει ικανή τιμή ώστε να σχηματιστούν οι νηματοειδείς σταγόνες.
- 6. <u>Μερικές εκκενώσεις σε υδροφοβικές επιφάνειες</u>. Οι νηματοειδείς σταγόνες μειώνουν την απόσταση μεταξύ των άκρων του μονωτικού, αυξάνοντας το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των γειτονικών νηματοειδών σταγόνων. Όταν η τάση αποκτήσει κατάλληλη τιμή τότε μπορεί να συμβούν επιφανειακές εκκενώσεις.
- 7. <u>Εξασθένιση της υδροφοβικότητας</u>. Οι εκκενώσεις καταστρέφουν ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς γύρω από τα σταγονίδια και μειώνουν την υδροφοβικότητα, περιστρέφοντας ή σπάζοντας τις πολυμερείς αλυσίδες. Η απώλεια ή η εξασθένηση της επιφανειακής υδροφοβικότητας έχει ως αποτέλεσμα την εξάπλωση των σταγόνων και το σχηματισμό ενός συνεχούς αγώγιμου στρώματος, επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος διαρροής.
- 8. <u>Σχηματισμός ξηρής ζώνης</u>. Οι ξηρές ζώνες σχηματίζονται όπως και στους μονωτήρες πορσελάνης. Η προκύπτουσα δραστηριότητα προκαλεί επιφανειακή διάβρωση, της οποίας ο ρυθμός εξαρτάται από τον τρόπο σχηματισμού του συγκεκριμένου υλικού, και συμβάλλει στη γήρανση.
- 9. <u>Αποκατάσταση της υδροφοβικότητας</u>. Η ολική ή μερική αποκατάσταση της υδροφοβικότητας είναι δυνατή μόνο αν το υλικό εκφορτιστεί ελεύθερα για

ικανό χρονικό διάστημα. Η διαδικασία αποκατάστασης εξαρτάται από το υλικό, τον τρόπο κατασκευής και τη σχεδίαση του μονωτήρα και το περιβάλλον.

- 10. <u>Επανάληψη του κύκλου γήρανσης.</u> Η επανάληψη του κύκλου γήρανσης προκαλεί επιπλέον ύγρανση και, πιθανόν, διάβρωση της επιφάνειας, φαινόμενα τα οποία ενισχύονται από χημικές αντιδράσεις και τοπική άνοδο της θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια εκκένωσης η θερμοκρασία σε κάποια σημεία μπορεί να φθάσει τους 400°C.
- <u>Υπερπήδηση</u>. Η υπερπήδηση, συνεπώς, μπορεί να συμβεί ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όπως σε μονωτήρες πορσελάνης, εάν η επιφάνεια γίνει υδρόφιλη.

Οι υδρόφοβες επιφάνειες αντιστέκονται περισσότερο στη ροή του ρεύματος διαρροής από τις υδρόφιλες επιφάνειες και απαιτούν υψηλότερο ρεύμα διαρροής και αντίστοιχη έκλυση ενέργειας προκειμένου να ξεκινήσει υπερπήδηση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι πολυμερείς μονωτήρες παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση υπερπήδησης από τους μονωτήρες πορσελάνης. Όπως αναφέρθηκε και στους μονωτήρες πορσελάνης, όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί πρέπει να ενεργοποιηθούν διαδοχικά για να οδηγήσουν σε υπερπήδηση. Εάν η διαδικασία διακοπεί, για παράδειγμα λόγω επανάκτησης της επιφανειακής υδροφοβικότητας, η υπερπήδηση δεν λαμβάνει χώραν.

1.2.3 Τρόποι μετριασμού του φαινομένου της υπερπήδησης

Μονωτήρες πορσελάνης

Οι χρήστες λαμβάνουν αρκετά μέτρα, ώστε να μειώσουν τη συχνότητα των υπερπηδήσεων σε μονωτήρες πορσελάνης. Αυτά είναι [6]:

- Επέκταση του μήκους. Πολυμερή κυάθια (φούστες) εγκαθίστανται ακριβώς πάνω από τα κυάθια του μονωτήρα πορσελάνης προκειμένου να αυξηθεί το μήκος ερπυσμού και να προστεθεί η ιδιότητα της υδροφοβικότητας.
- <u>Πλύσιμο.</u> Οι μονωτήρες είναι δυνατό να πλυθούν, είτε ευρισκόμενοι εν λειτουργία, είτε εκτός λειτουργίας, με τη χρήση νερού υπό υψηλή πίεση. Επειδή, όμως, το πλύσιμο των μονωτήρων αποτελεί μία δαπανηρή διαδικασία πρέπει να πραγματοποιείτε κατόπιν σωστού προγραμματισμού.
- 3. Πολύπλοκο σχήμα του μονωτικού υλικού. Είναι διαθέσιμοι μονωτήρες, υψηλού,

σχετικά, κόστους, οι οποίοι, λόγω του σχήματός τους, αντιστέκονται στην εναπόθεση ρύπανσης.

- 4. <u>Επιφανειακές επιστρώσεις.</u> Στην πορσελάνη εφαρμόζεται γράσο ή πολυμερής επίστρωση, προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητές της, υπό συνθήκες ρύπανσης. Η βελτίωση των ιδιοτήτων της και ο χρόνος μέχρι να απαιτηθεί επανάληψη της επίστρωσης εξαρτώνται από την ποιότητα του επιστρώματος, την εφαρμογή του και τις τοπικές συνθήκες ρύπανσης.
- 5. <u>Υάλωση.</u> Μία μη αγώγιμη ή ημιαγώγιμη υάλωση διατηρεί μία μεγάλη περιοχή της επιφάνειας του μονωτήρα ξηρή κατά τη διάρκεια της φυσικής ύγρανσης. Σε αυτούς του μονωτήρες, όμως, διαρκή ρεύματα διαρροής οδηγούν σε μεγάλες απώλειες ισχύος. Η φθορά της υάλωσης και η έκλυση θερμότητας είναι, επίσης, μεγάλα προβλήματα αυτών των μονωτήρων.

<u>Πολυμερείς μονωτήρες</u>

Στους πολυμερείς μονωτήρες σπάνια χρησιμοποιούνται πρόσθετα μέτρα για την αποφυγή υπερπηδήσεων. Απαιτείται, όμως, ιδιαίτερη προσοχή κατά τη δημιουργία του υλικού και το σχεδιασμό του μονωτήρα [6]. Τα πολυμερή μονωτικά υλικά είναι απαραίτητο να διαθέτουν δύο αμυντικούς μηχανισμούς κατά της ρύπανσης και κατ' επέκταση της δημιουργίας υπερπηδήσεων. Αυτοί είναι:

- <u>Έλεγχος του ρεύματος διαρροής.</u> Επειδή είναι πιθανό να συμβεί φθορά του υλικού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ένας αμυντικός μηχανισμός είναι ο περιορισμός του ρεύματος διαρροής. Εάν το ρεύμα διαρροής δεν έχει ικανή τιμή, ώστε να προκαλέσει ξήρανση του ηλεκτρολύτη και δημιουργία ξηρών ζωνών, τότε ο μηχανισμός της υπερπήδησης δεν μπορεί να εξελιχθεί. Τούτο μπορεί να επιτευχθεί, τόσο με την επιλογή του κατάλληλου υλικού, όσο και με τον κατάλληλο σχεδιασμό του μονωτήρα.
- 2. <u>Αντοχή στη διάβρωση</u>. Τα πολυμερή υλικά δεν θα πρέπει να υφίστανται σημαντική διάβρωση κατά τη διάρκεια αναπόφευκτων περιόδων, κατά τις οποίες η επιφανειακή δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει απώλεια της υδροφοβικότητας. Ειδικά, υλικά, που έχουν την τάση να ανακτούν την υδροφοβικότητά τους, πρέπει να αντέχουν περιόδους επιφανειακής δραστηριότητας χωρίς να υφίστανται σημαντική διάβρωση. Ένα πολυμερές υλικό, το οποίο δεν έχει καλή αντοχή στη διάβρωση, δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε περιοχή με έντονη ρύπανση, γιατί θα οδηγηθεί σε πρόωρη βλάβη. Ένα υλικό

με μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, ακόμα κι αν χάσει την υδρόφοβη ιδιότητά του, υπερτερεί ενός υλικού, το οποίο μπορεί να επανακτήσει την υδροφοβικότητα του, αλλά έχει μικρή αντοχή στη διάβρωση.

1.3 Γήρανση πολυμερών μονωτήρων

Τα πολυμερή μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην κατασκευή μονωτήρων. Τα πλεονεκτήματά τους (καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, υψηλή μηχανική αντοχή, μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, εύκολη μορφοποίηση, χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης) καθιστούν τα πολυμερή υλικά μία καλή επιλογή μονωτικού υλικού για αρκετές εφαρμογές. Εκτός, όμως, από τα πλεονεκτήματα που έχουν, παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, καθώς υφίστανται "υποβάθμιση" (degradation), υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, η οποία επιδρά στην εμφάνιση και στις ιδιότητές τους [7]. Στη χημεία ο όρος "υποβάθμιση" αναφέρεται σε οποιαδήποτε χημική μεταβολή στη δομή του πολυμερούς.

Τα πολυμερή υφίστανται συχνά, με την πάροδο του χρόνου, μια βραδεία και μη αντιστρεπτή μεταβολή των ιδιοτήτων τους, η οποία αντιστοιχεί στη μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και κυρίως της ελαστικότητας. Η μεταβολή αυτή γίνεται με τους ακόλουθους μηχανισμούς: οξείδωση, υδρόλυση, φωτόλυση, ράγισμα υπό την επίδραση δυνάμεων, βιολογική αποσύνθεση. Οι μηχανισμοί αυτοί επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον, στο οποίο χρησιμοποιείται το πολυμερές, όπως π.χ. μολυσμένος αέρας, κενό, αδρανές αέριο, υγρό, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιδρούν και οι ακτινοβολίες ορατού και υπεριώδους φωτός, μικροοργανισμοί και μηχανικές τάσεις.

Τα πολυμερή υλικά μπορεί να υποστούν "υποβάθμιση" ως αποτέλεσμα της έκθεσης τους στους παρακάτω παράγοντες:

 <u>Θερμότητα</u>: Κάθε πολυμερές υφίσταται "υποβάθμιση" σε κάποιο επίπεδο, εάν η θερμοκρασία αυξηθεί αρκετά και οι διακυμάνσεις της είναι σημαντικές. Η θερμική γήρανση των πολυμερών είναι καθοριστική για τη συμπεριφορά των υλικών αυτών σε περιπτώσεις φωτιάς [8].

- 2. <u>Φως</u>: Το φάσμα της ακτινοβολούμενης ενέργειας από τον ήλιο, η οποία φθάνει στην επιφάνεια της γης το καλοκαίρι, εκτείνεται περίπου από την υπεριώδη (από 290nm) έως την υπέρυθρη περιοχή, ενώ η υπεριώδης συνιστώσα της ακτινοβολίας περιέχει σημαντική ενέργεια, ικανή να σπάσει την κύρια αλυσίδα και να προκαλέσει γήρανση σε πολλά πολυμερή. Παρ' ότι τα πολυμερή υλικά, σε φυσική κατάσταση, δεν απορροφούν φως με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 300nm, η φωτογήρανση των πολυμερών συμβαίνει με φως στην υπεριώδη περιοχή και οφείλεται στην παρουσία χρωμοσωμάτων, τα οποία παράγονται τυχαία μέσα στο πολυμερές κατά τη διάρκεια της σύνθεσης του υλικού. Η υπεριώδης ακτινοβολία προκαλεί φωτοχημικές αντιδράσεις, δημιουργεί ελεύθερες ρίζες και σπάζει τις κύριες αλυσίδες οδηγώντας σταδιακά στο σχηματισμό ενός ηλεκτρικού δενδρίτη [7]. Τα πολυμερή είναι επίσης ευαίσθητα σε ακτίνες Χ και ακτίνες γ [8].
- 3. <u>Ατμόσφαιρα</u>: Η χημική επίδραση των αερίων της ατμόσφαιρας μπορεί να προκαλέσει γήρανση στα πολυμερή. Η πιο σημαντική είναι η προσβολή από το οξυγόνο, αλλά και αέρια όπως το όζον, το διοξείδιο του θείου και το διοξείδιο του αζώτου μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση, ακόμα και σε χαμηλή συγκέντρωση [8].
- 4. <u>Υδρόλυση</u>: Τα πολυμερή είναι, αναπόφευκτα, ευαίσθητα σε αυτόν τον ειδικό τύπο χημικής επίδρασης κάτω από κατάλληλες συνθήκες. Υδρολυτική υποβάθμιση υφίστανται τα συνθετικά πολυμερή, που περιέχουν εστέρες, αμίδια, ουρεθάνη και καρβονυλικές διασταυρώσεις, και τα φυσικά πολυμερή, πολυσακχαρίδια και πρωτεΐνες. Η υδρόλυση οδηγεί σε ραγδαία απώλεια των φυσικών ιδιοτήτων των πολυμερών, ως αποτέλεσμα τεμαχισμού των αλυσίδων. Η ύπαρξη NaCl, λόγω καθαλάτωσης, σε συνδυασμό με την απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας είναι δυνατό να οδηγήσει στην παραγωγή HCl (τοξικού αερίου). Το ιδιαίτερα υγρό περιβάλλον και pH μικρότερο του 7 ευνοούν αυτό τον τύπο γήρανσης. Βέβαια, ο υδρόφοβος χαρακτήρας πολλών πολυμερών και η προσπάθεια ενίσχυσής του καθυστερούν τη διεργασία της υδρόλυσης [8, 9].
- 5. <u>Βιογήρανση</u>: Τα περισσότερα φυσικά πολυμερή, αλλά και αρκετά συνθετικά πολυμερή, είναι ευαίσθητα στην επίδραση των μυκήτων και των μικροοργανισμών κάτω, φυσικά, από κατάλληλες συνθήκες. Επισημαίνεται ότι,

πολυμερή, τα οποία έχουν, αρχικά, αυξημένη αντίσταση στη βιογήρανση, μπορεί να γίνουν ευαίσθητα, μετά τη διάσπαση της αλυσίδας τους, λόγω της φωτοοξείδωσης [8].

Η γήρανση των πολυμερών μονωτήρων οφείλεται στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι αναλύθηκαν προηγουμένως, καθώς και σε παράγοντες που σχετίζονται με την ηλεκτρική και τη μηχανική καταπόνηση. Με το φαινόμενο της γήρανσης των πολυμερών μονωτήρων έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών [10 – 14], είτε μέσω πειραμάτων σε φυσικές συνθήκες [13, 15, 16].

Οι Bamji et al. [11] ασχολήθηκαν με το φαινόμενο σχηματισμού ηλεκτρικού δενδρίτη στα πολυμερή υλικά, το οποίο οδηγεί σε "υποβάθμιση" και αποτελεί πρόδρομο για την αστοχία του υλικού. Συγκεκριμένα, μελέτησαν το μηχανισμό έναρξης των δενδριτών. Υπό κανονικές συνθήκες ρύπανσης, οι ρυπαντές ή οι ατέλειες, που εισάγονται τυχαία στην πολυμερή μόνωση, κατά τη διάρκεια των διαδικασιών σύνθεσης και κατασκευής, μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία αυξημένης ηλεκτρικής έντασης, στα οποία μπορεί να ξεκινήσει η δημιουργία ηλεκτρικών δενδριτών. Ο στόχος των ερευνητών ήταν να βρεθεί ο τύπος ή η πολικότητα του φορτίου, που απαιτείται για ηλεκτροφωτοβολία, η οποία οδηγεί στην έναρξη ηλεκτρικών δενδριτών. Προκειμένου να ελεγχθεί η πολικότητα του εγχυόμενου φορτίου στο πολυμερές υλικό, χρησιμοποιήθηκε, διαδοχικά, εναλλασσόμενο ρεύμα, συνεχές ρεύμα και ημιανορθωμένο ρεύμα. Παρατηρήθηκε ότι η έγχυση μονοπολικού φορτίου (ηλεκτρόνιο ή οπή) στο πολυμερές υλικό δεν προκαλεί φωτοεκπομπή ή έναρξη δενδριτών, ενώ αντίθετα για την έναρξη των δενδριτών απαιτείται η έγχυση, τόσο ηλεκτρονίων, όσο και οπών.

Οι Vlastos και Sherif [16] μελέτησαν τις αλλαγές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων πολυμερών μονωτήρων υπό συνθήκες γήρανσης του υλικού των μονωτήρων, λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων (ρύπανση, καταιγίδες με αυξημένη των περιεκτικότητα 3δ αλάτι, ηλεκτροστατικός διαχωρισμός αιωρημάτων, θερμοκρασιακές μεταβολές και ηλιακή ακτινοβολία), με έμφαση στην επίδραση, που έχουν στη γήρανση, η σύνθεση του μονωτικού υλικού, η σχεδίαση και η κατασκευή των μονωτήρων. Οι μονωτήρες, που μελετήθηκαν, εκτέθηκαν για πολλά χρόνια σε φυσική ρύπανση και τροφοδοτήθηκαν τόσο με εναλλασσόμενη, όσο και συνεχή τάση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υλικό των κυαθίων (sheds) των μονωτήρων υφίσταται μια αργή διαδικασία γήρανσης και χάνει σταδιακά την ικανότητά του να αποκρούει το νερό.

Οι Oliveira και Tourreil [12] υπέβαλλαν σε μηχανική και ηλεκτρική καταπόνηση επτά τύπους πολυμερών μονωτήρων, που χρησιμοποιούνται ευρέως στον Καναδά. Κάποια δοκίμια τοποθετήθηκαν, πριν από τις υπόλοιπες δοκιμές γήρανσης, για 2500 ώρες σε θάλαμο υπεριώδους ακτινοβολίας. Παρόμοιες δοκιμές διεξήγαγαν και οι Tourreil και Lambeth [13], σε πολυμερείς μονωτήρες μεγάλου μήκους των 230kV και 75kV. Οι τελευταίοι υπέβαλαν τους μονωτήρες σε εργαστηριακές δοκιμές και σε δοκιμές φυσικής γήρανσης, υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, για περισσότερα από τρία χρόνια.

Οι Zhao και Bernstorf [14] διεξήγαγαν τυπικές εργαστηριακές δοκιμές γήρανσης, τόσο των πολυμερών μονωτικών υλικών, όσο και των πολυμερών μονωτήρων. Οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης των πολυμερών μονωτικών υλικών περιλαμβάνουν έλεγχο για την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία, έλεγχο διάβρωσης, έλεγχο φαινομένου Corona και έλεγχο οξειδωτικής σταθερότητας. Εκτός από τον έλεγχο των μονωτικών υλικών είναι απαραίτητο να ελεγχθεί ο σχεδιασμός και η ποιότητα κατασκευής των μονωτήρων. Τα κριτήρια των δοκιμών είναι η ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων, η αντοχή τους (σπάσιμο ή φθορά), η περιβαλλοντική υποβάθμισή τους και η διατήρηση της υδροφοβικότητάς τους.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των πολυμερών μονωτήρων είναι η υδρόφοβη επιφάνειά τους. Για το λόγο αυτό, στη βιβλιογραφία [17 – 21] πολλοί είναι αυτοί που έχουν ασχοληθεί με την ιδιότητα της υδροφοβικότητας. Επιπλέον, το 1992 [22] δημιουργήθηκε ένας οδηγός κατάταξης των πολυμερών μονωτήρων, ανάλογα με το βαθμό υδροφοβικότητας που παρουσιάζουν. Η κατάταξη αυτή των μονωτήρων υιοθετήθηκε και από το Πρότυπο IEC/TS 62073 [23]. Η εμφάνιση της επιφάνειας του μονωτήρα, μετά από την έκθεσή του σε υγρασία, πρέπει να αξιολογηθεί και να ταξινομηθεί σε μία από επτά κατηγορίες ύγρανσης (wettability class). Τα κριτήρια για την ταξινόμηση των διαβρεγμένων επιφανειών είναι οπτικά και λαμβάνουν υπόψη τους δύο παραμέτρους: α) το σχήμα των σταγόνων και β) το επί της εκατό τμήμα της επιφάνειας που έχει υγρανθεί.

1.4 Φυσικά και μαθηματικά μοντέλα

Τα φαινόμενα σχηματισμού τόξου, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε ρυπασμένες επιφάνειες, είναι τόσο σύνθετα, ώστε, προκειμένου να καταστεί δυνατή η μαθηματική επίλυσή τους, είναι απαραίτητη η απλοποίησή τους, με βάση ορισμένες υποθέσεις και προσεγγίσεις. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος πηγάζει από την ποικιλότητα στη μορφή των μονωτήρων και το είδος της ρύπανσης, τη μεταβολή της επιφανειακής ειδικής αντίστασης, λόγω των θερμικών διαδικασιών, την ανομοιόμορφη ύγρανση, την ανομοιομορφία των τόξων που σχηματίζονται στην περιοχή της επιφάνειας των μονωτήρων, τον πολλαπλασιασμό των τόξων, την επίδραση των παραμέτρων του κυκλώματος τροφοδοσίας στη συμπεριφορά μονωτήρων, κ.α.. Η τάση υπερπήδησης ενός ρυπασμένου μονωτήρα είναι μια στατιστική μεταβλητή, η οποία χαρακτηρίζεται από σημαντική διασπορά, ακόμη και υπό ελεγχόμενες συνθήκες.

Στη βιβλιογραφία έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες ώστε να προσομοιωθεί το φυσικό φαινόμενο της υπερπήδησης σε ένα μονωτήρα με κάποιο μοντέλο, το οποίο να στηρίζεται σε μαθηματικές σχέσεις. Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, στα διάφορα μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί, εμπεριέχονται προσεγγίσεις. Έτσι, τα μαθηματικά μοντέλα [24 – 45] για την υπερπήδηση λόγω ρύπανσης μπορούν να θεωρηθούν μόνο ως πολύτιμο συμπλήρωμα στην πειραματική έρευνα [7 – 23, 46 – 75], εξαιτίας της εξιδανικευμένης φύσης τους. Ένα καλό μοντέλο μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο στην ορθολογική οργάνωση των πειραμάτων, καθώς και στην ερμηνεία και παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Υπάρχουν δύο θεμελιώδη σημεία στη μοντελοποίηση του φαινομένου σχηματισμού τόξου σε ρυπασμένες επιφάνειες:

Από τη μία πλευρά είναι ο υπολογισμός της ελάχιστης τάσης, της απαραίτητης να στηρίξει μία μερική εκκένωση που δημιουργείται εν σειρά με την αγεφύρωτη ρυπασμένη επιφάνεια μεταβλητού μήκους, σε συνδυασμό με το κριτήριο για τη διάδοση τόξων κατά μήκος της υγρής επιφάνειας μονωτήρων. Είναι προφανές ότι, εάν το τόξο επεκταθεί σε τέτοιο μήκος, ώστε η εφαρμοζόμενη τάση να μην είναι πλέον επαρκής να το στηρίξει, τότε το τόξο αποσβέννυται και η υπερπήδηση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί.

 Από την άλλη πλευρά, κάποιος μηχανισμός είναι απαραίτητος για να επιμηκύνει το τόξο, ώστε να επεκταθεί σε ένα σημαντικό μέρος του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα, διαφορετικά οι μερικές εκκενώσεις, διανύοντας έναν σχετικά σύντομο δρόμο, κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, μπορούν να συνεχίσουν να υφίστανται, έως ότου στεγνώσει το στρώμα ρύπανσης.

Στη βιβλιογραφία [24 – 45] διαφαίνεται ότι έχει γίνει ιδιαίτερη προσπάθεια ως προς τη διατύπωση των αναλυτικών εκφράσεων για την ελάχιστη τάση, η οποία είναι απαραίτητη να στηρίξει μία μερική εκκένωση, αλλά πολύ ελάχιστα έχουν γίνει ως προς την ποσοτικοποίηση του μηχανισμού διάδοσης τόξου. Αυτό απορρέει από την έλλειψη λεπτομερούς γνώσης για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στη μετακίνηση τόξου και, επίσης, οφείλεται στην πεποίθηση πολλών ερευνητών ότι, το κριτήριο για την ύπαρξη τόξων είναι το σημαντικότερο για τη δημιουργία υπερπήδησης [24].

Μία από τις πρώτες ποσοτικές προσεγγίσεις του τόξου που δημιουργείται σε ρυπασμένες επιφάνειες είναι αυτή του Obenhaus [24, 25]. Σε αυτό το μοντέλο, το οποίο είναι κυκλωματικό, υπάρχει ένα τόξο μήκους x, δημιουργούμενο κατά τη γεφύρωση των ξηρών ζωνών, εν σειρά με μία αντίσταση R_p , η οποία παριστάνει το στρώμα υγρής ρύπανσης. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από πηγή σταθερής τάσης U. Το μοντέλο του Obenhaus παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.3.



Το κρίσιμο μήκος του τόξου x_c δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{x}_{c} = \frac{\mathbf{n}^{n}}{\left(\mathbf{n}+1\right)^{n+1}} \cdot \mathbf{U} \cdot \frac{\mathbf{I}_{sc}^{*n}}{\mathbf{A}}$$
(1.1)

ópou $I_{\rm sc}^*=U/R_{\rm p}\,$ eínai to reúma pou ba diérree to kúkluma an to tózo

αντικατασταθεί από βραχυκύκλωμα και A, n είναι σταθερές εξαρτώμενες από τα χαρακτηριστικά του στατικού τόξου. Για τόξα που λαμβάνουν χώρα στον αέρα οι παραπάνω σταθερές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών $0,45 \le n \le 1,30$ και $50 \le A \le 200$ [24]. Στη συνέχεια, οι σταθερές αυτές προσδιορίστηκαν με διάφορους τρόπους και τα όρια τροποποιήθηκαν σε $0,25 \le n \le 1,40$ και $20 \le A \le 460$ (από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. προτάθηκαν, αρχικά, οι τιμές n = 0,374και A = 131,5 [26] και, στη συνέχεια, n = 0,409 και A = 124,8 [27]). Χρήσιμη, στο σημείο αυτό, είναι η παράθεση του Πίνακα 1.1, στον οποίο φαίνονται οι σταθερές A, n που έχουν προταθεί από τους διάφορους ερευνητές [71].

Η ελάχιστη συνεχής τάση U_{cx} που απαιτείται για να συντηρηθεί ένα τόξο μήκους x είναι:

$$U_{cx} = \frac{n+1}{n^{\frac{n}{n+1}}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot x^{\frac{1}{n+1}} \cdot R_{p}^{\frac{n}{n+1}}$$
(1.2)

Το μοντέλο του Obenhaus μπορεί να προσδιορίσει μόνο την τάση κάτω από την οποία δεν θα αναπτυχθεί τόξο στην επιφάνεια του μονωτήρα, αλλά δεν είναι δυνατό να προσδιορίσει την τιμή της τάσης στην οποία θα εμφανιστεί το τόξο. Συνεπώς, θέτει ένα αναγκαίο, αλλά όχι ικανό κριτήριο για την ανάπτυξη τόξου.

Επεκτείνοντας το μοντέλο του Obenhaus, ο Neumärker [24, 28] ποσοτικοποίησε την ομοιόμορφη ρύπανση μέσω μίας αντίστασης $\overline{r_p}$ ανά μονάδα μήκους ερπυσμού L.

$$\mathbf{R}_{p} = \overline{\mathbf{r}_{p}} \cdot \left(\mathbf{L} - \mathbf{x}\right) \tag{1.3}$$

Η ελάχιστη συνεχής τάση U_{cx} που απαιτείται για να συντηρηθεί ένα τόξο σε ένα τμήμα x του μήκους ερπυσμού L εμπεριέχεται στη σχέση:

$$\frac{\mathbf{n}\cdot\mathbf{A}}{\overline{\mathbf{r}_{p}}}\cdot\left[\frac{\mathbf{U}_{cx}}{(1+n)\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{L}}\right]^{\frac{n+1}{n}} = \left(\frac{\mathbf{x}}{\mathbf{L}}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{\mathbf{x}}{\mathbf{L}}\right)^{\frac{n+1}{n}}$$
(1.4)

Μεγιστοποιώντας την παραπάνω σχέση ως προς το μήκος x προκύπτει η κρίσιμη ένταση, η οποία εκφράζει τη μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης κάτω από την οποία η υπερπήδηση είναι αδύνατη:

$$E_{c} = \frac{U_{c}}{L} = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot \overline{r_{p}}^{\frac{n}{n+1}}$$
(1.5)

α/α	Ερευνητές	A	n	Τύπος	Μέσο	
				Τροφοδοσίας	Διάδοσης	
		65	0.6	NS	Αέρας	
1	C.G. Suits (1939)	220	0,6	NS	Ατμός	
	× ,	81	0,6	NS	Άζωτο	
2	F. Obenhaus (1959)	100	0,7	AC	Αέρας	
3	L.L. Alston et al. (1963)	63	0,76	AC	Αέρας	
4	E. Nasser et al. (1963)	63	0,76	DC	Αέρας	
-		65	0,8	NS	Αέρας	
5	B.F. Hampton et al. (1964)	52	0,1	NS	Ατμός	
6	E. Los et al. (1971)	52	0,43	DC	Αέρας	
7	Nottingham (1973)	44	0,67			
		310	0,985	DC	Αέρας	
/		39,2	0,67	DC		
		20,3	1,38			
0	B Clavoria at al. (1074)	113	0,5		λάρας	
0	F. Clavelle et al. (1974)	98,99	0,5	AC	Αερας	
9	D.C. Jolly et.al. (1974)	296	0,397	AC	Αέρας	
10	El-arbaty et al. (1979)	40	0,8	AC	Αέρας	
		46,05	0,91	DC		
11	Gars at al (1081)	44,77	0,822	ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ	λέρας	
11	Gers et al. (1981)	43,80	0,823	DC	Aspus	
		59,64	0,773	DC		
12	F A M Bizk (1081)	130 -	0,45 -	DC	λέρας	
12	F.A.M. RIZK (1981)	210,6	1,30	DC	Acpuş	
13	M.P. Varma (1981)	53,45	0,5	AC	Αέρας	
	Mayr et al. (1986)	40,6	0,724		Αέρας	
14		Mayr et al. (1986) 50,20 (0,708	DC	Ήλιο	
		114	0,714		Άζωτο	
15	D A Swift (1989)	80	0.5	DC	Αέρας	
10	D.11. Switt (1909)	60	0,5		Topas	
16	G.I. Theodorakis et al. (1989)	131,5	0,374	AC	Αέρας	
17	G. Zhicheng et al. (1990)	138	0,69	DC	Αέρας	
		140	0,67	AC	در ماهد -	
18	R.P. Singh et al. (1993)	31 -	0,43 -	AC	Αέρας	
		100	0,98	_	-13	
19	R. Sundararajan et al. (1993)	60	0,8	DC	Αέρας	
		63	0,5		- T 2	
	P.S. Ghosh et al. (1995)	360	0,59			
20		P.S. Ghosh et al. (1995)	270	0,66	AC	Αέρας
		450	0,49		1 5	
		461	0,42			
21	H.G. Gopal et al. (1995)	60	0,25	NS	Αέρας	
	· · · · ·	100	1,20			
22	D.C. Chaurasia et al. (1996)	50	0,25 -	AC	Αέρας	
		100	1,10			
22	M. Farzaneh et al. (2000)	84	0,//	DC (-)	1 6	
23		209	0,45	DC (+)	Αερας	
24	I.D. Holt-houses (2001)	203	0,50	AC	A 4	
24	J.P. Holtznausen (2001)	39	0,33	AC	Αερας	
25	I.F. Gonos et al. (2002)	124,8	0,409	AC	Αερας	

Πίνακας 1.1: Προτεινόμενες τιμές των Α, η από διάφορους ερευνητές [71].

Το κρίσιμο ρεύμα για να υπάρξει υπερπήδηση σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο δίνεται από τη σχέση:

$$i_{c} = \left(\frac{A}{\overline{r_{p}}}\right)^{\frac{1}{n+1}}$$
(1.6)

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το κρίσιμο ρεύμα είναι ανεξάρτητο από το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα.

Οι Alston και Zoledziowski [24, 29] κατέληξαν στο ίδιο μοντέλο με τον Neumärker [28]. Σύμφωνα με το μοντέλο των Alston και Zoledziowski, ο μονωτήρας απλοποιείται σε έναν κυλινδρικό μονωτήρα μήκους L, με ηλεκτρόδια στα άκρα του. Μία εκκένωση υπό μορφή ηλεκτρικού τόξου, μήκους x, τείνει να επιμηκυνθεί, ενώ το στρώμα ρύπανσης – υγρασίας προσομοιώνεται μέσω μίας αντίστασης. Η εγκυρότητα του μοντέλου ελέγχθηκε τόσο με πειράματα των ίδιων των συγγραφέων, όσο και με πειράματα άλλων.

Ο Hampton [1, 30] εξέτασε πειραματικά το μηχανισμό υπερπήδησης χρησιμοποιώντας στρώματα τεχνητής ρύπανσης. Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα πειραμάτων οδηγήθηκε στο μοντέλο, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4 και περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα: ομοιόμορφη κλίση της τάσης, δημιουργία περισσότερων από μία ξηρών ζωνών, κυριαρχία μίας ζώνης, γεφύρωση με τόξο της μίας ζώνης, επέκταση τόξων, υπερπήδηση.

Ο Hampton έδειξε ότι, το κριτήριο για τη διάδοση των εκκενώσεων στην επιφάνεια του μονωτήρα, για να προκληθεί υπερπήδηση, είναι "η τιμή της πεδιακής έντασης στο υγρό στρώμα, E_p , να υπερβαίνει την πεδιακή ένταση στο τόξο, E_α ($E_\alpha < E_p$)". Γενικά, όσο η E_α είναι μεγαλύτερη της E_p , οποιαδήποτε φυσική εξάπλωση του τόξου οδηγεί σε μείωση του ρεύματος, με περαιτέρω αύξηση της E_α , καθώς εκφράζεται από τη σχέση (1.7). Έτσι, η επέκταση του τόξου σταματά.

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}^{-\mathbf{n}} \tag{1.7}$$

όπου i είναι το ρεύμα και A, n είναι οι, αναφερθείσες σε προηγούμενη θέση, σταθερές.

Ο Hampton μέτρησε τη σχέση (τάση / ρεύμα) για τόξα που αναπτύσσονται τόσο σε ατμό, όσο και σε αέρα και διερεύνησε το κριτήριο διάδοσης. Η εργασία αυτή καθιέρωσε άμεσα τις αναγκαίες συνθήκες για τη διάδοση ενός επιφανειακού τόξου έως την υπερπήδηση, ένα αποτέλεσμα που θα μπορούσε να εξαχθεί και από τις θεωρητικές μελέτες των Obenhaus και Neumärker. Η συνθήκη είναι, επίσης, σύμφωνη με τα αποτελέσματα των Alston και Zoledziowski. Τα κριτήρια που είχαν αναπτυχθεί πριν από αυτό του Hampton δεν περιέγραφαν το μηχανισμό, σύμφωνα με τον οποίο το τόξο μετακινείται, ενώ, αντίθετα, είχαν πολλές ομοιότητες με τη στατική χαρακτηριστική του τόξου. Η εργασία του Hampton, παρ' όλα αυτά, δεν συμπεριλαμβάνει όλες τις ικανές συνθήκες για την ανάπτυξη υπερπήδησης σε έναν πραγματικό μονωτήρα, καθώς η διάταξη που χρησιμοποίησε είναι αρκετά απλοποιημένη.



Σχήμα 1.4: Η εξέλιξη της διαδικασίας της υπερπήδησης [1].

Πάντως, αξίζει να τονιστεί ότι το βασικό κριτήριο του Hampton δίνει πολλά από τα απαιτούμενα για το σχεδιασμό ή την επιλογή μονωτήρων, για λειτουργία υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Αποδεικνύει ότι η υπερπήδηση δεν μπορεί να συμβεί αν η επιφανειακή πεδιακή ένταση και το ρεύμα διαρροής είναι αρκετά χαμηλά, η μείωσή τους σίγουρα αποτρέπει τη δημιουργία υπερπήδησης. Αντίθετα, όλοι οι άλλοι τρόποι επέμβασης στη διάδοση των εκκενώσεων δρουν απλώς κατασταλτικά.

Ο Wilkins [31], προκειμένου να εξηγήσει την αιτία για την οποία μια εκκένωση,

έρπουσα στη ρυπασμένη επιφάνεια του μονωτήρα, επεκτείνεται, οδηγώντας σε υπερπήδηση, χρησιμοποιεί ένα κριτήριο, το οποίο στηρίζεται στην άποψη ότι η εκκένωση τείνει να μετακινηθεί προς το σημείο με το μέγιστο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας. Αν x είναι το μήκος της εκκένωσης, επέκταση της εκκένωσης θα συμβεί όταν:

$$\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dx}} > 0 \tag{1.8}$$

όπου P είναι ισχύς που παρέχεται από την τροφοδοσία. Αν η εφαρμοζόμενη τάση είναι σταθερή, τότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$\frac{\mathrm{di}}{\mathrm{dx}} > 0 \tag{1.9}$$

Η σχέση (1.9) βρίσκει εφαρμογή σε μονωτήρες που τροφοδοτούνται με συνεχή τάση. Στην περίπτωση της εναλλασσόμενης τάσης το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η τάση που εφαρμόζεται μπορεί να μηδενιστεί προτού ολοκληρωθεί η υπερπήδηση. Ωστόσο, ο Wilkins εκτιμά ότι υπάρχει αρκετός χρόνος για την εκκένωση να μετακινηθεί, όσο η τάση βρίσκεται στην περιοχή της μέγιστης τιμής της, και, συνεπώς, η εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με τη μέγιστη τιμή της.

Το γενικευμένο κριτήριο για την διάδοση των εκκενώσεων, το οποίο εκφράζεται από τη σχέση (1.8), υποστήριξαν αργότερα οι Ghosh και Chatterjee [32], κατόπιν πειραματικής έρευνας που διεξήγαγαν.

Ο Wilkins χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Σχήματος 1.5 υπολόγισε το κρίσιμο ρεύμα και την κρίσιμη τάση λαμβάνοντας υπόψη και το πλάτος της ρυπασμένης λωρίδας.



Σχήμα 1.5: Μοντέλο υπερπήδησης κατά τον Wilkins [31].

Συγκρίνοντας την κρίσιμη τιμή του ρεύματος με εκείνη που υπολογίστηκε από τους Alston και Zoledziowski [29] διαπιστώνεται ότι, στην περίπτωση που το πλάτος της λωρίδας είναι μικρό, η κρίσιμη τιμή του ρεύματος που προκύπτει και από τα δύο μοντέλα είναι η ίδια. Αντίθετα, η κρίσιμη τιμή για την τάση που προκύπτει από το μοντέλο του Wilkins είναι υψηλότερη. Επιπλέον, ο Wilkins επιχείρησε να επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου του τόσο σε κυλινδρικούς μονωτήρες, όσο και σε μονωτήρες με πολύπλοκο σχήμα.

Εκτός από τα μοντέλα συνεχούς ρεύματος, αναπτύχθηκαν και μοντέλα εναλλασσομένου ρεύματος. Οι Hurley και Limbourn [24] στήριξαν το μοντέλο τους σε μία εμπειρική σχέση, η οποία βασίστηκε σε πειραματικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η ελάχιστη τάση που είναι απαραίτητη για να συντηρήσει ένα τόξο εναλλασσομένου ρεύματος μεταξύ ενός διακένου ακίδας – ακίδας μήκους x σε σειρά με μία αντίσταση R_p δίνεται από τη σχέση:

$$U_{cx} = const. \cdot x^{2/3} \cdot R_{p}^{1/3}$$
(1.10)

Αξιοσημείωτο σε αυτό το μοντέλο είναι το γεγονός ότι, η κρίσιμη τάση υπερπήδησης εξαρτάται τόσο από το μήκος ερπυσμού, όσο και από την ελάχιστη απόσταση σχηματισμού τόξου στον μονωτήρα, οπότε προκύπτει:

$$U_{c} = \text{const.} \cdot \overline{r_{p}}^{1/3} \cdot L_{\alpha}^{2/3} \cdot L^{1/3}$$
 (1.11)

όπου L_α είναι το μήκος του τόξου.

Στη συνέχεια, από το μοντέλο των Claverie και Porcheron [24] προέκυψε η ακόλουθη εμπειρική σχέση, που συνδέει την ελάχιστη τάση επικράτησης του τόξου με το ρεύμα του τόξου:

$$U_{cx} = \frac{800 \cdot x}{\sqrt{i}} \tag{1.12}$$

Οι Rizk και Nguyen [72] προσπάθησαν να προσομοιώσουν κυκλωματικά (Σχήμα 1.6) την αλληλεπίδραση μεταξύ μιας πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος και ενός ρυπασμένου μονωτήρα υψηλής τάσης, κατά τη διάρκεια του σχηματισμού τόξου. Η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη της τη δυναμική του τόξου, την κίνηση του τόξου επί της ρυπασμένης επιφάνειας, τη διηλεκτρική αποκατάσταση και την επαναδημιουργία τόξου, καθώς και τις περισσότερες από τις παραμέτρους που σχετίζονται με το

μονωτήρα (μήκος ερπυσμού, επιφανειακή ειδική αντίσταση, συντελεστής μορφής) και την πηγή (σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος, εκφρασμένη μέσω των στοιχείων R, L και C).



Σχήμα 1.6: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα [72].

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της ελάχιστης τάσης υπερπήδησης, του μέγιστου ρεύματος, στην τελευταία ημιπερίοδο πριν από την υπερπήδηση, και της ταχύτητας των τόξων βρέθηκαν να συμφωνούν με μετρήσεις των αντίστοιχων μεγεθών που διεξήχθησαν από τους ίδιους ερευνητές [72]. Οι παράμετροι της πηγής, και ιδιαίτερα η αυτεπαγωγή, επηρεάζουν τη μορφή του ρεύματος διαρροής και εισάγουν σφάλμα στον προσδιορισμό της τάσης υπερπήδησης. Η (παράλληλη) χωρητικότητα της πηγής επηρεάζει την επαναδημιουργία των τόξων στις ξηρές ζώνες και τη μεταβολή των εκκενώσεων από τη μορφή σπινθήρων σε τόξο, το οποίο συντηρείται.

Οι Rizk και Nguyen [73] επέκτειναν την προηγούμενη δουλειά τους εξετάζοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός μονωτήρα και μίας πηγής υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος. Το μοντέλο προσομοίωσης περιλαμβάνει τόσο τη δυναμική του τόξου, όσο και θερμοδυναμικά φαινόμενα, που αναπτύσσονται στο υγρό στρώμα ρύπανσης.

Οι Khalifa et al. [74] παρουσίασαν ένα απλοποιημένο μοντέλο, παρόμοιο με το προηγούμενο [72, 73], για την υπερπήδηση ομοιόμορφα ρυπασμένων μονωτήρων υπό εναλλασσόμενη τάση (Σχήμα 1.7). Ο μονωτήρας ισοδυναμεί με μία χωρητικότητα C_i παράλληλα με το τόξο (σπινθηριστή), το οποίο είναι σε σειρά με τη ρυπασμένη επιφάνεια αντίστασης R(x), όπου x είναι το μήκος της ξηρής ζώνης. Εάν αντί για ένα μονωτήρα θεωρηθεί αλυσίδα n μονωτήρων, έχοντας μόνο ένα σπινθηριστή, τα υπόλοιπα στοιχεία των μονωτήρων αυτών παριστάνονται από μία αντίσταση (n-1)R_p, όπου R_p είναι η ωμική αντίσταση ενός εκάστου των μονωτήρων της αλυσίδας. Η εμπέδηση της πηγής αποτελείται από ωμική αντίσταση R_s, επαγωγή L_s και χωρητικότητα C_s.


Σχήμα 1.7: Ισοδύναμο μοντέλο ομοιόμορφα ρυπασμένου μονωτήρα [74].

Το παραπάνω μοντέλο έχει εφαρμοστεί από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. [75], δίνοντας αποτελέσματα για τη μεταβολή του ρεύματος διαρροής, κατά μήκος του σχηματιζόμενου τόξου, σε συνάρτηση του μήκους της ξηρής ζώνης και της ρύπανσης του μονωτήρα, όταν μεταβάλλεται η τάση και η εμπέδηση της πηγής του ισοδυνάμου κυκλώματος. Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι η πρόκληση μεγάλων μεταβολών στο ρεύμα διαρροής, λόγω της επίδρασης της ρύπανσης του μονωτήρα, γίνεται εντονότερη, όταν επικρατεί συνδυασμός μεγάλων τιμών ρύπανσης και τάσης της πηγής ή μήκους των ξηρών ζωνών.

Οι Zhicheng και Renyu [33] υποστήριξαν ότι η διαδικασία υπερπήδησης στην περίπτωση συνεχούς ρεύματος είναι διαφορετική από την αντίστοιχη διαδικασία για εναλλασσόμενο ρεύμα, με αποτέλεσμα οι μέθοδοι υπολογισμού της τάσης, στην οποία συμβαίνει υπερπήδηση, να πρέπει να είναι διαφορετικοί για συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα. Προκειμένου να δημιουργήσουν ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της τάσης υπερπήδησης μέτρησαν τα χαρακτηριστικά της τάσης και του ρεύματος σε τόξα τόσο συνεχούς, όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος, τα οποία αναπτύσσονται κατά μήκος της ρυπασμένης επιφάνειας των μονωτήρων, καθώς και την επιφανειακή αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης. Τα αναπτυσσόμενα φαινόμενα και οι διαδικασίες διάδοσης των τόξων στην επιφάνεια ρυπασμένων και υγρών κυλινδρικών ράβδων καταγράφηκαν και ερευνήθηκαν με τη βοήθεια μιας φωτογραφικής μηχανής υψηλής ταχύτητας. Οι προκύπτουσες φωτογραφίες έδειξαν ότι υπάρχει εμφανής διάκριση μεταξύ της υπερπήδησης συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην περίπτωση συνεχούς ρεύματος το τόξο επιμηκύνθηκε σταθερά κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα και μόλις έφθασε το κρίσιμο μήκος, περίπου τα 2/3 του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα, η υπερπήδηση εμφανίστηκε ξαφνικά. Αντίθετα, η διάδοση του τόξου εναλλασσόμενου ρεύματος είναι πιο σύνθετη. Το μήκος και η ένταση του τόξου εναλλασσόμενου ρεύματος αλλάζει πολλές φορές ανά δευτερόλεπτο. Το τόξο αποκτά μεγάλη ένταση μόνο κοντά στη μέγιστη τάση, ενώ κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου χρόνου το τόξο μειώνεται και, στη συνέχεια, επανακτά την έντασή του ακολουθώντας την εναλλασσόμενη τάση. Συγκεκριμένα, οι εν λόγω ερευνητές παρατήρησαν δύο διαφορετικά φαινόμενα σχετικά με τη διάδοση τόξων εναλλασσόμενου ρεύματος. Στη μια περίπτωση το τόξο εξαλείφθηκε κατά τη διέλευση του ρεύματος από το μηδέν και έπειτα ξαναδημιουργήθηκε. Στην άλλη περίπτωση το τόξο δεν εξαλείφθηκε, αλλά αποδυναμώθηκε και μίκρυνε σε μήκος, κατά τη διέλευση του ρεύματος από το μηδέν. Στηριζόμενοι οι Zhicheng και Renyu, αφ' ενός μεν, στα παραπάνω συμπεράσματα και, αφ' ετέρου, στο μοντέλο που αποτελείται από ένα τοπικό τόξο σε σειρά με την αντίσταση του στρώματος ρύπανσης [24, 29, 31], κατέληξαν σε μαθηματικές εκφράσεις για την τιμή του κρίσιμου ρεύματος και της κρίσιμης τάσης τόσο στην περίπτωση συνεχούς ρεύματος, όσο και στην περίπτωση εναλλασσομένου ρεύματος.

Οι Sundararajan και Gorur [34] παρουσίασαν ένα δυναμικό μοντέλο για τον υπολογισμό της υπερπήδησης σε ρυπασμένους μονωτήρες συνεχούς τάσης, βασισμένο στη μελέτη του Obenhaus (Σχήμα 1.8). Το σημαντικό χαρακτηριστικό στοιχείο του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι λαμβάνει υπόψη του τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα στη διαδικασία της υπερπήδησης. Για το λόγο αυτό η αντίσταση του τόξου αλλάζει δυναμικά κατά το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα. Η εγκυρότητα του μοντέλου ελέγχθηκε από τους συγγραφείς, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα άλλων ερευνητών, και αποδείχθηκε ότι δίνει ικανοποιητικές προβλέψεις για μονωτήρες διαφόρων χαρακτηριστικών. Επιπλέον, προσομοίωσαν γεωμετρικών μονωτήρες με ανομοιόμορφη κατανομή ρύπανσης, κατάσταση η οποία προσεγγίζει περισσότερο τις ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. Για την επίτευξη αυτής της μοντελοποίησης, χώρισαν την επιφάνεια του μονωτήρα σε ζώνες και θεώρησαν διαφορετική ποσότητα ρύπανσης σε κάθε ζώνη. Από τη μελέτη αποδείχθηκε ότι, η τάση υπερπήδησης, για ανομοιόμορφη ρύπανση, είναι ελαφρώς υψηλότερη ή σχεδόν ίση με την αντίστοιχη τάση για ομοιόμορφη ρύπανση, υπό την υπόθεση ίδιας μέσης ποσότητας ρύπανσης, εκφραζομένης μέσω της ισοδύναμης πυκνότητας επικάθησης άλατος (Equivalent Salt Deposit Density, ESDD).



Ρ: Στρώμα υγρής ρύπανσης, Q: Ξηρό στρώμα γεφυρωμένο με τόξο
 Σχήμα 1.8: (α) Ρυπασμένος μονωτήρας, στον οποίο έχει αναπτυχθεί τόξο στην ξηρή ζώνη,
 (β) Μοντέλο ρυπασμένου μονωτήρα [34].

Σε επόμενη εργασία τους, οι Sundararajan και Gorur [35], εφάρμοσαν το μοντέλο τους σε μία μεγάλη ποικιλία από μονωτήρες "cap and pin", και μελέτησαν την επίδραση του γεωμετρικού σχήματος του μονωτήρα στην τάση υπερπήδησης υπό συνθήκες ρύπανσης.

Οι Ghosh και Chatterjee [36] πρότειναν ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης V_{ec} και του κρίσιμου ρεύματος I_{ec} υπερπήδησης για μονωτήρες, στους οποίους εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα και σε κλασσικές εξισώσεις, που είχαν προταθεί από άλλους ερευνητές [24, 29, 31]. Κατόπιν μαθηματικής ανάλυσης κατέληξαν στις εξισώσεις:

$$V_{ec} = L \cdot k^{\frac{1}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_{p}^{\frac{n}{n+1}}$$
(1.13)

$$I_{ec} = \left(\frac{k \cdot A}{r_{p}}\right)^{\frac{1}{n+1}}$$
(1.14)

όπου L είναι το μήκος ερπυσμού, A και n είναι οι σταθερές του τόξου, r_p είναι η ανά μονάδα μήκους αντίσταση του στρώματος ρύπανσης και $k = (\sqrt{2}/1, 3)^{-(n+1)}$.

Προκειμένου οι παραπάνω σχέσεις να δίνουν ακριβή αποτελέσματα είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι σταθερές Α και n, ανάλογα με τη χημική σύσταση της ρύπανσης. Για το λόγο αυτό, με τη βοήθεια των πειραματικών αποτελεσμάτων και του μοντέλου, υπολόγισαν τις τιμές των Α, n για διάφορα είδη ρύπανσης. Έτσι, το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να προβλέψει την κρίσιμη τάση και την τάση υπερπήδησης με μέσο απόλυτο σφάλμα μικρότερο από 4%.

Οι Hussain et al. [37], βασισμένοι στο προηγούμενο μοντέλο, ανέπτυξαν ένα νέο μαθηματικό μοντέλο για τον προσδιορισμό του κρίσιμου ρεύματος υπερπήδησης,

τροποποιώντας τον τρόπο μοντελοποίησης της ρύπανσης. Έτσι αντικατέστησαν την αντίσταση R_p με την ισοδύναμη πυκνότητα επικάθησης άλατος (ESDD) και κατέληξαν στην παρακάτω σχέση για το κρίσιμο ρεύμα I_{ec} .

$$I_{ec} = k^{\frac{1}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot ESDD^{\frac{-1}{n+1}} \cdot K_{1}^{\frac{1}{n \cdot (n+1)}}$$
(1.15)

όπου A και n είναι οι σταθερές του τόξου, $\mathbf{k} = (\sqrt{2}/1.3)^{-(n+1)}$ και $\mathbf{K}_1 = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})^{n-1}$, ενώ α, b είναι οι διαστάσεις του επίπεδου μονωτήρα.

Από τη σχέση (1.15) φαίνεται ότι, το κρίσιμο ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με τη χημική σύσταση του ηλεκτρολύτη και το πλάτος του καναλιού, στο οποίο συμβαίνει η εκκένωση. Η επίδραση των παραπάνω παραγόντων, καθώς και η αξιοπιστία του μοντέλου ελέγχθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα και αποδείχθηκε ότι το μοντέλο υπολογίζει την ενεργό (rms) τιμή του κρίσιμου ρεύματος υπερπήδησης με μέσο απόλυτο σφάλμα μικρότερο από 5%.

Οι Farzaneh et al. [38] δημιούργησαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της τάσης υπερπήδησης μονωτήρων, οι οποίοι τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση και είναι τοποθετημένοι στις ψυχρές περιοχές του πλανήτη, στις οποίες σχηματίζεται πάγος στην επιφάνεια του μονωτήρα. Το μοντέλο, που παρουσίασαν, είναι βασισμένο στην κύρια ιδέα του μοντέλου του Obenhaus, αλλά λαμβάνει υπόψη του τη μεταβολή της αγωγιμότητας στην παγωμένη επιφάνεια του μονωτήρα, ως συνάρτηση της αγωγιμότητας του παγωμένου νερού. Για τον υπολογισμό της τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα υπό συνθήκες πάγου, υποστήριζαν ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα δυναμικά αναπτυσσόμενο τόξο με μήκος μεγαλύτερο από 7cm. Έτσι, κατέληξαν ότι η κρίσιμη πεδιακή ένταση E_c (σε V/cm), ως συνάρτηση της μέγιστης I_m (σε A), δίνεται από τη σχέση:

$$E_{c} = 204, 7 \cdot I_{m}^{-0.5607}$$
(1.16)

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Farzaneh et al., υφίστανται συνθήκες επαναδημιουργίας του τόξου σε μονωτήρες καλυμμένους με πάγο, όταν η μέγιστη τιμή της τάσης του τόξου V_m (σε V), το μήκος του τόξου x (σε cm), και η μέγιστη τιμή του ρεύματος διαρροής I_m (σε A), ικανοποιούν την ανισότητα:

$$V_{\rm m} \ge \frac{1118 \cdot x}{I_{\rm m}^{0.5277}} \tag{1.17}$$

Οι Rizk και Rezazada [39] αναθεώρησαν τις παραμέτρους προγενέστερου μοντέλου για τον υπολογισμό της τάσης υπερπήδησης σε μονωτήρες καταπονούμενους από εναλλασσόμενη τάση και υπό θαλάσσια ρύπανση: το νέο μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και την ποσότητα της ρύπανσης, όσο και τις θερμικές ιδιότητες του αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και την ατμοσφαιρική πίεση. Από τη διεξαγωγή πειραμάτων και την εφαρμογή του μοντέλου διαπιστώθηκε ότι, το κρίσιμο ρεύμα επηρεάζεται περισσότερο από την ατμοσφαιρική πίεση, παρά από την κρίσιμη τάση, ενώ το κρίσιμο μήκος του τόζου, το οποίο ανέρχεται περίπου στο 65% του μήκους ερπυσμού, είναι σχεδόν ανεξάρτητο από την ποσότητα της ρύπανσης και την ατμοσφαιρική πίεση.

Οι Dhahbi-Megriche, Beroual και Krähenbühl [40] παρουσίασαν ένα μοντέλο βασισμένο στο ενεργειακό ισοζύγιο, σε ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και στα φυσικά χαρακτηριστικά του τόξου, το οποίο είναι κατάλληλο για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης, του κρίσιμου ρεύματος και του κρίσιμου μήκους του τόξου. Για τη δημιουργία του μοντέλου υπέθεσαν την ύπαρξη ενός επικρατούντος τόξου, ομοιόμορφη κατανομή της ρύπανσης και ομοιόμορφη ύγρανση της επιφάνειας του μονωτήρα. Ο ρυπασμένος μονωτήρας με ένα μερικό τόξο, το οποίο έχει ήδη δημιουργηθεί πάνω από την ξηρή ζώνη (Σχήμα 1.9α), μοντελοποιείται ως ένα τόξο μήκους x και αντίστασης R_{are}, σε σειρά με μια αντίσταση R_p και έναν πυκνωτή C συνδεδεμένο παράλληλα (Σχήμα 1.9β). Το στοιχεία R_p και C εκφράζουν την αντίσταση και τη χωρητικότητα, αντίστοιχα, του ρυπασμένου στρώματος.



Σχήμα 1.9: (α) Επίπεδο μοντέλο μονωτήρα, (β) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα [40]. Επιπλέον, οι Dhahbi-Megriche, Beroual και Krähenbühl, στο ίδιο άρθρο τους [40], πρότειναν ένα κριτήριο για τη διάδοση του τόξου. Αυτό το κριτήριο διαφοροποιεί την περίπτωση, κατά την οποία το τόξο επιμηκύνεται έως ότου εμφανιστεί η συνολική υπερπήδηση, από την περίπτωση εκείνη, κατά την οποία το τόξο σταματά, προτού φθάσει στο απέναντι άκρο του μονωτήρα. Απέδειξαν ότι, το τόξο μπορεί να

επεκταθεί, υπό ορισμένες συνθήκες, ακόμα κι αν το κριτήριο Hampton, που έχει, ήδη, αναφερθεί, δεν ικανοποιείται. Έτσι, το τόξο μπορεί να επεκταθεί, ακόμα κι εάν $E_{\alpha}>E_{p}$ (E_{α} είναι η πεδιακή ένταση κατά μήκος του τόξου και E_{p} είναι η πεδιακή ένταση κατά μήκος του υγρού στρώματος), σε αντίθεση με το κριτήριο Hampton, χωρίς όμως να φθάσει στο απέναντι άκρο του μονωτήρα.

Ένα δυναμικό μοντέλο, το οποίο επιτρέπει την πρόβλεψη εκκενώσεων ικανών να οδηγήσουν σε υπερπήδηση, ανέπτυξαν οι Dhahbi-Megriche και Beroual [41]. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, ο ρυπασμένος μονωτήρας και η διαδικασία διάδοσης του τόξου αναπαριστώνται με μία ισοδύναμη ηλεκτρική διάταξη (Σχήμα 1.10α). Η διαδικασία διάδοσης του τόξου μεταξύ των ηλεκτροδίων εξελίσσεται κατά βήματα. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του τόξου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.10β. Κάθε επιμήκυνση κατά i του τόξου μοντελοποιείται μέσω αντίστασης R_i, επαγωγής L_i και χωρητικότητας C_i συνδεδεμένων σε σειρά μεταξύ τους, οπότε η προσθήκη ενός νέου επιμέρους κυκλώματος (R_i, L_i, C_i) αντιπροσωπεύει τη μερική επέκταση της εκκένωσης. Η εφαρμοζόμενη τάση στο κύκλωμα συμβολίζεται με V_{ap}, το ρεύμα διαρροής με I_f, η αντίσταση, που εκφράζει τη ρύπανση του τήματος ($\ell_f - x$) του μονωτήρα, με R_{pi} και ο αριθμός των επεκτάσεων του τόξου (arc jumps) με Ν. Το κύκλωμα του Σχήματος 1.10γ αντιπροσωπεύει το τόξο που έχει δημιουργηθεί αρχικά, πριν αυτό επεκταθεί.



Σχήμα 1.10: Μοντέλο για την επέκταση των εκκενώσεων κατά τους Dhahbi-Megriche και Beroual [41].

Από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. [26, 42, 76] παρουσιάστηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο για τον υπολογισμό της τάσης υπερπήδησης ενός ρυπασμένου μονωτήρα, το οποίο στηρίζεται, κυρίως, στο μοντέλο του Obenhaus [25] και του Alston [29]. Η κρίσιμη τάση U_c, σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$U_{c} = \frac{A}{n+1} \cdot \left(L + \pi \cdot n \cdot D_{m} \cdot F \cdot K \right) \cdot \left(\pi \cdot A \cdot D_{m} \cdot \sigma_{s} \right)^{-\left(\frac{n}{n+1}\right)}$$
(1.18)

όπου L είναι το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα, D_m είναι η μέγιστη διάμετρος του δισκοειδούς μονωτήρα, F είναι ο συντελεστής μορφής και A, n είναι οι σταθερές του τόξου. Η επιφανειακή αγωγιμότητα σ_s (σε Ω^{-1}) υπολογίζεται από τη σχέση [43]:

$$\sigma_{\rm s} = (369, 05 \cdot C + 0, 42) \cdot 10^{-6} \tag{1.19}$$

όπου C είναι ισοδύναμη πυκνότητα επικάθησης άλατος (ESDD) σε mg/cm².

Ο συντελεστής της αντίστασης του στρώματος ρύπανσης K, στην περίπτωση ενός μονωτήρα "cap and pin", εκφράζεται από τη σχέση:

$$K = 1 + \frac{n+1}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot n} \cdot \ln\left(\frac{L}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot F}\right)$$
(1.20)

όπου R είναι η ακτίνα του ίχνους του τόξου, η όποια δίνεται από τη σχέση [31]:

$$R = \sqrt{\frac{I}{\pi \cdot 1, 45}} = 0,469 \cdot \left(\pi \cdot A \cdot D_{m} \cdot \sigma_{s}\right)^{\frac{1}{2(n+1)}}$$
(1.21)

Στην περίπτωση μονωτήρων "stab type" ο συντελεστής Κ δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{N \cdot (n+1)}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot n} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot L}{\pi \cdot N \cdot R} \right) - \ln \left(\tan \frac{\pi}{2 \cdot (n+1)} \right) \right)$$
(1.22)

όπου Ν είναι ο αριθμός των κυαθίων του μονωτήρα.

Στη συνέχεια το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο επεκτάθηκε, ώστε να καλύπτει περιπτώσεις ανομοιόμορφής ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα [44, 45]. Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο, το μήκος ερπυσμού χωρίζεται σε τμήματα και για κάθε τμήμα θεωρείται σταθερή ποσότητα ρύπανσης. Τελικά, υπολογίζεται μία μέση τιμή της ισοδύναμης πυκνότητας επικάθησης άλατος (ESDD), η οποία υπεισέρχεται στη σχέση (1.18) προκειμένου να υπολογιστεί η κρίσιμη τάση ενός ανομοιόμορφα ρυπασμένου μονωτήρα. Εξαιτίας της καθοριστικής επίδρασης της ρύπανσης στο φαινόμενο της υπερπήδησης, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου Πατρών [77] έχει αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης της συμπεριφοράς της ρύπανσης σε μονωτήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε ελληνικά νησιά. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη τις καιρικές συνθήκες, που επικρατούν σε κάθε περιοχή, και, κυρίως, τις βροχοπτώσεις, οι οποίες συμβάλλουν στον καθαρισμό των μονωτήρων και, συνεπώς, επηρεάζουν τη συμπεριφορά της ρύπανσης. Μέσω του μοντέλου αυτού, υπολογίζεται ένας μηνιαίος συντελεστής καθαρισμού, ο οποίος ορίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα των βροχοπτώσεων των τελευταίων μηνών έως το μήνα αναφοράς, και στη συνέχεια ο συντελεστής αυτός συσχετίζεται με τον αριθμό των, λόγω του φαινομένου της υπερπήδησης σε μονωτήρες, αστοχιών του δικτύου υψηλής τάσης. Το μοντέλο εφαρμόστηκε ικανοποιητικά σε τέσσερα ελληνικά νησιά (Σύρο, Πάρο, Νάξο, Σαντορίνη), έχοντας ως δεδομένα καταγεγραμμένα στοιχεία αστοχιών λόγω υπερπήδησης μονωτήρων και βροχοπτώσεων χρονικού ορίζοντα άνω των επτά ετών. Σύμφωνα με τους ερευνητές, που πρότειναν το συγκεκριμένο μοντέλο, αυτό μπορεί να εφαρμοστεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της ρύπανσης των μονωτήρων σε νησιά, όπου επικρατούν παρόμοιες καιρικές συνθήκες με αυτές των νησιών, στα οποία εφαρμόστηκε.

Ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό των επιφανειακών τόξων και των μερικών εκκενώσεων σε ρυπασμένους μονωτήρες αναπτύχθηκε από τους Tsarabaris et. al. [78]. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο (Σχήμα 1.11), η εξέλιξη του τόξου προσομοιώνεται με μία αντίσταση R(t), η οποία έχει μικρή τιμή κατά τη διάρκεια του τόξου και πρακτικά βραχυκυκλώνει την αντίσταση ξηρής ζώνης. Όταν δεν εμφανίζεται τόξο, η αντίσταση R(t) πρέπει να είναι μεγάλη, έτσι ώστε η επίδρασή της στο ισοδύναμο κύκλωμα να είναι αμελητέα.



Σχήμα 1.11: Μοντέλο για τη μελέτη των επιφανειακών τόξων και των μερικών εκκενώσεων [78].

1.5 Δοκιμές ρύπανσης

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα που απασχολούν τους κατασκευαστές των μονωτήρων είναι ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς τους, καθώς και η βελτιστοποίηση της απόδοσης τους, υπό συνθήκες ρύπανσης. Για το λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με δοκιμές σε μονωτήρες υπό συνθήκες ρύπανσης. Οι δοκιμές αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: δοκιμές με φυσική ρύπανση και δοκιμές με τεχνητή ρύπανση.

1.5.1 Δοκιμές με φυσική ρύπανση

Σε διάφορες περιοχές, επιβαρυμένες με ρύπανση έχουν κατασκευαστεί σταθμοί δοκιμών, στους οποίους πραγματοποιούνται δοκιμές, είτε υπό τάση, είτε χωρίς, σε μονωτήρες αφήνοντάς τους να ρυπανθούν φυσικά επί σειρά ετών. Οι δοκιμές αυτές είναι πολύ χρήσιμες, καθώς λαμβάνουν υπόψη τους τις φυσικές συνθήκες ρύπανσης, αλλά τα αποτελέσματά τους δίνουν πληροφορίες ιδιαίτερα χρήσιμες, αλλά, κυρίως, για την περιοχή στην οποία διεξάγονται.

Στην Ιαπωνία είχαν κατασκευαστεί τρεις σταθμοί δοκιμών [49], στους οποίους διεξήγαγαν πειράματα, τόσο υπό τάση, όσο χωρίς τάση, για χρονικό διάστημα πέντε ετών σε αλυσίδες μονωτήρων πορσελάνης. Οι ρυπαντές συλλέγονταν από την πάνω και την κάτω επιφάνεια κάθε μονωτήρα ξεχωριστά χρησιμοποιώντας μία βούρτσα και αποσταγμένο νερό. Ακολουθούσε η μέτρηση της ισοδύναμης πυκνότητας επικάθησης άλατος, της πυκνότητας επικάθησης μη διαλυτών ρυπαντών, των κατιόντων και το βάρος των συστατικών των μη διαλυτών ρυπαντών.

Παρόμοια πειράματα αναφορικά με φυσική ρύπανση διεξήγαγαν οι Akbar και Zedan [50, 51], οι οποίοι μέτρησαν την ισοδύναμη πυκνότητα επικάθησης άλατος σε μονωτήρες πορσελάνης διαφόρων τύπων. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε παράκτια περιοχή της Σαουδικής Αραβίας και εξετάστηκαν μονωτήρες εντός και εκτός λειτουργίας.

Στην Κίνα (Σαγκάη) οι Lin et al. [52] διεξήγαγαν παρόμοια πειράματα, σε δύο αντιπροσωπευτικές περιοχές με βιομηχανική ρύπανση. Συγκεκριμένα, τοποθέτησαν επτά τύπους μονωτήρων πορσελάνης επί ένα χρόνο χωρίς να εφαρμόσουν τάση επ'

αυτών και μετρούσαν περιοδικά την ισοδύναμη πυκνότητα επικάθησης άλατος. Με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων Χ, διεξήγαγαν χημική ανάλυση των ρυπαντών, από την οποία προέκυψε ότι τα συστατικά τους περιείχαν Ca, SO₄, Na, Mg, Zn, K, Cl και NO₃. Επιπλέον, εγκατέστησαν τέσσερις (4) αντιπροσωπευτικούς τύπους μονωτήρων πορσελάνης σε εν λειτουργία γραμμή μεταφοράς των 220kV, για ένα χρόνο, και στη συνέχεια τους αποξήλωσαν, προκειμένου να τους υποβάλουν σε δοκιμές αντοχής σε θάλαμο τεχνητής ρύπανσης. Παρατήρησαν ότι, αν προστεθεί μία μικρή ποσότητα αλατιού στους, ήδη, ρυπασμένους μονωτήρες, μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η τάση υπερπήδησης, συνεπώς απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή αν η περιοχή είναι ευάλωτη σε ισχυρούς ανέμους προερχόμενους από τη θάλασσα.

Στο Μεξικό οι Ramos et al. [53] διεξήγαγαν πειράματα μετρώντας τη ρύπανση σε επτά περιοχές του Μεξικού μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονταν παράκτιες, αγροτικές και βιομηχανικές περιοχές ή συνδυασμός αυτών. Τα μετρούμενα μεγέθη ήταν η ισοδύναμη πυκνότητα επικάθησης άλατος, η πυκνότητα των μη διαλυτών επικαθήσεων (Non Soluble Deposit Density, NSDD) και η αγωγιμότητα. Επιπλέον, πραγματοποίησαν χημική ανάλυση της ρύπανσης, προσδιορίζοντας τα συστατικά της.

Οι Richards et al. [54] ανέπτυξαν μια πειραματική μεθοδολογία για να προσδιορίσουν την ηλεκτρική συμπεριφορά μονωτήρων όταν εκτίθενται σε φυσική ύγρανση, είτε λόγω υγρασίας, είτε λόγω βροχής. Από τα πειράματα που διεξήγαγαν παρατήρησαν ότι, σε περίπτωση χαμηλής υγρασίας, όταν οι μονωτήρες είναι ξηροί, η ηλεκτρική συμπεριφορά των ρυπασμένων μονωτήρων είναι όμοια με αυτή των καθαρών μονωτήρων και χαρακτηρίζεται από ένα μικρό χωρητικό ρεύμα διαρροής. Στη συνέχεια, καθώς οι μονωτήρες γίνονται υγροί από την έκθεσή τους σε περιβάλλον με υψηλή σχετική υγρασία, οι ρυπασμένωι μονωτήρες παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση στην ηλεκτρική συμπεριφορά τους σε σχέση με τους ξηρούς μονωτήρες. Αυτή η απόκλιση χαρακτηρίζεται από την προσθήκη ενός ωμικού στοιχείου μόνιμης κατάστασης και ενός στοιχείου, που χαρακτηρίζει τη μεταβατική συμπεριφορά του ρεύματος διαρροής. Αποδείχτηκε ότι, κυρίως, το μεταβατικό στοιχείο διαφοροποιεί την ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων υπό συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας από αυτή των καθαρών μονωτήρων τους Στην περίπτωση έκθεσης των μονωτήρων σε βροχή, η ηλεκτρική συμπεριφορά τους, προφανώς,

αποκλίνει από την αντίστοιχη των στεγνών μονωτήρων και η απόκλιση αυτή ισοδυναμεί με την προσθήκη ενός μεταβλητού ωμικού στοιχείου και ενός στοιχείου, που χαρακτηρίζει τη μεταβατική συμπεριφορά του ρεύματος διαρροής.

Οι Vosloo και Holtzhausen [55] παρουσίασαν πειράματα υπό φυσική ρύπανση μονωτήρων ενιαίου σχήματος, αλλά κατασκευασμένων από διαφορετικά υλικά, τα οποία διήρκεσαν ένα έτος. Η εναπόθεση ρύπανσης ελέγχθηκε στους υπό εξέταση μονωτήρες και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη εναπόθεση σε μονωτήρες που βρίσκονταν εκτός τάσης. Τα πειράματα διεξήχθησαν στη Νότια Αφρική, σε περιοχή που συνδυάζει θαλάσσια (Ατλαντικός Ωκεανός), βιομηχανική (καμένο πετρέλαιο, άνθρακας, βαριά σωματίδια καύσιμου λαδιού, εκπομπές διυλιστηρίου κ.α.) και αγροτική (περιστασιακές πυρκαγιές, ψεκασμός φυτειών, θερισμός κ.α.) ρύπανση. Διαπιστώθηκε ότι, η ανάπτυξη ισχυρών ανέμων και η κατεύθυνσή τους επηρεάζουν σημαντικά την επικάθηση ρύπανσης. Παρατηρήθηκε ότι στους μονωτήρες που δεν βρίσκονταν υπό τάση, αν και οι μετρήσεις αγωγιμότητας στην επιφάνεια των μονωτήρων έδειξαν ότι, η αγωγιμότητα της ρύπανσης στους μονωτήρες που δεν βρίσκονταν υπό τάση ήταν μικρότερη σε σχέση με την επιφανειακή αγωγιμότητα των μονωτήρων που βρίσκονταν υπό τάση.

Οι Stefanakis et al. [56] δημοσίευσαν μία έρευνα με τις επιπτώσεις της ρύπανσης στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης και τις προσπάθειες που έχουν γίνει προκειμένου να βελτιωθεί τούτο τα τελευταία εικοσιπέντε χρόνια. Αναλύονται τα γεωγραφικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά του νησιού, τα οποία σχετίζονται με το πρόβλημα της ρύπανσης, καθώς και τα χαρακτηριστικά του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Προκειμένου να διερευνηθεί το φαινόμενο της ρύπανσης στο σύστημα της Κρήτης, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού σε συνεργασία με το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου Πατρών μέτρησαν τις μετεωρολογικές παραμέτρους, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι κρίσιμες χρονικές περίοδοι, το ρεύμα διαρροής και η ισοδύναμη ποσότητα εναπόθεσης άλατος στην επιφάνεια των μονωτήρων.

1.5.2 Δοκιμές με τεχνητή ρύπανση

Η πραγματοποίηση πειραμάτων υπό φυσική ρύπανση απαιτεί πολύ χρόνο, ο οποίος

ανέρχεται σε έτη, και, επιπλέον, σε περιπτώσεις τέτοιου είδους δοκιμών σε δίκτυα εν λειτουργία είναι απαραίτητη η εναρμόνιση των απαιτήσεων του δικτύου με εκείνες των πειραμάτων. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα δοκιμών υπό φυσική ρύπανση παρουσιάζουν, κυρίως, τοπικό ενδιαφέρον, λόγω της διαφοροποίησης των συνθηκών ρύπανσης από περιοχή σε περιοχή, ενώ δύσκολα μπορούν να γενικευτούν. Για τους παραπάνω λόγους, έχουν επινοηθεί διάφορες τεχνικές δοκιμών, ώστε να προσομοιώνονται οι φυσικές συνθήκες, που προκαλούν την υπερπήδηση λόγω ρύπανσης. Καμία, όμως, μεμονωμένη διαδικασία δοκιμής δεν μπορεί να προσομοιώσει με ακρίβεια όλες τις σημαντικές μεταβολές των φυσικών συνθηκών που μπορούν να οδηγήσουν στην υπερπήδηση. Πολλές μέθοδοι επινοήθηκαν σε μία προσπάθεια βελτίωσης των μειονεκτημάτων άλλων δοκιμών, με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια των ετών να υπάρξει μεγάλη εξέλιξη. Βέβαια, είναι εξαιρετικά δύσκολο να αξιολογηθεί κάποια διαδικασία δοκιμής ως η βέλτιστη, καθώς σε πολλές χώρες ειδικές συνθήκες ρύπανσης ή ειδικές απαιτήσεις υπαγορεύουν τη χρήση συγκεκριμένων διαδικασιών δοκιμής που είναι κατάλληλες για την προσομοίωση των συνθηκών στις συγκεκριμένες περιοχές.

Ο McIlhagger [57] διεξήγαγε πειράματα τοποθετώντας το μονωτήρα μέσα σε θάλαμο ρυθμιζόμενων συνθηκών υγρασίας. Με τη διάταξη που χρησιμοποίησε μέτρησε ταυτόχρονα τη θερμοκρασία και την τάση σε μονωτήρα πορσελάνης, δίνοντας ποσοτικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά των μονωτήρων πολύπλοκου σχήματος, οι οποίοι λειτουργούν υπό δυσμενείς συνθήκες.

Επίσης, την ίδια περίοδο ξεκίνησαν οι διαδικασίες για την τυποποίηση δοκιμών τεχνητής ρύπανσης, οι οποίες κατέληξαν στην έκδοση του Προτύπου IEC 507 το 1975. Οι τυποποιημένες μέθοδοι σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 507 (εκδόθηκε το 1975 και αναθεωρήθηκε το 1991) είναι η μέθοδος αλατομίχλης (salt fog method), η οποία χρησιμοποιεί ως ρυπαντή NaCl και νερό, και οι μέθοδοι στερεού στρώματος (solid layer methods), οι οποίες χρησιμοποιούν επιπλέον πυριτικό άλευρο, καολίνη ή μη διαλυτό ρυπαντή (tonoko), συστάσεως 60-70% SiO₂, 10-20% Al₂O₃ και 4-8% Fe₂O₃ [46].

Αργότερα μία ομάδα εργασίας της CIGRE [58] δημοσίευσε μία ανασκόπηση των δοκιμών υπό τεχνητή ρύπανση. Εκτός από πολύ σπάνιες περιπτώσεις, η υπερπήδηση ενός μονωτήρα λόγω ρύπανσης απαιτεί την παρουσία στην επιφάνειά του διαλυτών στερεών και νερού. Συνήθως ως διαλυτό στερεό χρησιμοποιείται το κοινό άλας (NaCl), ενώ από αρκετές μεθόδους προβλέπεται και η προσθήκη αδιάλυτων στερεών στην επιφάνεια των μονωτήρων. Οι φυσικές εναποθέσεις ρύπανσης περιλαμβάνουν μια σειρά αλάτων, όπως MgCl₂, το οποίο εμπεριέχεται σε αξιόλογες ποσότητες στο θαλασσινό νερό και είναι πιο υγροσκοπικό από το NaCl. Άλλα ενεργά συστατικά που ανιχνεύονται συχνά - CaCl₂ και CaSO₄ - συμπεριφέρονται παρόμοια με το NaCl στο νερό. Επίσης, η ποσότητα αδιάλυτων στερεών έχει κάποια επιρροή στην απόδοση των μονωτήρων. Όλα τα υλικά αυτά είναι, βασικά, παρόμοια με τα αδιάλυτα συστατικά που συναντώνται στη φυσική ρύπανση.

Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σε συνεργασία με τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, διεξήγαγε πειράματα σε μονωτήρες πορσελάνης εφαρμόζοντας τις μεθόδους: στερεού στρώματος – ψυχρής ομίχλης (solid layer – cool fog method) και αλατομίχλης (salt fog method) [59]. Με βάση τα πειράματα αποδείχθηκε ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί ένας πρώτος προσδιορισμός της μέγιστης τάσης αντοχής για συγκεκριμένο κάθε φορά τύπο μονωτήρα, π.χ. κοινό "cap and pin", και για δεδομένη ρύπανση, με τη γνώση μόνο του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα.

Οι Gorur et al. [60 – 62] διεξήγαγαν μία σειρά πειραμάτων σε θάλαμο ρυθμιζόμενων συνθηκών ρύπανσης και εξέτασαν τη συμπεριφορά πολυμερών μονωτήρων, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικά υλικά, όταν υποβάλλονται είτε σε εναλλασσόμενη, είτε σε συνεχή τάση. Οι Kim, Cherney και Hackam [17, 63] διεξήγαγαν, επίσης, πειράματα σε θάλαμο ρυθμιζόμενων συνθηκών ρύπανσης με τη μέθοδο της αλατομίχλης μελετώντας μονωτήρες επικαλυμμένους με σιλικονούχο καουτσούκ, βουλκανισμένο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (room temperature vulcanizing silicone rubber, RTV). Η έρευνά τους στράφηκε γύρω από την απώλεια και την επανάκτηση της υδροφοβικότητας του πολυμερούς καλύμματος.

Οι Engelbrecht et al. [64] διεξήγαγαν πειράματα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αλατομίχλης (salt fog method) και με τη μέθοδο ξηρού στρώματος άλατος (dry-saltlayer method), με στόχο να συγκρίνουν τις δύο μεθόδους και να καταλήξουν στην πιο αξιόπιστη μέθοδο για προσομοίωση συνθηκών θαλάσσιας ρύπανσης. Ως δοκίμιο χρησιμοποίησαν έναν πολυμερή μονωτήρα διέλευσης 800kV. Από άλλους ερευνητές [58] έχει αποδειχθεί ότι, η μέθοδος αλατομίχλης δίνει έγκυρα αποτελέσματα για τους μονωτήρες γυαλιού και πορσελάνης, που είναι τοποθετημένοι σε παράκτιες περιοχές. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων των Engelbrecht et al. [64] έδειξαν ότι, η μέθοδος της αλατομίχλης δεν είναι το ίδιο αξιόπιστη σε πολυμερείς μονωτήρες παράκτιων περιοχών. Συγκεκριμένα, η μέθοδος της αλατομίχλης μπορεί να υπερεκτιμήσει τη συμπεριφορά στην υπερπήδηση ενός υδρόφοβου μονωτήρα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες ρύπανσης. Συνεπώς, οι μονωτήρες που επιλέγονται με βάση αποτελέσματα αυτής μεθόδου είναι, $\tau \alpha$ της ενδεχομένως, υποδιαστασιολογημένοι. Επίσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, η εφαρμογή ενός ξηρού στρώματος άλατος σε πολυμερείς μονωτήρες οδηγεί σε υψηλότερες μέγιστες τιμές του ρεύματος διαρροής και, συνεπώς, σε μεγαλύτερο κίνδυνο υπερπήδησης, σε σύγκριση με τη δοκιμή της αλατομίχλης για συγκρίσιμη βαρύτητα ρύπανσης.

Οι Engelbrecht et al., σε άλλη δημοσίευσή τους [65], του ιδίου έτους με την [64], στηριζόμενοι στα προηγούμενα συμπεράσματα για την αζιοπιστία της μεθόδου ξηρού στρώματος άλατος για περιοχές με θαλάσσια ρύπανση, εφάρμοσαν τη συγκεκριμένη μέθοδο σε τρεις τύπους μονωτήρων πορσελάνης και σε ένα τύπο πολυμερούς μονωτήρα. Στο Σχήμα 1.12 παρουσιάζεται η κάτοψη του θαλάμου κυλινδρικού σχήματος, που χρησιμοποίησαν για την εναπόθεση της ρύπανσης και την ύγρανση των μονωτήρων. Συνέκριναν, επίσης, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που διεξήγαγαν, με αποτελέσματα άλλων ερευνητών, που προέκυψαν από δοκιμές υπό φυσική ρύπανση σε παράκτιες περιοχές. Τα αποτελέσματα της εργαστηριακής δοκιμής δεν βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών υπό φυσική ρύπανση. Μια πιθανή εξήγηση γι' αυτή τη διαφορά είναι ότι, στο εργαστήριο η διαδικασία ρύπανσης των μονωτήρων δεν προσομοιώνει, απόλυτα, τα αποτελέσματα της μακροπρόθεσμης έκθεσης του μονωτήρα υπό φυσική ρύπανση.





Οι κλιματολογικές συνθήκες σε ορισμένες περιοχές απαιτούν διαφοροποίηση της πειραματικής διαδικασίας: οι Hamza, Abdelgawad και Arafa [66] μελέτησαν τη συμπεριφορά των μονωτήρων που είναι εγκατεστημένοι κοντά σε έρημο και πλήττονται συχνά από καταιγίδες άμμου. Η πειραματική διάταξη περιελάμβανε τουρμπίνες για να μεταφέρουν την άμμο στον αέρα. Επειδή στην πραγματικότητα η άμμος καθώς περνάει κοντά από το πεδίο που δημιουργούν οι γραμμές μεταφοράς φορτίζεται ηλεκτρικά, προσομοίωσαν το φαινόμενο αυτό τοποθετώντας σε κάποια απόσταση από το μονωτήρα ένα πλέγμα υπό τάση. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατήρησαν ότι η επικάθηση άμμου στην επιφάνεια του μονωτήρα μειώνει την τάση υπερπήδησης.

Πειράματα σε μονωτήρες πορσελάνης υπό συνθήκες ρύπανσης πραγματοποιήθηκαν από τους Tsarabaris et al. [67], με εφαρμογή εναλλασσόμενης τάσης. Από τα πειράματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, οι μερικές εκκενώσεις λαμβάνουν χώρα, κυρίως, κοντά στη μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Μελέτησαν πειραματικά [79] το ρεύμα διαρροής, σε ρυπασμένους μονωτήρες υψηλής τάσης, μέσω των χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος – τάσης, οι οποίες σχεδιάστηκαν για έναν κύκλο της εφαρμοζόμενης τάσης, αποδεικνύοντας ότι η απόκριση της εφαρμοζόμενης τάσης (ρεύμα διαρροής) είναι αρχικά γραμμική, στη συνέχεια παίρνει τη μορφή των παλμών και μετά γίνεται πάλι γραμμική.

Το ρεύμα διαρροής έχει μετρηθεί και από άλλους ερευνητές [80, 81], προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των μονωτήρων. Το πλεονέκτημα της μέτρησης αυτής είναι ότι μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την εξέλιξη της επιφανειακής δραστηριότητας στο μονωτήρα μέχρι να συμβεί υπερπήδηση. Οι έρευνες των Siderakis et al. απέδειξαν ότι η συμπεριφορά των μονωτήρων πορσελάνης υπό συνθήκες ρύπανσης μπορεί να βελτιωθεί, εάν η επιφάνειά τους επικαλυφθεί με ένα περίβλημα από σιλικονούχο καουτσούκ βουλκανισμένο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

1.6 Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου

Η γνώση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την εμβάθυνση στην κατανόηση της συμπεριφοράς του φαινομένου της υπερπήδησης

των μονωτήρων. Για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία έχουν γίνει προσπάθειες [68, 69], οι οποίες εστιάζονται στη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, μέσω κατάλληλων αισθητήρων (probes). Η εξέλιξη της τεχνολογίας των αισθητήρων αυτών έχει συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση του τρόπου μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου. Παρ' όλα αυτά, η επίδραση του ίδιου του μετρητικού εξοπλισμού στις μετρήσεις του πεδίου, ειδικά όταν ο εξοπλισμός είναι τοποθετημένος κοντά στα μεταλλικά άκρα του μονωτήρα, είναι απαραίτητο να εξετάζεται με προσοχή [69].

Ο Hörnfeldt [68] πραγματοποίησε μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου σε μονωτήρες συνεχούς ρεύματος, χρησιμοποιώντας ένα σφαιρικό περιστρεφόμενο αισθητήρα πεδιομέτρου (Σχήμα 1.13), ο οποίος αποτελείται από δύο μεταλλικά περιστρεφόμενα ημισφαίρια χωρισμένα μέσω ενός μικρού διηλεκτρικού διακένου. Η περιστροφική κίνηση εξασφαλίζεται μέσω ενός μικρού αεροστροβίλου. Ο αισθητήρας του Σχήματος 1.13 δεν είναι ευαίσθητος σε συνιστώσες του πεδίου κατά μήκος του άξονα περιστροφής του. Για το λόγο αυτό το πεδίο πρέπει να είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του πεδίου στηρίζονται στην παρακάτω βασική αρχή: Αν μία μεταλλική σφαίρα ακτίνας R βρεθεί σε ένα εξωτερικό ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο \vec{E}_{o} (Σχήμα 1.14α), τότε η πυκνότητα του επαγόμενου φορτίου σ μεταβάλλεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma(\theta) = 3 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot \cos\theta \tag{1.23}$$

Το φορτίο Q σε κάθε ημισφαίριο είναι:

$$Q = 3 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{o} \cdot R^{2} \cdot E_{o} \tag{1.24}$$

Αν η εμπέδηση μεταξύ των ημισφαιρίων, τα οποία διαχωρίζονται με ένα διάκενο $d \ll R$, είναι μικρή, ολόκληρη η σφαίρα αποτελεί μία ισοδυναμική επιφάνεια. Όταν ο αισθητήρας περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό γύρω από άξονα κάθετο στο $\overrightarrow{E_o}$, τότε φορτίο ίσο με 2Q μεταφέρεται μεταξύ των ημισφαιρίων δημιουργώντας ένα εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο είναι γραμμική συνάρτηση του πλάτους του περιβάλλοντος πεδίου (E_o).

Αν η εμπέδηση μεταξύ των ημισφαιρίων είναι μεγάλη, τότε μία τάση V_g , ανεξάρτητη της εμπέδησης, εμφανίζεται μεταξύ των ημισφαιρίων, όταν ο αισθητήρας περιστρέφεται εντός του πεδίου. Η τάση V_g λαμβάνει μέγιστη τιμή όταν

το διάκενο μεταξύ των ημισφαιρίων είναι κάθετο στο πεδίο $\overrightarrow{E_o}$ (Σχήμα 1.14β). Για μικρά διάκενα d, το φορτίο είναι ίσο με Q (σχέση 1.24) και το πεδίο στο διάκενο $\overrightarrow{E_g}$, όταν το διάκενο είναι κάθετο στο πεδίο $\overrightarrow{E_o}$, παίρνει την τιμή:

$$\overrightarrow{\mathrm{E}_{\mathrm{g}}} = 3 \cdot \overrightarrow{\mathrm{E}_{\mathrm{o}}} \tag{1.25}$$

Η τάση $V_{\rm g}$ μεταξύ των ημισφαιρίων είναι:

$$V_{g} = 3 \cdot E_{o} \cdot d \tag{1.26}$$

Όταν ο αισθητήρας περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό γύρω από άξονα κάθετο στο $\overrightarrow{E_o}$, η τάση V_g μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη και μπορεί να μετρηθεί. Η τάση αυτή είναι ημιτονοειδής και ανάλογη του πεδίου $\overrightarrow{E_o}$, ακόμα και όταν τα ημισφαίρια είναι κελύφη.



Α: μεταλλικά ημισφαίρια
Β: διηλεκτρικός κυλινδρικός άξονας
C: αεροστρόβιλος
D: διηλεκτρικός σωλήνας







Σχήμα 1.14: α) Επαγόμενο φορτίο σε μεταλλική σφαίρα,

β) φορτίο δύο στερεών ημισφαιρίων σε εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο [68]. Βασιζόμενος στην προαναφερθείσα μέθοδο μέτρησης του πεδίου, ο Hörnfeldt [68] χρησιμοποίησε ένα ηλεκτρο-οπτικό βολτόμετρο, για να προσδιορίσει την επαγόμενη τάση μεταξύ των δύο ημισφαιρίων ενός περιστρεφόμενου αισθητήρα, προκειμένου να μετρήσει το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος ενός μονωτήρα διέλευσης και ενός μονωτήρα στήριξης. Το πεδίο μετρήθηκε στην περίπτωση που οι μονωτήρες είναι ξηροί και στην περίπτωση που έχουν υποστεί ύγρανση. Στο Σχήμα 1.15α παρουσιάζονται μετρήσεις κατά μήκος μονωτήρα διέλευσης, με εφαρμογή τάσης 600kV υπό ξηρές συνθήκες και υπό συνθήκες υγρασίας, ενώ στο Σχήμα 1.15β παρουσιάζονται μετρήσεις κατά μήκος μονωτήρα στήριξης, με εφαρμογή τάσης 129kV υπό ξηρές συνθήκες. Η κάθετη και η ακτινική συνιστώσα του πεδίου παρουσιάζονται ξεχωριστά στο Σχήμα 1.15β.



β) μετρήσεις πεδίου σε μονωτήρα στήριξης [68].
Στις ανωτέρω μετρήσεις του πεδίου φαίνεται ότι, στους υπό εξέταση μονωτήρες, το

ηλεκτρικό πεδίο είναι της τάξεως των 100kV/m, για επιβολή τάσης ύψους 600kV, όταν αυτοί είναι ξηροί, ενώ υπό συνθήκες βροχής αυξάνεται σημαντικά. Η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να ελεγχθεί όταν η αξονική και η ακτινική συνιστώσα του πεδίου μετρηθούν ξεχωριστά. Σε αυτή την περίπτωση η τάση μπορεί να εκτιμηθεί, μέσω της ολοκλήρωσης κατά μήκος μιας διαδρομής μεταξύ των ηλεκτροδίων, και να συγκριθεί με την εφαρμοζόμενη τάση. Σημειώνεται ότι, δεν έχει νόημα, η διάταξη μέτρησης να προσδιορίζει το ηλεκτρικό πεδίο με μεγαλύτερη ακρίβεια από την αβεβαιότητα, που οφείλεται στον προσδιορισμό της θέσης μέτρησης του πεδίου. Επιπλέον, με χρήση του ως άνω συστήματος μέτρησης πεδίου, είναι δυνατό να μετρηθεί και κατανομή πεδίου εναλλασσόμενου ρεύματος, χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Στην περίπτωση αυτή, ο αισθητήρας του πεδιομέτρου δεν πρέπει να περιστρέφεται.

Ο Hartings [70] διεξήγαγε μετρήσεις πεδίου, χρησιμοποιώντας παρόμοια μετρητική διάταξη με τον Hörnfeldt [68]. Ο αισθητήρας που χρησιμοποίησε ήταν σφαιρικός και μπορούσε να μετράει το πεδίο σε δύο άξονες, ήτοι την αξονική και την ακτινική συνιστώσα του πεδίου. Ως δοκίμιο χρησιμοποίησε ένα μονωτήρα των 85kV, τον οποίο υπέβαλε σε εναλλασσόμενη τάση 50kV, 85 kV, 127kV και 170 kV, βιομηχανικής συχνότητας (50Hz). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο υπό ξηρές συνθήκες, όσο και υπό συνθήκες υγρασίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.16. Στα πειράματα που διεξήγαγε ο Hartings [70] υπό τάση 50kV δεν παρατηρήθηκε φαινόμενο Corona. Αντίθετα, για μεγαλύτερες τιμές

της τάσης ήταν εμφανείς οι εκκενώσεις στην περιοχή επαφής του ακροδέκτη υψηλής τάσης με το μονωτικό υλικό του μονωτήρα. Επιπλέον, όταν ο αισθητήρας του πεδιομέτρου βρισκόταν κοντά στην περιοχή αυτή, παρατηρήθηκε αύξηση στο φαινόμενο Corona. Οι εκκενώσεις παρατηρήθηκαν οπτικά, μέσω φωτογραφιών υπεριώδους φάσματος.



Σχήμα 1.16: α) Αξονική και β) ακτινική συνιστώσα του πεδίου υπό ξηρές συνθήκες, γ) αξονική και δ) ακτινική συνιστώσα του πεδίου υπό συνθήκες βροχής [70].

Εκτός από τις μετρήσεις πεδίου, ο Hartings [70] επιχείρησε προσομοίωση του πεδίου, με τη βοήθεια ενός δισδιάστατου προγράμματος, βασισμένου στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τρία διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του πεδίου: το πρώτο μοντέλο (απλό) περιλαμβάνει μόνο τον μονωτήρα (Σχήμα 1.17α), στο δεύτερο μοντέλο (πλήρες) το ηλεκτρόδιο της υψηλής τάσης έχει επεκταθεί προς περιοχή όπου εμφανίστηκε φαινόμενο Corona, την συμπεριλαμβανομένων και των εκκενώσεων, λόγω της επίδρασης του αισθητήρα του πεδιομέτρου (Σχήμα 1.17β), ενώ το τρίτο μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη του τις εκκενώσεις που οφείλονται στη μετρητική διάταξη (περιλαμβάνει μόνο τη χαμηλότερη προέκταση του ηλεκτροδίου που φαίνεται στο Σχήμα 1.17β). Η βασική γεωμετρία των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι οριακές συνθήκες παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.17γ.





Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα. Στο Σχήμα 1.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, πειραματικά και προσομοιώσεων, για την αξονική και την ακτινική συνιστώσα του πεδίου, με εφαρμογή τάσης 127kV.



(β)

Σχήμα 1.18: α) Αξονική και β) ακτινική συνιστώσα του πεδίου, με εφαρμογή τάσης 127kV [70].

Συνεχίζοντας την πειραματική του έρευνα, ο Hartings [18] διεξήγαγε μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου σε υδρόφιλο και υδρόφοβο μονωτήρα, υπό διαφορετικές συνθήκες υγρασίας. Προκειμένου ο υπό εξέταση μονωτήρας πορσελάνης να αποκτήσει υδρόφιλη επιφάνεια, πλενότανε προσεκτικά με ισχυρό καθαριστικό πριν από κάθε πείραμα. Η υδροφοβικότητα εξασφαλίστηκε, όταν ο μονωτήρας καλύφθηκε με επίστρωση σιλικονούχου καουτσούκ βουλκανισμένου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (room temperature vulcanizing silicone rubber, RTV). Οι συνθήκες βροχής επιτεύχθηκαν μέσω συστήματος ψεκασμού παροχής 0.4mm/min ή 1.6mm/min, ενώ η αγωγιμότητα του νερού ήταν είτε 50µS/cm, είτε 250µS/cm. Μερικά από τα αποτελέσµατα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.19.

(α)



ζηρές συνθήκες, (2) 50μS/cm, 0,4mm/min, (3) 250μS/cm, 0,4mm/min, (4) 50μS/cm, 0,4mm/min, (5) 250μS/cm, 0,4mm/min
 Σχήμα 1.19: Αξονική συνιστώσα του πεδίου κατά μήκος υδρόφιλου μονωτήρα, με εφαρμογή τάσης α) 50kV, β) 127kV και κατά μήκος υδρόφοβου μονωτήρα, με εφαρμογή τάσης γ) 50kV, δ) 127kV [18].

1.7 Μέθοδοι προσομοίωσης – υπολογιστικές μέθοδοι

Οι Rasolonjanahary et al. [82] παρουσίασαν μία υπολογιστική μέθοδο για τον προσδιορισμό του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου σε ρυπασμένους μονωτήρες. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται σε ολοκληρωτικές εξισώσεις οριακών συνθηκών. Ο ρυπασμένος μονωτήρας προσομοιώνεται, με βάση μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει δύο περιοχές του χώρου, στο εσωτερικό των οποίων η πυκνότητα φορτίου θεωρείται μηδενική: την περιοχή του αέρα με σχετική επιτρεπτότητα ε_{r1}=1 και την περιοχή που καλύπτεται από το μονωτικό υλικό με σχετική επιτρεπτότητα ε_{r2}. Η επιφάνεια του μονωτήρα καλύπτεται από στρώμα ρύπανσης επιφανειακής αγωγιμότητας σ_s. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιείται ένας σχετικά μικρός αριθμός αγνώστων, λαμβάνεται υπόψη κατά τους υπολογισμούς μια μη πεπερασμένη περιοχή του χώρου και, επιπλέον, μπορούν να υπολογιστούν απ' ευθείας τιμές για το δυναμικό και το ηλεκτρικό πεδίο.

Οι Chakravorti και Mukherjee [83] διερεύνησαν την κατανομή του πεδίου γύρω από

έναν μονωτήρα στήριξης, για διάφορες τιμές ομοιόμορφης ή μερικής επιφανειακής ρύπανσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο προσομοίωσης του φορτίου. Το ομοιόμορφο στρώμα ρύπανσης προσομοιώνεται από μια ενιαία επιφανειακή ειδική αντίσταση κατά μήκος του μονωτήρα, ενώ το μη ομοιόμορφο στρώμα ρύπανσης προσομοιώνεται θεωρώντας διάφορες ειδικές αντιστάσεις στις επιμέρους περιοχές της επιφάνειας του μονωτήρα. Ο υπολογισμός του πεδίου πραγματοποιήθηκε τόσο υπό τάση βιομηχανικής συχνότητας, όσο και υπό κρουστική τάση (1,2/50μs και 250/2500μs). Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Το πεδίο είναι χωρητικό, όταν η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου είναι χαμηλή και ωμικό όταν αυτή είναι υψηλή. Για ενδιάμεσες τιμές της επιφανειακής πυκνότητας φορτίου το πεδίο είναι μικτό (χωρητικό ωμικό). Η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα, όσο και από την επιφανειακή ειδική αντίσταση. Η τιμή της επιφανειακής πυκνότητας φορτίου μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα για δεδομένη επιφανειακή ειδική αντίσταση. Οι αλλαγές της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου από χωρητικό σε μικτό (χωρητικό ωμικό) και εν συνεχεία σε ωμικό, λαμβάνουν χώρα για μικρό εύρος τιμών της επιφανειακής ειδικής αντίστασης, είτε επιβάλλεται τάση βιομηχανικής συχνότητας, είτε κρουστική τάση.
- Η ωμική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί ανεπιθύμητες ηλεκτρικές εντάσεις γύρω από έναν ρυπασμένο μονωτήρα, γεγονός το οποίο συνεπάγεται, τελικά, χαμηλότερη τάση αντοχής (withstand voltage).
- Για μη ομοιόμορφη επιφανειακή ρύπανση, υπερβολικά υψηλές εντάσεις παρουσιάζονται στο όριο μεταξύ δύο διαφορετικών επιφανειακών ειδικών αντιστάσεων.
- Μερική ρύπανση της επιφάνειας του μονωτήρα κοντά στα ηλεκτρόδια προκαλεί υψηλότερες εντάσεις απ' ότι η ομοιόμορφη επιφανειακή ρύπανση.
- Για μια δεδομένη επιφανειακή ειδική αντίσταση, η κρουστική τάση μορφής 250/2500μs προκαλεί υψηλότερες εντάσεις απ' ότι η μορφής 1,2/50μs. Επιπλέον, τάση βιομηχανικής συχνότητας ίδιου πλάτους με την κρουστική προκαλεί υψηλότερες εντάσεις.

Οι Scopec et al. [84] εφάρμοσαν την κλασσική μέθοδο των ολοκληρωτικών εξισώσεων για να προσδιορίσουν την κατανομή του ηλεκτροστατικού πεδίου σε έναν ρυπασμένο (είτε ομοιόμορφα, είτε ανομοιόμορφα) μονωτήρα, ο οποίος παρουσιάζει αξονική συμμετρία, όταν αυτός καλύπτεται από λεπτά στρώματα με διαφορετικές επιφανειακές αγωγιμότητες. Ο αλυσοειδής μονωτήρας προσομοιώνεται με βάση κυλινδρικά, δισκοειδή και κωνικά στοιχεία (Σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.20: Σύνθεση ενός επαναλαμβανόμενου τμήματος μονωτήρα χρησιμοποιώντας στοιχεία κυλινδρικού, κωνικού και δισκοειδούς σχήματος [84]. Οι Asenjo et al. [85] πρότειναν μία μέθοδο υπολογισμού του πεδίου σε ρυπασμένους μονωτήρες όταν αυτοί λειτουργούν σε πεδία χαμηλών συχνοτήτων. Η μέθοδός τους στηρίχτηκε στη σύζευξη των εξισώσεων του Maxwell, ενώ η αριθμητική επίλυση πραγματοποιήθηκε μέσω της τεχνικής των πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμητικές τιμές που ελήφθησαν με τη μέθοδο αυτή συγκρίθηκαν από τους ίδιους με αντίστοιχες που προέκυψαν μέσω κυκλωματικής επίλυσης και αποδείχθηκε ότι το σφάλμα είναι μικρότερο από 1%, τόσο στο πραγματικό, όσο και στο φανταστικό

Οι Zhao και Comber [86] χρησιμοποίησαν προγράμματα ανάλυσης ηλεκτρικών πεδίων βασισμένα στη μέθοδο οριακών στοιχείων, για να μελετήσουν το ηλεκτρικό πεδίο και την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μη κεραμικών μονωτήρων, καθώς και για να καταδείξουν την επίδραση των διάφορων θέσεων των γραμμών μεταφοράς και της γεωμετρίας των πυλώνων στο ηλεκτρικό πεδίο. Οι Zhao και Comber υποστήριξαν ότι η προσομοίωση μόνο του μονωτήρα, χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση της κατασκευαστικής δομής των πυλώνων και των αγωγών, οδηγεί σε ανακριβείς εκτιμήσεις της κατανομής των ηλεκτρικών πεδίων και του δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων, όταν αυτοί θα εγκατασταθούν σε εν λειτουργία συστήματα μεταφοράς. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να γίνουν τρυσιδιάστατοι υπολογισμοί, οι οποίοι θα συνεκτιμούν τις επιδράσεις των αγωγών και των πυλώνων. Είναι δυνατό να γίνουν απλοποιήσεις χωρίς να επηρεάσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, για παράδειγμα τα κυάθια των μη κεραμικών μονωτήρων μπορούν να παραλειφθούν και οι αγωγοί των γραμμών μεταφοράς

Η δομή των πυλώνων, καθώς και η διάμετρος και η θέση τοποθέτησης του τοροειδούς (grading ring), το οποίο χρησιμοποιείται για την ελάττωση της ανομοιομορφίας του πεδίου, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για τον προσδιορισμό της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του μονωτήρα. Στο Σχήμα 1.21 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μονωτήρων τοποθετημένων σε διάταξη "Ι" (Σχήμα 1.21α) και σε διάταξη "V" (Σχήμα 1.21β) για τέσσερις διαφορετικούς τύπους πυλώνων.



Σχήμα 1.21: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μονωτήρων σε διάταξη α) "Ι" και β) "V", τοποθετημένων σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους πυλώνων [86].

Η διάμετρος του σωλήνα, ο οποίος διαμορφώνεται σε τοροειδές, έχει μικρή επίδραση στο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του μονωτήρα, αλλά η επίδραση είναι σημαντική για τον έλεγχο του ηλεκτρικού πεδίου (έλεγχος της έναρξης του φαινομένου Corona) που αναπτύσσεται στο ίδιο το τοροειδές (Σχήμα 1.22).



Σχήμα 1.22: Μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου α) κατά μήκος του μονωτήρα και β) στην επιφάνεια του τοροειδούς συναρτήσει της διαμέτρου του σωλήνα, που διαμορφώνεται σε τοροειδές, για μονωτήρες σε διάταξη "Ι" και σε διάταξη "V" [86]. Οι Morales et al. [87] συνέχισαν προηγούμενη έρευνά τους [85], η οποία αναφερόταν στην εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε

ρυπασμένους μονωτήρες συμμετρικούς περί τον άξονά τους. Πολλές φορές, όμως, δεν υπάρχει συμμετρία, είτε λόγω ανομοιόμορφων στρωμάτων ρύπανσης, είτε λόγω ασύμμετρων οριακών συνθηκών. Για αυτό το λόγο εφάρμοσαν τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, με ασύμμετρες οριακές συνθήκες, προκειμένου να υπολογίσουν το ηλεκτρικό πεδίο σε ρυπασμένους μονωτήρες. Για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα επί της επιφάνειας του μονωτήρα, το οποίο αποτελείται από παράλληλους και μεσημβρινούς, διατυπώνοντας μία εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για κάθε κατάσταση. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου παραλείφθηκε η ροή ρεύματος διαμέσου της πορσελάνης και του αέρα, σε σύγκριση με τη ροή ρεύματος στο ημιαγώγιμο στρώμα ρύπανσης, που καλύπτει τον μονωτήρα. Αυτή η υπόθεση μετατρέπει το τρισδιάστατο πρόβλημα σε δισδιάστατο. Στο Σχήμα 1.23 παρουσιάζονται ο μονωτήρας τύπου cap and pin, που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς του πεδίου, καθώς και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου, για τον υπολογισμό της αντίστασης του στρώματος ρύπανσης, η οποία συνδέεται σε σειρά με το τόξο, σύμφωνα με το μοντέλο του Obenhaus. Η αντίσταση υπολογίζεται ως ο λόγος V/I, όπου το 100% της τάσης V είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του ίχνους του τόξου στη μονωτική επιφάνεια (arc root) και του ηλεκτροδίου χαμηλής τάσης, ενώ το ρεύμα Ι είναι το συνολικό ρεύμα που κυκλοφορεί μεταξύ του ίχνους του τόξου και του ηλεκτροδίου χαμηλής τάσης.



Σχήμα 1.23: α) Μονωτήρας τύπου cap and pin, β) ανομοιόμορφη κατανομή της ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα, γ) η τιμή της εν σειρά αντίστασης συναρτήσει του μήκους του τόξου [87].

Ο Sebestyén [88] παρουσίασε ένα διαφορετικό τρόπο προσέγγισης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε μονωτήρες δικτύων υψηλής τάσεως. Σύμφωνα με την προτεινόμενη από τον Sebestyén μέθοδο, η ηλεκτρική ένταση τόσο στο εσωτερικό των μονωτήρων, όσο και γύρω από αυτούς, προσδιορίζεται συνυπολογίζοντας τις επιδράσεις του τρισδιάστατου περιβάλλοντος. Αρχικά, ένα μεγάλης κλίμακας μοντέλο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανομής του δυναμικού κοντά στο μονωτήρα. Στη συνέχεια εξετάζεται τοπικά μια περιοχή, η οποία συμπεριλαμβάνει το ακριβές μοντέλο του μονωτήρα. Τέλος, εφαρμόζεται μια σειρά επαναληπτικών λύσεων σε αυτές τις επικαλυπτόμενες περιοχές προκειμένου να προσδιοριστεί η ακριβής κατανομή του πεδίου κατά μήκος του μονωτήρα. Στο Σχήμα 1.24 απεικονίζεται τόσο το συνολικό, όσο και το τοπικό μοντέλο ενός πολυμερούς μονωτήρα τοποθετημένου σε γραμμή μεταφοράς 400kV. Πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η εφαρμογή της δεν απαιτεί υπολογιστή με μεγάλη μνήμη και, επιπλέον, ο χρόνος απασχόλησης της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας του υπολογιστή είναι μικρός.



Σχήμα 1.24: Απεικόνιση του πλήρους και του επιμέρους μοντέλου του μονωτήρα [88]. Οι Que και Sedo [89, 90] χρησιμοποίησαν ένα πρόγραμμα προσομοίωσης, βασισμένο στη μέθοδο των οριακών συνθηκών, το οποίο είναι διαθέσιμο στο εμπόριο και ονομάζεται Coulomb, προκειμένου να εξετάσουν σχεδιαστικές παραμέτρους ενός μονωτήρα, όπως τη μορφή των κυαθίων, την απόσταση μεταξύ των κυαθίων, την απόσταση μεταξύ του πρώτου κυαθίου και του μεταλλικού άκρου, αλλά και να απλοποιήσουν το μοντέλο προσομοίωσης του μονωτήρα. Στο Σχήμα 1.25β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση της επίδρασης της απόστασης μεταξύ του πρώτου κυαθίου και του μεταλλικού άκρου ενός πολυμερούς μονωτήρα (Σχήμα 1.25α) στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ στο Σχήμα 1.24γ είναι εμφανής η επίδραση του αριθμού των κυαθίων στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.





Στο Σχήμα 1.26 παρουσιάζεται η επίδραση της μορφής των κυαθίων στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.





Στο επόμενο άρθρο τους [91] οι Que και Sedo θεώρησαν μια γεωμετρία που περιλαμβάνει πυλώνα με τριφασική γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 765kV, ώστε να υπολογιστεί η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων. Ερεύνησαν τα αποτελέσματα της παρουσίας των αγώγιμων γραμμών μεταφοράς και της διέγερσης των τριών φάσεων (αντί μίας) στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού.

Ο έλεγχος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μη-κεραμεικούς μονωτήρες είναι πολύ σημαντικός. Υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να προκαλέσει το

φαινόμενο Corona γύρω από τους μονωτήρες, όπως μπορεί να προκαλέσει και την αποικοδόμηση των υλικών του περιβλήματος. Όταν οι μη-κεραμεικοί μονωτήρες τοποθετούνται σε τριφασική γραμμή μεταφοράς, οι αγωγοί (γραμμές μεταφοράς), το τοροειδές, η διαμόρφωση του πυλώνα και η τοπολογία των άλλων δύο φάσεων του τριφασικού συστήματος μπορούν να επηρεάσουν τις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στην περιοχή κοντά στους μονωτήρες. Για να αναλυθούν οι κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού ενός μονωτήρα σε λειτουργία, είναι σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση των παραπάνω παραγόντων από μια πρακτική σκοπιά. Για να ελεγχθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το σχήμα των μεταλλικών άκρων (end fitting) των πολυμερών μονωτήρων πρέπει να σχεδιαστεί πολύ προσεκτικά. Αν θεωρηθεί απαραίτητο, πρέπει να προστεθεί ένα τοροειδές.

Στο άρθρο αυτό [91] αναλύονται οι επιδράσεις του πυρήνα από ίνες γυαλιού, του πολυμερούς περιβλήματος και των ελαστομερών κυαθίων, καθώς και της γραμμής μεταφοράς πάνω στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού γύρω από ένα μονωτήρα. Η επίδραση των άλλων δύο φάσεων του τριφασικού συστήματος υπολογίζεται σε μονωτήρες τοποθετημένους τόσο σε διάταξη "Ι", όσο και σε διάταξη "V" ενός πυλώνα 765kV.

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιείται ένας τυπικός μη-κεραμεικός μονωτήρας 34,5kV. Με στόχο να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού των κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού όταν αναλύονται μονωτήρες μεγάλου μήκους, κρίνεται απαραίτητη η απλοποίηση του μονωτήρα. Για να αποφασιστεί ποιό χαρακτηριστικό της γεωμετρίας μπορεί να παραλειφθεί με τη λιγότερη δυνατή επίδραση στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού όταν αναλύονται μονωτήρας (μουστήρων, χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς αυτός ο μονωτήρας 34,5kV. Έτσι, για τη διαδικασία της αντιπαραβολής, χρησιμοποιούνται τέσσερα μοντέλα: (α) μόνο δύο ηλεκτρόδια, (β) τα δύο ηλεκτρόδια και ο πυρήνας, (γ) δύο ηλεκτρόδια, ο πυρήνας και το περίβλημα, χωρίς τα ελαστομερή κυάθια και (δ) ο «πλήρης» μονωτήρας των 34,5kV. Στο άκρο της γραμμής εφαρμόζεται τάση 100V, ενώ το άλλο άκρο είναι γειωμένο.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ελαστομερή κυάθια του μονωτήρα μπορούν να παραλειφθούν κατά την προσομοίωση, χωρίς να χάνεται σημαντική ακρίβεια στον υπολογισμό της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα. Συγκεκριμένα, στη (δ) περίπτωση η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατά 4% μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της (γ) περίπτωσης. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει μερικά, μόνο, από τα ελαστομερή κυάθια και δίνει ακόμα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο αριθμός των κυαθίων καθορίζεται από την επιθυμητή ακρίβεια.

Η επίδραση ενός αγωγού (γραμμής μεταφοράς) στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού μελετήθηκε προσθέτοντας στο μοντέλο του μονωτήρα έναν αγωγό μήκους 3m, ο οποίος προσομοιώνει τη γραμμή μεταφοράς. Ο μονωτήρας αναρτάται από το κέντρο μίας γειωμένης επιφάνειας 1,6m×0,4m. Από την προσομοίωση προκύπτει ότι, η ύπαρξη του αγωγού μειώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο άκρο του μονωτήρα από το οποίο αναρτάται η γραμμή, αλλά αυξάνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.27.



Σχήμα 1.27: Επίδραση της ύπαρξης ή μη του αγωγού στην ένταση του πεδίου [91].

Η επίδραση των άλλων δύο φάσεων του τριφασικού συστήματος στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού διερευνήθηκε για διάταξη "Ι" και διάταξη "V" των μονωτήρων. Ο αγωγός της κεντρικής φάσης βρίσκεται μέσα στο «παράθυρο» του πυλώνα. Αυτή είναι η χειρότερη περίπτωση κατά τη μελέτη των κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο της τριπλής σύνδεσης στο μεταλλικό άκρο (metal fitting) κοντά στον αγωγό υψηλής τάσης, του ελαστομερούς κυαθίου και του αέρα είναι περίπου 16% μεγαλύτερη για διάταξη "Ι" των μονωτήρων και 6% μεγαλύτερη για διάταξη "V" στην τριφασική διέγερση, συγκρινόμενη με την ίδια ανάρτηση σε περίπτωση μονοφασικής διέγερσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε έναν πολυμερή μονωτήρα μεγάλου μήκους, το 10% περίπου των ελαστομερών κυαθίων που βρίσκονται πιο κοντά στο άκρο που είναι συνδεδεμένη η γραμμή, καταπονούνται από ένα ποσοστό 30-35% της εφαρμοζόμενης τάσης, ενώ, αντίθετα, στο 10% περίπου των κυαθίων που βρίσκονται κοντά στο γειωμένο άκρο αντιστοιχεί, μόλις, 10-15% της εφαρμοζόμενης τάσης.

1.8 Μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων

Το 2004 δημοσιεύτηκαν τα αποτέλεσμα μιας μελέτης που διενεργήθηκε στο Power Systems Engineering Research Center (PSERC) [92] και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα και την ανάλυση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου, με στόχο τον πιθανό εντοπισμό εσωτερικών ελαττωμάτων σε μη-κεραμεικούς μονωτήρες, μέσω της μέτρησης του πεδίου γύρω από το μονωτήρα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο πακέτο λογισμικού, Coulomb. Προσομοιώθηκαν διάφοροι τύποι ελαττωμάτων σε κάποια διεπιφάνεια στο μονωτήρα.

Τα συμπεράσματα της μελέτης έχουν ως εξής:

- Ο εντοπισμός του ελαττώματος εξαρτάται από τη θέση που βρίσκεται αυτό και η πιθανότητα να εντοπιστεί είναι μεγαλύτερη, όταν το ελάττωμα βρίσκεται πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.
- Η αλλαγή που παρατηρείται στην τιμή του πεδίου εξαρτάται από τον τύπο του ελαττώματος, ενώ, όσο περισσότερο αγώγιμο είναι το ελάττωμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα εντοπισμού του.
- Η πιθανότητα εντοπισμού των ελαττωμάτων αυξάνει αν ληφθούν ακτινικές (radial) μετρήσεις, αντί των παραδοσιακών αξονικών (axial) μετρήσεων. Ο τρόπος λήψης αυτών των μετρήσεων παρουσιάζεται παρακάτω.

Στους κεραμεικούς μονωτήρες η κατανομή της τάσης είναι γραμμικότερη, σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή των μη κεραμεικών μονωτήρων, λόγω της παρουσίας

των ενδιάμεσων μεταλλικών μερών. Το υλικό τους δε φθείρεται από το φαινόμενο Corona. Συνεπώς, το φαινόμενο Corona δεν αποτελεί σοβαρή απειλή για τους κεραμεικούς μονωτήρες. Παρ' όλα αυτά, στους μη-κεραμεικούς μονωτήρες η κατανομή της τάσης είναι εντελώς ανομοιόμορφη, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 1.28, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία φαινομένου Corona.



Σχήμα 1.28: Σύγκριση της κατανομής τάσης σε κεραμεκούς και μη-κεραμεικούς μονωτήρες [92].

Τα τοροειδή χρησιμοποιούνται σε μη-κεραμεικούς μονωτήρες για τάσεις άνω των 230kV, με στόχο τη μείωση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Από τα Σχήματα 1.29 και 1.30 είναι προφανές ότι για μονωτήρες με τοροειδές, η μέγιστη ένταση του πεδίου μειώνεται σημαντικά και η κατανομή του πεδίου γίνεται πιο ομοιόμορφη σε σχέση με τους μονωτήρες χωρίς τοροειδές. Συστήματα υψηλότερων τάσεων απαιτούν μεγαλύτερες διαστάσεις για τα τοροειδή.



Σχήμα 1.29: Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα χωρίς τοροειδές [92].



Σχήμα 1.30 : Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα με τοροειδές [92].

Για την αναγνώριση των ελαττωματικών μονωτήρων, είναι απαραίτητες αποτελεσματικές μέθοδοι για τον εντοπισμό τους και την έγκαιρη αντικατάστασή τους, πριν συμβεί κάποια αστοχία στο σύστημα. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων των μονωτήρων, αλλά η μέθοδος του ηλεκτρικού πεδίου είναι η πιο αποδοτική, γιατί μέσω αυτής εντοπίζονται ελαττώματα στο εσωτερικό του μονωτήρα. Τα ελαττώματα μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή στις ιδιότητες των υλικών που απεικονίζονται σαν αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο. Παρόλα αυτά, κάποια ελαττώματα δεν εντοπίζονται μέσω αυτής της μεθόδου, γιατί δεν εμφανίζουν κάποια σημαντική αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο που να μπορεί να εντοπιστεί.

Κατόπιν λεπτομερούς έρευνας, έγινε αντιληπτό ότι δεν υπάρχει κάποια μέθοδος που να μπορεί αποτελεσματικά να εντοπίζει όλα τα ελαττώματα στους μονωτήρες. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων είναι οι εξής:

Η μέθοδος Buzz, στηριζόμενη σε ακουστικό θόρυβο, που εφαρμόζεται μόνο σε μονωτήρες πορσελάνης, λόγω των μεταλλικών μερών που υπάρχουν μόνο σε αυτούς. Πάνω στα μεταλλικά μέρη τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.31. Ένας υγιής μονωτήρας θα προκαλέσει τη δημιουργία ενός τόξου μεταξύ των δύο ακίδων (prongs), παράγοντας έναν θόρυβο. Αντίθετα, ένας ελαττωματικός μονωτήρας δε θα έχει αρκετό δυναμικό για να δημιουργήσει ένα τέτοιο τόξο.



Σχήμα 1.31: Μέθοδος Buzz [92].

- Η μέθοδος αντίστασης, που στηρίζεται σε μέτρηση με μονωσιόμετρο (megger) υψηλής τάσης, που χρησιμοποιείται τόσο σε κεραμεικούς όσο και σε μηκεραμεικούς μονωτήρες. Η χαμηλή αντίσταση σε κάποιο κομμάτι του μονωτήρα αποκαλύπτει την παρουσία κάποιου ελαττώματος. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη μόνο για επιφανειακά ελαττώματα και για μεγάλα αγώγιμα εσωτερικά ελαττώματα.
- Οι μετρήσεις διηλεκτρικού ρεύματος (dielectric current measurements). Η παρουσία υψηλών ρευμάτων φανερώνει την παρουσία ελαττωμάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό μόνο μεγάλων ελαττωμάτων και στα δύο είδη μονωτήρων.
- Η μέθοδος των μερικών εκκενώσεων επηρεάζεται από το θόρυβο και γι' αυτό είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μόνο μέσα σε κλωβό Faraday. Οι εκκενώσεις σε έναν υγιή κεραμεικό ή μη-κεραμεικό μονωτήρα είναι πολύ λίγες και είναι της τάξεως των μερικών pico coulombs. Μεγαλύτερες εκκενώσεις αναδεικνύουν την ύπαρξη αυξημένης πεδιακής έντασης και φαινομένου Corona.
- Μετρήσεις RIV (ραδιοφωνικών παρεμβολών). Η μέθοδος αυτή δεν είναι πολύ αξιόπιστη, γιατί δεν μπορεί να εντοπίσει τη θέση του σφάλματος (είναι εκεί που εμφανίζεται το φαινόμενο Corona).
- Δοκιμές θέρμανσης μονωτήρων (Heating tests / Time withstand). Η εργαστηριακή αυτή μέθοδος εφαρμόζεται και στα δύο είδη μονωτήρων. Στα άκρα των μονωτήρων εφαρμόζεται για λίγα λεπτά το 80% της τάσης υπερπήδησής τους. Η παρουσία σημείων με υψηλή θερμοκρασία (hot spots) μετά τη δοκιμή φανερώνει την παρουσία ελαττωμάτων.
- Δοκιμή αντίστασης σε κρουστική τάση που προσομοιώνει κεραυνική τάση (Dry lightning impulse withstand tests). Αυτή είναι μια εργαστηριακή μέθοδος που εφαρμόζεται και στα δύο είδη μονωτήρων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην

εφαρμογή κρουστικής τάσης της μορφής 1,2/50μs και στον έλεγχο της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα. Ένας υγιής μονωτήρας θα έχει μια γραμμική αύξηση της τάσης για 1,2μs, που θα ακολουθείται από μια εκθετικά ελαττούμενη τάση για 50μs. Η παρουσία βραχυκυκλώματος θα οδηγήσει σε κατάρρευση της τάσης.

- Μέθοδος που στηρίζεται στη μέτρηση της θερμοκρασίας των μονωτήρων (Infrared Thermography) και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ελαττωμάτων και στους δύο τύπους μονωτήρων. Η κατανομή της θερμοκρασίας στον υπό δοκιμή μονωτήρα συγκρίνεται με την αντίστοιχη σε έναν υγιή και, έτσι, ελέγχεται κατά πόσον ο υπό δοκιμή μονωτήρας έχει κάποιο ελάττωμα.
- Η μέθοδος του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη και πολλά υποσχόμενη μέθοδος εντοπισμού ελαττωμάτων στους κεραμεικούς και μη-κεραμεικούς μονωτήρες. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, συγκρίνονται οι τιμές πεδίου στην επιφάνεια του υπό δοκιμή μονωτήρα με τις τιμές πεδίου σε έναν αντίστοιχο υγιή μονωτήρα. Τυχόν σημαντικές αλλαγές στις πεδιακές τιμές φανερώνουν την ύπαρξη ελαττωμάτων.

1.9 Έμπειρα συστήματα για τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών μονωτήρων

Η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην αύξηση του επιπέδου της τάσεως στα δίκτυα μεταφοράς και στη δημιουργία νέων δικτύων. Καθώς το επίπεδο της τάσης στα δίκτυα μεταφοράς αυξάνει, δημιουργούνται και νέες απαιτήσεις όσον αφορά στην αντοχή των μονωτήρων σε καταπονήσεις. Συνεπώς, καθίσταται πολύ σημαντική η εύρεση τρόπων ελέγχου της κατάστασης των μονωτήρων. Προς αυτήν την κατεύθυνση αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες, οι οποίες στηρίζονται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και σε ασαφή λογική.

1.9.1 Ανάπτυξη τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Oi Ghosh et al. [93] ανέπτυξαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση του χρόνου εμφάνισης υπερπήδησης σε ρυπασμένο μονωτήρα, συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης, του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα και της αντίστασης ανά μονάδα μήκους του μονωτήρα. Τα προαπαιτούμενα δεδομένα για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου προέκυψαν από πειράματα σε μοντέλο επίπεδης μονωτικής πλάκας υπό συνθήκες ρύπανσης. Μετά την εκπαίδευση, το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι ικανό να προβλέπει το χρόνο μέχρι την υπερπήδηση με ένα μέσο απόλυτο σφάλμα της τάξης του 6% σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.

Επειδή οι μονωτήρες μπορούν να καθαρίζονται περιστασιακά, αλλά αυτή είναι μια δαπανηρή εργασία, οι Cline et al. [94] εκπαίδευσαν ένα νευρωνικό δίκτυο, ώστε να ερμηνεύει τα δεδομένα από δύο συσκευές ελέγχου ρύπανσης και να εκτιμά αν επίκειται υπερπήδηση των μονωτήρων του υποσταθμού. Η εκτιμώμενη πιθανότητα υπερπήδησης αποτελεί κριτήριο για την συχνότητα καθαρισμού των μονωτήρων.

Οι M. Ugur et al. [95] ανέπτυξαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών, στα αρχικά στάδια εμφάνισής τους, σε πολυμερείς συμπαγείς μονωτήρες, η μέθοδος, όμως, που πρότειναν είναι δυνατό να εφαρμοστεί και για την ανίχνευση άλλων παραγόντων, που επηρεάζουν την αντοχή ενός μονωτήρα, όπως οι μερικές εκκενώσεις, το ρεύμα διαρροής και οι σοβαρές βλάβες.

Στο άρθρο [96] παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου με ένα κρυμμένο επίπεδο, το οποίο εκπαιδεύτηκε με τη μέθοδο της ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, ώστε, με δεδομένα το μήκος ερπυσμού και την απόσταση των ηλεκτροδίων, να γίνεται πρόβλεψη της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Για να επιταχυνθεί ο ρυθμός σύγκλισης της διαδικασίας μάθησης, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος προσαρμοστικής μάθησης, στον οποίο, τόσο ο ρυθμός μάθησης, όσο και η σταθερά ορμής προσαρμόζονται αυτόματα κατά τη διαδικασία της μάθησης. Τα αποτελέσματα του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το οποίο αναπτύχθηκε για το συγκεκριμένο σκοπό, θεωρήθηκαν ικανοποιητικά, ύστερα από σύγκριση με τις πειραματικές τιμές.

Οι Ahmad S. Ahmad et al. [97] ανέπτυξαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για τη μοντελοποίηση της ισοδύναμης πυκνότητας επικάθησης άλατος, συναρτήσει της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της ατμοσφαιρικής πίεσης, της βροχόπτωσης και της ταχύτητας του ανέμου. Στόχος της προσπάθειας αυτής ήταν να εκτιμηθεί το επίπεδο της ρύπανσης, μέσω των καιρικών συνθηκών, ώστε να τροποποιείται ανάλογα το πρόγραμμα συντήρησης των μονωτήρων.

Οι P. Dixit et al. [98] εκπαίδευσαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, σύμφωνα με το οποίο αν είναι δεδομένες οι τιμές των σταθερών του τόξου και του κρίσιμου ρεύματος, τότε μπορεί να προσδιοριστεί το στάδιο εξέλιξης του φαινομένου της υπερπήδησης: α) εμφάνιση μίας αρχικής επιφανειακής ροής ρεύματος στο μονωτήρα, η οποία οδηγεί σε εμφάνιση μερικών εκκενώσεων και ενός συνεχούς συριγμού, β) πολλαπλασιασμός των μερικών τόξων σε τέτοιο βαθμό, ώστε να εμφανίζονται ισχυρά τοπικά τόξα, τα οποία προκαλούν την καταστροφή της επιφάνειας του μονωτήρα και γ) περαιτέρω ανάπτυξη αυτών των τόξων έως, τελικά, την εμφάνιση της υπερπήδησης. Η γνώση του σταδίου της υπερπήδησης είναι πολύ χρήσιμη για τον κατάλληλο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης των μονωτήρων, ώστε να μειωθεί, στο μέτρο του δυνατού, το χρονικό διάστημα, που τίθεται εκτός λειτουργίας το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω βραχυκυκλωμάτων στις γραμμές μεταφοράς (μονοφασικά σφάλματα) προκαλούμενα από βλάβες στους μονωτήρες.

Στο άρθρο [99] αναπτύχθηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την εκτίμηση του ρεύματος διαρροής. Τα πειραματικά δεδομένα εκμάθησης προέκυψαν από μετρήσεις σε μονωτήρες, οι οποίοι τοποθετήθηκαν εντός θαλάμου ρύπανσης. Το συμπέρασμα της μελέτης αυτής είναι ότι το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, που αναπτύχθηκε, μπορεί να προβλέψει την τιμή του ρεύματος διαρροής με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια (μέγιστο σφάλμα 12%).

Οι ίδιοι ερευνητές σε προηγούμενο σχετικό άρθρο τους [100] είχαν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι, εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία, αλλά με δεδομένα που προέκυψαν για διαφορετικούς τύπους μονωτήρων, το σφάλμα της εκτίμησης που δίνει το νευρωνικό δίκτυο είναι της τάξεως του 15% και γι' αυτόν το λόγο είναι προτιμότερο τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου να ομαδοποιούνται ανάλογα με το είδος του μονωτήρα.

1.9.2 Ανάπτυξη ασαφών συστημάτων

Λαμβανομένης υπόψη της σημασίας του βέλτιστου σχεδιασμού των ηλεκτροδίων και του περιγράμματος των μονωτήρων, αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος με χρήση ασαφούς λογικής [101]. Το αυτοοργανούμενο ασαφές σύστημα, που αναπτύχθηκε, πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς (π.χ.
επαναληπτικές μέθοδοι, νευρωνικά δίκτυα) λόγω του ότι δεν απαιτείται εκπαίδευση για την επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας, γεγονός που επιταχύνει αρκετά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Η βάση των ασαφών κανόνων παράγεται αυτόματα από τα δεδομένα εισόδου-εξόδου του συστήματος. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε δύο πρακτικά προβλήματα: σε ένα μονοφασικό σύστημα αερίου μονωτικού τοποθετημένο σε τερματικό ζυγό και σε ένα διακόπτη απόζευξης, δίνοντας αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ο έγκαιρος εντοπισμός των δενδριτών, οι οποίοι αποτελούν το ύστατο στάδιο κατάρρευσης της μονωτικής ικανότητας των μονωτήρων, καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικός προκειμένου να αποφευχθούν βλάβες στους μονωτήρες. Στο άρθρο [102] έχει προταθεί μια μέθοδος εντοπισμού των δενδριτών, η οποία στηρίζεται στην ασαφή λογική και εμπλέκει το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δύο εκφορτίσεων, δεδομένου ότι η γνώση μόνο του πλάτους της μερικής εκκένωσης αποδείχθηκε ανεπαρκής για τον σκοπό αυτό. Λόγω της αδυναμίας διαχωρισμού των μερικών εκκενώσεων στις οφειλόμενες στις εσοχές που υπάρχουν στον μονωτήρα (ως αποτέλεσμα της φθοράς του) και στις οφειλόμενες σε δενδρίτες, που εμφανίζονται με μορφή δενδροειδών καναλιών όταν συμβαίνουν εκκενώσεως στην επιφάνεια του μονωτήρα, η χρήση της ασαφούς λογικής καθίσταται επιτακτική για τη συσχέτιση του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εκκενώσεων με την εμφάνιση ενός ηλεκτρικού δένδρου.

Κεφάλαιο 2

ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

2.1 Σκοπός και βασικές αρχές των μετρήσεων

Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύονται οι πειραματικές διαδικασίες μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες υπό τάση και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα.

Η μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου, όπως έχει αποδειχτεί από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων για λόγους, οι οποίοι συνοψίζονται κυρίως στα εξής:

- η γνώση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο του μονωτήρα, καθώς και το υλικό κατασκευής του, επηρεάζουν τη σχεδίασή του. Είναι απαραίτητο να αποφεύγονται οι μεγάλες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν, υπό κατάλληλες συνθήκες, στη δημιουργία μερικών εκκενώσεων, στην εμφάνιση υπερπήδησης ή, υπό εντελώς ειδικές προϋποθέσεις, (ακόμη και) στη διάτρηση του μονωτήρα,
- η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, από την οποία διέρχονται οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Όπως προαναφέρθηκε σε άλλη θέση, ανάλογα με την περιοχή τοποθέτησης των μονωτήρων, στην επιφάνειά τους επικάθεται υγρασία ή θαλάσσια άλμη ή ακαθαρσίες, που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, ή συνδυασμός των ανωτέρω και μεταβάλλουν την κρίσιμη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση των ανωτέρω συνθηκών ρύπανσης στο ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τύπου μονωτήρα,
- η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλεται, όταν ο μονωτήρας

αποκτήσει κάποιο ελάττωμα κατά τη λειτουργία του. Η σύγκριση των τιμών του ηλεκτρικού πεδίου στον υπό δοκιμή μονωτήρα με τις αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου σε έναν υγιή μονωτήρα ίδιου τύπου αποτελεί μέθοδο ανίχνευσης βλαβών. Η διαπίστωση σημαντικών διαφορών στις πεδιακές τιμές φανερώνει την ύπαρξη ελαττωμάτων στο μονωτήρα.

Αντίστοιχα, η μελέτη της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε ένα μονωτήρα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για το σχεδιασμό ενός μονωτήρα, για τους εξής λόγους:

- η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σχετίζεται άμεσα με την καταπόνηση, που υφίσταται ο μονωτήρας κατά τη λειτουργία του.
- η προσπάθεια ισοκατανομής της επιβαλλόμενης τάσης στο σύνολο του μονωτήρα οδηγεί σε βέλτιστη αξιοποίηση του μονωτικού υλικού και συνεπώς σε μείωση του κόστους.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες υψηλής τάσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τη Δ.Ε.Η. για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς 150kV και 400kV. Επισημαίνεται ότι, ένας από τους χρησιμοποιηθέντες μονωτήρες ήταν ρυπασμένος, γεγονός το οποίο επέτρεψε τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου στο συγκεκριμένο μονωτήρα, τόσο υπό συνθήκες ρύπανσης, όσον και εν συνεχεία, όταν ο μονωτήρας καθαρίσθηκε.

Στους αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς των 150kV, εκτός από το ηλεκτρικό πεδίο, μετρήθηκε και η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης προκειμένου να ευρεθεί η καταπόνηση του καθενός δισκοειδούς μονωτήρα της αλυσίδας. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης μετρήθηκαν με δύο διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες, απολύτως ανεξάρτητες τη μία από την άλλη, με συνέπεια τα σφάλματα των δύο μετρήσεων να μην σχετίζονται μεταξύ τους.

2.2 Πειραματική διάταξη

2.2.1 Μέτρηση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης

Προκειμένου να προσδιοριστεί πειραματικά η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης



σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του Σχήματος 2.1 [4].

Σχήμα 2.1: Πειραματική διάταξη.

Η διάταξη περιλαμβάνει έναν αυτομετασχηματιστή (230/0...230)V, η είσοδος του οποίου συνδέεται, μέσω ενός σταθεροποιητή, στην παροχή της Δ.Ε.Η. (230V, 50Hz) και η έξοδος του τροφοδοτεί ένα μετασχηματιστή 110V/55kV. Η εφαρμοζόμενη τάση στον αλυσοειδή μονωτήρα μετρήθηκε τοποθετώντας ένα βολτόμετρο στο πρωτεύον του μετασχηματιστή και πολλαπλασιάζοντας την ένδειξή του με το λόγο μετασχηματισμού α (α=500) [103, 104]. Προκειμένου να ελεγχθεί η αναπαραγωγιμότητα των μετρήσεων, η επιβαλλόμενη τάση στο μονωτήρα μετρήθηκε με ηλεκτροστατικό βολτόμετρο, συνδεδεμένο στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Οι ενδείξεις του ηλεκτροστατικού βολτομέτρου συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές του βολτομέτρου, το οποίο είχε συνδεθεί στο πρωτεύον του μετασχηματιστή.

Η επιβαλλόμενη τάση U₂ αυξάνεται, έως ότου στον σπινθηριστή, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2, εφαρμοστεί η τάση διάσπασής του U_d. Το ποσοστό της τάσης P_i, το οποίο εφαρμόζεται στον i-οστό δισκοειδή μονωτήρα της αλυσίδας, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{i} = \frac{U_{d}}{U_{2i}} \cdot 100\%$$
(2.1)

όπου U_{2i} είναι η τρέχουσα τιμή της U_2 , όταν με το σπινθηριστή παράλληλο στον iοστό δίσκο, αυτός διασπάται.

Μετακινώντας το σπινθηριστή, παράλληλα, εκάστοτε, σε έναν έκαστο από τους δισκοειδείς μονωτήρες (Σχήμα 2.3), προκύπτουν n το πλήθος (n: πλήθος των δίσκων της αλυσίδας) ποσοστά P_i, τα οποία αθροιζόμενα δίνουν, προφανώς 1:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{i} = U_{d} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{U_{2i}} = 1$$
(2.2)

Από τη (2.2) προκύπτει η τάση διάσπασης U_d του σπινθηριστή, στη συνέχεια δε, γνωστής, πλέον, αυτής, από την εξίσωση (2.1) υπολογίζεται η επιβαλλόμενη τάση U_{2i} σε κάθε δισκοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 2.2: Σπινθηριστής



Σχήμα 2.3: Τοποθέτηση του σπινθηριστή σε κάθε δισκοειδή μονωτήρα.

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία του μετασχηματιστή φαίνονται στο Σχήμα 2.4, ενώ στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η τράπεζα χειρισμών του εργαστηρίου, μέσω της οποίας τροφοδοτήθηκε το πρωτεύον του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικά λειτουργίας του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.5: Τράπεζα χειρισμών.

2.2.2 Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε το πεδιόμετρο PMM 8053A και ο αισθητήρας (probe) PMM EHP 50B [105], τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικής ίνας. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου και του αισθητήρα. Το σημείο ανάρτησης του αγωγού θεωρήθηκε ως το σημείο (X=0, Y=0, Z=0) του χώρου. Ο άξονας Χ θεωρήθηκε συγγραμμικός στον αγωγό υψηλής τάσης, ο άξονας Ζ συγγραμμικός στον αλυσοειδή μονωτήρα και ο άξονας Υ κάθετος στο επίπεδο XOZ. Το σύστημα αξόνων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε έντεκα θέσεις (A-K) του οριζοντίου επιπέδου XOY (Z=0), ενώ παράλληλα, με τη βοήθεια επάλληλων σωλήνων, πάνω στους οποίους ενσωματώθηκε ο αισθητήρας, λήφθηκαν μετρήσεις σε διάφορα σημεία κατά μήκος γραμμών, κάθετων στο οριζόντιο επίπεδο XOY, οι οποίες ξεκινούν από τις έντεκα θέσεις A-K. Οι συντεταγμένες των έντεκα θέσεων του οριζοντίου επιπέδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7.

Με τη βοήθεια του πεδιομέτρου μετρήθηκε το μέτρο των τριών συνιστωσών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E_x , E_y , E_z), καθώς και η συνολική τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E_t , η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$E_t = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$
(2.3)

Η εφαρμοζόμενη τάση στον αλυσοειδή μονωτήρα ήταν ίση με 20kV. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται αναρτημένος ένας από τους προς μέτρηση μονωτήρες, καθώς και το πεδιόμετρο τοποθετημένο σε κάποια θέση του χώρου.



Σχήμα 2.6: Το σύστημα αξόνων για τη λήψη των μετρήσεων.



Θέση	X [cm]	Y [cm]
А	36,0	37,5
В	58,0	57,5
Γ	80,0	78,5
Δ	15,5	59,5
Е	38,0	80,0
ΣΤ	50,5	100,5
Ζ	18,0	102,0
Н	40,0	122,5
Θ	62,5	143,0
Ι	85,0	163,5
Κ	65,5	185,0

Σχήμα 2.7: Απεικόνιση θέσεων στο οριζόντιο επίπεδο ΧΟΥ.





Σχήμα 2.8: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

2.3 Δοκίμια

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένες αλυσίδες μονωτήρων πορσελάνης ή υάλου. Οι δισκοειδείς μονωτήρες τύπου "cap and pin", από τους οποίους αποτελούνται οι αλυσοειδείς μονωτήρες, απεικονίζονται στα Σχήματα 2.9 – 2.17. Κάποιοι από τους δισκοειδείς μονωτήρες είναι τύπου ομίχλης, ενώ κάποιοι άλλοι χαρακτηρίζονται ως κοινοί ή κανονικού τύπου ή κανονικής μορφής, δηλωτικό του ότι δεν είναι τύπου ομίχλης.

Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς 150kV αποτελούμενοι από:

 Δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης, με διάμετρο 254mm, βήμα 146mm και μήκος ερπυσμού 305mm (εργαστηρίου).



Σχήμα 2.9: Κοινός δισκοειδής μονωτήρας πορσελάνης (εργαστηρίου).

Δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, με διάμετρο 254mm, βήμα 146mm
 και μήκος ερπυσμού 290mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 033)



Σχήμα 2.10: Κοινός δισκοειδής μονωτήρας υάλου (κωδικός Δ.Ε.Η.: 033).

 Δώδεκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης, με διάμετρο 254mm, βήμα 146mm και μήκος ερπυσμού 290mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 010)



Σχήμα 2.11: Κοινός δισκοειδής μονωτήρας πορσελάνης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 010).

Δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, με διάμετρο 255mm, βήμα
 127mm και μήκος ερπυσμού 390mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161)



Σχήμα 2.12: Δισκοειδής μονωτήρας υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).

Δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, με διάμετρο 280mm, βήμα
 146mm και μήκος ερπυσμού 430mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 069)



Σχήμα 2.13: Δισκοειδής μονωτήρας υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 069).

Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς 400kV αποτελούμενοι από:

Δεκαοκτώ κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης, με διάμετρο 280mm,
 βήμα 170mm και μήκος ερπυσμού 370mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 070)



Σχήμα 2.14: Κοινός δισκοειδής μονωτήρας (κωδικός Δ.Ε.Η.: 070).

 Δεκαοκτώ κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, με διάμετρο 280mm, βήμα 170mm και μήκος ερπυσμού 270mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 082)



Σχήμα 2.15: Κοινός δισκοειδής μονωτήρας υάλου (κωδικός Δ.Ε.Η.: 082).

Δεκαέξι δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης, τύπου ομίχλης, με διάμετρο 320mm,
 βήμα 170mm και μήκος ερπυσμού 540mm (κωδικός Δ.Ε.Η 100)



Σχήμα 2.16: Δισκοειδής μονωτήρας πορσελάνης, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 100).

Δεκαοκτώ δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, με διάμετρο 320mm,
 βήμα 170mm και μήκος ερπυσμού 540mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 112)



Σχήμα 2.17: Δισκοειδής μονωτήρας υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 112).

2.4 Κατανομή τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες

Με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.2.1 λήφθηκαν δεκαπέντε σειρές μετρήσεων για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε κάθε αλυσοειδή μονωτήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV. Μία εκ των πέντε διαθέσιμων αλυσοειδών μονωτήρων ήταν ρυπασμένη, με αποτέλεσμα να μετρηθεί, αρχικά, η κατανομή της τάσης υπό συνθήκες ρύπανσης και, στη συνέχεια, κατόπιν καθαρισμού της αλυσίδας, να μετρηθεί εκ νέου η κατανομή της τάσης.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τους αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης των γραμμών μεταφοράς 150kV (για τους αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης των γραμμών μεταφοράς 400kV δεν ήταν εφικτό να μετρηθεί στο εργαστήριο η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, λόγω του μεγάλου μήκους των αλυσίδων αυτών), καθώς και η επεξεργασία τους με βάση τις σχέσεις (2.1) και (2.2) για τον υπολογισμό του ποσοστού της τάσης, με την οποία καταπονείται ο κάθε δισκοειδής μονωτήρας, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης για τους διάφορους αλυσοειδείς μονωτήρες, οι οποίοι αποτελούνται από δέκα ή δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις απεικονίζονται στα Σχήματα 2.18 – 2.23. Το διάστημα τιμών, που εμφανίζεται σε κάθε μέτρηση,

οριοθετείται από τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των δεκαπέντε μετρήσεων (μετά την εξαίρεση κάποιων μετρήσεων σύμφωνα με το Παράρτημα Β) της τάσης καταπόνησης κάθε δίσκου.

		Κατα	νομή επιβαλλ	όμενης τάση	; [%]	
α/α	Αλυσοειδής	Αλυσοειδής μονωτήρας	Αλυσοειδής μονωτήρας	Αλυσοειδής υάλου (κωδικ	; μονωτήρας κός ΔΕΗ 161)	Αλυσοειδής μονωτήρας
δισκοειδούς μονωτήρα	πορσελάνης (εργαστηρίου)	υάλου (κωδικός ΔΕΗ 033)	πορσελάνης (κωδικός ΔΕΗ 010)	Καθαρός	Υπό συνθήκες ρύπανσης	υάλου (κωδικός ΔΕΗ 069)
1	6,44	6,57	4,78	4,47	4,83	5,57
2	6,01	6,21	4,33	3,76	4,52	5,11
3	5,87	6,29	4,41	3,88	4,57	5,19
4	6,26	6,66	4,64	4,24	4,79	5,29
5	7,22	7,60	5,01	4,77	5,23	5,82
6	8,34	8,69	6,01	5,39	5,75	6,24
7	10,08	10,55	6,98	6,55	6,70	7,02
8	12,14	12,33	8,52	7,83	7,79	8,11
9	15,89	16,00	10,17	9,98	9,62	9,72
10	21,97	19,16	11,62	12,45	11,70	11,01
11			14,61	16,30	15,31	14,05
12			19,04	20,43	19,27	16,91

Πίνακας 2.1: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στους διάφορους αλυσοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 2.18: Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (εργαστηρίου).



Σχήμα 2.19: Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες υάλου (κωδικός Δ.Ε.Η.: 033).



Σχήμα 2.20: Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 010).



Σχήμα 2.21: Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).



Σχήμα 2.22: Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, υπό συνθήκες ρύπανσης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).



Σχήμα 2.23: Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 069).

2.5 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες

Μέσω της πειραματικής διάταξης, η οποία περιγράφτηκε στην Παράγραφο 2.2.2, λήφθηκαν μετρήσεις για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε όλους τους διαθέσιμους αλυσοειδείς μονωτήρες. Στους ρυπασμένους μονωτήρες μετρήθηκε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, αρχικά, υπό συνθήκες ρύπανσης, ενώ, στη συνέχεια, οι μονωτήρες καθαρίστηκαν και μετρήθηκε εκ νέου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Τα σημεία μέτρησης επελέγησαν ως εξής: ο αισθητήρας μετακινείται κατακορύφως άνω των σημείων Α – Κ, του οριζοντίου επιπέδου ΧΟΥ, που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7, σε θέσεις των οποίων οι συντεταγμένες z φαίνονται στους Πίνακες 2.2 – 2.11, στους οποίους φαίνονται οι ληφθείσες μετρήσεις πεδιακής

έντασης (σε	kV/m),	για	εφαρμογή	της,	αναφερθείσης	και	σε	άλλη	θέση	(§2.2.2)
τάσης 20kV.										

Z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]												
[cm]	Α	В	Γ	Δ	Ε	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K		
0,0	13,630	9,536	6,908	9,837	6,160	4,587	4,561	3,772	2,769	2,045	1,685		
5,5	12,920	9,260	6,864	9,539	6,085	4,543	4,575	3,742	2,742	2,020	1,652		
11,0	12,010	8,965	6,585	9,248	5,970	4,43	4,448	3,622	2,669	2,024	1,634		
16,5	11,220	8,580	6,292	9,129	5,800	4,356	4,437	3,563	2,635	1,983	1,611		
22,0	10,480	8,184	6,045	8,760	5,556	4,314	4,29	3,465	2,581	1,935	1,587		
27,5	9,877	7,660	5,789	8,257	5,300	4,100	4,197	3,342	2,544	1,929	1,570		
33,0	8,966	7,271	5,538	7,906	5,140	4,013	4,147	3,233	2,494	1,870	1,541		
38,5	8,430	6,800	5,218	7,435	5,122	3,844	4,071	3,183	2,426	1,815	1,531		
44,0	8,035	6,510	4,966	7,232	4,886	3,68	3,951	3,163	2,374	1,775	1,506		
49,5	7,514	6,142	4,713	6,775	4,728	3,561	3,818	3,013	2,351	1,735	1,466		
55,0	7,119	5,826	4,489	6,466	4,544	3,385	3,706	2,969	2,256	1,691	1,413		
60,5	6,811	5,547	4,232	6,010	4,342	3,262	3,582	2,845	2,188	1,648	1,397		
66,0	6,365	5,232	4,019	5,782	4,249	3,115	3,45	2,78	2,141	1,621	1,341		
71,5	5,976	4,855	3,851	5,408	4,061	2,983	3,34	2,667	2,073	1,586	1,319		
77,0	5,637	4,685	3,634	5,121	3,911	2,861	3,222	2,622	1,992	1,532	1,270		
82,5	5,375	4,407	3,458	4,843	3,777	2,717	3,088	2,519	1,924	1,508	1,241		
88,0	5,079	4,127	3,240	4,541	3,602	2,587	2,95	2,427	1,833	1,443	1,206		
93,5	4,738	3,893	3,053	4,351	3,450	2,476	2,825	2,319	1,802	1,416	1,183		
99,0	4,578	3,637	2,908	4,083	3,302	2,368	2,707	2,283	1,716	1,365	1,140		
104,5	4,317	3,410	2,738	3,893	3,124	2,26	2,61	2,196	1,653	1,295	1,112		
110,0	4,059	3,207	2,656	3,680	2,996	2,132	2,48	2,093	1,573	1,243	1,064		
115,5	3,847	2,997	2,509	3,473	2,782	2,047	2,355	2,039	1,536	1,203	1,022		
121,0	3,652	2,873	2,339	3,282	2,690	1,959	2,257	1,954	1,465	1,175	1,001		
126,5	3,358	2,678	2,220	3,056	2,594	1,834	2,157	1,881	1,421	1,111	0,957		

Πίνακας 2.2: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (εργαστηρίου).

z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]											
[cm]	Α	В	Γ	Δ	Е	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K	
0,0	15,610	9,984	6,985	10,300	6,674	4,614	4,693	3,436	2,690	2,008	1,658	
5,5	14,940	9,656	6,982	10,270	6,655	4,522	4,647	3,379	2,684	2,004	1,632	
11,0	13,970	9,289	6,667	10,000	6,612	4,473	4,617	3,404	2,667	1,978	1,615	
16,5	12,960	8,776	6,363	9,669	6,347	4,375	4,570	3,329	2,610	1,948	1,584	
22,0	11,980	8,349	6,141	9,044	6,139	4,214	4,480	3,214	2,572	1,945	1,551	
27,5	11,340	7,752	5,921	8,969	5,968	4,044	4,355	3,169	2,523	1,924	1,533	
33,0	10,590	7,397	5,650	8,541	5,757	3,925	4,258	3,113	2,474	1,882	1,504	
38,5	9,983	6,981	5,351	8,478	5,594	3,819	4,076	3,002	2,443	1,829	1,498	
44,0	9,230	6,669	5,115	7,964	5,356	3,754	3,968	2,912	2,371	1,774	1,459	
49,5	8,638	6,309	4,826	7,613	5,126	3,62	3,835	2,827	2,349	1,744	1,435	
55,0	8,188	5,962	4,578	7,178	4,861	3,489	3,743	2,697	2,267	1,694	1,411	
60,5	7,572	5,627	4,267	6,812	4,615	3,313	3,578	2,605	2,146	1,664	1,369	
66,0	7,126	5,304	4,068	6,407	4,410	3,108	3,432	2,494	2,082	1,599	1,325	
71,5	6,774	4,993	3,838	6,016	4,140	3,004	3,235	2,407	2,031	1,542	1,281	
77,0	6,313	4,748	3,663	5,670	3,939	2,91	3,122	2,319	1,935	1,508	1,231	
82,5	5,919	4,488	3,449	5,358	3,713	2,733	2,919	2,223	1,875	1,464	1,196	
88,0	5,435	4,237	3,254	4,972	3,517	2,622	2,813	2,119	1,802	1,396	1,163	
93,5	5,163	3,978	3,091	4,747	3,305	2,450	2,640	2,031	1,705	1,327	1,129	
99,0	4,814	3,764	2,937	4,369	3,119	2,340	2,522	1,951	1,648	1,291	1,090	
104,5	4,571	3,536	2,783	4,175	2,968	2,221	2,380	1,853	1,585	1,239	1,057	
110,0	4,287	3,266	2,623	3,853	2,821	2,111	2,246	1,789	1,508	1,205	1,027	
115,5	3,937	3,181	2,478	3,588	2,609	2,037	2,135	1,674	1,432	1,156	0,985	
121,0	3,772	2,965	2,421	3,373	2,508	1,941	2,015	1,600	1,388	1,121	0,950	
126,5	3,423	2,757	2,274	3,167	2,373	1,852	1,897	1,508	1,319	1,057	0,918	

Πίνακας 2.3: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες υάλου (κωδικός Δ.Ε.Η.: 033).

Z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]											
[cm]	Α	В	Γ	Δ	Е	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K	
11,0	14,130	9,397	6,761	10,740	6,749	4,527	4,766	3,388	2,723	2,030	1,605	
16,5	13,280	8,915	6,574	10,450	6,607	4,446	4,628	3,325	2,658	2,005	1,592	
22,0	12,270	8,526	6,289	10,160	6,434	4,367	4,628	3,318	2,644	1,968	1,621	
27,5	11,510	8,051	6,021	9,603	6,225	4,265	4,513	3,213	2,622	1,932	1,597	
33,0	10,630	7,660	5,749	9,170	6,006	4,143	4,434	3,183	2,526	1,923	1,567	
38,5	10,040	7,148	5,469	8,805	5,745	3,993	4,352	3,095	2,475	1,884	1,558	
44,0	9,466	6,729	5,256	8,301	5,564	3,830	4,218	3,004	2,438	1,842	1,504	
49,5	8,813	6,480	4,992	7,973	5,288	3,770	4,110	2,894	2,383	1,808	1,455	
54,5	8,271	6,217	4,722	7,558	5,136	3,654	4,004	2,829	2,346	1,788	1,454	
60,0	7,859	5,863	4,479	7,197	4,970	3,501	3,862	2,773	2,302	1,711	1,416	
65,5	7,325	5,468	4,281	6,846	4,756	3,361	3,644	2,667	2,240	1,654	1,386	
71,0	6,858	5,196	4,001	6,345	4,561	3,224	3,492	2,571	2,162	1,618	1,368	
76,5	6,400	4,925	3,785	5,968	4,307	3,083	3,352	2,478	2,080	1,593	1,320	
82,0	6,010	4,681	3,637	5,557	4,030	2,940	3,197	2,408	2,007	1,538	1,282	
87,5	5,648	4,371	3,436	5,246	3,814	2,810	3,064	2,286	1,946	1,483	1,248	
93,0	5,301	4,137	3,289	4,916	3,609	2,675	2,952	2,173	1,873	1,433	1,227	
98,5	5,062	3,899	3,109	4,617	3,431	2,531	2,777	2,081	1,794	1,394	1,182	
104,0	4,750	3,699	2,978	4,417	3,256	2,417	2,633	2,011	1,762	1,345	1,155	
109,5	4,445	3,528	2,812	4,184	3,079	2,294	2,528	1,926	1,703	1,293	1,100	
115,0	4,098	3,273	2,679	3,934	2,936	2,178	2,419	1,831	1,620	1,243	1,089	
120,5	3,880	3,088	2,526	3,661	2,760	2,082	2,273	1,766	1,556	1,195	1,041	
126,0	3,676	2,916	2,398	3,464	2,612	1,966	2,180	1,692	1,505	1,153	1,002	
131,5	3,390	2,709	2,264	3,197	2,480	1,874	2,068	1,600	1,433	1,114	0,975	
137,0	3,203	2,616	2,189	3,013	2,319	1,785	1,965	1,519	1,381	1,080	0,932	
142,5	3,028	2,451	2,077	2,798	2,195	1,685	1,859	1,456	1,338	1,032	0,905	
148,0	2,812	2,324	1,942	2,656	2,047	1,615	1,770	1,380	1,253	1,006	0,880	
153,5	2,646	2,188	1,849	2,469	1,962	1,523	1,659	1,336	1,192	0,963	0,851	
159,0	2,439	2,019	1,751	2,307	1,845	1,455	1,577	1,273	1,152	0,917	0,807	

Πίνακας 2.4: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δώδεκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 010).

Z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]												
[cm]	А	В	Г	Δ	Е	ΣΤ	Ζ	Н	Θ	Ι	K		
11,0	14,330	9,389	6,824	11,010	6,832	4,583	4,993	3,563	2,819	2,116	1,712		
16,5	13,420	8,995	6,657	10,750	6,736	4,488	4,913	3,513	2,724	2,077	1,703		
22,0	12,300	8,503	6,402	10,380	6,545	4,359	4,736	3,465	2,694	2,041	1,677		
27,5	11,470	8,186	6,118	10,000	6,466	4,290	4,652	3,382	2,697	2,021	1,642		
33,0	10,630	7,652	5,847	9,499	6,204	4,193	4,536	3,290	2,659	1,988	1,609		
38,5	10,060	7,273	5,603	9,040	5,934	4,079	4,448	3,187	2,558	1,950	1,603		
44,0	9,424	6,906	5,300	8,566	5,726	3,909	4,328	3,127	2,536	1,877	1,582		
49,5	8,782	6,623	5,051	8,106	5,457	3,788	4,172	3,068	2,465	1,847	1,529		
54,5	8,443	6,368	4,769	7,733	5,370	3,642	4,112	2,986	2,437	1,814	1,516		
60,0	7,912	6,093	4,590	7,241	5,087	3,482	4,012	2,879	2,381	1,771	1,498		
65,5	7,415	5,740	4,296	6,943	4,835	3,390	3,855	2,766	2,312	1,728	1,436		
71,0	7,011	5,400	4,088	6,543	4,614	3,219	3,688	2,674	2,238	1,676	1,422		
76,5	6,530	5,084	3,920	6,129	4,379	3,084	3,538	2,544	2,186	1,629	1,394		
82,0	6,225	4,787	3,694	5,789	4,160	2,967	3,361	2,472	2,132	1,580	1,365		
87,5	5,906	4,475	3,510	5,464	4,001	2,837	3,210	2,387	2,049	1,527	1,322		
93,0	5,806	4,254	3,378	5,179	3,802	2,743	3,069	2,309	1,954	1,503	1,284		
98,5	5,526	4,035	3,206	4,909	3,598	2,614	2,956	2,225	1,863	1,428	1,236		
104,0	5,189	3,834	3,014	4,633	3,292	2,458	2,801	2,140	1,842	1,388	1,193		
109,5	4,561	3,607	2,870	4,328	3,256	2,340	2,654	2,030	1,749	1,332	1,155		
115,0	4,337	3,439	2,740	4,109	3,111	2,235	2,531	1,941	1,698	1,304	1,124		
120,5	4,044	3,217	2,602	3,838	2,945	2,120	2,375	1,874	1,628	1,265	1,084		
126,0	3,825	3,049	2,499	3,613	2,768	2,045	2,275	1,789	1,545	1,225	1,064		
131,5	3,590	2,877	2,375	3,380	2,623	1,939	2,150	1,711	1,485	1,165	1,021		
137,0	3,349	2,701	2,282	3,170	2,490	1,845	2,048	1,616	1,441	1,129	0,989		
142,5	3,161	2,555	2,166	3,003	2,349	1,762	1,930	1,540	1,374	1,087	0,954		
148,0	2,965	2,411	2,074	2,811	2,206	1,700	1,841	1,487	1,335	1,056	0,918		
153,5	2,778	2,282	1,954	2,653	2,067	1,612	1,732	1,422	1,262	1,018	0,884		
159,0	2,629	2,133	1,848	2,481	1,940	1,510	1,660	1,357	1,203	0,967	0,848		

Πίνακας 2.5: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).

Z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]											
[cm]	А	В	Г	Δ	Ε	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K	
11,0	14,010	9,100	6,698	10,540	6,468	4,487	4,580	3,316	2,652	2,046	1,643	
16,5	13,230	8,818	6,466	10,220	6,407	4,350	4,570	3,260	2,648	1,999	1,640	
22,0	12,300	8,331	6,211	9,930	6,220	4,294	4,511	3,225	2,595	1,998	1,632	
27,5	11,330	7,983	6,017	9,560	6,012	4,134	4,403	3,169	2,532	1,933	1,599	
33,0	10,500	7,513	5,711	9,126	5,836	4,009	4,280	3,116	2,500	1,918	1,545	
38,5	9,891	7,102	5,433	8,591	5,626	3,876	4,190	3,026	2,441	1,846	1,517	
44,0	9,210	6,696	5,198	8,211	5,468	3,746	4,034	2,981	2,383	1,832	1,507	
49,5	8,649	6,330	4,945	7,851	5,176	3,624	3,872	2,872	2,339	1,771	1,463	
54,5	8,246	6,113	4,717	7,480	5,122	3,484	3,826	2,766	2,303	1,751	1,460	
60,0	7,711	5,798	4,429	7,058	4,864	3,353	3,703	2,671	2,226	1,713	1,419	
65,5	7,182	5,424	4,259	6,632	4,654	3,231	3,565	2,580	2,198	1,660	1,388	
71,0	6,719	5,157	4,047	6,215	4,441	3,083	3,414	2,500	2,097	1,603	1,357	
76,5	6,290	4,832	3,831	5,803	4,246	2,966	3,274	2,406	2,036	1,563	1,340	
82,0	5,925	4,578	3,661	5,494	4,023	2,841	3,143	2,316	1,981	1,523	1,300	
87,5	5,559	4,308	3,519	5,238	3,838	2,704	3,010	2,233	1,899	1,476	1,272	
93,0	5,255	4,150	3,352	4,857	3,602	2,609	2,879	2,139	1,830	1,434	1,232	
98,5	4,950	3,860	3,172	4,574	3,446	2,482	2,718	2,058	1,782	1,388	1,195	
104,0	4,617	3,723	3,001	4,285	3,255	2,392	2,598	1,965	1,702	1,329	1,166	
109,5	4,318	3,453	2,773	4,062	3,017	2,262	2,487	1,875	1,660	1,285	1,132	
115,0	4,091	3,298	2,677	3,763	2,835	2,153	2,396	1,794	1,607	1,265	1,080	
120,5	3,828	3,061	2,546	3,512	2,731	2,056	2,239	1,715	1,512	1,219	1,034	
126,0	3,555	2,899	2,387	3,298	2,579	1,927	2,100	1,635	1,464	1,178	1,007	
131,5	3,342	2,717	2,244	3,128	2,431	1,872	2,005	1,564	1,398	1,129	0,964	
137,0	3,134	2,578	2,141	2,926	2,288	1,786	1,893	1,489	1,338	1,070	0,938	
142,5	2,974	2,405	2,028	2,750	2,139	1,702	1,827	1,431	1,284	1,028	0,902	
148,0	2,773	2,276	1,974	2,586	2,041	1,605	1,707	1,359	1,230	0,997	0,874	
153,5	2,614	2,145	1,829	2,431	1,913	1,522	1,622	1,312	1,183	0,962	0,844	
159,0	2,407	2,033	1,757	2,258	1,790	1,437	1,531	1,239	1,124	0,921	0,826	

Πίνακας 2.6: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, υπό συνθήκες ρύπανσης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).

Z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]												
[cm]	А	В	Γ	Δ	Е	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K		
11,0	14,670	9,273	6,796	10,580	6,660	4,443	4,576	3,284	2,629	1,964	1,602		
16,5	13,530	8,839	6,494	10,290	6,455	4,327	4,460	3,237	2,598	1,943	1,579		
22,0	12,290	8,383	6,222	9,913	6,358	4,281	4,428	3,220	2,536	1,909	1,568		
27,5	11,390	7,998	5,953	9,389	6,107	4,118	4,275	3,155	2,495	1,880	1,551		
33,0	10,450	7,518	5,626	9,014	5,821	4,004	4,208	3,078	2,473	1,852	1,510		
38,5	10,090	7,092	5,389	8,585	5,607	3,832	4,088	2,998	2,394	1,847	1,487		
44,0	8,998	6,730	5,098	8,050	5,424	3,706	3,911	2,894	2,300	1,801	1,481		
49,5	8,701	6,334	4,877	7,641	5,194	3,569	3,835	2,839	2,296	1,756	1,443		
54,5	8,284	6,041	4,628	7,233	4,982	3,447	3,763	2,727	2,282	1,721	1,430		
60,0	7,676	5,688	4,373	6,731	4,750	3,330	3,673	2,632	2,203	1,668	1,412		
65,5	7,189	5,443	4,200	6,403	4,534	3,178	3,437	2,544	2,121	1,626	1,370		
71,0	6,825	5,162	3,935	5,977	4,301	3,066	3,290	2,442	2,078	1,585	1,340		
76,5	6,334	4,770	3,757	5,637	4,089	2,888	3,144	2,377	1,988	1,534	1,303		
82,0	5,894	4,467	3,517	5,283	3,834	2,778	3,021	2,300	1,924	1,488	1,236		
87,5	5,560	4,236	3,352	5,009	3,651	2,645	2,886	2,205	1,852	1,433	1,235		
93,0	5,202	3,976	3,193	4,667	3,437	2,500	2,748	2,092	1,777	1,375	1,208		
98,5	4,839	3,777	2,995	4,362	3,266	2,387	2,589	1,994	1,732	1,335	1,165		
104,0	4,514	3,560	2,836	4,036	3,080	2,312	2,445	1,889	1,672	1,304	1,115		
109,5	4,254	3,354	2,671	3,813	2,898	2,208	2,337	1,830	1,589	1,251	1,071		
115,0	3,937	3,113	2,536	3,519	2,717	2,092	2,214	1,745	1,535	1,214	1,056		
120,5	3,666	2,952	2,411	3,312	2,567	1,992	2,005	1,667	1,465	1,163	1,019		
126,0	3,407	2,763	2,295	3,124	2,407	1,860	1,989	1,582	1,416	1,118	0,992		
131,5	3,206	2,611	2,174	2,882	2,329	1,766	1,925	1,519	1,347	1,078	0,954		
137,0	2,972	2,433	2,054	2,703	2,142	1,601	1,826	1,424	1,301	1,041	0,925		
142,5	2,791	2,310	1,951	2,534	2,021	1,610	1,708	1,373	1,263	1,004	0,895		
148,0	2,590	2,171	1,847	2,337	1,926	1,508	1,567	1,316	1,189	0,960	0,861		
153,5	2,399	2,028	1,730	2,176	1,812	1,435	1,525	1,244	1,143	0,928	0,830		
159,0	2,261	1,874	1,651	2,033	1,690	1,347	1,395	1,178	1,095	0,895	0,798		

Πίνακας 2.7: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 069).

Z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]										
[cm]	А	В	Γ	Δ	Ε	ΣΤ	Ζ	Н	Θ	Ι	K
11,0	13,010	9,059	6,872	10,330	6,645	4,606	4,846	3,507	2,836	2,100	1,718
16,5	12,240	8,628	6,579	10,060	6,511	4,518	4,726	3,460	2,793	2,083	1,716
22,0	11,480	8,228	6,330	9,728	6,324	4,385	4,692	3,402	2,752	2,087	1,687
27,5	10,800	7,775	6,007	9,454	6,126	4,287	4,537	3,330	2,719	2,041	1,671
33,0	10,170	7,380	5,776	9,016	5,863	4,172	4,451	3,233	2,648	1,985	1,642
38,5	9,580	7,052	5,521	8,703	5,711	4,049	4,332	3,175	2,626	1,953	1,625
44,0	9,025	6,694	5,264	8,277	5,421	3,902	4,236	3,072	2,556	1,935	1,592
49,5	8,557	6,304	4,978	7,862	5,273	3,748	4,045	2,998	2,507	1,883	1,573
54,5	8,233	6,019	4,748	7,435	5,130	3,635	3,987	2,943	2,399	1,818	1,539
60,0	7,767	5,720	4,504	7,029	4,946	3,483	3,862	2,846	2,369	1,808	1,498
65,5	7,310	5,441	4,299	6,638	4,726	3,361	3,701	2,739	2,321	1,748	1,485
71,0	6,921	5,214	4,110	6,371	4,528	3,229	3,558	2,647	2,252	1,718	1,448
76,5	6,541	4,928	3,932	6,064	4,333	3,092	3,403	2,568	2,191	1,667	1,412
82,0	6,153	4,683	3,721	5,752	4,158	2,957	3,264	2,474	2,129	1,601	1,388
87,5	5,853	4,437	3,552	5,434	3,968	2,836	3,157	2,387	2,065	1,575	1,351
93,0	5,599	4,231	3,373	5,220	3,778	2,715	3,044	2,315	2,000	1,534	1,317
98,5	5,291	4,010	3,229	4,903	3,594	2,587	2,919	2,224	1,933	1,486	1,273
104,0	5,006	3,823	3,078	4,632	3,434	2,483	2,762	2,124	1,877	1,444	1,242
109,5	4,726	3,634	2,933	4,406	3,264	2,369	2,660	2,066	1,806	1,398	1,207
115,0	4,472	3,466	2,820	4,176	3,129	2,242	2,541	1,983	1,752	1,351	1,171
120,5	4,232	3,284	2,657	3,952	2,966	2,160	2,415	1,894	1,683	1,305	1,138
126,0	3,999	3,110	2,562	3,765	2,814	2,069	2,309	1,821	1,620	1,274	1,102
131,5	3,781	2,958	2,435	3,542	2,673	1,988	2,197	1,743	1,560	1,227	1,080
137,0	3,573	2,830	2,331	3,346	2,539	1,891	2,096	1,673	1,510	1,189	1,022
142,5	3,372	2,683	2,234	3,171	2,416	1,819	2,013	1,606	1,463	1,130	0,993
148,0	3,206	2,563	2,134	3,014	2,270	1,727	1,928	1,536	1,413	1,115	0,967
153,5	3,040	2,434	2,041	2,835	2,170	1,658	1,832	1,484	1,342	1,064	0,933
159,0	2,868	2,287	1,948	2,732	2,080	1,593	1,753	1,415	1,305	1,033	0,895
164,5	2,702	2,196	1,852	2,549	1,982	1,517	1,684	1,366	1,260	1,000	0,865
170,0	2,575	2,097	1,785	2,481	1,887	1,450	1,604	1,301	1,193	0,957	0,840
175,5	2,403	1,973	1,698	2,301	1,783	1,387	1,496	1,250	1,154	0,928	0,801
181,0	2,273	1,871	1,626	2,187	1,675	1,317	1,425	1,189	1,095	0,900	0,776
186,5	2,139	1,782	1,539	2,057	1,609	1,251	1,357	1,139	1,076	0,874	0,736
192,0	2,029	1,651	1,487	1,998	1,487	1,178	1,252	1,070	1,011	0,822	0,708

Πίνακας 2.8: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δεκαοκτώ κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 070).

z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]											
[cm]	А	В	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K	
11,0	14,960	10,000	7,246	12,450	7,616	4,990	5,416	3,878	3,099	2,340	1,901	
16,5	13,910	9,510	6,899	12,020	7,544	4,901	5,396	3,820	3,049	2,323	1,873	
22,0	12,870	9,036	6,599	11,470	7,268	4,781	5,385	3,771	3,022	2,292	1,809	
27,5	11,990	8,627	6,362	11,080	7,099	4,681	5,318	3,692	2,987	2,223	1,787	
33,0	11,360	8,117	6,073	10,650	6,869	4,472	5,147	3,626	2,914	2,193	1,752	
38,5	10,700	7,822	5,814	10,100	6,665	4,339	4,975	3,561	2,870	2,153	1,736	
44,0	9,928	7,230	5,512	9,697	6,389	4,232	4,906	3,493	2,778	2,081	1,712	
49,5	9,370	6,931	5,269	9,323	6,121	4,078	4,815	3,353	2,722	2,013	1,674	
54,5	9,012	6,639	5,053	8,864	5,803	3,974	4,638	3,254	2,661	1,984	1,621	
60,0	8,538	6,374	4,780	8,399	5,585	3,830	4,495	3,171	2,615	1,933	1,605	
65,5	8,171	6,077	4,589	8,013	5,384	3,725	4,394	3,075	2,536	1,893	1,578	
71,0	7,718	5,861	4,410	7,557	5,149	3,564	4,222	2,977	2,469	1,835	1,541	
76,5	7,357	5,588	4,186	7,203	4,911	3,411	4,033	2,897	2,400	1,806	1,517	
82,0	7,067	5,321	4,001	6,827	4,761	3,303	3,886	2,799	2,329	1,749	1,480	
87,5	6,693	5,047	3,833	6,485	4,553	3,213	3,720	2,716	2,265	1,729	1,439	
93,0	6,258	4,857	3,688	6,227	4,365	3,054	3,627	2,617	2,203	1,665	1,404	
98,5	6,011	4,612	3,510	5,918	4,183	2,927	3,464	2,525	2,132	1,641	1,369	
104,0	5,698	4,324	3,448	5,659	4,000	2,828	3,344	2,447	2,100	1,606	1,370	
109,5	5,369	4,143	3,226	5,294	3,828	2,752	3,198	2,377	2,020	1,552	1,324	
115,0	5,107	3,980	3,095	5,025	3,718	2,639	3,074	2,262	1,944	1,496	1,294	
120,5	4,901	3,721	2,955	4,831	3,509	2,529	2,971	2,215	1,885	1,438	1,277	
126,0	4,662	3,564	2,821	4,672	3,384	2,408	2,799	2,102	1,830	1,414	1,247	
131,5	4,397	3,422	2,712	4,388	3,234	2,340	2,707	2,035	1,765	1,373	1,210	
137,0	4,171	3,300	2,582	4,152	3,054	2,223	2,605	1,956	1,733	1,321	1,177	
142,5	4,002	3,104	2,496	3,935	3,002	2,140	2,474	1,880	1,665	1,277	1,142	
148,0	3,767	2,972	2,413	3,782	2,827	2,044	2,392	1,817	1,615	1,251	1,118	
153,5	3,609	2,845	2,270	3,587	2,688	1,978	2,278	1,735	1,538	1,205	1,093	
159,0	3,418	2,708	2,208	3,505	2,570	1,884	2,173	1,681	1,486	1,163	1,042	
164,5	3,236	2,624	2,110	3,312	2,465	1,825	2,091	1,618	1,435	1,120	1,016	
170,0	3,067	2,499	2,039	3,182	2,375	1,736	2,004	1,531	1,404	1,102	1,005	
175,5	2,926	2,384	1,964	3,050	2,243	1,652	1,908	1,474	1,354	1,070	0,973	
181,0	2,752	2,251	1,873	2,900	2,135	1,608	1,782	1,394	1,283	1,031	0,924	
186,5	2,688	2,172	1,798	2,897	2,094	1,573	1,737	1,321	1,237	0,983	0,917	
192,0	2,502	2,110	1,729	2,798	1,935	1,481	1,573	1,278	1,194	0,922	0,873	

Πίνακας 2.9: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δεκαοκτώ κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες υάλου (κωδικός Δ.Ε.Η.: 082).

z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]										
[cm]	Α	В	Γ	Δ	Ε	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K
11,0	15,510	10,140	7,304	12,910	7,740	4,990	5,343	3,769	3,010	2,218	1,797
16,5	14,360	9,720	7,048	12,410	7,560	4,872	5,281	3,723	2,963	2,187	1,776
22,0	13,270	9,135	6,748	12,030	7,330	4,729	5,231	3,644	2,909	2,146	1,759
27,5	12,410	8,755	6,465	11,370	7,106	4,619	5,100	3,588	2,864	2,110	1,730
33,0	11,650	8,234	6,140	10,830	6,796	4,480	5,007	3,492	2,814	2,062	1,698
38,5	11,040	7,863	5,872	10,380	6,481	4,346	4,758	3,421	2,754	2,022	1,673
44,0	10,420	7,462	5,611	9,915	6,367	4,196	4,695	3,326	2,688	1,977	1,642
49,5	9,845	7,112	5,382	9,371	6,109	4,070	4,555	3,231	2,626	1,944	1,613
54,5	9,359	6,746	5,116	8,917	5,832	3,926	4,453	3,152	2,572	1,909	1,582
60,0	8,895	6,480	4,887	8,402	5,624	3,787	4,332	3,040	2,494	1,864	1,558
65,5	8,386	6,207	4,677	7,973	5,303	3,609	4,154	2,953	2,428	1,824	1,524
71,0	7,908	5,894	4,476	7,526	5,109	3,462	4,006	2,849	2,358	1,772	1,495
76,5	7,483	5,581	4,229	7,111	4,866	3,358	3,828	2,757	2,287	1,727	1,460
82,0	7,051	5,291	4,070	6,741	4,690	3,210	3,698	2,679	2,220	1,679	1,426
87,5	6,644	5,020	3,874	6,367	4,449	3,102	3,529	2,578	2,135	1,632	1,385
93,0	6,303	4,810	3,739	6,040	4,251	2,998	3,369	2,491	2,100	1,601	1,353
98,5	5,912	4,529	3,571	5,675	4,045	2,866	3,242	2,407	2,015	1,534	1,319
104,0	5,622	4,314	3,386	5,394	3,836	2,756	3,112	2,323	1,965	1,498	1,284
109,5	5,252	4,113	3,266	5,010	3,649	2,642	2,957	2,232	1,897	1,454	1,240
115,0	4,992	3,924	3,116	4,762	3,542	2,543	2,827	2,154	1,830	1,404	1,206
120,5	4,669	3,687	2,988	4,448	3,345	2,429	2,707	2,057	1,772	1,356	1,174
126,0	4,398	3,480	2,873	4,262	3,151	2,312	2,598	1,972	1,701	1,313	1,137
131,5	4,139	3,320	2,721	3,979	3,022	2,218	2,462	1,886	1,647	1,274	1,106
137,0	3,920	3,159	2,581	3,809	2,904	2,122	2,349	1,813	1,587	1,240	1,080
142,5	3,719	3,020	2,479	3,562	2,746	2,037	2,238	1,745	1,532	1,196	1,052
148,0	3,518	2,841	2,360	3,397	2,647	1,953	2,156	1,668	1,481	1,166	1,009
153,5	3,297	2,690	2,258	3,185	2,466	1,869	2,046	1,609	1,433	1,119	0,975
159,0	3,117	2,599	2,190	3,048	2,331	1,780	1,941	1,536	1,388	1,077	0,949
164,5	2,950	2,434	2,072	2,852	2,216	1,718	1,868	1,482	1,328	1,045	0,914
170,0	2,811	2,295	1,994	2,754	2,100	1,624	1,771	1,414	1,286	1,008	0,883
175,5	2,596	2,164	1,879	2,541	1,967	1,540	1,686	1,347	1,231	0,976	0,840
181,0	2,478	2,069	1,821	2,452	1,881	1,455	1,570	1,292	1,160	0,930	0,816
186,5	2,292	1,927	1,711	2,275	1,829	1,393	1,526	1,248	1,134	0,898	0,778
192,0	2,185	1,867	1,676	2,240	1,683	1,310	1,409	1,170	1,032	0,858	0,752

Πίνακας 2.10: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δεκαέξι δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 100).

Z	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου [kV/m]										
[cm]	Α	В	Г	Δ	Е	ΣΤ	Z	Н	Θ	Ι	K
11,0	14,350	9,592	6,940	11,840	7,234	5,006	5,342	3,805	2,935	2,253	1,835
16,5	13,530	9,247	6,793	11,480	7,161	4,932	5,292	3,749	2,920	2,206	1,805
22,0	12,550	8,744	6,585	11,220	6,945	4,778	5,248	3,675	2,868	2,171	1,787
27,5	11,780	8,351	6,368	10,710	6,856	4,647	5,156	3,597	2,859	2,131	1,766
33,0	11,010	7,791	6,067	10,350	6,604	4,491	5,029	3,516	2,787	2,079	1,759
38,5	10,480	7,607	5,751	9,889	6,370	4,360	4,873	3,468	2,748	2,045	1,745
44,0	9,794	7,154	5,501	9,404	6,097	4,249	4,713	3,345	2,674	2,017	1,741
49,5	9,338	6,744	5,213	8,931	5,888	4,057	4,578	3,260	2,609	1,969	1,711
54,5	8,846	6,431	4,956	8,489	5,677	3,879	4,468	3,228	2,594	1,941	1,679
60,0	8,333	6,235	4,741	8,026	5,527	3,779	4,352	3,139	2,516	1,902	1,611
65,5	7,890	5,923	4,538	7,728	5,359	3,623	4,230	3,055	2,447	1,843	1,563
71,0	7,623	5,712	4,342	7,307	5,008	3,545	4,101	2,962	2,389	1,798	1,515
76,5	7,338	5,386	4,219	6,937	4,897	3,384	3,942	2,828	2,320	1,751	1,478
82,0	6,959	5,096	4,074	6,586	4,688	3,241	3,833	2,727	2,281	1,709	1,450
87,5	6,606	4,904	3,892	6,276	4,491	3,145	3,709	2,628	2,229	1,659	1,404
93,0	6,171	4,645	3,723	6,026	4,278	3,016	3,550	2,575	2,146	1,616	1,374
98,5	5,891	4,448	3,508	5,638	4,089	2,876	3,392	2,491	2,087	1,572	1,342
104,0	5,561	4,228	3,330	5,459	3,906	2,799	3,270	2,395	2,041	1,525	1,322
109,5	5,318	4,003	3,135	5,177	3,539	2,676	3,086	2,317	1,981	1,477	1,275
115,0	4,995	3,860	3,047	4,863	3,343	2,555	2,945	2,253	1,904	1,477	1,248
120,5	4,723	3,649	2,924	4,613	3,131	2,469	2,817	2,165	1,851	1,408	1,198
126,0	4,563	3,518	2,789	4,459	3,065	2,353	2,731	2,086	1,777	1,341	1,166
131,5	4,302	3,387	2,668	4,168	2,978	2,313	2,617	2,003	1,714	1,319	1,130
137,0	4,048	3,185	2,582	3,997	2,943	2,217	2,455	1,924	1,653	1,287	1,108
142,5	3,717	3,035	2,463	3,831	2,798	2,133	2,351	1,847	1,609	1,247	1,064
148,0	3,647	2,945	2,362	3,679	2,652	2,047	2,245	1,767	1,525	1,185	1,037
153,5	3,539	2,781	2,258	3,468	2,534	1,934	2,163	1,696	1,507	1,155	1,016
159,0	3,285	2,677	2,180	3,356	2,436	1,865	2,074	1,623	1,452	1,112	0,985
164,5	3,137	2,560	2,077	3,143	2,292	1,785	2,007	1,570	1,418	1,078	0,960
170,0	3,048	2,426	1,974	2,991	2,211	1,701	1,894	1,507	1,341	1,050	0,928
175,5	2,858	2,355	1,913	2,744	2,123	1,620	1,805	1,453	1,312	1,021	0,880
181,0	2,721	2,236	1,856	2,671	2,012	1,556	1,708	1,374	1,245	0,970	0,849
186,5	2,557	2,094	1,753	2,569	1,873	1,489	1,608	1,319	1,201	0,938	0,827
192.0	2,440	1.955	1.710	2,583	1.822	1.395	1.528	1.242	1.126	0.885	0.787

Πίνακας 2.11: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αποτελούμενο από δεκαοκτώ δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 112).

2.6 Συμπεράσματα

Από τα Σχήματα 2.18 – 2.23 και τον Πίνακα 2.1 προκύπτει ότι η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης κατά μήκος των αλυσοειδών μονωτήρων είναι ανομοιόμορφη, με αποτέλεσμα ο δισκοειδής μονωτήρας πλησίον του αγωγού υψηλής τάσης να καταπονείται με το μεγαλύτερο ποσοστό της τάσης σε σχέση με τους υπόλοιπους μονωτήρες. Το ποσοστό αυτό είναι περίπου τετραπλάσιο από το αντίστοιχο ποσοστό του δισκοειδούς μονωτήρα με τη μικρότερη καταπόνηση, για αλυσίδες αποτελούμενες από δέκα ή δώδεκα δίσκους. Η ανομοιομορφία της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης οφείλεται στην ανάπτυξη παράσιτων χωρητικοτήτων μεταξύ των μεταλλικών μερών του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα και αφ' ενός του αγωγού υψηλής τάσης και αφ' ετέρου του πυλώνα (γη). Η μέση τιμή των παράσιτων χωρητικοτήτων ως προς γη είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή των παράσιτων γωρητικοτήτων ως προς τη γραμμή μεταφοράς, γεγονός που εξηγεί την αύξηση της καταπόνησης των δισκοειδών μονωτήρων καθώς προσεγγίζουμε τον αγωγό υψηλής τάσης. Η καταπόνηση των δισκοειδών μονωτήρων μειώνεται σταδιακά πλησιάζοντας προς τον πυλώνα, αν και το ποσοστό της επιβαλλόμενης τάσης στον πρώτο ή στους δύο πρώτους δισκοειδείς μονωτήρες (πλησίον του πυλώνα) είναι αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό του αμέσως επόμενου δισκοειδούς μονωτήρα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των παρασίτων χωρητικοτήτων προς γην στους δισκοειδείς μονωτήρες πλησίον του πυλώνα, η οποία συνοδεύεται από αντίστοιγη μείωση της παράσιτης γωρητικότητας ως προς την υψηλή τάση.

Όπως προκύπτει από τη σύγκριση της κατανομής της τάσης σε δύο αλυσοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (010 και εργαστηρίου), με παραπλήσιες διαστάσεις και διαφορετικό αριθμό δίσκων, η καταπόνηση ανά δισκοειδή μονωτήρα προφανώς μειώνεται, όταν προστεθούν δίσκοι στην αλυσίδα, με αποτέλεσμα και ο δισκοειδής μονωτήρας πλησίον του αγωγού να καταπονείται με μικρότερη τάση: στην περίπτωση των αλυσοειδών μονωτήρων αποτελούμενων από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες, ο τελευταίος δισκοειδής μουωτήρας καταπονείται κατά μέσο όρο με το 21% της επιβαλλόμενης τάσης, οι δύο τελευταίοι με το 37% και οι τρεις τελευταίοι με το 49%. Αντίστοιχα, στους αλυσοειδείς μονωτήρες αποτελούμενους από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες, ο τελευταίος δισκοειδείς μονωτήρες καταπονείται κατά μέσο δισκοειδη με το 49%.

όρο με το 19% της επιβαλλόμενης τάσης, οι δύο τελευταίοι με το 34% και οι τρεις τελευταίοι με το 46%.

Στο Σχήμα 2.24 παρουσιάζεται η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης για τον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου, τύπου ομίχλης, όταν αυτός είναι καθαρός ή υπό συνθήκες ρύπανσης. Ο αλυσοειδής μονωτήρας ήταν ρυπασμένος με τυχαίο τρόπο (παραλήφθηκε ρυπασμένος από τη Δ.Ε.Η.), με αποτέλεσμα τόσο η ποσότητα της ρύπανσης, όσο και το είδος της να μην είναι προσδιορισμένα. Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα τείνει να γίνει πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή στον καθαρό. Ο πρώτος έως και ο έβδομος δισκοειδής μονωτήρας καταπονούνται με μεγαλύτερη τάση στην περίπτωση της ρυπασμένης αλυσίδας, ενώ η καταπόνηση του όγδοου έως και του δωδέκατου δισκοειδή μονωτήρα είναι μικρότερη. Ο καθαρός δισκοειδής μονωτήρας πλησίον του αγωγού καταπονείται με 6% μεγαλύτερη τάση σε σύγκριση με τον αντίστοιχο ρυπασμένο. Αν και η επιδίωξη για ομοιόμορφη κατανομή φαίνεται να ικανοποιείται με την επικάθηση ρύπανσης, η ταυτόχρονη αύξηση των απωλειών ισχύος, η μείωση της κρίσιμης έντασης και ο κίνδυνος ανωμαλιών καθιστούν, προφανώς, ανεπιθύμητη την ύπαρξη ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων. Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σχετίζεται άμεσα με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, με αποτέλεσμα όσο πιο ομοιόμορφη (μικρότερες διαφορές δυναμικού) είναι η κατανομή της τάσης, τόσο μικρότερες είναι οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 2.24: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον καθαρό και στο ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).

Από το Σχήμα 2.25 προκύπτει ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ένταση στον καθαρό.





Όσον αφορά στη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, παρατηρείται ότι η απομάκρυνση από τον αγωγό υψηλής τάσης, είτε στο κάθετο, είτε στο οριζόντιο επίπεδο, οδηγεί σε μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 2.26). Σε θέσεις πλησίον του αλυσοειδούς μονωτήρα, η μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι εκθετική, ενώ σε απομακρυσμένες θέσεις τείνει να γίνει γραμμική.



Σχήμα 2.26: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από το αλυσοειδή μονωτήρα υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).

Η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και του υλικού κατασκευής του μονωτήρα αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Στα Σχήματα 2.27 και 2.28 φαίνεται η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (θέση Η) για τρεις αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, οι οποίοι αποτελούνται

από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες. Παρατηρείται ότι ο αλυσοειδής μονωτήρας με τις μεγαλύτερες διαστάσεις (κωδικός 069) εμφανίζει πιο ομοιόμορφη κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και συνεπώς μικρότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 2.27: Σύγκριση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάση σε τρεις μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 2.28: Σύγκριση της ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε τρεις μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες.

Η επίδραση του υλικού κατασκευής των μονωτήρων στην κατανομή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου φαίνεται στα Σχήματα 2.29 και 2.30, όπου ο αλυσοειδής μονωτήρας υάλου (033) συγκρίνεται με τον ιδίων διαστάσεων αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης (εργαστηρίου). Ο μονωτήρας υάλου παρουσιάζει πιο ομοιόμορφη κατανομή από τον μονωτήρα πορσελάνης. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά του γυαλιού σε σχέση με την πορσελάνη, με αποτέλεσμα οι μονωτήρες υάλου να εμφανίζουν μεγαλύτερη κύρια χωρητικότητα.



Σχήμα 2.29: Σύγκριση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάση σε δύο μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 2.30: Σύγκριση της ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο μονωτήρες 150kV, αποτελούμενους από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες.

Οι ληφθείσες μετρήσεις αξιοποιούνται σε επόμενα κεφάλαια, καθώς αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από την προσομοίωση των αλυσοειδών μονωτήρων. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με πειραματικά δεδομένα, και όχι μόνο με προσομοιώσεις άλλων ερευνητών, αποτελεί ένδειξη, τουλάχιστον, για την εγκυρότητα των μοντέλων προσομοίωσης. Επιπλέον, οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες.

Οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συμβάλλουν σημαντικά στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων, ιδίως γιατί διεξήχθησαν με δοκίμια, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πράξη για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 3

ΠΕΔΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Η μελέτη της διηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων αποτελεί ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, το οποίο είναι δυνατό να επιλυθεί με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους. Οι αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν ταχύτατη επίλυση και ακριβή αποτελέσματα, αλλά η εφαρμογή τους γίνεται εξαιρετικά δύσκολη σε πολύπλοκες γεωμετρίες και μη γραμμικά υλικά. Αντίθετα, οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύπλοκα προβλήματα, αλλά υπεισέρχονται ανακρίβειες στις λύσεις, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά προκειμένου να μην οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η πεδιακή ανάλυση των μονωτήρων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα PC OPERA της Vector fields, το οποίο εφαρμόζει την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση των μερικών διαφορικών ή ολοκληρωτικών εξισώσεων, οι οποίες είναι δύσκολο να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Βασίζεται στη διαίρεση του χώρου σε μικρά στοιχεία (πεπερασμένα στοιχεία) όγκου για τρισδιάστατη ανάλυση ή επιφανείας για δισδιάστατη ανάλυση. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι δυνατή η απόζευξη των ηλεκτρικών μεγεθών από τα μαγνητικά, καθώς οι υπό εξέταση μονωτήρες λειτουργούν σε χαμηλή (βιομηχανική) συχνότητα. Συνεπώς, ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου των μονωτήρων είναι δυνατό να αναχθεί σε πρόβλημα ηλεκτροστατικού πεδίου, το οποίο επιλύεται με την εξίσωση Poisson, κατά την

οποία, το δυναμικό φ σε μια διάσταση περιγράφεται από τη σχέση [106, 107]:

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = -\rho \tag{3.1}$$

όπου το ρ είναι η γραμμική πυκνότητα φορτίου και ε η επιτρεπτόητα. Προκειμένου να οριστεί το δυναμικό φ, απαιτείται γνώση των οριακών συνθηκών, οι οποίες είναι

συγκεκριμένες τιμές είτε του δυναμικού ϕ , είτε της παραγώγου του $\frac{\partial \phi}{\partial x}$.

Για τη λύση της εξίσωσης (3.1) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία, καθένα από τα οποία διαιρείται σε δύο αριθμημένους κόμβους (π.χ. 1 και 2). Το δυναμικό σε κάθε τέτοιο στοιχείο προσεγγίζεται από το γραμμικό πολυώνυμο:

$$\phi(\mathbf{x}) = \alpha + \beta \cdot \mathbf{x} \tag{3.2}$$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό είναι συνεχές στο χώρο, παρ' όλο που η παράγωγός του δυναμικού είναι δυνατό να είναι ασυνεχής.

Η εξίσωση (3.2) απλοποιείται με τη χρήση κομβικών συναρτήσεων N_i, οι οποίες, για ένα συγκεκριμένο κόμβο, ορίζονται μόνο εντός των στοιχείων, που περιέχουν τον κόμβο αυτό, ενώ εκτός των στοιχείων αυτών είναι μηδενικές:

$$N_{i}(x) = \begin{cases} 1 & x = x_{i} \\ 0 & x = x_{j}, j \neq i \end{cases}$$

$$(3.3)$$

όπου x_i είναι η x συντεταγμένη του κόμβου i.

$$\phi(\mathbf{x}) = \mathbf{N}_1(\mathbf{x}) \cdot \phi_1 + \mathbf{N}_2(\mathbf{x}) \cdot \phi_2 \tag{3.4}$$

Σε κάθε στοιχείο οι συναρτήσεις N_i εκφράζονται σε τοπικές συντεταγμένες, με στόχο την απλοποίηση των μαθηματικών εκφράσεων και την αποφυγή λαθών, που προκύπτουν από αριθμητικές στρογγυλοποιήσεις. Χρησιμοποιώντας το σύστημα τοπικών συντεταγμένων ξ, οι συναρτήσεις N_i γράφονται ως εξής:

$$N_{1} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \xi), \ N_{2} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \xi) \ \mu \varepsilon \ -1 \le \xi \le 1$$
(3.5)

Μία προσεγγιστική επίλυση ως προς φ της εξίσωσης (3.1), σύμφωνα με τη μέθοδο των συντελεστών βαρύτητας, καθορίζεται από την απαίτηση να ικανοποιείται η συνάρτηση:

$$\int w \left(\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi + \rho \right) \cdot dx = 0 \tag{3.6}$$

ΠΕΔΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

όπου w είναι η συνάρτηση βάρους.

Ολοκληρώνοντας την (3.6) κατά τμήματα, προκειμένου να μειωθεί η τάξη της διαφόρισης που εφαρμόζεται στο φ, προκύπτει μια προσεγγιστική λύση για το δυναμικό φ:

$$\int_{a}^{b} \left(\nabla \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \nabla \boldsymbol{\phi} + \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\rho} \right) \cdot d\mathbf{x} - \left[\mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \frac{\vartheta \boldsymbol{\phi}}{\vartheta \mathbf{x}} \right]_{a}^{b} = 0$$
(3.7)

όπου α, b τα όρια ολοκλήρωσης της εξίσωσης.

Με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων και των συναρτήσεων N_i, η εξίσωση (3.7) οδηγεί σε μια μέθοδο αριθμητικής επίλυσης, η οποία πλεονεκτεί έναντι άλλων, αφού οι συναρτήσεις w και φ δεν απαιτούν συνέχεια των παραγώγων και, επιπλέον, καθορίζονται εύκολα οι φυσικές οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του χώρου.

Ο τομέας από α έως b διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι δίνουν ένα συνδυασμό ανεξάρτητων συναρτήσεων βάρους. Από αυτές τις συναρτήσεις βάρους αναπτύσσονται εξισώσεις, υπό την προϋπόθεση ότι η σχέση (3.7) ικανοποιείται για κάθε συνάρτηση βάρους.

Η εξίσωση για τη συνάρτηση βάρους w_i εξάγεται από τη σχέση:

$$\sum_{j} \left(\int_{a}^{b} (\nabla N_{i} \cdot \varepsilon \nabla N_{j} \phi_{j} + N_{i} \cdot \rho) \cdot \partial x \right) - \left[N_{i} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_{a}^{b} = 0$$
(3.8)

για όλα τα στοιχεία που περιέχουν τον κόμβο i.

Οι διαφορετικές συναρτήσεις βάρους αποτελούν ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, που σε μητρική μορφή γράφεται ως:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{\Phi} = \mathbf{S} \tag{3.9}$$

όπου K ο πίνακας των συντελεστών, Φ το διάνυσμα των άγνωστων δυναμικών στους κόμβους και S το διάνυσμα των οριακών συνθηκών ή των πυκνοτήτων φορτίου.

Οι συντελεστές στον πίνακα Κ έχουν τη μορφή:

$$\mathbf{K}_{ij} = \int_{a}^{b} \nabla \mathbf{N}_{i} \cdot \varepsilon \nabla \mathbf{N}_{j} \cdot \mathbf{dx}$$
(3.10)

Επισημαίνεται ότι, παρ' όλο που η ολοκλήρωση στην εξίσωση (3.10) πραγματοποιείται για όρια από α έως b, μόνο τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και τους δύο κόμβους i και j συνεισφέρουν. Επιπλέον, οι εξισώσεις στη σχέση (3.10) δεν είναι πάντα γραμμικές, επειδή η επιτρεπτότητα ε εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, που προφανώς δεν είναι γραμμική.

Για την επίλυση αυτών των μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson. Δίνεται μια αρχική τιμή-λύση $Φ_n$ στα δυναμικά και υπολογίζεται μια νέα λύση $Φ_{n+1}$ επιλύνοντας το γραμμικοποιημένο Ιακωβιανό σύστημα:

$$\boldsymbol{\Phi}_{n+1} = \boldsymbol{\Phi}_n - \boldsymbol{J}_n^{-1} \cdot \boldsymbol{R}_n \tag{3.11}$$

$$όπου Rn = Kn ⋅ Φn - Sn$$
(3.12)

και
$$\mathbf{J}_{n} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{\Phi}_{n}} \cdot \left(\mathbf{K}_{n} \cdot \mathbf{\Phi}_{n} - \mathbf{S}_{n} \right)$$
 (Ιακωβιανή μήτρα) (3.13)

Με διαδοχικές επαναλήψεις της μεθόδου Newton-Raphson, προσεγγίζεται η ζητούμενη τιμή του δυναμικού.

3.3 Δισδιάστατες προσομοιώσεις μονωτήρων

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις διαφόρων τύπων μονωτήρων, ρυπασμένων ή μη, με σκοπό τον υπολογισμό αφ' ενός μεν της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης, αφ' ετέρου δε του ηλεκτρικού πεδίου τόσο στο εσωτερικό των μονωτήρων, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο.

Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν στο OPERA-2d, το οποίο επιλύει την εξίσωση Poisson ($\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho$), ενώ, επιπρόσθετα, αποφασίζει αν θα επιλύσει την εξίσωση ροής ρεύματος, ελέγχοντας κατά πόσον το μοντέλο περιέχει κάποιο υλικό, στο οποίο η αγωγιμότητα σ έχει μη μηδενική τιμή [106]:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \mathbf{V} = 0 \tag{3.14}$$

Στην περίπτωση χρονομεταβλητών προβλημάτων, υπό την προϋπόθεση ότι φαινόμενα επαγωγής είναι αμελητέα σε ημιαγώγιμα διηλεκτρικά προβλήματα, το πρόγραμμα επιλύει την εξίσωση:

$$\nabla \cdot \varepsilon_{\rm c} \nabla V = 0 \tag{3.15}$$

όπου

$$\varepsilon_{c} = \varepsilon_{o} \cdot \varepsilon_{r} - j \cdot \frac{\sigma}{\omega}$$
(3.16)

Προκειμένου να είναι εφικτή η αναπαράσταση της διάταξης ενός μονωτήρα από ένα δισδιάστατο μοντέλο, γίνεται η θεώρηση ότι δεν υπάρχει γωνιακή συνιστώσα του πεδίου και η κατανομή του είναι ίδια σε κάθε αξονική τομή (συμμετρικό εκ περιστροφής). Συνεπώς, στη δισδιάστατη διάταξη δεν είναι δυνατό να ληφθούν υπ' όψιν μη συμμετρικά στοιχεία, όπως η γραμμή μεταφοράς.

3.3.1 Προσομοίωση αλυσοειδούς μονωτήρα

Προκειμένου να μελετηθεί η διηλεκτρική συμπεριφορά μονωτήρων, προσομοιώθηκε ένας αλυσοειδής μονωτήρας πορσελάνης τύπου cap and pin αποτελούμενος από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες, καθένας από τους οποίους έχει διάμετρο 254mm, ύψος 146mm και μήκος ερπυσμού 305mm. Ο συγκεκριμένος αλυσοειδής μονωτήρας χρησιμοποιείται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV. Στο Σχήμα 3.1α παρουσιάζεται το μοντέλο, όπως αυτό δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Κατά την προσομοίωση η πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων είναι υψηλότερη στις 'κρίσιμες' περιοχές, στις οποίες απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές (Σχήμα 3.1β).



Σχήμα 3.1 α) Μοντέλο αλυσοειδούς μονωτήρα, β) πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων σε τμήμα του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτροστατικός επιλύτης του προγράμματος OPERA-2d. Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών, οι οποίες είναι παράλληλες στον άξονα του μονωτήρα, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2, ενώ στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των ίδιων γραμμών. Επειδή ο ηλεκτροστατικός επιλύτης λαμβάνει υπ' όψιν του μόνο την επιτρεπτότητα των υλικών, και, προκειμένου να συνυπολογιστεί η τιμή της αγωγιμότητας των υλικών του μονωτήρα (πορσελάνη, τσιμέντο, μέταλλο), το προηγούμενο μοντέλο αλυσοειδούς μονωτήρα επιλύθηκε ως ένα πρόβλημα διηλεκτρικών με απώλειες (lossy dielectrics). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για συχνότητα 50Hz. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό κατά μήκος, παράλληλων στον άξονα του μονωτήρα, γραμμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.4 και 3.5.



Σχήμα 3.2: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για ηλεκτροστατική ανάλυση.



Σχήμα 3.3: Κατανομή δυναμικού κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για ηλεκτροστατική ανάλυση.



Σχήμα 3.4: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για συχνότητα 50Hz (lossy dielectrics).



Σχήμα 3.5: Κατανομή δυναμικού κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα για συχνότητα 50Hz (lossy dielectrics).

Από τα Σχήματα 3.4 και 3.5 είναι εμφανές ότι, εξαιτίας των παράσιτων χωρητικοτήτων της άρθρωσης μεταξύ των δισκοειδών μονωτήρων είτε προς τον αγωγό υψηλής τάσης, είτε προς τη γη, η κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου είναι ανομοιόμορφη, με αποτέλεσμα οι δισκοειδείς μονωτήρες κοντά στον αγωγό υψηλής τάσης να εμφανίζουν αυξημένη ένταση ηλεκτρικού πεδίου σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Στο Σχήμα 3.6 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ηλεκτροστατική ανάλυση και ανάλυση διηλεκτρικών με απώλειες, με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, τα οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η ανάλυση διηλεκτρικών με απώλειες για συχνότητα 50Hz βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης μειώνοντας το μέσο σφάλμα μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης από 20,83% (ηλεκτροστατική επίλυση) σε 6,04% (επίλυση διηλεκτρικών με απώλειες).



Σχήμα 3.6: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα.
Επιπρόσθετα, το μοντέλο επιλύθηκε πεδιακά στην περίπτωση, που η επιφάνεια του μονωτήρα έχει καλυφθεί από στρώμα ρύπανσης. Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για συνθήκες ρύπανσης, για τις οποίες υπάρχουν πειραματικά δεδομένα στη βιβλιογραφία [59]. Η ισοδύναμη πυκνότητα επικαθήσεως άλατος C (ESDD) ως δείκτης της σφοδρότητας της ρύπανσης και μεταβαλλόταν από C=0,02mg/cm² έως C=0,3mg/cm². Οι διάφορες περιπτώσεις ρύπανσης, ενώ η εφαρμοζόμενη τάση επιλέγηκε για κάθε ποσότητα ρύπανσης, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παράλληλα, εφαρμόστηκε το μαθηματικό μοντέλο [44] για τις συνθήκες του πειράματος.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα, η κρίσιμη τάση U_c, η οποία μετρήθηκε πειραματικά και υπολογίστηκε μέσω του μαθηματικού μοντέλου, μετατράπηκε σε κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_c μέσω της σχέσης (3.17). Αντίθετα, από το πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογίζεται απ' ευθείας η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

$$E_{c} = \frac{U_{c}}{L}$$
(3.17)

όπου L είναι το μήκος ερπυσμού.



Σχήμα 3.7: Κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της ρύπανσης.

Από τη γραφική παράσταση του Σχήματος 3.7 παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων, των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων του προγράμματος προσομοίωσης. Συνεπώς, το

πρόγραμμα προσομοίωσης είναι δυνατό να αποτελέσει ένα βοηθητικό εργαλείο για το σχεδιασμό μονωτήρων προσφέροντας το πλεονέκτημα, σε σχέση με άλλους τρόπους εκτίμησης του πεδίου, ότι μπορεί να υπολογίσει την τιμή του ηλεκτρικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου.

3.3.2 Προσομοίωση συνθετικού μονωτήρα

Ένας πολυμερής μονωτήρας προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα OPERA-2d και, στη συνέχεια, επιχειρήθηκε η απλοποίηση του μοντέλου, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος κατασκευής του μοντέλου και ο υπολογιστικός χρόνος της προσομοίωσης, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο για την προσομοίωση μονωτήρων μεγάλου μήκους. Συγκεκριμένα, μοντελοποιήθηκε ένας μονωτήρας μήκους 812mm, ο οποίος αποτελείται από 12 κυάθια (sheds) κατασκευασμένα από σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber). Ο πυρήνας και το περίβλημά του είναι κατασκευασμένα από ρητίνη ενισχυμένη με υαλόνημα (fiberglass). Στο Σχήμα 3.8α παρουσιάζεται το απλοποιημένο μοντέλο, το οποίο προκύπτει από την αφαίρεση σημαντικού αριθμού από τα μεσαία κυάθια (8 από τα 12).



Σχήμα 3.8: α) Μοντέλο μονωτήρα και β) απλοποιημένο μοντέλο μονωτήρα.

Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται η κατανομή της τάσης τόσο στο εσωτερικό, όσο και περιβάλλοντα χώρο του μονωτήρα, όπως προκύπτει από την επίλυση του πλήρους και του απλοποιημένου μοντέλου του μονωτήρα. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε μία γραμμή, η οποία ακολουθεί το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα, για το πλήρες και το απλοποιημένο μοντέλο. Το απλοποιημένο μοντέλο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την κατανομή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του μονωτήρα (Σχήμα 3.10). Διαφορά παρατηρείται στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των κυαθίων, τα οποία έχουν παραληφθεί στο απλοποιημένο μοντέλο, αλλά παρ' όλα αυτά η μέγιστη τιμή της έντασης συμφωνεί με την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει από το πλήρες μοντέλο.



Σχήμα 3.9: Κατανομή δυναμικού α) για το πλήρες μοντέλο και β) για το απλοποιημένο μοντέλο.



Σχήμα 3.10: α) Κατανομή δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα και β) ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του μονωτήρα για το πλήρες και το απλοποιημένο μοντέλο.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα αποτελέσματα δημοσιευμένα στη βιβλιογραφία [90], αποδείχθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική. Συμπερασματικά, είναι εφικτή η απλοποίηση των μοντέλων των μονωτήρων, με συνέπεια να είναι δυνατή και εύκολη η προσομοίωση μονωτήρων μεγάλου μήκους.

3.4 Τρισδιάστατες προσομοιώσεις μονωτήρων

Η αξονική συμμετρία του μοντέλου του μονωτήρα αναιρείται από την ύπαρξη μη συμμετρικών στοιχείων πλησίον του μονωτήρα, όπως η γραμμή μεταφοράς και ο πυλώνας. Συνεπώς, καθίσταται απαραίτητη η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του μονωτήρα, ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση και των υπολοίπων, συνδεδεμένων με το μονωτήρα, στοιχείων.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προσομοιώθηκαν αλυσοειδείς μονωτήρες

τύπου cap and pin (τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στην Παράγραφο 2.3), οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τη Δ.Ε.Η. για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV και 400kV. Για τους συγκεκριμένους αλυσοειδείς μονωτήρες έχουν διεξαχθεί πειράματα στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., τα οποία έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 2. Στα τρισδιάστατα μοντέλα, που δημιουργήθηκαν, συμπεριλήφθηκε τμήμα της γραμμής μεταφοράς, περίπου ίσο με το συνολικό μήκος της κάθε αλυσίδας [86]. Στην επιφάνεια του αγωγού τίθεται το δυναμικό ίσο με $150/\sqrt{3}$ kV ή ίσο με $400/\sqrt{3}$ kV, ανάλογα με την τάση λειτουργίας της γραμμής μεταφοράς. Η επίλυση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με τον ηλεκτροστατικό επιλύτη του OPERA-3d [107], καθώς δεν είναι διαθέσιμος ο επιλύτης που συνυπολογίζει τις απώλειες των διηλεκτρικών (lossy dielectrics). Εξαιτίας της χρήσης ηλεκτροστατικού επιλύτη, ο οποίος χρησιμοποιεί για την επίλυση μόνο τις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών (επιτρεπτότητα), ενώ η αγωγιμότητα λαμβάνεται μηδενική, η τιμή της επιτρεπτότητας των μεταλλικών στοιχείων του μονωτήρα αυξήθηκε σημαντικά, ώστε να υπάρχει καλύτερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς τους.

3.4.1 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 150kV

Αλυσοειδής μονωτήρας πορσελάνης 150kV, κανονικού τύπου (εργαστηρίου)

Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται το μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως αυτό εισήχθηκε στο OPERA-3d. Ο αγωγός είναι τοποθετημένος συγγραμμικά στον άξονα X, ενώ ο μονωτήρας εκτείνεται κατά μήκος του άξονα Z.



Σχήμα 3.11: Μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα πορσελάνης 150kV.

Στα Σχήματα 3.12 – 3.13, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Z και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος είτε του άξονα X (Y=0), είτε του άξονα Y (X=0). Οι γραμμές (X=125mm, Y=0mm) και (X=0mm, Y=125mm) παρουσιάζουν απότομες βυθίσεις εκεί που διαπερνούν την άκρη των εξωτερικών πτυχώσεων των δισκοειδών μονωτήρων (η ακτίνα του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα είναι 127mm). Οι βυθίσεις αυτές οφείλονται στη μεγαλύτερη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς της πορσελάνης από τον περιβάλλοντα αέρα, με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εντός της πορσελάνης.

Η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμής, που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, παρουσιάζεται σε ξεχωριστή γραφική παράσταση (Σχήμα 3.13γ), καθώς οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου διαφέρουν σημαντικά σε τάξη μεγέθους από αντίστοιχες τιμές εκτός του μονωτήρα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13γ, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγώγιμων μερών της αλυσίδας, γεγονός αναμενόμενο. Οι κορυφές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζονται στην περιοχή της πορσελάνης του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα, καθώς έχει τη μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με τα υπόλοιπα μέρη του μονωτήρα. Παρ' όλο που η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται από το δισκοειδή μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο δισκοειδή μονωτήρα, παρατηρείται μια μικρή αύξηση της μέγιστης τιμής της έντασης στους δύο τελευταίους δισκοειδείς μονωτήρες, η οποία δικαιολογείται από την αύξηση της τάσης (Σχήματα 3.12 και 3.15).



Σχήμα 3.12: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 125, 300, 600mm και β) Y=0mm και X=0, 125, 300, 600mm.



Σχήμα 3.13: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=125, 300, 600mm, β) Y=0mm και X=125, 300, 600mm γ) X=0mm και Y=0mm.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιφάνειες ίσου δυναμικού (Σχήμα 3.14α) και ίσης έντασης ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 3.14β) γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο επίπεδο ΥΖ.



Σχήμα 3.14: α) Ισοδυναμικές επιφάνειες και β) επιφάνειες ίσης έντασης ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο επίπεδο ΥΖ.

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων (Παράγραφος 2.4), και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι 4,25%, το οποίο είναι μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο σφάλμα, που προέκυψε από τη δισδιάστατη προσομοίωση (Παράγραφος 3.3.1).



Σχήμα 3.15: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης 150kV, κανονικού τύπου (εργαστηρίου).

Στο Σχήμα 3.16 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.16: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης 150kV, κανονικού τύπου (εργαστηρίου).

Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία Α, Δ, Ε και ΣΤ είναι 3,82%, 8,74%, 11,34% και 12,05% αντίστοιχα.

Αλυσοειδής μονωτήρας υάλου 150kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 033)

Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται το μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου, ο οποίος αποτελείται από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 3.17: Μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου 150kV.

Στα Σχήματα 3.18 – 3.19, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Ζ και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος του άξονα Χ (Y=0) και του άξονα Υ (X=0). Από τις συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις εξάγονται παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που ήδη έχουν αναφερθεί για τον αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης 150kV, κανονικού τύπου.

Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων (Παράγραφο 2.4), και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα.

Στο Σχήμα 3.21 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της τάσης προέκυψε ίσο με 2,31%, ενώ το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία A, Δ, Ε και ΣΤ είναι 10,22%, 16,44%, 13,43% και 10,88% αντίστοιχα.



Σχήμα 3.18: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 120, 300, 600mm και β) Y=0mm και X=0, 120, 300, 600mm.



Σχήμα 3.19: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=120, 300, 600mm, β) Y=0mm και X=120, 300, 600mm γ) X=0mm και Y=0mm.



Σχήμα 3.20: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 150kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 033).



Σχήμα 3.21: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 150kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 033).

Αλυσοειδής μονωτήρας πορσελάνης 150kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 010)

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζεται το μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα πορσελάνης, όπως αυτό δημιουργήθηκε στο Opera-3d.



Σχήμα 3.22: Μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα πορσελάνης 150kV.

Στα Σχήματα 3.23 – 3.24, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Ζ και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος του άξονα X (Y=0) και του άξονα Y (X=0).

Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων (Παράγραφο 2.4), και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα. Στο Σχήμα 3.26 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της τάσης προέκυψε ίσο με 5,34%, ενώ το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία Α, Δ, Ε και ΣΤ είναι 4,54%, 13,43%, 9,73% και 2,91% αντίστοιχα.



Σχήμα 3.23: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 125, 300, 600mm και β) Y=0mm και X=0, 125, 300, 600mm.



Σχήμα 3.24: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=125, 300, 600mm, β) Y=0mm και X=125, 300, 600mm γ) X=0mm και Y=0mm.



Σχήμα 3.25: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης 150kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 010).



Σχήμα 3.26: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης 150kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 010).

<u>Αλυσοειδής μονωτήρας υάλου 150kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 161)</u>

Στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζεται το μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου, ο οποίος αποτελείται από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες.

Στα Σχήματα 3.28 – 3.29, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Ζ και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος του άξονα X (Y=0) και του άξονα Y (X=0).







Σχήμα 3.28: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 135, 300, 600mm και β) Y=0mm και X=0, 135, 300, 600mm.



Σχήμα 3.29: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=135, 300, 600mm, β) Y=0mm και X=135, 300, 600mm γ) X=0mm και Y=0mm.

Στο Σχήμα 3.30 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων (Παράγραφο 2.4), και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα. Στο Σχήμα 3.31 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.30: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 150kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 161).



Σχήμα 3.31: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 150kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 161).

Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της τάσης προέκυψε ίσο με 4,68%, ενώ το

μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία Α, Δ, Ε και ΣΤ είναι 8,78%, 15,90%, 12,00% και 3,28% αντίστοιχα.

<u>Αλυσοειδής μονωτήρας υάλου 150kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 069)</u>

Στο Σχήμα 3.32 παρουσιάζεται το μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου, ο οποίος αποτελείται από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 3.32: Μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου 150kV.

Στα Σχήματα 3.33 - 3.34, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Z και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος του άξονα X (Y=0) και του άξονα Y (X=0).

Στο Σχήμα 3.35 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων (Παράγραφο 2.4), και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα. Στο Σχήμα 3.36 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την κατανομή της τάσης προέκυψε ίσο με 4,49%, ενώ το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία A, Δ, Ε και ΣΤ είναι 7,18%, 8,31%, 4,88% και 6,79% αντίστοιχα.



Σχήμα 3.33: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 120, 300, 600mm και β) Y=0mm και X=0, 120, 300, 600mm.



Σχήμα 3.34: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=120, 300, 600mm, β) Y=0mm και X=120, 300, 600mm γ) X=0mm και Y=0mm.



Σχήμα 3.35: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 150kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 069).



Σχήμα 3.36: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 150kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 069).

3.4.2 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 400kV

Αλυσοειδής μονωτήρας πορσελάνης 400kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 070)

Στο Σχήμα 3.37 απεικονίζεται το μοντέλο του αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης, ο οποίος αποτελείται από δεκαοκτώ δισκοειδείς μονωτήρες. Ο αγωγός είναι τοποθετημένος συγγραμμικά στον άξονα Χ, ενώ ο μονωτήρας εκτείνεται κατά μήκος του άξονα Ζ.



Σχήμα 3.37: Μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα πορσελάνης 400kV.

Στα Σχήματα 3.38 – 3.39, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Ζ και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος είτε του άξονα X (Y=0),

είτε του άξονα Y (X=0). Όπως παρατηρήθηκε και για τους μονωτήρες των 150kV, οι γραμμές, οι οποίες διαπερνούν την άκρη των εξωτερικών πτυχώσεων των δισκοειδών μονωτήρων, παρουσιάζουν έντονες βυθίσεις, εξαιτίας της μεγαλύτερης τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς της πορσελάνης από τον περιβάλλοντα αέρα.



Σχήμα 3.38: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 140, 400, 700mm και β) Y=0mm και X=0, 140, 400, 700mm.



Σχήμα 3.39: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=140, 400, 700mm, β) Y=0mm και X=140, 400, 700mm γ) X=0mm και Y=0mm.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιφάνειες ίσου δυναμικού (Σχήμα 3.40α) και ίσης έντασης ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 3.40β) γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο επίπεδο ΥΖ. Στο Σχήμα 3.41 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.40: α) Ισοδυναμικές επιφάνειες και β) επιφάνειες ίσης έντασης ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο επίπεδο YZ.



Σχήμα 3.41: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα πορσελάνης 400kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 070).

Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία Α, Δ, Ε και ΣΤ είναι 9,29%, 13,49%, 7,07% και 4,19% αντίστοιχα.

Αλυσοειδής μονωτήρας υάλου 400kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 082)

Στο Σχήμα 3.42 παρουσιάζεται το μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου, ο οποίος αποτελείται από δεκαοκτώ δισκοειδείς μονωτήρες. Στα Σχήματα 3.43 – 3.44, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Ζ και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος είτε του άξονα Χ (Y=0), είτε του άξονα Υ (X=0).



Σχήμα 3.42: Μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου 400kV.



Σχήμα 3.43: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 145, 400, 700mm και β) Y=0mm και X=0, 145, 400, 700mm.



Σχήμα 3.44: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=145, 400, 700mm, β) Y=0mm και X=145, 400, 700mm γ) X=0mm και Y=0mm.

Στο Σχήμα 3.45 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία Α, Δ, Ε και ΣΤ είναι 7,61%, 11,72%, 12,52% και 3,13% αντίστοιχα.



Σχήμα 3.45: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 400kV, κανονικού τύπου (κωδικός Δ.Ε.Η. 082).

Αλυσοειδής μονωτήρας υάλου 400kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 112)

Στο Σχήμα 3.46 παρουσιάζεται το μοντέλο του αλυσοειδούς μονωτήρα υάλου, ο οποίος αποτελείται από δεκαοκτώ δισκοειδείς μονωτήρες.





της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα Z και κινούμενων σε διαφορετικές αποστάσεις κατά μήκος είτε του άξονα X (Y=0), είτε του άξονα Y (X=0).

Στο Σχήμα 3.49 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις του χώρου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.5, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τα σημεία Α, Δ, Ε και ΣΤ είναι 10,70%, 13,65%, 6,39% και 7,94% αντίστοιχα.



Σχήμα 3.47: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=0, 160, 400, 700mm και β) Y=0mm και X=0, 160, 400, 700mm.



Σχήμα 3.48: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα με α) X=0mm και Y=160, 400, 700mm, β) Y=0mm και X=160, 400, 700mm γ) X=0mm και Y=0mm.



Σχήμα 3.49: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα υάλου 400kV, τύπου ομίχλης (κωδικός Δ.Ε.Η. 112).

3.5 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Η δυσκολία διεξαγωγής πειραμάτων, καθώς αποτελούν χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία, κατέδειξε την ανάγκη για τη δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης, τα οποία προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια και αποτελούν αρωγό για την επιλογή του σωστού τύπου μονωτήρα. Τα μοντέλα των μονωτήρων επιλύθηκαν με τη βοήθεια προγράμματος υπολογισμού ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Opera της εταιρείας Vector Fields). Από την επίλυση του κάθε μοντέλου υπολογίζεται το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο του μονωτήρα.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής δημιουργήθηκαν δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης και συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους. Οι δισδιάστατες προσομοιώσεις εκμεταλλεύονται την αξονική συμμετρία, που παρουσιάζει ένας μονωτήρας. Στις δισδιάστατες προσομοιώσεις, όμως, είναι αδύνατο να συμπεριληφθούν μη συμμετρικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται με το μονωτήρα, όπως η γραμμή

την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Για το λόγο αυτό, είναι επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης των μονωτήρων.

Βασική παραδοχή για την επίλυση τόσο των δισδιάστατων, όσο και των τρισδιάστατων μοντέλων είναι η θεώρηση του πεδίου ως ηλεκτροστατικού, δηλαδή κατά την επίλυση λαμβάνεται υπ' όψιν η επιτρεπτότητα, αλλά αγνοείται η αγωγιμότητα των υλικών, γεγονός που επηρεάζει τα αποτελέσματα. Επιπλέον, ο ηλεκτροστατικός επιλύτης είναι ακατάλληλος για την προσομοίωση της ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων. Η διαπίστωση της συγκεκριμένης αδυναμίας του ηλεκτροστατικού επιλύτη έγινε αποδεκτή από την εταιρεία ανάπτυξης του προγράμματος Opera, οδηγώντας την στη δημιουργία ενός νέου επιλύτη, ο οποίος στηρίζεται σε επαλληλία του ηλεκτροστατικού προβλήματος και του προβλήματος ροής φορτίου, δίνοντας τη δυνατότητα προσδιορισμού των υλικών μέσω της επιτρεπτότητας και της αγωγιμότητάς τους. Ο συγκεκριμένος επιλύτης (lossy dielectrics) είναι διαθέσιμος μόνο για την επίλυση δισδιάστατων προβλημάτων, ενώ

Στην περίπτωση των τρισδιάστατων προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτροστατικός επιλύτης. Η αδυναμία ορισμού της αγωγιμότητας των μεταλλικών μερών του μονωτήρα ξεπεράστηκε προσαρμόζοντας κατάλληλα την τιμή της επιτρεπτότητάς τους. Στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιδρά σημαντικά η επιτρεπτότητα και των υπολοίπων υλικών (πορσελάνη ή γυαλί, τσιμέντο). Από τη διερεύνηση της βιβλιογραφίας προέκυψε ότι η διακύμανση των τιμών της επιτρεπτότητας για τα διάφορα υλικά έχει μεγάλο εύρος, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαφορετική σύνθεση του κάθε υλικού ανάλογα με την εφαρμογή του. Συνεπώς, θα ήταν χρήσιμη η διεξαγωγή πειραμάτων για τη μέτρηση της επιτρεπτότητας των συγκεκριμένων υλικών. Η διαδικασία αυτή, όμως, είναι ανέφικτη στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, καθώς απαιτείται συγκεκριμένων διαστάσεων δείγμα κάθε υλικού του μονωτήρα. Στις προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκαν, η τιμή της επιτρεπτότητας του κάθε υλικού επιλέχθηκε ως μία ενδεικτική τιμή από τη βιβλιογραφία και διατηρήθηκε σταθερή για το κάθε υλικό σε όλες τις προσομοιώσεις, καθώς δεν ήταν διαθέσιμες πειραματικές τιμές για τα υλικά του κάθε μονωτήρα.

Επισημαίνεται ότι, σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση του

μοντέλου. Προς επίτευξη τούτου, ελέγχθηκε το μέγεθος του περιβάλλοντα χώρου του μονωτήρα, του οποίου η εξωτερική επιφάνεια θεωρήθηκε γειωμένη (άπειρη γη), και αυξήθηκε το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων σε κρίσιμες περιοχές του μοντέλου. Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, και διαπιστώθηκε η ιδιαίτερα ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ αυτών τόσο για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, όσο και για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Η αξιοπιστία των μοντέλων ενισχύεται από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα για τη μέτρηση της κατανομής της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που προέκυψαν από το ίδιο μοντέλο προσομοίωσης, συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν από δύο διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες, μία για τη μέτρηση της κατανομής της τάσης και μία για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με αποτέλεσμα να υπεισέρχονται διαφορετικοί παράγοντες σφάλματος σε κάθε μέτρηση, και διαπιστώθηκε η ιδιαίτερα ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Παράλληλα, αποτελέσματα προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με αποτελέσματα άλλων ερευνητών [90], οι οποίοι χρησιμοποιούν τη μέθοδο των οριακών στοιχείων: και από τη σύγκριση αυτή, προέκυψε ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων, παρ' ότι η μεθοδολογία επίλυσης ήταν διαφορετική.

Συμπερασματικά, η μοντελοποίηση των μονωτήρων είναι απαραίτητο να γίνεται σε τρεις διαστάσεις και να συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο στοιχεία, που συνδέονται με το μονωτήρα. Επιπλέον, όπως αποδείχτηκε από τις δισδιάστατες προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά στην περίπτωση επίλυσης της εξίσωσης ροής ρεύματος σε συνδυασμό με την εξίσωση Poisson, η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση ηλεκτροστατικών πεδίων. Συνεπώς, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ενός μονωτήρα δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 4

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΣΙΤΩΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους πυλώνες χρησιμοποιούνται αλυσοειδείς μονωτήρες. Ο αριθμός των δισκοειδών μονωτήρων, που απαρτίζουν την αλυσίδα, εξαρτάται από το επίπεδο της τάσης της γραμμής μεταφοράς. Ένας αλυσοειδής μονωτήρας μπορεί να θεωρηθεί, σε μία πρώτη προσέγγιση, ότι αποτελείται από γωρητικότητες συνδεσμολογημένες εν σειρά, ο αριθμός των οποίων ταυτίζεται με τον αριθμό των δισκοειδών μονωτήρων. Με βάση την ανωτέρω υπόθεση, η επιβαλλόμενη τάση στον αλυσοειδή μονωτήρα θα έπρεπε να ισομοιράζεται μεταξύ των δισκοειδών μονωτήρων (ομοιόμορφη κατανομή), γεγονός που θα επέτρεπε την πλήρη εκμετάλλευση της διηλεκτρικής αντοχής των δισκοειδών μονωτήρων. Στην πράξη η κατανομή της τάσης κατά μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα διαφέρει από την ομοιόμορφη κατανομή, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στις παράσιτες χωρητικότητες που εμφανίζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα ως προς γη και ως προς τον αγωγό υψηλής τάσης [4]. Ο υπολογισμός των παράσιτων χωρητικοτήτων, καθώς και η προσπάθεια εξάλειψής τους αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών [108-111], λόγω της καταπόνησης άνω του μέσου όρου κάποιων δισκοειδών μονωτήρων της αλυσίδας, ενώ η καταπόνηση κάποιων άλλων δισκοειδών μονωτήρων είναι μικρότερη του μέσου όρου. Η απαίτηση για μεγαλύτερη αντοχή κάποιων δισκοειδών μονωτήρων, που απορρέει από την ανομοιόμορφη κατανομή της τάσης επί των αλυσοειδών μονωτήρων, οδηγεί σε αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής όλων των δισκοειδών μονωτήρων της αλυσίδας, γεγονός που αυξάνει το κόστος τους.

Στο παρόν Κεφάλαιο μελετάται η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες και, αξιοποιώντας τις μετρήσεις, που διεξήχθησαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, υπολογίστηκαν, με τη βοήθεια γενετικού αλγορίθμου, οι παράσιτες χωρητικότητες σε πέντε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την ανάρτηση γραμμών 150kV.

4.2 Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες

4.2.1 Καθαροί αλυσοειδείς μονωτήρες

Για τον υπολογισμό της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε καθαρούς αλυσοειδείς μονωτήρες έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια.

<u>1η μέθοδος [108]</u>

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.1, ένα ρεύμα Ι διαρρέει τον τελευταίο (η αρίθμηση αρχίζει από τον πυλώνα) δισκοειδή μονωτήρα χωρητικότητας C, το οποίο ακολούθως διαμοιράζεται σε ένα ρεύμα I_e, προς την παράσιτη χωρητικότητα C_e ως προς γη, και σε (I-I_e), προς το υπόλοιπο τμήμα του αλυσοειδούς μονωτήρα, κ.ο.κ.



Σχήμα 4.1: Κατανομή τάσης σε αλυσοειδή μονωτήρα.

Θεωρώντας ως V_1 την τάση στον πλησιέστερο προς τον πυλώνα δισκοειδή μονωτήρα και, αντίστοιχα, ως $V_2, V_3, ..., V_n$ τις τάσεις στους υπόλοιπους η δισκοειδείς μονωτήρες, τότε ισχύει:

$$V_{i} = V \cdot \frac{2 \cdot \sinh\left(1/2 \cdot \sqrt{k}\right) \cdot \cosh\left[\left(i - (1/2)\right) \cdot \sqrt{k}\right]}{\sinh\left(n \cdot \sqrt{k}\right)}$$
(4.1)

όπου k =
$$\frac{C_e}{C}$$
 (4.2)

Από το Σχήμα 4.1 είναι εμφανές ότι διαρκώς μικρότερο μέρος του αρχικού ρεύματος Ι ρέει προς τους δισκοειδείς μονωτήρες πλησιάζοντας προς τον γειωμένο πυλώνα, με συνέπεια τη διαρκώς μειούμενη καταπόνηση των μονωτήρων ($V_i < V_{i+1}$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η ανομοιομορφία αυτή στην κατανομή της τάσης έχει ως αποτέλεσμα οι δισκοειδείς μονωτήρες πλησίον του αγωγού να καταπονούνται υπερβολικά, σχεδόν στο μέγιστο της επιτρεπόμενης αντοχής τους, ενώ στους δισκοειδείς μονωτήρες πλησίον του πυλώνα είναι αναπόφευκτη η 'σπατάλη' μονωτικού υλικού. Ένα μέτρο υπολογισμού του βαθμού χρησιμοποίησης του μονωτικού υλικού είναι η αποδοτικότητα του μονωτήρα (string efficiency), η οποία ορίζεται ως την τάση καταπόνησης κάθε δισκοειδούς μονωτήρα της αλυσίδας στην περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής προς τη μέγιστη τάση καταπόνησης, εμφανιζόμενη στον δισκοειδή μονωτήρα πλησίον του αγωγού.

Η αποδοτικότητα του αλυσοειδούς μονωτήρα είναι:

$$E = \frac{V}{n \cdot V_n} = \frac{\sinh(n \cdot \sqrt{k})}{2 \cdot n \cdot \sinh(1/2 \cdot \sqrt{k}) \cdot \cosh[(n - 1/2) \cdot \sqrt{k}]}$$
(4.3)

<u>2η μέθοδος [108]</u>

Σύμφωνα με τον πρώτο κανόνα Kirrchoff, για τον i-οστό δισκοειδή μονωτήρα του Σχήματος 4.2 ισχύει:

$$\mathbf{I}_{i} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{V}_{i} \tag{4.4}$$

Στον κόμβο Α ισχύει:

$$I_{2} = I_{1} + i_{1} \Leftrightarrow \omega \cdot C \cdot V_{2} = \omega \cdot C \cdot V_{1} + \omega \cdot k \cdot C \cdot V_{1} \Leftrightarrow V_{2} = V_{1} \cdot (1+k)$$

$$(4.5)$$

όπου το k δίνεται από τη σχέση (4.2).

Στον κόμβο Β ισχύει:

$$I_{3} = I_{2} + i_{2} \Leftrightarrow \omega \cdot C \cdot V_{3} = \omega \cdot C \cdot V_{2} + \omega \cdot k \cdot C \cdot (V_{1} + V_{2}) \Leftrightarrow V_{3} = V_{2} + k \cdot (V_{1} + V_{2})$$
(4.6)

Αντικαθιστώντας τη σχέση (4.5) στη σχέση (4.6) προκύπτει:

$$V_{3} = V_{1} \cdot \left(1 + 3 \cdot k + k^{2}\right)$$
(4.7)

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία για τους κόμβους Γ και Δ προκύπτει:

$$V_4 = V_1 \cdot \left(1 + 6 \cdot k + 5 \cdot k^2 + k^3\right)$$
(4.8)

$$V_{5} = V_{1} \cdot \left(1 + 10 \cdot k + 15 \cdot k^{2} + 7 \cdot k^{3} + k^{4} \right)$$
(4.9)

Αντίστοιχα, είναι δυνατό να υπολογιστούν οι εφαρμοζόμενες τάσεις στους n δισκοειδείς μονωτήρες της αλυσίδας. Η επιβαλλόμενη τάση στον i-οστό δισκοειδή μονωτήρα δίνεται από τη σχέση:

$$V_i = V_{i-1} + k \cdot \sum_{j=1}^{i} V_j$$
 (4.10)

Η αποδοτικότητα του αλυσοειδούς μονωτήρα είναι:

$$E = \frac{V}{n \cdot V_n} = \frac{V}{n \cdot (V_{n-1} + k \cdot V)}$$
(4.11)



Σχήμα 4.2: Αλυσοειδής μονωτήρας.

<u>3η μέθοδος [108]</u>

Στη συνέχεια αναλύεται μια γενική μέθοδος, η οποία εφαρμόζεται στην περίπτωση που ο αλυσοειδής μονωτήρας αποτελείται από μεγάλο αριθμό δισκοειδών μονωτήρων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη γενική μεθοδολογία ανάλυσης των γραμμών μεταφοράς, με τη διαφορά ότι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς έχει αντικατασταθεί με τη χωρητικότητα C και η σύνθετη αγωγιμότητα με τη χωρητικότητα C_e, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Για τον i-οστό δισκοειδή μονωτήρα της αλυσίδας ισχύει:

$$V_{i} = V_{r} \cdot \cosh(i\gamma) + I_{r} \cdot Z_{c} \cdot \sinh(i\gamma)$$
(4.12)

όπου
$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$
 με $Z = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}$, $Y = j \cdot \omega \cdot C_e = j \cdot \omega \cdot k \cdot C$ (4.13)

και γ =
$$\sqrt{Z \cdot Y} = \sqrt{\left(\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}\right) \cdot (j \cdot \omega \cdot k \cdot C)} = \sqrt{k}$$
 (4.14)

Επειδή $V_r = 0$, η σχέση (4.12) γίνεται:

$$V_{i} = I_{r} \cdot Z_{c} \cdot \sinh(i\gamma) = I_{r} \cdot Z_{c} \cdot \sinh(i\sqrt{k})$$
(4.15)

Εάν ο αλυσοειδής μονωτήρας αποτελείται από η δισκοειδείς μονωτήρες, τότε:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{s} = \mathbf{I}_{r} \cdot \mathbf{Z}_{c} \cdot \sinh n\sqrt{\mathbf{k}}$$
(4.16)

$$\kappa \alpha i \, \frac{V_i}{V} = \frac{\sinh\left(i\sqrt{k}\right)}{\sinh\left(n\sqrt{k}\right)} \tag{4.17}$$

Αξιοποιώντας τη σχέση (4.17), προκύπτει:

$$V_{1} = V_{A} - V_{r} = V_{A} = V \cdot \frac{\sinh\left(\sqrt{k}\right)}{\sinh\left(n\sqrt{k}\right)}$$
(4.18)

$$V_{2} = V_{B} - V_{A} = V \cdot \frac{\sinh\left(2\sqrt{k}\right) - \sinh\left(\sqrt{k}\right)}{\sinh\left(n\sqrt{k}\right)}$$
(4.19)

$$V_{n} = V \cdot \frac{\sinh(n\sqrt{k}) - \sinh[(n-1)\sqrt{k}]}{\sinh(n\sqrt{k})}$$
(4.20)



Σχήμα 4.3: Αλυσοειδής μονωτήρας μεγάλου μήκους.

Στην περίπτωση αυτή η αποδοτικότητα του αλυσοειδούς μονωτήρα είναι:

$$E = \frac{V}{n \cdot V_n} = \frac{\sinh(n\sqrt{k})}{n \cdot \left\{\sinh(n\sqrt{k}) - \sinh\left[(n-1)\sqrt{k}\right]\right\}}$$
(4.21)

<u>4η μέθοδος [4]</u>

Έστω ότι C είναι η χωρητικότητα ενός δισκοειδούς μονωτήρα και C_e, C_h είναι οι παράσιτες χωρητικότητες της άρθρωσης μεταξύ δύο γειτονικών δισκοειδών μονωτήρων προς το γειωμένο πυλώνα και προς τον αγωγό υψηλής τάσης αντίστοιχα (Σχήμα 4.4α), τότε η τάση ΔV_i που εφαρμόζεται στον i-οστό μονωτήρα της αλυσίδας (η αρίθμηση αρχίζει από τον πλησιέστερο προς τον πυλώνα μονωτήρα) ανηγμένη ως προς τη συνολική επιβαλλόμενη τάση V δίνεται από τον τύπο των Schwaiger-Sirotinski:

$$\Delta V_{i} = \frac{V}{\left(C_{e} + C_{h}\right) \cdot \sinh\left(n\gamma\right)} \cdot F_{i}$$
(4.22)

όπου γ =
$$\sqrt{\frac{C_e + C_h}{C}}$$
 (4.23)

και F_i = C_e [sinh(iγ)-sinh[(i-1)γ]] - C_h [sinh[(n-i)γ]-sinh[(n-i+1)γ]] (4.24)

Η τάση V_i μεταξύ της γης (πυλώνα) και της i-οστής άρθρωσης, μεταξύ δηλαδή του iοστού και του (i+1)-στού δισκοειδούς μονωτήρα, δίνεται από τη σχέση:

$$V_{i} = \frac{V}{1+m} \cdot \left\{ 1+m \cdot \frac{\sinh(i\gamma)}{\sinh(n\gamma)} - \frac{\sinh[(n-i)\gamma]}{\sinh(n\gamma)} \right\}$$
(4.25)

όπου m =
$$\frac{C_e}{C_h}$$
 (4.26)

Η αποδοτικότητα του αλυσοειδούς μονωτήρα δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{V}{n \cdot \Delta V_{n}} = \frac{(C_{e} + C_{h}) \cdot \sinh(n\gamma)}{n \cdot \{C_{e} \cdot [\sinh(n\gamma) - \sinh((n-1)\gamma)] - C_{h} \cdot \sinh\gamma\}}$$
(4.27)

Από τις τιμές των χωρητικοτήτων C, C_e, C_h εξαρτάται το ποσοστό ανομοιομορφίας όσον αφορά στην καταπόνηση των δισκοειδών μονωτήρων της αλυσίδας. Επειδή η παράσιτη χωρητικότητα προς γη είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν προς την υψηλή τάση, η κατανομή της τάσης, βάσει της σχέσης (4.25), είναι μία καμπύλη, η οποία στρέφει τα κοίλα προς τα άνω, καθώς η ανά δισκοειδή μονωτήρα επιβαλλόμενη τάση αυξάνεται πλησιάζοντας προς τον αγωγό υψηλής τάσης (Σχήμα 4.4β).



Σχήμα 4.4: α) Συμβολική απεικόνιση των παράσιτων χωρητικοτήτων σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα, β) κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης.

Προκειμένου να συγκριθούν μεταξύ τους οι τέσσερις προαναφερθείσες μεθόδοι, υπολογίστηκε η κατανομή της τάσης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από πέντε δισκοειδείς μονωτήρες, για τον οποίο οι χωρητικότητες λαμβάνουν τις τιμές: C = 70 pF, $C_e = 4, 5 pF$, $C_h = 0, 7 pF$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5, από το οποίο προκύπτει ότι, οι τρεις πρώτες μέθοδοι δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα, ειδικά η πρώτη και η τρίτη μέθοδος, ενώ τα αποτελέσματα της τέταρτης μεθόδου διαφοροποιούνται σημαντικά για τους ακραίους δισκοειδείς μονωτήρες. Το τέταρτο, βέβαια, μοντέλο είναι το μόνο που συνυπολογίζει την παράσιτη χωρητικότητα ως προς τη γραμμή μεταφοράς και, συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.5: Κατανομή τάσης σε αλυσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από πέντε δισκοειδείς μονωτήρες ($C = 70 pF, C_e = 4, 5 pF, C_h = 0, 7 pF$).

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η αποδοτικότητα ενός αλυσοειδούς μονωτήρα αποτελούμενου από πέντε δισδοειδείς μονωτήρες για διάφορες τιμές των C, C_e και C_h. Σε όλες τις περιπτώσεις, το πρώτο και το τρίτο μοντέλο δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα για την αποδοτικότητα του μονωτήρα. Η αποδοτικότητα, υπολογιζόμενη από το τέταρτο μοντέλο, προκύπτει σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές, όπως υπολογίζονται από τα υπόλοιπα μοντέλα.



Σχήμα 4.5: Αποδοτικότητα αλυσοειδούς μονωτήρα αποτελούμενου από πέντε δισκοειδείς μονωτήρες για διάφορες τιμές των C, C_e και C_h.

4.2.2 Ρυπασμένοι αλυσοειδείς μονωτήρες

Για τον υπολογισμό της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε ρυπασμένους αλυσοειδείς μονωτήρες, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια.

<u>1η μέθοδος [109]</u>

Η δεύτερη μέθοδος, που παρουσιάστηκε για τον υπολογισμό της κατανομής της τάσης σε καθαρούς αλυσοειδείς μονωτήρες, είναι δυνατό να τροποποιηθεί, ώστε να υπολογίζει την κατανομή της τάσης σε ρυπασμένους αλυσοειδείς μονωτήρες.

Η ρύπανση αντιπροσωπεύεται από μία αντίσταση R συνδεδεμένη παράλληλα με τη χωρητικότητα κάθε δισκοειδούς μονωτήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος για έναν αλυσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από τρεις δισκοειδείς μονωτήρες, ενώ είναι δυνατό να επεκταθεί και εφαρμοστεί σε αλυσοειδή μονωτήρα αποτελούμενο από η δισκοειδείς μονωτήρες.



Σχήμα 4.7: Ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας.

Στον κόμβο Α ισχύει:

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_2 + \dot{i}_3 + \dot{i}_4$$
 (4.28)

$$\mu\epsilon \ i_1 = \omega \cdot C \cdot V_3, \ i_2 = i_b - i_a = \frac{V_2 - V_3}{R}, \ i_3 = \omega \cdot C_{e2} \cdot (V_2 + V_1), \ i_4 = \omega \cdot C \cdot V_2$$

οπότε προκύπτει:
$$V_3 = k_1 \cdot V_2 + k_2 \cdot V_1$$
 (4.29)

όπου
$$\mathbf{k}_1 = \frac{1 + \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{C}_{e2} + \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{C}}{1 + \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{C}}$$
(4.30)

$$\kappa \alpha \iota k_2 = \frac{R \cdot \omega \cdot C_{e^2}}{1 + R \cdot \omega \cdot C}$$
(4.31)

Στον κόμβο Β ισχύει:

$$\dot{i}_4 = \dot{i}_5 + \dot{i}_6 + \dot{i}_7$$
 (4.32)

$$\mu \varepsilon \ \mathbf{i}_{5} = \mathbf{i}_{c} + \mathbf{i}_{b} = \frac{\mathbf{V}_{1} - \mathbf{V}_{2}}{\mathbf{R}}, \ \mathbf{i}_{6} = \omega \cdot \mathbf{C}_{e2} \cdot \mathbf{V}_{1}, \ \mathbf{i}_{7} = \omega \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{V}_{1}$$

onóte prokúptel:
$$\mathbf{V}_{2} = \mathbf{k}_{3} \cdot \mathbf{V}_{1}$$
(4.33)

οπότε προκύπτει: $V_2 = k_3 \cdot V_1$

όπου
$$k_3 = \frac{1 + R \cdot \omega \cdot C_{e1} + R \cdot \omega \cdot C}{1 + R \cdot \omega \cdot C}$$

Αξιοποιώντας τις σχέσεις (4.29) και (4.33), η συνολική επιβαλλόμενη τάση V προκύπτει:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \mathbf{V}_3 = \left(\frac{1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_3}{\mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_3}\right) \cdot \mathbf{V}_3$$
(4.34)

και η τάση, υπό την οποία καταπονείται κάθε δισκοειδής μονωτήρας, είναι:

$$\mathbf{V}_{1} = \left(\frac{1}{1 + k_{2} + k_{3} + k_{1} \cdot k_{3}}\right) \cdot \mathbf{V}$$
(4.35)

$$\mathbf{V}_2 = \left(\frac{\mathbf{k}_3}{1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_3}\right) \cdot \mathbf{V} \tag{4.36}$$

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΣΙΤΩΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΩΝ

$$\mathbf{V}_{3} = \left(\frac{\mathbf{k}_{2} + \mathbf{k}_{1} \cdot \mathbf{k}_{3}}{1 + \mathbf{k}_{2} + \mathbf{k}_{3} + \mathbf{k}_{1} \cdot \mathbf{k}_{3}}\right) \cdot \mathbf{V}$$
(4.37)

<u>2η μέθοδος [110]</u>

Η ρύπανση αντιπροσωπεύεται, και σε αυτή την περίπτωση, από μία αντίσταση R συνδεδεμένη παράλληλα με τη χωρητικότητα κάθε δισκοειδούς μονωτήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η μιγαδική (χωρητική) αντίσταση ως προς γη συμβολίζεται με Z_G, ενώ μιγαδική (χωρητική) αντίσταση ως προς τη γραμμή μεταφοράς συμβολίζεται με Z_L.



Σχήμα 4.8: Ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας.

Στον κόμβο (i) ισχύει:

$$\frac{\mathbf{V}_{i+1} - \mathbf{V}_{i}}{Z_{\text{S}i+1}} - \frac{\mathbf{V}_{i} - \mathbf{V}_{i-1}}{Z_{\text{S}i}} = \frac{\mathbf{V}_{i} - \mathbf{0}}{Z_{\text{G}i}} + \frac{\mathbf{V}_{i} - \mathbf{V}}{Z_{\text{L}i}}$$
(4.38)

$$\acute{\eta} \frac{V}{Z_{Li}} = V_{i+1} \cdot \left[\frac{1}{Z_{Si+1}}\right] - V_i \cdot \left[\frac{1}{Z_{Si+1}} + \frac{1}{Z_{Si}} + \frac{1}{Z_{Gi}} + \frac{1}{Z_{Li}}\right] + V_{i-1} \cdot \left[\frac{1}{Z_{Si}}\right]$$
(4.39)

όπου
$$Z_s = \frac{1}{(1/R_s) + j \cdot \omega \cdot C_s}$$
, $Z_G = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_G}$ και $Z_L = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_L}$

Η σχέση (4.39) εφαρμόζεται για κάθε δισκοειδή μονωτήρα από τον πυλώνα έως τη γραμμή μεταφοράς. Το συγκεκριμένο μοντέλο επιτρέπει την ύπαρξη ανομοιόμορφης

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΣΙΤΩΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΩΝ

ρύπανσης στον αλυσοειδή μονωτήρα, καθώς η τιμή της αντίστασης είναι δυνατό να μεταβάλλεται ανά δισκοειδή μονωτήρα.

4.3 Μεθοδολογία υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων

Ο υπολογισμός των παράσιτων χωρητικοτήτων ενός αλυσοειδούς μονωτήρα αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο στόχος είναι η βέλτιστη ταύτιση μεταξύ των πειραματικών τιμών για την κατανομή της τάσης και αυτών που υπολογίζονται με βάση κάποια από τις προαναφερθείσες μεθόδους (Παράγραφος 4.2). Η συγκεκριμένη βελτιστοποίηση είναι δυνατό να υλοποιηθεί με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος χρησιμοποιεί ενδεικτικά την τέταρτη μέθοδο της Παραγράφου 4.2.1 για τον υπολογισμό της κατανομής της τάσης και παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 2.4.

4.3.1 Γενετικός αλγόριθμος

Η φύση έχει έναν πολύ ισχυρό μηχανισμό εξέλιξης των οργανισμών, που βασίζεται στον ακόλουθο κανόνα της φυσικής επιλογής: οι οργανισμοί που δεν μπορούν να επιβιώσουν στο περιβάλλον τους πεθαίνουν, ενώ οι υπόλοιποι πολλαπλασιάζονται μέσω της αναπαραγωγής. Αν το περιβάλλον μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς, τα διάφορα είδη μπορούν να εξελίσσονται σταδιακά, ώστε να προσαρμόζονται σε αυτό. Αν, όμως, συμβούν ραγδαίες μεταβολές, αρκετά είδη οργανισμών θα εξαφανιστούν. Σποραδικά, συμβαίνουν τυχαίες μεταλλάξεις, από τις οποίες οι περισσότερες οδηγούν τα μεταλλαγμένα άτομα στο θάνατο, αν και είναι πιθανό, πολύ σπάνια όμως, να οδηγήσουν στη δημιουργία 'καλύτερων' οργανισμών.

Ο μετασχηματισμός ενός προβλήματος, από την περιοχή του πραγματικού κόσμου σε αυτή του γενετικού, δίνει τη δυνατότητα απλοποίησης της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος. Ο γενετικός αλγόριθμος αποτελεί ένα εύχρηστο και αξιόπιστο εργαλείο υπολογισμού της βέλτιστης λύσης (αναζήτηση ελαχίστου ή μεγίστου).

Γενικά, ο τρόπος λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων συνοψίζεται στα εξής βήματα [112]:
- Δημιουργείται με τυχαίο τρόπο ένα σύνολο P_s από N υποψήφιες λύσεις του προβλήματος.
- Οι λύσεις βαθμολογούνται από μια συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function).
 Η βαθμολόγησή τους συνίσταται στην αντιστοίχηση ενός αριθμού σε κάθε υποψήφια λύση, ο οποίος δηλώνει την εγγύτητα της υποψήφιας μη αποδεκτής λύσης ως προς κάποια αποδεκτή.
- Όσο ο πληθυσμός P_s δεν συγκλίνει σε μία λύση, τότε από τον αρχικό πληθυσμό σχηματίζονται N/2 ζευγάρια, όχι απαραίτητα μοναδικών γονέων, δίνοντας μεγαλύτερη προτεραιότητα στις πιο κατάλληλες λύσεις.
- Κάθε ζεύγος λύσεων συνδυάζεται δίνοντας δύο νέες λύσεις, τους απογόνους. Η αναπαραγωγή είναι δυνατό να γίνει με διάφορες τεχνικές, η σημαντικότερη από τις οποίες είναι ο συνδυασμός της διασταύρωσης (cross-over) και της μετάλλαξης (mutation).
- Ο νέος πληθυσμός P' αποτελείται από το σύνολο των γονέων και των απογόνων και, συνήθως, αποτελεί βελτίωση του προηγούμενου πληθυσμού.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το νέο πληθυσμό P's, ενώ οι πιο συνηθισμένες
 συνθήκες τερματισμού της είναι η εύρεση μιας 'τέλειας' λύσης με βάση τη
 συνάρτηση καταλληλότητας και η σύγκλιση όλων των λύσεων σε μία.

4.3.1.1 Λειτουργία γενετικού αλγόριθμου

Η λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου στηρίζεται σε πέντε βασικά βήματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω [27, 112, 113]:

<u>1ο βήμα</u>

Ο αρχικός πληθυσμός P_s δημιουργείται τυχαία από μία γεννήτρια αριθμών. Κάθε μέλος του αρχικού πληθυσμού αναπαριστάται με συμβολοσειρές, ισάριθμες με τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, αποτελούμενες από δυαδικά ψηφία '0' και '1'.

<u>2ο βήμα</u>

Πραγματοποιείται η αξιολόγηση (evaluation), δηλαδή ο υπολογισμός της καταλληλότητας κάθε μέλους του πληθυσμού (πιθανή λύση), μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας. Η συνάρτηση καταλληλότητας δέχεται ως είσοδο ένα μέλος του πληθυσμού και επιστρέφει έναν αριθμό που υποδηλώνει το πόσο κατάλληλο είναι.

Συνήθως, το πεδίο τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας παίρνει τιμές εντός του διαστήματος [0, 1], όπου η τιμή 1 υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο μέλος του πληθυσμού ικανοποιεί όλες τις προϋποθέσεις του προβλήματος και αποτελεί αποδεκτή λύση, ενώ η τιμή 0 υποδηλώνει την πλήρη απόκλιση του συγκεκριμένου μέλους του πληθυσμού από κάποια αποδεκτή λύση.

<u>3ο βήμα</u>

Εφαρμόζεται η διαδικασία της φυσικής επιλογής (selection) για τα N μέλη του πληθυσμού, με κριτήριο το μεγαλύτερο βαθμό καταλληλότητας.

<u>4ο βήμα</u>

Πραγματοποιείται η διαδικασία της αναπαραγωγής μέσω της διασταύρωσης (crossover). Συγκεκριμένα, από τον ενδιάμεσο πληθυσμό γίνεται τυχαία επιλογή των λύσεων ανά δύο, και έτσι δημιουργούνται οι λύσεις-γονείς. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται στους γονείς ο τελεστής διασταύρωσης με μια πιθανότητα P_c . Η διασταύρωση ανασυνδυάζει τις συμβολοσειρές (γενετικό υλικό) των γονέων δημιουργώντας τέσσερις απογόνους που κληρονομούν χαρακτηριστικά και των δύο γονέων δηλαδή σχηματίζει $P_s/2$ ζευγάρια από αυτά τα μέλη του πληθυσμού, που θεωρούνται γονείς για την αναπαραγωγή, στην οποία ανταλλάσσουν N_p τμήματα του γενετικού τους υλικού.

<u>5ο βήμα</u>

Πραγματοποιείται η διαδικασία της μετάλλαξης (mutation). Η διασταύρωση, αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων, δεν είναι σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Ο τελεστής της μετάλλαξης καλύπτει αυτή την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στους απογόνους. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή των ψηφίων της συμβολοσειράς (δηλαδή αν περιέχει 0 γίνεται 1 ή το 1 γίνεται 0). Αν και είναι δυνατό η μετάλλαξη να προκαλέσει απώλεια μερικού εν δυνάμει χρήσιμου γενετικού υλικού, συνολικά, όμως, βοηθάει στην καλύτερη και ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση.

Με τις παραπάνω λειτουργίες δημιουργείται η επόμενη γενιά με έναν νέο πληθυσμό. Εφ' όσον οι επαναλήψεις της αναπαραγωγής υπό τη διαδικασία της διασταύρωσης, της μετάλλαξης και της φυσικής επιλογής συνεχιστούν, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βρει το ελάχιστο (ή το μέγιστο) της συνάρτησης F_g, η οποία στο συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί τη συνάρτηση σφάλματος μεταξύ πειραματικών και εκτιμούμενων τιμών για την κατανομή της τάσης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα:

$$F_{g} = \sum_{i=1}^{N} \frac{|V_{ci} - V_{mi}|}{V_{mi}}$$
(4.40)

όπου V_{mi} είναι η μετρούμενη τάση υπό την οποία καταπονείται ο i-οστός δισκοειδής μονωτήρας της αλυσίδας και V_{ci} είναι η υπολογιζόμενη τιμή της τάσης από τη σχέση (4.22).

Το κριτήριο τερματισμού πληρείται, εάν είτε η μέση τιμή της F_g στον πληθυσμό P_s μελών δεν βελτιώνεται περαιτέρω (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση), είτε ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγαλύτερος από έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων N_{max} . Το διάγραμμα ροής του γενετικού αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής του γενετικού αλγορίθμου.

4.4 Αποτελέσματα υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων

Για κάθε ένα από τους αλυσοειδείς μονωτήρες των 150kV, των οποίων οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 2.4, εκτελέστηκε ο γενετικός αλγόριθμος πολλές φορές, μεταβάλλοντας, κάθε φορά, τόσο το πλήθος γονέων, όσο και τον αριθμό επαναλήψεων.

Για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε, τυχαία επιλεγμένος, αρχικός πληθυσμός αποτελούμενος από 20 ή 30 γονείς ($P_s=20$ ή $P_s=30$), καθένας από τους οποίους απαρτίζεται από 3 συμβολοσειρές (m=3), ενώ το μέγεθος της κάθε συμβολοσειράς είναι 20 bits (t=20). Κατά τη διαδικασία της διασταύρωσης (crossover) κάθε συμβολοσειρά διαιρείται σε 4 τμήματα ($N_c=4$). Από κάθε ζεύγος γονιών (αρχικός πληθυσμός) με τη βοήθεια της διασταύρωσης προκύπτουν 4 παιδιά (νέα μέλη στον πληθυσμός). Το 5% ($P_m=5\%$) των συμβολοσειρών υφίστανται μεταλλάξεις (mutations). Η διαδικασία σταματάει μετά από συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων, ο οποίος μεταβάλλεται από 20 έως 50 ($N_{max}=20$, 30, 40 ή 50). Οι βέλτιστες τιμές για τις χωρητικότητες C, C_e και C_h των αλυσοειδών μονωτήρων, που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο, παρατίθενται στον Πίνακα 4.1, ενώ στα Σχήματα 4.10 – 4.14 παρουσιάζεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου, καθώς και η σύγκριση μεταξύ αυτών και των πειραματικών τιμών.

Αλυσοειδής μονωτήρας	C / δίσκο [pF]	C _e [pF]	C _h [pF]	Fg
Αλυσοειδής μονωτήρας αποτελούμενος από 10 κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (εργαστηρίου)	69,610	4,175	0,636	0,176
Αλυσοειδής μονωτήρας αποτελούμενος από 12 κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης (κωδικός ΔΕΗ 010)	65,809	3,186	0,401	0,370
Αλυσοειδής μονωτήρας αποτελούμενος από 10 κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες υάλου (κωδικός ΔΕΗ 033)	78,986	4,003	0,565	0,133
Αλυσοειδής μονωτήρας αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός ΔΕΗ 161)	84,864	4,811	0,483	0,230
Αλυσοειδής μονωτήρας αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης (κωδικός ΔΕΗ 069)	91,688	3,293	0,494	0,160

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό των χωρητικοτήτων των αλυσοειδών μονωτήρων.



Σχήμα 4.10: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4.11: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010.



Σχήμα 4.12: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 033.

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΣΙΤΩΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΩΝ



Σχήμα 4.13: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161.



Σχήμα 4.14: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069.

4.5 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Παράγραφο 4.2.1, συνήθεις περιοχές τιμών για τις χωρητικότητες σε αλυσοειδείς μονωτήρες είναι, σύμφωνα με μελέτες ερευνητών, C=20...70pF, C_e=4...5pF και C_h=0,5...1pF [4]. Παρατηρείται ότι οι τιμές των παράσιτων χωρητικοτήτων, που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο, κυμαίνονται εντός των ανωτέρω ορίων. Η τιμή της κύριας χωρητικότητας για τους μονωτήρες πορσελάνης κυμαίνεται εντός των ανωτέρω ορίων, ενώ για τους μονωτήρες υάλου προκύπτει ελαφρώς, μόνον, μεγαλύτερη (μεταξύ 10...30%) του άνω ορίου.

Με δεδομένο ότι, τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στους αλυσοειδείς μονωτήρες συγκλίνουν ικανοποιητικά με τις πειραματικές τιμές, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.10 – 4.14, οδηγούμαστε στη σκέψη ότι ο γενετικός αλγόριθμος είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες.

Η γνώση του εύρους τιμών των χωρητικοτήτων συνεισφέρει στην προσπάθεια ισοκατανομής της επιβαλλόμενης τάσης κατά μήκος των αλυσοειδών μονωτήρων, αφ' ενός μεν καθιστώντας δυνατό τον υπολογισμό των ορίων, εντός των οποίων λαμβάνει τιμές η τάση καταπόνησης ανά δισκοειδή μονωτήρα, αφ' ετέρου δε επιτρέποντας την επιλογή του καταλληλότερου και οικονομικότερου τρόπου βελτίωσης της αποδοτικότητας του μονωτήρα (π.χ. χρήση τοροειδούς, αύξηση του μεγέθους της οριζόντιας 'τραβέρσας' του πυλώνα, από την οποία αναρτώνται οι μονωτήρες, κ.λπ.).

Κεφάλαιο 5

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Η υπολογιστική νοημοσύνη αποτελεί έναν επιστημονικό τομέα που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα και παρουσιάζει ένα πλήθος εφαρμογών. Οι τρεις κλάδοι: Νευρωνικά Δίκτυα, Ασαφής Λογική και Γενετικοί Αλγόριθμοι, από τους οποίους αποτελείται, καλούνται να λύσουν προβλήματα, τα οποία άπτονται θεμάτων αναγνώρισης προτύπων, αυτομάτου ελέγχου και επιχειρησιακών-διοικητικών αποφάσεων [114].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα απ' τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται σε μονωτήρες Υψηλής Τάσης, όταν αυτοί λειτουργούν υπό συνθήκες ρύπανσης (βιομηχανικής ή θαλάσσιας), είναι η εμφάνιση του φαινομένου της υπερπήδησης. Συνεπώς, η γνώση των παραμέτρων, από τις οποίες εξαρτάται το φαινόμενο της υπερπήδησης, καθώς και των κρισίμων τιμών αυτών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Ο τρόπος, με τον οποίο καθεμιά από τις παραμέτρους αυτές συμβάλλει στην εμφάνιση του φαινομένου, δεν είναι γνωστός και η πολυπλοκότητα του φαινομένου εισάγει αβεβαιότητα, η οποία οδηγεί στη λήψη προσεγγίσεων. Στο σημείο αυτό τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και η Ασαφής Λογική αποδεικνύονται πολύ χρήσιμα εργαλεία για την εκτίμηση και πρόβλεψη της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται χρήση των προαναφερθεισών τεχνικών υπολογιστικής νοημοσύνης, προκειμένου να εκτιμηθεί η κρίσιμη τάση υπερπήδησης των μονωτήρων.

5.2 Νευρωνικά δίκτυα

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα μιμούνται την κατανεμημένη λειτουργία του

ανθρωπίνου εγκεφάλου και αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό μη γραμμικών επεξεργαστών ειδικού τύπου (τεχνητούς νευρώνες), οι οποίοι ελέγχονται από προσαρμοζόμενες παραμέτρους και είναι ικανοί να μαθαίνουν, να γενικεύουν και να ανταποκρίνονται με 'εξυπνάδα' σε νέα ερεθίσματα. Η κυριότερη εφαρμογή τους αφορά στη μοντελοποίηση αγνώστων συστημάτων με μη γραμμική συμπεριφορά χωρίς να είναι απαραίτητη η a priori γνώση κάποιου μαθηματικού μοντέλου αυτών.

Κάθε Νευρωνικό Δίκτυο χαρακτηρίζεται από μία κατάσταση, ένα σύνολο εισόδων με βάρη που προέρχονται από άλλους νευρώνες και μία εξίσωση, η οποία περιγράφει τη δυναμική λειτουργία του Νευρωνικού Δικτύου. Τα βάρη ανανεώνονται μέσω μίας διαδικασίας μάθησης (εκπαίδευσης), η οποία πραγματοποιείται με την ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης κόστους (σφάλματος). Οι βέλτιστες τιμές των βαρών αποθηκεύονται (ως δυνάμεις των διασυνδέσεων μεταξύ των νευρονίων) και χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της εργασίας για την οποία προορίζεται το Νευρωνικό Δίκτυο.

5.2.1 Μάθηση Νευρωνικών Δικτύων

Ο τεχνητός νευρώνας αποτελείται από: α) ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης (συνάψεις), β) έναν κόμβο γραμμικής άθροισης και γ) μία συνάρτηση ενεργοποίησης (μη γραμμικότητα). Στα Νευρωνικά Δίκτυα, η μάθηση αναφέρεται στη διεργασία επίτευξης μιας επιθυμητής συμπεριφοράς μέσω ανανέωσης της τιμής των συναπτικών βαρών [114].

Αλγόριθμος μάθησης ή εκπαίδευσης είναι κάθε προκαθορισμένο σύνολο καλά ορισμένων κανόνων επίλυσης του προβλήματος εκπαίδευσης του Νευρωνικού Δικτύου.



Σχήμα 5.1: Δομή της επιβλεπόμενης μάθησης [114].

Σε προβλήματα μοντελοποίησης με επιθυμητά ζεύγη εισόδου-εξόδου βρίσκει εφαρμογή η επιβλεπόμενη μάθηση. Σε αυτήν την περίπτωση, τα νευρωνικά δίκτυα

πρέπει να έχουν ελεύθερες (επιλέξιμες) παραμέτρους, οι οποίες ανανεώνονται με κάποιο κανόνα επιβλεπόμενης μάθησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

5.2.2 Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος

Ένα σύνολο εκπαίδευσης αποτελείται από N ζεύγη της μορφής $[\vec{x}, \vec{d}]$, όπου \vec{x} το διάνυσμα εισόδου (πρότυπο) και \vec{d} το διάνυσμα των επιθυμητών εξόδων, όταν εφαρμοσθεί ως είσοδος το πρότυπο \vec{x} [115].

Το σφάλμα στην έξοδο του τυχαίου νευρώνα *j*, ο οποίος είναι κόμβος εξόδου, για τη *n*-οστή επανάληψη δίνεται από τον τύπο:

$$e_{i}(n) = d_{i}(n) - y_{i}(n)$$
 (5.1)

όπου d_j και y_j η επιθυμητή και η πραγματική έξοδος αντίστοιχα του νευρώνα jόταν εφαρμόζεται η $\vec{x}(n), \{n = 1, ..., N\}$.



Σχήμα 5.2: Δομή του *j* νευρώνα εξόδου.

Η μέση τιμή των σφαλμάτων για όλα τα Ν πρότυπα ορίζεται ως εξής:

$$G_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} G(n) = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^{N} \sum_{j \in C} e_j^2(n)$$
(5.2)

όπου C το σύνολο των νευρώνων.

Ο σκοπός της διαδικασίας εκπαίδευσης είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής των σφαλμάτων G_{av} με την ανάλογη προσαρμογή των ελευθέρων παραμέτρων του δικτύου. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια συγκεκριμένη λογική, όπου τα βάρη ενημερώνονται μετά το 'πέρασμα' κάθε προτύπου, σύμφωνα με τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την παρουσίαση του αντίστοιχου προτύπου στο δίκτυο.

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.2, ο νευρώνας εξόδου j τροφοδοτείται από τα σήματα εξόδου όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου. Συνεπώς, το σήμα $u_i(n)$ δίνεται από τη σχέση:

$$u_{j}(n) = \sum_{i=0}^{p} w_{ji}(n) y_{i}(n)$$
(5.3)

όπου *p* είναι το σύνολο όλων των νευρώνων του προηγούμενου επιπέδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι 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 επανάληψη n δίνεται από τη σχέση:

$$y_j(n) = \phi(u_j(n)) \tag{5.4}$$

Ο αλγόριθμος προβαίνει σε κάθε επανάληψη σε διόρθωση του βάρους. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

ο νευρώνας *j* αποτελεί κόμβο εξόδου, όπου, εφόσον η επιθυμητή έξοδος του νευρώνα είναι γνωστή, υπολογίζεται το σήμα σφάλματος. Ο πιο σημαντικός παράγοντας, από τον οποίο εξαρτάται η αναπροσαρμογή των βαρών Δw_{ji}(n), είναι το σφάλμα e_j(n) στο νευρώνα *j*. Σε κάθε επανάληψη η διόρθωση Δw_{ji}(n) του βάρους w_{ji}(n) για το n πρότυπο εισόδου δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial G(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -\eta \frac{\partial G(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial u_j(n)} \frac{\partial u_j(n)}{\partial w_{ji}(n)}$$
(5.5)

ή αλλιώς

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) \tag{5.6}$$

όπου η τοπική κλίση $\delta_i(n)$ ορίζεται ως:

$$\delta_{j}(n) = -\frac{\partial G(n)}{\partial e_{j}(n)} \frac{\partial e_{j}(n)}{\partial y_{j}(n)} \frac{\partial y_{j}(n)}{\partial u_{j}(n)} = e_{j}(n)\phi'(u_{j}(n))$$
(5.7)

ο νευρώνας αποτελεί εσωτερικό κόμβο του νευρωνικού δικτύου, ο οποίος έμμεσα επηρεάζει τα σφάλματα εξόδου του δικτύου. Σ' αυτήν την περίπτωση δεν υφίσταται κάποια επιθυμητή έξοδος για το συγκεκριμένο νευρώνα. Το σήμα σφάλματος καθορίζεται αναδρομικά σε σχέση με τα σφάλματα όλων των νευρώνων, με τους οποίους αυτός συνδέεται απευθείας αυξάνοντας σημαντικά την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, για τον νευρώνα *i* του πρώτου κρυμμένου επιπέδου (από το επίπεδο εξόδου) η διόρθωση $\Delta w_{il}(n)$ δίνεται με βάση τον κανόνα δέλτα από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta w_{il}(n) = -\eta \frac{\partial G(n)}{\partial w_{il}(n)} = -\eta \frac{\partial G(n)}{\partial y_i(n)} \frac{\partial y_i(n)}{\partial u_i(n)} \frac{\partial u_i(n)}{\partial w_{il}(n)}$$
(5.8)

ή αλλιώς

$$\Delta w_{il}(n) = \eta \cdot \delta_i(n) \cdot y_l(n) \tag{5.9}$$

όπου η τοπική κλίση $\delta_i(n)$ ορίζεται ως:

$$\delta_i(n) = \phi'(u_i(n)) \cdot \sum_j \delta_j(n) \cdot w_{ji}(n)$$
(5.10)

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

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου οπίσθιας τροφοδότησης σφάλματος (backpropagation) ακολουθούνται τα εξής:

- αρχικοποιούνται τα βάρη και οι πολώσεις σε μικρές τυχαίες τιμές στο διάστημα
 [-1,1].
- όσον αφορά στην εκτέλεση των υπολογισμών υλοποιείται το 'πέρασμα' ορθής φοράς (forward pass). Στη διαδικασία του ευθέως περάσματος όλα τα βάρη των συνδέσεων παραμένουν αναλλοίωτα και υπολογίζονται οι έξοδοι όλων των νευρώνων. Το σήμα εξόδου του εκάστοτε νευρώνα υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$y_i(n) = \phi_i\left(u_i(n)\right) \tag{5.11}$$

$$u_{i}(n) = \sum_{l=0}^{q} w_{il}(n) y_{l}(n)$$
(5.12)

εκτός της περίπτωσης που ανήκει στο πρώτο επίπεδο, για την οποία ισχύει:

$$y_k(n) = x_k(n) \tag{5.13}$$

όπου ο δείκτης k αναφέρεται στην k-οστή είσοδο του διανύσματος εισόδου \vec{x} . Δηλαδή το ευθύ 'πέρασμα' ξεκινά από το πρώτο επίπεδο με την παρουσίαση του διανύσματος εισόδου, υπολογίζει όλα τα σήματα εξόδου των νευρώνων βάσει των προαναφερθέντων σχέσεων και προχωρά στα επόμενα επίπεδα του δικτύου, ώσπου να φτάσει, τελικά, στο τελευταίο επίπεδο (επίπεδο εξόδου) και να υπολογίσει το διάνυσμα εξόδου του δικτύου, καθώς και το σφάλμα του κάθε νευρώνα αυτού του επιπέδου μέσω της σχέσης (5.1).

πραγματοποιείται το 'πέρασμα' αντίστροφης φοράς (reverse pass). Ξεκινά από το επίπεδο εξόδου περνώντας τα σήματα σφάλματος προς τα πίσω και υπολογίζοντας αναδρομικά την τιμή της τοπικής κλίσης του κάθε νευρώνα. Με αυτόν τον τρόπο αναπροσαρμόζονται τα βάρη μεταξύ των συνδέσεων σύμφωνα με τον κανόνα δέλτα. Ακολούθως, μέσω αυτών των τοπικών κλίσεων υπολογίζονται οι τοπικές κλίσεις των νευρώνων του προτελευταίου επιπέδου και ούτω καθεξής για τα υπόλοιπα επίπεδα, ώσπου να καταλήξει στο πρώτο επίπεδο του δικτύου.

Η διαδικασία των δύο 'περασμάτων' εκτελείται για κάθε πρότυπο του συνόλου εκπαίδευσης. Όταν εκτελεστεί για όλο το σύνολο των προτύπων εκπαίδευσης, τότε έχει πραγματοποιηθεί μία εποχή.

Στη συνέχεια επισημαίνονται κάποια κρίσιμα ζητήματα για την απόδοση του πολυεπίπεδου τεχνητού νευρωνικού δικτύου:

Συνάρτηση ενεργοποίησης και κορεσμός

Για να υπολογιστεί 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.

Για να αποφευχθεί το πρόβλημα κορεσμού των τιμών της συνάρτησης ενεργοποίησης, οι μεταβλητές εισόδου κανονικοποιούνται, δηλαδή μετασχηματίζονται, 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 είναι απαραίτητος στην περίπτωση ενός φυσικού μεγέθους, όπου στο σύνολο εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου δεν παρουσιάζονται οι ακραίες τιμές του. Στη συνέχεια μετασχηματίζονται οι τιμές εισόδου x στις νέες κανονικοποιημένες τιμές \hat{x} σύμφωνα με τη σχέση:

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ

$$\hat{x} = a + \frac{b - a}{x_{\max} - x_{\min}} (x - x_{\min})$$
(5.14)

$\phi(x) = 1/\left(1 + e^{-ax}\right)$	$\phi(x) = \tanh(ax+b)$	$\phi(x) = ax + b$
Σιγμοειδής με πεδίο τιμών [0,1] (λογιστική συνάρτηση)	Σιγμοειδής με πεδίο τιμών [-1,1] (υπερβολική εφαπτομένη)	Γραμμική
$\phi(x) = \begin{cases} \gamma, & x \ge \gamma \\ x, & x < \gamma \\ -\gamma, & x \le \gamma \end{cases}$	$\phi(x) = \begin{cases} a, & x \ge \gamma \\ b, & x < \gamma \end{cases}$	$\phi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{v}\right)$
Αναρρίχησης	Βηματική	Γκαουσιανή

Πίνακας 5.1: Συναρτήσεις Ενεργοποίησης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

<u>Προσθήκη όρου ορμής</u>

Ο αλγόριθμος της οπίσθιας τροφοδότησης δίνει μια προσέγγιση της τροχιάς των βαρών, η οποία υπολογίζεται με τη μέθοδο της απότομης καθόδου. Όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός μάθησης, τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή των βαρών σε κάθε επανάληψη και άρα τόσο πιο ομαλή είναι και η τροχιά της καμπύλης των βαρών. Συνεπώς, το κόστος για υψηλό επίπεδο μάθησης είναι ο αργός ρυθμός μάθησης. Αν χρησιμοποιηθεί υψηλός ρυθμός μάθησης για να επιταχυνθεί η διαδικασία, η καμπύλη των βαρών δεν θα είναι ομαλή, καθώς θα υπάρξουν απότομες μεταβολές, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται κίνδυνος αστάθειας του αλγόριθμου. Ένας τρόπος εξάλειψης των παραπάνω κινδύνων είναι η τροποποίηση του κανόνα αναπροσαρμογής των βαρών με την προσθήκη ενός όρου ορμής (momentum term) *α*, που ονομάζεται και σταθερά ορμής και είναι συνήθως θετικός αριθμός [115]:

$$\Delta w_{ji}(n) = \alpha \cdot \Delta w_{ji}(n-1) + \eta \cdot \delta_j(n) \cdot y_i(n)$$
(5.15)

Η σχέση (5.15) είναι δυνατό να διατυπωθεί ως χρονική ακολουθία με δείκτη t:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \sum_{t=0}^{n} a^{n-t} \frac{\partial G(n)}{\partial w_{ji}(n)}$$
(5.16)

Όταν η μερική παράγωγος $\partial G(n)/\partial w_{ji}(n)$ διατηρεί σταθερό πρόσημο σε συνεχόμενες επαναλήψεις, τότε η αντίστοιχη μεταβολή του βάρους αυξάνει σημαντικά. Δηλαδή η εισαγωγή της σταθεράς ορμής σ' αυτήν την περίπτωση τείνει κυρίως να επιταχύνει την κάθοδο προς μία σταθερή κατεύθυνση. Όταν, όμως, η μερική παράγωγος μεταβάλλει το πρόσημο της σε κάποιο αριθμό διαδοχικών

επαναλήψεων, τότε η αντίστοιχη μεταβολή του βάρους ελαττώνεται. Συνεπώς, η εισαγωγή του παράγοντα ορμής έχει σταθεροποιητικό αποτέλεσμα για τον αλγόριθμο.

<u>Τρόποι εκπαίδευσης</u>

Η διαδικασία εκπαίδευσης κατά τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος πραγματοποιείται με την παρουσίαση και εφαρμογή στο νευρωνικό δίκτυο ενός συνόλου διανυσμάτων εκπαίδευσης. Η παρουσίαση όλων των προτύπων εκπαίδευσης μια φορά το καθένα στο δίκτυο, είτε με τυχαίο, είτε με σειριακό τρόπο, ονομάζεται εποχή (epoch). 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.

Ανάλογα με τον τρόπο αναπροσαρμογής των βαρών υπάρχουν δύο τρόποι εκπαίδευσης [115]: η εκπαίδευση ανά πρότυπο και η 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 ενημερώνονται έπειτα από την παρουσίαση στο δίκτυο όλου του συνόλου προτύπων της εποχής. Για μία τέτοια εποχή η μέση τιμή των τετραγωνικών σφαλμάτων ορίζεται μέσω της σχέσης (5.2). 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.

<u>Κριτήρια τερματισμού</u>

Ο αλγόριθμος ανάστροφης τροφοδότησης γενικά δε 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 [115].

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 με βάση το μέγεθος των σφαλμάτων στο σύνολο αυτό υπολογίζεται το συνολικό σφάλμα μοντέλου. Επομένως, αν δίνεται ένας αριθμός μοντέλων, που έχουν εκπαιδευτεί 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).

5.2.3 Παραλλαγές αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος

Πέραν του βασικού αλγορίθμου έχουν αναπτυχθεί μία σειρά παραλλαγών του με σκοπό τη βελτίωση της ταχύτητας σύγκλισης και τη μείωση του σφάλματος [115, 116].

<u>Βασικός αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος με εκπαίδευση ανά εποχή</u> Υπάρχουν τρεις παραλλαγές του αλγορίθμου αυτού:

α. Για την περίπτωση του βασικού αλγορίθμου, αν η ανανέωση γίνεται κάθε εποχή
 ep (εκπαίδευση ανά εποχή), η αντίστοιχη σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\Delta \vec{w}(ep) = -\eta \cdot \nabla G(\vec{w}(ep)) \tag{5.17}$$

- β. Με την προσθήκη του όρου ορμής μετασχηματίζεται σε: $\Delta \vec{w}(ep) = -\eta \cdot \nabla G(\vec{w}(ep)) + a \cdot \Delta \vec{w}(ep-1)$ (5.18)
- γ. Προκειμένου να επιταχυνθεί η εκπαίδευση, ο ρυθμός μάθησης και ο όρος ορμής της σχέσης (5.18) μπορούν να μεταβληθούν σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις διαμορφώνοντας τον προσαρμοστικό αλγόριθμο:

$$\eta(ep) = \begin{cases} \eta(ep-1), & G_{av}(ep) > G_{av}(ep-1) \\ \eta(ep-1) \cdot \exp(-1/T_{\eta}), & G_{av}(ep) \le G_{av}(ep-1) \end{cases}$$
(5.19)

$$a(ep) = \begin{cases} a(ep-1), & G_{av}(ep) \le G_{av}(ep-1) \\ a(ep-1) \cdot \exp(-1/T_a), & G_{av}(ep) > G_{av}(ep-1) \end{cases}$$
(5.20)

όπου T_{η} και $\eta_0 = \eta(0)$ είναι η χρονική παράμετρος και η αρχική τιμή του ρυθμού μάθησης αντίστοιχα, T_a και $a_0 = a(0)$ είναι η χρονική παράμετρος και η αρχική τιμή του όρου ορμής, G_{av} η συνάρτηση σφάλματος είτε του συνόλου εκπαίδευσης, είτε του συνόλου επικύρωσης. Αν η συνάρτηση σφάλματος

μειώνεται με το πέρασμα των εποχών, τότε ο όρος ορμής μένει σταθερός ή αυξάνεται [93], ενώ ο ρυθμός μάθησης μειώνεται ενισχύοντας την επίδραση της μεταβολής των βαρών. Ενώ, αν η συνάρτηση σφάλματος αυξηθεί με το πέρασμα εποχών, πρέπει να μειωθεί η επίδραση των προηγούμενων σφαλμάτων, γι' αυτό ο όρος ορμής μειώνεται, ενώ ο ρυθμός μάθησης μένει σταθερός.

Ευπροσάρμοστος αλγόριθμος

Κατά τον ευπροσάρμοστο αλγόριθμο (resilient algorithm) λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο το πρόσημο της παραγώγου της συνάρτησης σφάλματος ως προς το βάρος w_{ij} για τον καθορισμό της κατεύθυνσης διόρθωσης του τελευταίου [117]. Το μέγεθος της παραγώγου δεν έχει καμία επίδραση. Η μεταβολή του βάρους δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta w_{ij}(ep) = \begin{cases} \delta_1 \cdot \Delta w_{ij}(ep-1), & \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep) \cdot \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep-1) > 0 \\ \Delta w_{ij}(ep-1), & \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep) \cdot \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep-1) = 0 \\ \frac{1}{\delta_2} \cdot \Delta w_{ij}(ep-1), & \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep) \cdot \frac{\partial G_{av}}{\partial w_{ij}}(ep-1) < 0 \end{cases}$$
(5.21)

όπου δ_1 , δ_2 είναι ο αυξητικός και ο μειωτικός παράγοντας της μεταβολής του βάρους αντίστοιχα. Δηλαδή, όταν η παράγωγος του σφάλματος ως προς w_{ij} έχει το ίδιο πρόσημο για δύο διαδοχικές επαναλήψεις, τότε η αντίστοιχη μεταβολή ενισχύεται. Αν μεταβάλλεται το πρόσημο, μειώνεται, ενώ, αν η παράγωγος είναι μηδενική, τότε η μεταβολή παραμένει σταθερή. Με αυτήν τη μέθοδο αντιμετωπίζεται εναλλακτικά το πρόβλημα του κορεσμού των σιγμοειδών συναρτήσεων ενεργοποίησης.

Μέθοδος συζευγμένης μεταβολής της κλίσης

Μία άλλη κατηγορία παραλλαγών του αλγορίθμου εκπαίδευσης οπίσθιας τροφοδότησης σφάλματος είναι της συζευγμένης μεταβολής κλίσης (conjugate gradient algorithm) [118], κατά την οποία η μεταβολή βαρών λαμβάνει υπ' όψιν το σύνολο των μεταβολών κλίσης εντός του αντίστοιχου χώρου και δεν στηρίζεται μόνο στην αντίστοιχη κλίση βάρους, όπως συμβαίνει στην αρχική μέθοδο. Αυτό έχει ως συνέπεια στις περισσότερες περιπτώσεις να συγκλίνει γρηγορότερα. Τα αντίστοιχα βήματά της είναι τα ακόλουθα:

α. Ορίζεται η κατεύθυνση αναζήτησης \vec{p}_0 ίση με το αντίθετο του διανύσματος μεταβολής κλίσης κατά την πρώτη επανάληψη:

$$\vec{p}_0 = -\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w} = \vec{w}_0} \tag{5.22}$$

β. Πραγματοποιείται η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος κατά την κατεύθυνση αναζήτησης:

$$\Delta \vec{w}_k = a_k \cdot p_k \tag{5.23}$$

Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται μέσω της παραμέτρου $a_k > 0$, η οποία υπολογίζεται με μεθόδους, όπως της χρυσής τομής, της διχοτόμου κ.λπ. [119].

Η μέθοδος της χρυσής τομής ξεκινά με την εύρεση ενός βασικού διαστήματος [a,b] εντός του οποίου θα γίνει η διερεύνηση για τον υπολογισμό του ελαχίστου. Κατόπιν γίνεται τριχοτόμηση του διαστήματος αυτού στα διαστήματα [a,c],

$$[c,d]$$
 και $[d,b]$, όπου $c = a + p(b-a)$ και $d = a + q(b-a)$ με $p = \frac{3-\sqrt{5}}{2} \approx 0.38$

кан $q = 1 - p \approx 0.62$ (oi δύο αριθμοί της χρυσής τομής). Αν f(c) < f(d) (ή f(c) > f(d)) τότε το διάστημα [a,d] (ή [c,b]) περιέχει ένα σημείο ελαχίστου της f στο [a,b]. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε ένα όλο και πιο μικρό διάστημα έως ότου καταλήξει με ικανοποιητική ακρίβεια στην τιμή του ελαχίστου.

Στη μέθοδο της διχοτόμου υπολογίζεται το μέσον x_0 του διαστήματος [a,b]. Κατόπιν διερευνάται σε ποιο από τα δύο διαστήματα $[a, x_0]$ ή $[x_0, b]$ βρίσκεται η ρίζα της εξίσωσης και σε αυτό το διάστημα εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

γ. Η κατεύθυνση αναζήτησης p
_{k+1} του επόμενου βήματος υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\vec{p}_{k+1} = -\nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k+1}} + \beta_{k+1} \cdot \vec{p}_k$$
(5.24)

όπου η παράμετρος β_{k+1} προσδιορίζεται είτε από τη σχέση (5.25) κατά Fletcher-Reeves [120], είτε από τη σχέση (5.26) κατά Polak-Ribiere [121]:

$$\beta_{k+1} = \frac{\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}^{T} \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}}}{\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}}^{T} \cdot \nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}}}$$
(5.25)

$$\beta_{k+1} = \frac{\Delta \left(\nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_k}^T \right) \cdot \nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k+1}}}{\nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_k}} \cdot \nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_k}}$$
(5.26)

δ. Αν ο αλγόριθμος δεν έχει συγκλίνει, τότε επαναλαμβάνεται το δεύτερο βήμα. Διευκρινίζεται ότι η k-οστή επανάληψη συνήθως ταυτίζεται με την αντίστοιχη εποχή, το οποίο όμως δεν είναι αναγκαίο. Επίσης, προκειμένου να αποφευχθεί ο ρυθμός σύγκλισης να είναι γραμμικός, πρέπει η επαναληπτική διαδικασία να επανεκκινεί κατά διαστήματα. Συνήθως αυτό συμβαίνει μετά από αριθμό επαναλήψεων ίσο με το πλήθος N_w των παραμέτρων υπό προσδιορισμό (βαρών και πολώσεων). Συμπληρωματικά μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος επανεκκίνησης κατά Powell-Beale [122] (χωρίς να αναιρεί τη χρήση του προηγούμενου κριτηρίου), όπου η μετάβαση στο πρώτο βήμα γίνεται, όταν η ορθογωνικότητα μεταξύ του παρόντος και του προηγούμενου διανύσματος κλίσης είναι μικρή, δηλαδή ισχύει:

$$\left|\nabla G(\vec{w})\right|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}}^{T} \cdot \nabla G(\vec{w})\Big|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}+1}\right| \ge \ell_{o} \cdot \left\|\nabla G(\vec{w})\right|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}+1}\right\|^{2} \ \mu\epsilon \ k \ge 1$$
(5.27)

όπου το όριο ορθογωνικότητας ℓ_o επιτρέπεται να κυμαίνεται στο διάστημα (0,1, 0,9) με συνήθη τιμή το 0,2.

Το βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου συζευγμένης μεταβολής κλίσης είναι ο υπολογιστικός φόρτος της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης σφάλματος.

Μέθοδος βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης

Ο αλγόριθμος της βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης (scaled conjugate gradient algorithm) [123] αποφεύγει αυτήν την αδυναμία στηριζόμενο στην προσέγγιση των Levenberg-Marquardt. Τα αντίστοιχα βήματά της είναι:

α. Αρχικοποιούνται η κατεύθυνση αναζήτησης \vec{p}_0 σύμφωνα με τη σχέση (5.22), το διάνυσμα των βαρών και των πολώσεων \vec{w}_0 και οι παράμετροι σ , λ_0 , $\overline{\lambda}_0$ και flag σύμφωνα με τα ακόλουθα:

 $0 < \sigma \le 10^4$ $0 < \lambda_0 \le 10^{-6}$ $\overline{\lambda}_0 = 0$ flag = 1 (5.28)

β. Αν η σημαία (flag) είναι 1, τότε υπολογίζονται:

$$\sigma_{k} = \sigma / \|\vec{p}_{k}\| \qquad \vec{s}_{k} = \left(\nabla G(\vec{w})\big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k} + \sigma_{k} \cdot \vec{p}_{k}} - \nabla G(\vec{w})\big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k}}\right) / \sigma_{k} \qquad \delta_{k} = \vec{p}_{k}^{T} \cdot \vec{s} \quad (5.29)$$

γ. Προσδιορίζεται η τιμή του παράγοντα δ_k :

$$\delta_k = \delta_k + \left(\lambda_k - \overline{\lambda}_k\right) \cdot \left\|\vec{p}_k\right\|^2 \tag{5.30}$$

δ. Αν $\delta_k \leq 0$, τότε η μήτρα Hessian γίνεται θετική ορίζοντας τα εξής:

$$\overline{\lambda}_{k} = 2\left(\lambda_{k} - \delta_{k} / \left\|\vec{p}_{k}\right\|^{2}\right) \qquad \delta_{k} = -\delta_{k} + \lambda_{k} \cdot \left\|\vec{p}_{k}\right\|^{2} \qquad \lambda_{k} = \overline{\lambda}_{k}$$
(5.31)

ε. Υπολογίζεται το μέγεθος του βήματος:

$$\mu_k = -\vec{p}_k^T \cdot \nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_k} \qquad a_k = \mu_k / \delta_k \qquad (5.32)$$

στ. Υπολογίζεται η παράμετρος σύγκρισης:

$$\Delta_{k} = 2 \cdot \delta_{k} \cdot \left(G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k}} - G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k} + a_{k} \cdot \vec{p}_{k}} \right) / \mu_{k}^{2}$$

$$(5.33)$$

ζ. Αν $\Delta_k \ge 0$, τότε πραγματοποιείται πετυχημένη μείωση του σφάλματος:

$$\Delta \vec{w}_k = a_k \cdot \vec{p}_k \qquad \vec{r}_{k+1} = -\nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k+1}} \qquad \vec{\lambda}_k = 0 \qquad flag = 1 \quad (5.34)$$

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

$$\vec{p}_{k+1} = -\nabla G(\vec{w})\Big|_{\vec{w} = \vec{w}_{k+1}}$$
(5.35)

διαφορετικά:

$$\beta_{k+1} = \left(\left\| \nabla G(\vec{w}) \right\|_{\vec{w} = \vec{w}_{k+1}} \left\| -\nabla G(\vec{w}) \right\|_{\vec{w} = \vec{w}_{k}}^{T} \cdot \nabla G(\vec{w}) \right\|_{\vec{w} = \vec{w}_{k}} \right) / \mu_{k}$$
(5.36)

$$\vec{p}_{k+1} = \nabla G(\vec{w}) \Big|_{\vec{w} = \vec{w}_k} + \beta_{k+1} \cdot \vec{p}_k$$
(5.37)

An $\Delta_{\mathbf{k}} \geq 0.75$, tóte $\lambda_{\mathbf{k}} = 0.25 \cdot \lambda_{\mathbf{k}}$, diajoretiká $\overline{\lambda_{\mathbf{k}}} = \lambda_{\mathbf{k}}$, flag = 0 .

η. Επαναπροσδιορίζεται ο συντελεστής κλίμα
κας $\lambda_{\mathbf{k}}$ ως εξής:

Av
$$\Delta_k < 0.25$$
, tóte $\lambda_k = \lambda_k + \delta_k (1 - \Delta_k) / \|\vec{p}_k\|^2$
(5.38)

θ. Αν $\nabla G(\vec{w})|_{\vec{w}=\vec{w}_{k+1}} \neq \vec{0}$, τότε k = k+1 και επιστρέφει στο βήμα β, αλλιώς έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία με την εύρεση των τελικών βαρών \vec{w}_{k+1} .

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας είναι η πολυπλοκότητά της, η οποία φτάνει στο $O(6N_w^2)$ έναντι του $O(3N_w^2)$ της βασικής μεθόδου ανάστροφης τροφοδότησης σφάλματος. Όταν ο συντελεστής κλίμακας λ_k είναι μηδέν, ο

αλγόριθμος της βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης ταυτίζεται με τον αντίστοιχο βασικό. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι το σφάλμα μειώνεται μονότονα, ενώ αύξησή του δεν επιτρέπεται. Στην περίπτωση που το σφάλμα μένει αμετάβλητο μεταξύ δύο επαναλήψεων, η μήτρα Hessian δεν ορίζεται θετικά και το λ_k αυξάνεται.

<u>Μέθοδος Newton</u>

Μία βασική κατηγορία εκπαίδευσης εμπρόσθιων πολυεπίπεδων νευρωνικών δικτύων στηρίζεται στη μέθοδο Newton. Το βασικό βήμα αυτής στηρίζεται στην αντιστροφή της μήτρας Hessian $\nabla^2 G(\vec{w})$ (της συνάρτησης σφάλματος ως προς τα βάρη και τις πολώσεις) για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων μεταβολών:

$$\Delta \vec{w}_{k} = -\nabla^{2} G\left(\vec{w}\right)\Big|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}}^{-1} \cdot \nabla G\left(\vec{w}\right)\Big|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}}$$
(5.39)

Η μέθοδος αυτή είναι, συνήθως, πιο γρήγορη από τους προαναφερθέντες αλγορίθμους, αλλά ο υπολογισμός και η αντιστροφή του πίνακα Hessian είναι αρκετά περίπλοκος, καθώς προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

Hessian
$$\mu\eta\tau\rho\alpha$$
: $\nabla^2 G(\vec{w}) = J(\vec{w})^T \cdot J(\vec{w}) + \sum_{j \in C} e_j(\vec{w}) \cdot \nabla^2 e_j(\vec{w})$ (5.40)

$$I α κωβιαν ή μήτρα: J(\vec{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{N_w}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{N_w}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_{p_C}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{p_C}}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_{p_C}}{\partial w_{N_w}} \end{bmatrix}_{p_C \times N_w}$$
(5.41)

Μία βασική παραλλαγή της μεθόδου Newton είναι η quasi-Newton, όπου ο δεύτερος όρος του δεξιού μέρους της σχέσης (5.40) παραλείπεται, καθώς τα αντίστοιχα στοιχεία λαμβάνουν μικρές τιμές και δεν είναι σημαντικές. Εναλλακτικά, κατά τη μέθοδο της τέμνουσας ενός βήματος (one step secant algorithm) δεν αποθηκεύεται ολόκληρος ο πίνακας Hessian, παρά μόνο τα διαγώνια στοιχεία, με συνέπεια να μην χρειάζεται αντιστροφή του πίνακα. Χρειάζεται μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων, αλλά το υπολογιστικό κόστος ανά επανάληψη περιορίζεται σημαντικά.

Επίσης, μία βασική παραλλαγή αυτής της μεθοδολογίας είναι η μέθοδος Levenberg-Marquardt [124, 125], όπου ο κανόνας μεταβολής των βαρών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \vec{w}_{k} = -\left(J^{T} \cdot J + \lambda \cdot diag\left[J^{T} \cdot J\right]\right)^{-1} \cdot \nabla G\left(\vec{w}\right)\Big|_{\vec{w}=\vec{w}_{k}} \Longrightarrow$$
$$\Delta \vec{w}_{k} = -\left(J^{T} \cdot J + \lambda \cdot diag\left[J^{T} \cdot J\right]\right)^{-1} \cdot J^{T} \cdot \vec{e}\left(\vec{w}_{k}\right) \tag{5.42}$$

Ο συντελεστής *λ* μεταβάλλεται ανάλογα με τις αυξομειώσεις της συνάρτησης σφάλματος σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda(k+1) = \begin{cases} \lambda(k) \cdot \beta, & G_{av}(k) > G_{av}(k-1) \\ \lambda(k), & G_{av}(k) = G_{av}(k-1) \\ \lambda(k)/\beta, & G_{av}(k) < G_{av}(k-1) \end{cases}$$
(5.43)

5.2.4 Διαστήματα εμπιστοσύνης στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Ο υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης στα νευρωνικά δίκτυα δεν είναι δυνατό να γίνει άμεσα, γι' αυτό χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μεθοδολογίες [126]:

<u>Εύρεση σφάλματος εζόδου</u>

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο έχει δύο εξόδους για κάθε μεταβλητή εξόδου, την ίδια τη μεταβλητή και την πρόβλεψη του αντίστοιχου σφάλματος. Τα απαιτούμενα στοιχεία για το σφάλμα εξόδου προσδιορίζονται σε κάθε εποχή εκπαίδευσης. Κάθε φορά που εμφανίζονται οι είσοδοι στο νευρωνικό δίκτυο, υπολογίζονται τα σφάλματα εξόδου. Σε κάθε εποχή χρησιμοποιούνται διαφορετικά στοιχεία σφάλματος εξόδου ως είσοδοι. Με την πρόοδο της διαδικασίας εκπαίδευσης το σφάλμα εξόδου σταθεροποιείται. Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης προστίθεται και αφαιρείται στο υπό μελέτη μέγεθος το σφάλμα εξόδου, ώστε να δημιουργηθεί ένα συμμετρικό διάστημα εμπιστοσύνης.

<u>Επαναδειγματοληψία</u>

Πραγματοποιείται η δειγματοληψία των σφαλμάτων εκτίμησης για κάθε πρόβλεψη. Τα *n* σφάλματα ταξινομούνται στη σειρά (λαμβάνοντας υπ' όψιν και το αντίστοιχο πρόσημο) και προσδιορίζεται η συνάρτηση αθροιστικής διανομής δείγματος:

$$S_{n}(z) = \begin{cases} 0, & z < z_{1} \\ r/n, & z_{r} \le z < z_{r+1} \\ 1, & z_{n} \le z \end{cases}$$
(5.44)

Όταν το πλήθος *n* είναι πολύ μεγάλο, η συνάρτηση της σχέσης (5.44) είναι μια καλή προσέγγιση της πραγματικής αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας. Το διάστημα

εμπιστοσύνης προσδιορίζεται βρίσκοντας το μέσο z παραλείποντας τις ακραίες τιμές σύμφωνα με τον επιθυμητό συντελεστή εμπιστοσύνης. Τα διαστήματα προσδιορίζονται, ώστε να είναι συμμετρικά ως προς την πιθανότητα, αλλά δεν είναι απαραίτητα συμμετρικά ως προς το z. 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 $|n \cdot p|$.

Πολυγραμμική παλινδρόμηση προσαρμοσμένη σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, μόνο αν η συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα εξόδου είναι γραμμική. Σ' αυτήν την περίπτωση η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι ένα είδος πολυγραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης. Ως είσοδοι λαμβάνονται οι έξοδοι των κρυμμένων νευρώνων και ως συντελεστές παλινδρόμησης τα συνδετικά βάρη του νευρώνα εξόδου αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του διαστήματος εμπιστοσύνης γίνεται μέσω της διασποράς του σφάλματος πρόβλεψης που δίνεται από τη σχέση [126]:

$$\sigma^{2} = \sum_{i=1}^{N} \left(t_{i} - o_{i} \right)^{2} / \left(N - p_{c} \right)$$
(5.45)

όπου N τα στοιχεία του συνόλου εκπαίδευσης, p_c ο αριθμός των συντελεστών, t_i και o_i η επιθυμητή και η εκτιμώμενη τιμή του υπό μελέτη μεγέθους αντίστοιχα. Ο επιδιωκόμενος βαθμός εμπιστοσύνης της πρόβλεψης τ ακολουθεί την κατανομή *t*-Student με (N- p_c) βαθμούς ελευθερίας και δίνεται από τη σχέση:

$$\left(t_{\tau} - o_{\tau}\right) / \left(\sigma \cdot \sqrt{1 + \vec{x}_{\tau}^{T} \cdot A^{-1} \cdot \vec{x}_{\tau}}\right) \text{ ónow } A = \sum_{i=1}^{N} \vec{x}_{i} \cdot \vec{x}_{i}^{T}$$

$$(5.46)$$

Το διάστημα εμπιστοσύνης της πρόβλεψης τ δίνεται από τη σχέση:

$$t_{\tau} - t_{N-p_{c}}(a/2) \cdot \sigma \cdot \sqrt{1 + \vec{x}_{\tau}^{T} \cdot A^{-1} \cdot \vec{x}_{\tau}} \le o_{\tau} \le t_{\tau} + t_{N-p_{c}}(a/2) \cdot \sigma \cdot \sqrt{1 + \vec{x}_{\tau}^{T} \cdot A^{-1} \cdot \vec{x}_{\tau}}$$
(5.47)

όπου το α είναι τέτοιο, ώστε η πιθανότητα της κατανομής *t-Student* (1-α) να είναι ο βαθμός εμπιστοσύνης.

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα των Silva et al. [126] προτείνουν τη μεθοδολογία της δειγματοληψίας ως την καταλληλότερη για τον προσδιορισμό διαστήματος εμπιστοσύνης με υψηλό βαθμό πιθανότητας.

5.3 Εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης μονωτήρων υπό συνθήκες ρύπανσης, καθώς έχουν την ικανότητα να 'μαθαίνουν' αυτόματα προσεγγιστικές σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων, χωρίς να επηρεάζονται από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

5.3.1 Δεδομένα εκπαίδευσης

Για την εκπαίδευση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούν μονωτήρες τύπου cap & pin. Συγκεκριμένα, ως μεταβλητές εισόδου χρησιμοποιήθηκαν τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη διάμετρος D_m (σε cm)
- Ύψος Η (σε cm)
- Μήκος ερπυσμού L (σε cm)
- Συντελεστής μορφής F¹
- Επιφανειακή αγωγιμότητα σ_s (σε μS)

 Ω_{ζ} εξαρτημένη μεταβλητή εξόδου του νευρωνικού δικτύου θεωρήθηκε η κρίσιμη τάση U_c (σε kV).

Τα δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και τον έλεγχο του νευρωνικού δικτύου, συλλέχθηκαν από πειράματα και από την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου. Τα πειράματα διεξήχθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 507/1975 σε ένα σταθμό δοκιμών μονωτήρων, ο οποίος είχε εγκατασταθεί στο Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων (ΚΔΕΠ) της Δ.Ε.Η. [59]. Στο συγκεκριμένο σταθμό δοκιμών, ο οποίος περιελάμβανε το θάλαμο ρύπανσης και το

εξής [27]: F = $\int_{0}^{L} \frac{dl}{\pi \cdot D(l)}.$

¹ Καθορίζεται από τις διαστάσεις του μονωτήρα. Προκειμένου να προσδιοριστεί γραφικά, σχεδιάζεται η αντίστροφη τιμή της περιφέρειας του μονωτήρα (1/p) συναρτήσει του μερικού μήκους ερπυσμού (1) υπολογιζόμενο από το τέλος του μονωτήρα μέχρι το μετρούμενο σημείο. Ο συντελεστής μορφής δίνεται από το εμβαδό κάτω από τη σχηματιζόμενη καμπύλη και υπολογίζεται από τη σχέση [46]:

 $F = \int_{0}^{L} \frac{dl}{p(l)}$. Αν D(l) είναι η διάμετρος του μονωτήρα, τότε η προηγούμενη σχέση τροποποιείται ως

θάλαμο ομίχλης, διεξήχθησαν πειράματα για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης σε τεχνητά ρυπασμένους μονωτήρες. Οι δοκιμές έγιναν για διάφορους τύπους μονωτήρων ανάρτησης, που χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ στα συστήματα μεταφοράς και διανομής. Συμπληρωματικά χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις, οι οποίες προέκυψαν από παρόμοιες πειραματικές διαδικασίες [33, 127].

Εξαιτίας του μικρού πλήθους πειραματικών δεδομένων, κρίθηκε αναγκαίος ο εμπλουτισμός των δεδομένων εισόδου με αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου (σχέση 1.18), το οποίο έχει προταθεί από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. [26, 42, 76] και υπολογίζει την κρίσιμη τάση U_c.

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του πλήθους των διανυσμάτων εισόδου στη συμπεριφορά του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, δοκιμάστηκε τόσο η περίπτωση χρήσης μόνο των πειραματικών δεδομένων (70% του συνόλου των δεδομένων για το σύνολο εκπαίδευσης και 30% για το σύνολο ελέγχου ή 85% και 15%, αντίστοιχα), όσο και η περίπτωση χρήσης πειραματικών τιμών και αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου για το σύνολο εκπαίδευσης (140 διανύσματα προερχόμενα από το μαθηματικό μοντέλο και 8 διανύσματα προερχόμενα από πειράματα) και πειραματικών τιμών για το σύνολο ελέγχου (20 διανύσματα). Στις περιπτώσεις χρήσης μόνο πειραματικών δεδομένων, το σύνολο εκπαίδευσης είναι αρκετά μικρό με αποτέλεσμα να προκαλείται πρόβλημα στη γενίκευση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Παρ' όλα αυτά το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο δίνει αποτελέσματα με σχετικά μικρό σφάλμα, όταν οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των μεταβλητών περιλαμβάνονται στο σύνολο εκπαίδευσης. Στην περίπτωση χρήσης δεδομένων προκύπτοντα τόσο από πειραματικές διατάξεις, όσο και από το μαθηματικό μοντέλο, το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο έδωσε καλύτερα αποτελέσματα, και μάλιστα με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την περίπτωση χρήσης μόνο του μαθηματικού μοντέλου για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης [128]. Συνεπώς, το πλήθος των δεδομένων εισόδου επιδρά άμεσα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε περιπτώσεις εφαρμογής μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης.

5.3.2 Ανάπτυξη αλγορίθμου σε MATLAB

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης αναπτύχθηκε αλγόριθμος, χρησιμοποιώντας έτοιμες συναρτήσεις του ΜΑΤLAB [129], ο οποίος υλοποιεί δίκτυο επιβλεπόμενης μάθησης με τον κανόνα ανάστροφης διάδοσης σφάλματος. Η εκπαίδευση έγινε με χρήση διάφορων αλγορίθμων, οι οποίοι υπάρχουν στο πακέτο του MATLAB και αποτελούν ουσιαστικά παραλλαγές του αλγόριθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν οι εξής μέθοδοι εκπαίδευσης:

- Απότομης κλίσης (traingd): Αποτελεί την πιο απλή υλοποίηση του αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, στην οποία τα βάρη ανανεώνονται ανά εποχή σύμφωνα με τον κανόνα απότομης κλίσης. Οι παράμετροι που σχετίζονται με την traingd είναι οι εποχές, ο στόχος (goal) και ο ρυθμός μάθησης (lr). Η εκπαίδευση σταματά όταν ο αριθμός των επαναλήψεων ξεπεράσει τον αριθμό των εποχών που έχει ορισθεί ή αν η συνάρτηση λειτουργίας (μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκπαίδευσης) πάρει τιμή μικρότερη του στόχου.
- Απότομης κλίσης με προσαρμοζόμενο ρυθμό μάθησης (traingda): Λειτουργεί όμοια με τη μέθοδο απότομης κλίσης, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί προσαρμοζόμενο ρυθμό μάθησης.
- Απότομης κλίσης με προσαρμοζόμενο ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής (traingdx): Λειτουργεί όμοια με τη μέθοδο απότομης κλίσης, με τη διαφορά ότι συνδυάζει τον προσαρμοζόμενο ρυθμό μάθησης με προσθήκη όρου ορμής.
- Levenberg-Marquardt (trainlm): Υλοποιεί τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος κατά Levenberg-Marquardt, ο οποίος με τη σειρά του είναι προσέγγιση των μεθόδων quasi-Newton [101].

Για κάθε μία απ' τις παραπάνω μεθόδους δημιουργήθηκε ένα σύνολο σεναρίων, στα οποία μεταβαλλόταν ο αριθμός των εποχών από 500 έως 5000 με βήμα 500. Σε κάθε σενάριο ο αριθμός των νευρώνων του κρυμμένου επιπέδου μεταβαλλόταν αυτόματα (από 2 έως 25), προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη δομή του νευρωνικού δικτύου. Ως κριτήριο βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα *MSE*:

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} e_k^2(i)$$
(5.48)

όπου *m* είναι ο αριθμός των διανυσμάτων εκπαίδευσης και e_k η απόλυτη διαφορά μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης για το σύνολο ελέγχου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρισδιάστατα γραφήματα (Σχήματα 5.3 – 5.6) του μέσου τετραγωνικού σφάλματος συναρτήσει του αριθμού των εποχών για τους τέσσερις αλγόριθμους εκπαίδευσης.

Από τα Σχήματα 5.3 έως 5.6 προκύπτει ότι σε κάποιες μεθόδους (π.χ. Levenberg– Marquardt) παρουσιάστηκε παλινδρόμηση (αστάθεια) οφειλόμενη στο μεγάλο αριθμό νευρώνων, γεγονός που καθιστά μη αποδεκτά τα αποτελέσματα, ακόμη κι αν το σφάλμα είναι μικρό. Η μέθοδος απότομης ήταν γενικά ευσταθής, αλλά οι τιμές του σφάλματος ήταν αρκετά μεγάλες. Η μέθοδος εκπαίδευσης με κανόνα απότομης κλίσης και ταυτόχρονη προσαρμογή του ρυθμού μάθησης και προσθήκη όρου ορμής, παρέμεινε ευσταθής σε μία περιοχή νευρώνων (6-12 νευρώνες), ενώ ταυτόχρονα έδωσε μικρές τιμές σφάλματος, με αποτέλεσμα να επιλεγεί ως η βέλτιστη μέθοδος εκπαίδευσης.



Σχήμα 5.3: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων και του αριθμού των εποχών για τον αλγόριθμο 'traingd'.



Σχήμα 5.5: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων και του αριθμού των εποχών για τον αλγόριθμο 'traingdx'.



Σχήμα 5.4: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων και του αριθμού των εποχών για τον αλγόριθμο 'traingda'.



Σχήμα 5.6: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων και του αριθμού των εποχών για τον αλγόριθμο 'trainlm'.

Από τα Σχήματα 5.3 έως 5.6 προκύπτει ότι σε κάποιες μεθόδους (π.χ. Levenberg– Marquardt) παρουσιάστηκε παλινδρόμηση (αστάθεια) οφειλόμενη στο μεγάλο αριθμό νευρώνων, γεγονός που καθιστά μη αποδεκτά τα αποτελέσματα, ακόμη κι αν το σφάλμα είναι μικρό. Η μέθοδος απότομης κλίσης ήταν γενικά ευσταθής, αλλά οι τιμές του σφάλματος ήταν αρκετά μεγάλες. Η μέθοδος εκπαίδευσης με κανόνα απότομης κλίσης και ταυτόχρονη προσαρμογή του ρυθμού μάθησης και προσθήκη όρου ορμής, παρέμεινε ευσταθής σε μία περιοχή νευρώνων (6-12 νευρώνες), ενώ ταυτόχρονα έδωσε μικρές τιμές σφάλματος, με αποτέλεσμα να επιλεγεί ως η βέλτιστη μέθοδος εκπαίδευσης.

Η μέθοδος απότομης κλίσης με προσαρμοζόμενο ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής, που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, βασίζει τη λειτουργία της στην ανανέωση των βαρών ανά εποχή. Με τη μέθοδο αυτή το δίκτυο εκπαιδεύεται προσαρμοστικά, δηλαδή με μεταβαλλόμενο ρυθμό μάθησης κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Στον κλασικό κανόνα κλίσης, αν ο ρυθμός ορισθεί πολύ μεγάλος, ο αλγόριθμος παρουσιάζει ταλαντώσεις και γίνεται ασταθής, ενώ αν ορισθεί πολύ μικρός ο αλγόριθμος αργεί να συγκλίνει. Ένας προσαρμοζόμενος ρυθμός μάθησης βοηθά, ώστε και το βήμα μάθησης να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερο (μεγαλύτερη ταχύτητα), αλλά και η μάθηση να διατηρείται ευσταθής. Η προσαρμογή του ρυθμού μάθησης, στη συγκεκριμένη περίπτωση, γίνεται ως εξής: Αρχικά, υπολογίζονται η έξοδος και το σφάλμα για το δίκτυο. Σε κάθε εποχή υπολογίζονται νέα βάρη, χρησιμοποιώντας τον τρέχοντα ρυθμό μάθησης. Στη συνέχεια, υπολογίζονται καινούριες έξοδοι και σφάλματα. Αν το καινούριο σφάλμα υπερβαίνει το παλιό κατά μία προκαθορισμένη τιμή, τα καινούρια βάρη απορρίπτονται και ο ρυθμός μάθησης μειώνεται [129]. Αλλιώς, τα καινούρια βάρη γίνονται αποδεκτά και ο ρυθμός μάθησης αυξάνεται.

Το μικρότερο σφάλμα της μεθόδου απότομης κλίσης με προσαρμοζόμενο ρυθμό μάθησης και προσθήκη όρου ορμής προέκυψε για 6-12 νευρώνες και 1500 εποχές. Για περισσότερους από 13 νευρώνες το δίκτυο παρουσίασε αστάθεια δίνοντας πολύ μεγάλα σφάλματα. Στη συνέχεια, διατηρώντας τον αριθμό των εποχών σταθερό, και για μεταβαλλόμενο αριθμό νευρώνων από 6 έως 12, μεταβλήθηκε ο ρυθμός μάθησης από 0,1 έως 0,9 με βήμα 0,05. Το ελάχιστο σφάλμα για το σύνολο ελέγχου ήταν 0,3099 και παρατηρήθηκε για 12 νευρώνες και για αρχική τιμή του ρυθμού μάθησης 0,3. Ο σταθερός όρος της ορμής, καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, είχε τιμή 0,9, όπως καθορίζεται από τη MATLAB. Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζονται σε κοινό γράφημα οι 24 τιμές της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου και οι αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές, που προέκυψαν από το νευρωνικό δίκτυο.



Σχήμα 5.7: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου.

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, η τιμή της οποίας είναι 0,9531.



Σχήμα 5.8: Συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης.

Τα αποτελέσματα προσεγγίζουν με αρκετά μικρό σφάλμα τις πειραματικές τιμές, αν και υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των αποτελεσμάτων. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου είναι το γεγονός ότι η συνάρτηση 'traingdx' επιτρέπει μεν προσαρμογή στο ρυθμό μάθησης, αλλά χωρίς να είναι δυνατή η επέμβαση στις παραμέτρους αυτού, κυρίως στη χρονική μεταβολή αυτού, και, επιπλέον, η ορμή διατηρείται σταθερή. Παρ' όλα αυτά στα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου πρέπει να συμπεριληφθεί το γεγονός ότι είναι αρκετά προσιτό σε χρήστες μη εξοικειωμένους με τον προγραμματισμό, καθώς είναι φιλικό προς το χρήστη και τα λάθη στο χειρισμό γίνονται εύκολα αντιληπτά. Προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα βελτίωσης των αποτελεσμάτων (μικρότερο σφάλμα και μεγαλύτερη τιμή συσχέτισης), πραγματοποιήθηκε σύγκριση δώδεκα διαφορετικών μεθόδων εκπαίδευσης (Παράγραφο 5.3.3), στις οποίες είναι δυνατός ο πλήρης έλεγχος όλων των παραμέτρων τους.

5.3.3 Ανάπτυξη αλγορίθμου

Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη μεθοδολογία εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης δοκιμάστηκαν, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (πλήθος νευρώνων, παράμετροι όρου ορμής και ρυθμού μάθησης, μέγιστος αριθμός εποχών, παράμετροι των συναρτήσεων ενεργοποίησης, κ.λπ.), οι εξής μέθοδοι:

1. Εκπαίδευση ανά πρότυπο, χρήση ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής.

Η εκπαίδευσή του στηρίζεται στη σχέση (5.15) με τυχαία παρουσίαση διανυσμάτων, όπου ο ρυθμός μάθησης και ο όρος ορμής μεταβάλλονται σύμφωνα σε τις σχέσεις:

$$\eta(ep) = \eta_0 \cdot \exp(-ep / T_\eta)$$
(5.49)

$$a(ep) = a_0 \cdot \exp(-ep / T_a)$$
(5.50)

όπου η_0 και T_η είναι η αρχική τιμή και η χρονική παράμετρος του ρυθμού μάθησης και α_0 και T_α τα αντίστοιχα μεγέθη για τον όρο ορμής.

 Εκπαίδευση ανά πρότυπο, χρήση προσαρμοστικών κανόνων ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής.

Η εκπαίδευσή του στηρίζεται στη σχέση (5.15) με τυχαία παρουσίαση διανυσμάτων, όπου ο ρυθμός μάθησης και ο όρος ορμής μεταβάλλονται σύμφωνα σε τις σχέσεις (5.19) και (5.20) αντίστοιχα.

3. Εκπαίδευση ανά πρότυπο, χρήση σταθερού ρυθμού εκπαίδευσης.

Η εκπαίδευσή του στηρίζεται στη σχέση (5.17) με τυχαία παρουσίαση των διανυσμάτων ανά πρότυπο, όπου ο ρυθμός μάθησης λαμβάνει σταθερή τιμή.

Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση σταθερού ρυθμού εκπαίδευσης.
Η εκπαίδευση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου στηρίζεται στη σχέση (5.17)
με σειριακή παρουσίαση των διανυσμάτων ανά εποχή, όπου ο ρυθμός μάθησης
λαμβάνει κατά τη διάρκεια όλων των εποχών σταθερή τιμή.

5. Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής.

Η εκπαίδευση γίνεται όπως και στην πρώτη μέθοδο, μόνο που εδώ η ανανέωση των βαρών του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου γίνεται ανά εποχή (όχι ανά πρότυπο).

 Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση προσαρμοστικών κανόνων ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής.

Η εκπαίδευση γίνεται όπως και στη δεύτερη μέθοδο, μόνο που εδώ η ανανέωση των βαρών του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου γίνεται ανά εποχή (όχι ανά πρότυπο).

 Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση αλγορίθμου συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Fletcher-Reeves.

Η εκπαίδευση στηρίζεται στις σχέσεις (5.22) ως (5.25) με σειριακή παρουσίαση διανυσμάτων ανά εποχή.

- 8. Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Fletcher-Reeves, επανεκκίνηση Powell-Beale.
 Η εκπαίδευση γίνεται όπως και στην έβδομη μέθοδο, με τη διαφορά ότι εδώ έχει ενεργοποιηθεί η συμπληρωματική μέθοδος επανεκκίνησης κατά Powell-Beale σύμφωνα με τη σχέση (5.27).
- Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση αλγορίθμου συζευγμένης μεταβολής κλίσης κατά Polak-Ribiere.

Στην παρούσα μέθοδο εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, ο συντελεστής β_{k+1} προσδιορίζεται βάσει της σχέσης (5.26), ενώ δεν έχει ενεργοποιηθεί η συμπληρωματική μέθοδος επανεκκίνησης κατά Powell-Beale.

 Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση αλγορίθμου συζευγμένης μεταβολής κλίσης Polak-Ribiere, επανεκκίνηση Powell-Beale.

Η εκπαίδευση γίνεται όπως και στην ένατη μέθοδο, μόνο που εδώ έχει ενεργοποιηθεί η επανεκκίνηση κατά Powell-Beale.

 Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση αλγορίθμου βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης.

Η εκπαίδευσή του στηρίζεται στις σχέσεις (5.28) ως (5.38) με σειριακή παρουσίαση διανυσμάτων ανά εποχή.

12. Εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση ευπροσάρμοστου αλγορίθμου.

Κατά την εκτέλεση του συγκεκριμένου αλγορίθμου εκπαίδευσης παρατηρήθηκε έντονη ευαισθησία στις τιμές των παραμέτρων δ_1 και δ_2 της σχέσης (5.21). Για να επιτευχθεί η αριθμητική σύγκλιση, πρέπει η παράμετρος δ_2 να είναι διπλάσια με δεκαπλάσια από την δ_1 . Σε κάθε περίπτωση, όμως, η απόδοση του δικτύου δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση, οπότε πρακτικά η μέθοδος αυτή έχει αποτύχει στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Ως κριτήρια σύγκλισης χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

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

Σε κάθε Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο ακολουθήθηκαν δύο προσεγγίσεις. Στην πρώτη (που απ' εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως περίπτωση α) χρησιμοποιήθηκαν και τα τρία προαναφερθέντα κριτήρια, ενώ στη δεύτερη (που απ' εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως περίπτωση β) χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δύο πρώτα.

Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, ο οποίος υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran [116, 130]. Το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο αποτελείται από ένα κρυμμένο επίπεδο (θεώρημα Kolmogorov [114]), του οποίου το πλήθος των νευρώνων βελτιστοποιείται σε κάθε περίπτωση με κριτήρια την ελαχιστοποίηση του μέσου σφάλματος και τη μεγιστοποίηση της συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται συνοπτικά, για όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους εκπαίδευσης, οι μέσες τιμές των σφαλμάτων των συνόλων εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου, όπως προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές, η συσχέτιση για το σύνολο ελέγχου, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, οι οποίες ρυθμίστηκαν σε κάθε μέθοδο εκπαίδευσης προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο, σε κάθε περίπτωση, αποτέλεσμα.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ροής του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

Πίνακας 5.2: Συνοπτική παρουσίαση του μέσου σφάλματος G_{av} των συνόλων εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου, της συσχέτισης και των παραμέτρων των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων για τις διάφορες μεθόδους εκπαίδευσής τους.

ის უ <u></u>	G_{av} (×10 ⁻⁴) συν	ų	Συσχέτιση (R) τιμών συνόλου					
α/α μεθόδ εκπαίδευσ	εκπαίδευσης	άξιολόγησης	aoXLiyon	Νευρώνε	εκπαίδευσης	αξιολόγησης	uoXY3X3	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	Λοιπές παράμετροι
1α	3,0804	1,3118	0,5985	3	0,9931	0,9957	0,9977	$f_1 = tanh(0,9x)$ $f_2 = tanh(0,4x)$	$\alpha_0=0.9, T_a=1400, \eta_0=0.9, T_\eta=1400, max_epochs=7000$
1β	4,4282	3,0511	2,0614	3	0,9884	0,9915	0,9909	$f_1=tanh(x)$ $f_2=tanh(x)$	$\alpha_0=0.8, T_{\alpha}=1600, \eta_0=0.2, T_{\eta}=400, max_epochs=7000$
2α	3,1550	1,9373	1,2398	2	0,9929	0,9937	0,9960	$\begin{array}{l} f_1 = \tanh(0,9x) \\ f_2 = \tanh(0,5x) \end{array}$	$\alpha_0 = \eta_0 = 0.9,$ $T_{\alpha} = 1200, T_{\eta} = 800,$ max_epochs=7000
2β	2,6312	2,7941	0,7893	2	0,9931	0,9923	0,9965	$f_1=tanh(x)$ $f_2=tanh(x)$	$\alpha_0=0,4, T_{\alpha}=2800, \eta_0=0,1, T_{\eta}=2600, max_epochs=7000$

3α	12,3560	1,9286	4,3687	3	0,9677	0,9939	0,9845	$\begin{array}{c} f_1 = tanh(0,9x) \\ f_2 = tanh(x) \end{array}$	$\alpha_0 = 0.4, T_{\alpha} = 1000, \eta_0 = 0.32, T_{\eta} = 1000, max_epochs = 7000$
3β	2,6369	2,5386	0,8043	3	0,9931	0,9929	0,9962	$f_1=tanh(x)$ $f_2=1/(1+exp(-0.6x))$	$\alpha_0 = 0.4, T_a = 1000, \eta_0 = 0.13, T_\eta = 1000, max epochs = 7000$
4α	17,3264	4,3633	3,7135	18	0,9537	0,9861	0,9895	$f_1 = tanh(0,8x)$ $f_2 = 0,1x$	$\alpha_0 = 0.3, T_a = 2000, \eta_0 = 3, T_\eta = 2000, max epochs = 5000$
4β	5,4084	3,5243	3,2704	21	0,9871	0,9903	0,9876	$f_1=tanh(x)$ $f_2=0,5x$	$\alpha_0 = 0.3, T_a = 2000, \eta_0 = 3, T_\eta = 2000, max_epochs = 5000$
5α	189,2463	151,2861	114,6663	21	0,8043	0,8708	0,9562	$f_1=1/(1+exp(-x))$ $f_2=0,25x$	$\alpha_0 = 0,4, T_a = 400, \eta_0 = 0,4, T_\eta = 200, max_epochs = 7000$
5β	13,8758	3,2073	4,2328	21	0,9631	0,9901	0,9911	$f_1 = tanh(x)$ $f_2 = 1/(1 + exp(-x))$	$\alpha_0=0.9, T_a=4800, \eta_0=0.9, T_{\eta}=5600, max_epochs=7000$
6α	15,2051	3,7728	3,8267	21	0,9594	0,9883	0,9881	$f_1 = tanh(0,9x)$ $f_2 = 0,2x$	$\alpha_0=0.9, T_a=3000, \eta_0=0.8, T_{\eta}=2600, max_epochs=7000$
6β	8,0111	2,9104	4,0557	21	0,9789	0,9911	0,9826	$f_1=tanh(x)$ $f_2=tanh(0,9x)$	$\alpha_0=0.9, T_{\alpha}=5200, \eta_0=0.8, T_{\eta}=5600, max_epochs=7000$
7α	1,1338	1,1916	0,3671	10	0,9970	0,9970	0,9985	$f_1=tanh(x)$ $f_2=tanh(0,4x)$	$s=0,2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
7β	0,5700	0,5434	0,4441	15	0,9985	0,9984	0,9979	$f_1=tanh(x)$ $f_2=tanh(0,8x)$	$s=0.2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
8α	12,4093	1,6546	3,5029	9	0,9679	0,9945	0,9850	$\begin{array}{l} f_1 = \tanh(1, 2x) \\ f_2 = \tanh(0, 04x) \end{array}$	$s=0,2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
8β	10,3235	1,8298	3,9689	7	0,9731	0,9941	0,9827	$f_1=tanh(x)$ $f_2=tanh(0,07x)$	$s=0,2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
9α	12,2312	1,9136	4,0413	7	0,9680	0,9938	0,9823	$\begin{array}{l} f_1 = tanh(0,9x) \\ f_2 = tanh(0,1x) \end{array}$	$s=0,2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
9β	17,5751	3,5162	2,9477	7	0,9537	0,9884	0,9898	$\begin{array}{l} f_1 = tanh(0,6x) \\ f_2 = tanh(0,1x) \end{array}$	$s=0.2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
10α	11,9359	1,8242	3,9699	7	0,9688	0,9940	0,9827	$\begin{array}{l} f_1 = \tanh(1, 2x) \\ f_2 = \tanh(0, 1x) \end{array}$	$s=0,2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
10β	12,4091	1,6546	3,5029	9	0,9679	0,9945	0,9850	$\begin{array}{l} f_1 = \tanh(1, 2x) \\ f_2 = \tanh(0, 04x) \end{array}$	$s=0,2, T_{bv}=20, T_{trix}=50, e_{trix}=10^{-6}, max_epochs=7000$
11α	0,6138	0,7480	0,3289	3	0,9983	0,9977	0,9985	$f_1 = tanh(0,325x)$ $f_2 = tanh(0,1x)$	$\sigma = 10^{-5}, \lambda_0 = 5 \cdot 10^{-8},$ max epochs = 7000
11β	0,7959	0,9673	0,3669	3	0,9979	0,9972	0,9984	f_1 =tanh(0,35x) f_2 =tanh(0.2x)	$\sigma = 10^{-5}, \lambda_0 = 5 \cdot 10^{-8},$ max epochs=7000
12α-β	#	#	#	#	#	#	#	#	Αδυναμία σύγκλισης

5.3.3.1 Σύγκριση μεθόδων εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Από τις μεθόδους εκπαίδευσης, στις οποίες γίνεται τυχαία παρουσίαση των προτύπων εκπαίδευσης (μέθοδοι 1 έως 3), τα καλύτερα αποτελέσματα για το πρόβλημα της εκτίμησης της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης σε μονωτήρες προέκυψαν με την εφαρμογή της εκπαίδευσης ανά πρότυπο με χρήση ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής (μέθοδος 1α). Από τις μεθόδους εκπαίδευσης, στις οποίες γίνεται σειριακή παρουσίαση των προτύπων εκπαίδευσης (μέθοδοι 4 έως 12), ο αλγόριθμος βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα (μέθοδος 11α). Και στις δύο μεθόδους, που έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκαν και τα τρία κριτήρια τερματισμού. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου για τις δύο μεθόδους, για τις οποίες προέκυψαν τα βέλτιστα αποτελέσματα.

<u>Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο με εκπαίδευση ανά πρότυπο και χρήση ρυθμού</u> εκπαίδευσης, όρου ορμής και των τριών κριτηρίων σύγκλισης (Μέθοδος 1α)

Προκειμένου να προσδιοριστεί το πλήθος των νευρώνων του κρυμμένου στρώματος διατηρήθηκαν σταθερές οι τιμές των παραμέτρων του ρυθμού μάθησης και του όρου ορμής, καθώς και το μέγιστο πλήθος των εποχών (7000). Ως συνάρτηση ενεργοποίησης επιλέχθηκε, και για τα δύο επίπεδα (του κρυμμένου και του επιπέδου εξόδου), η υπερβολική εφαπτομένη με a=0,2 και b=0. Το πλήθος των νευρώνων μεταβλήθηκε από 2 έως 25 με βήμα 1 και υπολογίστηκε η τιμή του σφάλματος G_{av} (μέση τιμή των σφαλμάτων για όλα τα N πρότυπα) για τα σύνολα εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.10, το ελάχιστο G_{av} και για τα τρία σύνολα επιτυγχάνεται για 3 νευρώνες (16,8558·10⁻⁴ για το σύνολο εκπαίδευσης, 3,2690·10⁻⁴ για το σύνολο αξιολόγησης, 3,0788·10⁻⁴ για το σύνολο ελέγχου).

Αποσκοπώντας στη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, μεταβλήθηκαν οι παράμετροι του όρου ορμής ως εξής: η αρχική τιμή a_0 εντός του διαστήματος [0,1, 0,9] με βήμα 0,1 και η χρονική παράμετρος T_a εντός του διαστήματος [200, 3000] με βήμα 200. Διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους (πλήθος νευρώνων: N=3, αρχική τιμή ρυθμού μάθησης: $\eta_0=0.4$, χρονική παράμετρος ρυθμού μάθησης: $T_\eta=1000$, συνάρτηση ενεργοποίησης: υπερβολική εφαπτομένη με a=0.2 και b=0,

μέγιστο πλήθος εποχών: 7000) παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα (μικρότερη τιμή σφάλματος G_{av}) και για τα τρία σύνολα επιτεύχθηκε για $\alpha_0 \in [0,7, 0,9]$ και για $T_{\alpha} \in [600, 3000]$, και, μάλιστα, όσο υψηλότερες είναι οι τιμές αυτών των δύο παραμέτρων, τόσο μικρότερη είναι η τιμή του G_{av} .

Εν συνεχεία, διατηρήθηκαν σταθερά τα εξής μεγέθη: N=3, $a_0=0.9$ και $T_a=1400$, ενώ μεταβλήθηκαν οι παράμετροι του ρυθμού εκπαίδευσης ως εξής: η αρχική τιμή η_0 εντός του διαστήματος [0,1, 0,9] με βήμα 0,1 και η χρονική παράμετρος T_η εντός του διαστήματος [200, 3000] με βήμα 200. Τα μικρότερα σφάλματα G_{av} των συνόλων εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου παρατηρήθηκαν για $\eta_0 \in [0,4, 0,9]$ και $T_\eta \in [400, 3000]$.

Τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση αλλαγής των συναρτήσεων ενεργοποίησης των δύο επιπέδων (του κρυμμένου και του επιπέδου εξόδου). Δοκιμάζοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των συναρτήσεων ενεργοποίησης (λογιστική, υπερβολική εφαπτομένη ή γραμμική) των δύο επιπέδων και με τις παραμέτρους των συναρτήσεων να παίρνουν τιμές, η μεν α από 0,1 έως 0,5 με βήμα 0,1, η δε b 0, διαπιστώθηκε ότι ο καταλληλότερος συνδυασμός είναι η χρήση της υπερβολικής εφαπτομένης με $a_1=0,9$ και $b_1=0$ στο κρυμμένο επίπεδο και με $a_2=0,4$ και $b_2=0$ στο επίπεδο εξόδου.



Σχήμα 5.10: Συγκριτικό διάγραμμα του G_{av} για τα σύνολα εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου συναρτήσει του πλήθους των νευρώνων.

Συνοψίζοντας, με την επιλογή: N=3, a_0 =0,9, T_a =1400, η_0 =0,9, T_{η} =1400, συναρτήσεις ενεργοποίησης τύπου υπερβολικής εφαπτομένης και στα δύο επίπεδα με a_1 =0,9, a_2 =0,4, b_1 = b_2 =0 και μέγιστο πλήθος εποχών τις 7000, επιτεύχθηκε το βέλτιστο αποτέλεσμα (με μέσο σφάλμα G_{av} 3,0804·10⁻⁴ για το σύνολο εκπαίδευσης, 1,3118·10⁻⁴ για το σύνολο αξιολόγησης και 0,5985·10⁻⁴ για το σύνολο ελέγχου). Στο
Σχήμα 5.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου για τα 24 στοιχεία του συνόλου ελέγχου σε κοινό γράφημα με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Στο Σχήμα 5.12 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών.

Στο Σχήμα 5.13 φαίνονται σε κοινή γραφική παράσταση η πειραματική τιμή και η εκτιμώμενη τιμή για τα δεδομένα του συνόλου αξιολόγησης, καθώς και το διάστημα εμπιστοσύνης με πιθανότητα ουράς ίση με 5% (το διάστημα εμπιστοσύνης να καλύπτει το 90% του πληθυσμού). Από το παρακάτω γράφημα προκύπτει ότι αφ' ενός μεν οι εκτιμώμενες τιμές είναι αρκετά κοντά στις πειραματικές, αφ' ετέρου δε τόσο οι πειραματικές, όσο και οι εκτιμώμενες τιμές βρίσκονται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης.



Σχήμα 5.11: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά πρότυπο και χρήση ρυθμού εκπαίδευσης, όρου ορμής και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



Σχήμα 5.12: Συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά πρότυπο και χρήση ρυθμού εκπαίδευσης, όρου ορμής και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



Σχήμα 5.13: Διάστημα εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης με 5% πιθανότητα ουράς για το TNΔ με εκπαίδευση ανά πρότυπο και χρήση ρυθμού εκπαίδευσης, όρου ορμής και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.

<u>Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο με εκπαίδευση ανά εποχή και χρήση του αλγορίθμου</u> βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης και των τριών κριτηρίων σύγκλισης (Μέθοδος 11α)

Οι παράμετροι της συγκεκριμένης μεθόδου προσδιορίστηκαν ως $\sigma=10^{-5}$, $\lambda_0=5\cdot10^{-8}$. Οι βέλτιστες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων είναι: N=3, συναρτήσεις ενεργοποίησης τύπου υπερβολικής εφαπτομένης και για τα δύο επίπεδα με παραμέτρους $\alpha_1=0,325$, $b_1=0$, $\alpha_2=0,1$, $b_2=0$ και μέγιστο πλήθος εποχών: 7000. Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα του συνόλου εκπαίδευσης είναι 0,6138·10⁻⁴, του συνόλου αξιολόγησης 0,7480·10⁻⁴ και του συνόλου ελέγχου 0,3289·10⁻⁴.

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου για τα 24 στοιχεία του συνόλου ελέγχου σε κοινό γράφημα με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών.

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται το διάστημα εμπιστοσύνης για το σύνολο αξιολόγησης με πιθανότητα ουράς ίση με 5%, απ' το οποίο προκύπτει ότι και σε αυτή την περίπτωση οι πειραματικές και οι εκτιμώμενες τιμές βρίσκονται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης.



Σχήμα 5.14: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση του αλγορίθμου βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



Σχήμα 5.15: Συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση του αλγορίθμου βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.



Σχήμα 5.16: Διάστημα εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης με 5% πιθανότητα ουράς για το ΤΝΔ με εκπαίδευση ανά εποχή, χρήση του αλγορίθμου βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης και των τριών κριτηρίων σύγκλισης.

5.4 Ασαφής Λογική

Η ασάφεια είναι ένα χαρακτηριστικό της γλώσσας και πηγάζει από την ανακρίβεια που ενυπάρχει στο (γλωσσικό) ορισμό και τη χρήση των εννοιών και των συμβόλων. Το μαθηματικό υπόβαθρο της ασαφούς συλλογιστικής και των ασαφών συστημάτων είναι τα ασαφή σύνολα [114]. Η θεωρία της ασαφούς λογικής βρήκε αρχικά μεγάλη αντίδραση από τους οπαδούς της κλασικής (Αριστοτελικής) λογικής και τους πιθανοθεωρητικούς επιστήμονες, σήμερα, όμως, αποτελεί ένα από τα ισχυρότερα καθολικά εργαλεία λήψης αποφάσεων και ανάπτυξης αλγορίθμων ελέγχου και έμπειρων συστημάτων με αβεβαιότητα.

Τα ασαφή σύνολα και η ασαφής συλλογιστική χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση πολλών πρακτικών προβλημάτων. Με τη θεωρία των ασαφών συνόλων και της ασαφούς συλλογιστικής βρίσκονται χρήσιμες και αποδοτικές λύσεις σε δύσκολα πρακτικά προβλήματα, για τα οποία δεν υπάρχουν ακριβείς περιγραφές και μοντέλα, όπως αυτό της εκτίμησης κρίσιμων μεγεθών σε μονωτήρες.

Τα μαθηματικά στηρίζονται κατά βάση στη συνολοθεωρία και αυτή στηρίζεται εξ ολοκλήρου σε ένα αξίωμα βασισμένο στη διχοτομία (ανήκει ή δεν ανήκει, είναι εντός ή εκτός του συνόλου) [114]. Αμφισβητώντας τη διχοτομία, η κλασική συνολοθεωρία καταστρέφεται εκ θεμελίων και στη θέση της αναδύεται μία άλλη προσέγγιση, η 'θεωρία των ασαφών συνόλων' (theory of fuzzy sets).

Στα ασαφή σύνολα, όπως παρουσιάστηκαν από τον L. A. Zadeh [131], περισσότεροι από δυο βαθμοί συμμέτοχης είναι επιτρεπτοί. Ο βαθμός συμμετοχής (membership function) ενός στοιχείου σε ένα σύνολο περιγράφεται με έναν αριθμό στο διάστημα [0,1]. Συνεπώς, γενικεύεται το συνόλο τιμών από το ζεύγος αριθμών {0,1} σε όλους τους αριθμούς που υπάρχουν στο διάστημα [0,1]. Επεκτείνοντας το σύνολο τιμών αλλάξει η φύση της χαρακτηριστικής συνάρτησης, η οποία ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής (membership function) και συμβολίζεται με $\mu_A(x)$. Από τη στιγμή που το διάστημα [0,1] περιέχει μια απειρία αριθμών, μια απειρία βαθμών συμμετοχής είναι δυνατή. Έτσι, λοιπόν, η συνάρτηση συμμετοχής απεικονίζει κάθε στοιχείο του χώρου αναφοράς X (universe of discourse) στο διάστημα [0,1] και αυτή η απεικόνιση περιγράφεται από τη σχέση:

 $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$

(5.51)

Υπάρχουν δυο πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τρόποι ορισμού των ασαφών συνόλων:

 Εάν το X είναι ένας χώρος αναφοράς και το x είναι ένα στοιχείο του X, τότε το ασαφές σύνολο A, που ορίζεται στον X, μπορεί να παρασταθεί με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \}, x \in X$$
(5.55)

όπου το $\mu_A(x)$ είναι ο βαθμός συμμετοχής του στοιχείου x στο ασαφές σύνολο A. Κάθε ζευγάρι $(x, \mu_A(x))$ ονομάζεται 'singleton'. Στα σύνολα της κλασσικής συνολοθεωρίας, ένα 'singleton' είναι το στοιχείο x από μόνο του. Στα ασαφή σύνολα ένα 'singleton' αποτελείται από το στοιχείο x και το βαθμό συμμετοχής του $\mu_A(x)$.

2. Ένα 'singleton' μπορεί επίσης να παρασταθεί ως μ_A(x)/x, δηλαδή βάζοντας πρώτα το βαθμό συμμετοχής στη συνέχεια το σύμβολο '/' και τέλος το στοιχείο x. Τα στοιχεία που έχουν βαθμό συμμετοχής μηδέν σε ένα ασαφές σύνολο μπορούν να παραλειφθούν. Ο χώρος αναφοράς του ασαφούς συνόλου A είναι το σύνολο των στοιχείων του τα οποία έχουν βαθμό συμμετοχής διαφορετικό από το μηδέν. Με βάση τα παραπάνω, ένα ασαφές σύνολο μπορεί να θεωρηθεί ως η ένωση όλων των 'singleton' μ_A(x)/x. Στην περίπτωση που υπάρχει ένα πεπερασμένο σύνολο αναφοράς για το A, ισχύει

$$A = \sum_{i=1}^{n} \mu_A(x_i) / x_i$$
 (5.53)

Το σύμβολο του αθροίσματος στη σχέση (5.53) παριστάνει την ένωση όλων των 'singleton'.

Για ένα συνεχή χώρο αναφοράς η σχέση (5.53) τροποποιείται ως εξής:

$$A = \int_{X} \mu_A(x) / x \tag{5.54}$$

Το σύμβολο του ολοκληρώματος στη σχέση (5.54) παριστάνει την ένωση όλων των 'singleton'.

Τέλος, αναφέρεται ότι ο βαθμός συμμετοχής σε ένα ασαφές σύνολο μπορεί να είναι και ο ίδιος ένα ασαφές σύνολο.

5.4.1 Ασαφή συστήματα

Τα ασαφή συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των ευφυών συστημάτων και είναι στην ουσία συστήματα λήψης απόφασης ή ελέγχου που λειτουργούν σε αβέβαιο περιβάλλον και μοντελοποιούνται με ασαφείς μεταβλητές [114]. Ένας εμπειρογνώμονας μπορεί να χτίσει ένα ασαφές σύστημα γράφοντας ένα σύνολο μη επακριβών κανόνων για το πρόβλημά του υπό τη μορφή ενός ασαφούς αλγορίθμου (συνόλου ασαφών κανόνων). Τότε, μέσω της ασαφούς συλλογιστικής και των μονάδων ασαφοποίησης και από-ασαφοποίησης, προσδιορίζονται ορθολογιστικές λύσεις εφάμιλλες (ή καλύτερες) των παραδοσιακών πιθανοθεωρητικών μεθόδων χειρισμού της αβεβαιότητας, χωρίς τις υποθέσεις και το μεγάλο αριθμό δεδομένων που χρειάζονται οι μέθοδοι αυτές.

5.4.1.1 Γενική αρχιτεκτονική ασαφών συστημάτων

Η γενική αρχιτεκτονική (δομή) των ασαφών συστημάτων περιλαμβάνει τέσσερις μονάδες [114]:

1. Μία βάση ασαφών κανόνων (Ασαφής Βάση Γνώσης).

Η ασαφής βάση γνώσης αποτελείται από μια συλλογή κανόνων ΕΑΝ – ΤΟΤΕ (IF - THEN) της παρακάτω μορφής [114]:

 R^{l} : EAN x_{1} είναι A_{1}^{l} KAI ... KAI x_{n} είναι A_{n}^{l} TOTE y είναι B^{l}

όπου τα A_i^l και B^l είναι ασαφή σύνολα επί των $X_i \subset \Re$ και $Y \subset \Re$, αντίστοιχα, και $\mathbf{x} = [x_1, ..., x_n]^T$ και y είναι γλωσσικές μεταβλητές.

Για τον προσδιορισμό της μορφής των A_i^l και B^l υπάρχουν οι ακόλουθες μέθοδοι:

- Αν οι κανόνες καθορίζονται από κάποιο εμπειρογνώμονα, τότε αυτός πρέπει να καθορίσει και τη μορφή τους.
- Αν οι κανόνες καθορίζονται με βάση δεδομένα μετρήσεων, τότε χρησιμοποιείται κάποια αυθαίρετη μορφή με πιο συνηθισμένες τις τριγωνικές, Gauss και τραπεζοειδείς (Πίνακας 5.3).

Τριγωνική	$\mu = \max\left[\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right]$					
Τραπεζοειδής	$\mu = \max\left[\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right]$					
Καμπανοειδής	$\mu = \frac{1}{1 + \left \frac{x - c}{a}\right ^{2b}}, b > 0$					
Γκαουσιανή	$\mu = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$					

Πίνακας 5.3: Συναρτήσεις συμμετοχής

- 2. Μία ασαφή συλλογιστική μηχανή (μηχανισμό εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων), η οποία αποτελεί τον πυρήνα του ασαφούς συστήματος και περιέχει τη λογική λήψης αποφάσεων. Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπεράσματος περιλαμβάνει τρία διαδοχικά βήματα [132]:
 - i) Για κάθε κανόνα μίας εισόδου-μίας εξόδου εφαρμόζεται ο κανόνας σύνθεσης
 γινομένου (Larsen-Max Product Implication), που ουσιαστικά είναι η
 συνάρτηση συμμετοχής
 - ii) Υπολογίζεται η τιμή του βαθμού πλήρωσης (DOF degree of fulfillment), δηλαδή ο προηγούμενος κανόνας σύνθεσης για περισσότερες της μίας εισόδους.

Ο g-κανόνας για το k-διάνυσμα προσδιορίζεται ως:

$$dof_{g} = m_{A_{l}, l_{1,g}} \left(x_{1k} \right) \cdots m_{A_{N}, l_{N,g}} \left(x_{Nk} \right)$$
(5.55)

iii)Η τελική συνάρτηση της μεταβλητής εξόδου παράγεται βάσει των κανόνων και της μεθόδου της περιβάλλουσας, για την περίπτωση δύο γειτονικών ενεργοποιημένων τριγώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



[132].

 Μία μονάδα ασαφοποίησης (ασαφοποιητική μονάδα διεπαφής ή ασαφοποιητής), η οποία μετατρέπει τα δεδομένα εισόδου σε ασαφή σύνολα.

Η μονάδα ασαφοποίησης εκτελεί τις παρακάτω εργασίες:

Μετράει (παραλαμβάνει) τις (μη ασαφείς) τιμές των εισόδων του συστήματος.

- Απεικονίζει τις περιοχές μεταβολής των τιμών εισόδου σε κατάλληλα υπερσύνολα αναφοράς.
- Ασαφοποιεί τις εισερχόμενες τιμές των εισόδων, δηλαδή τις μετατρέπει σε ασαφή γλωσσική μορφή.
- Μία μονάδα από-ασαφοποίησης (από-ασαφοποιητική μονάδα διεπαφής ή απόασαφοποιητής), η οποία μετατρέπει τα ασαφή συμπεράσματα/αποφάσεις σε σαφώς καθορισμένη μορφή.

Η μονάδα από-ασαφοποίησης εκτελεί τις εξής εργασίες:

- Απεικονίζει τις περιοχές μεταβολής των μεταβλητών εξόδου σε αντίστοιχα υπερσύνολα αναφοράς.
- Από-ασαφοποιεί τα αποτελέσματα που δίνει η ασαφής συλλογιστική μηχανή, δηλαδή τα μετατρέπει σε "ντετερμινιστική" (μη ασαφή) μορφή για παραπέρα χρήση από επόμενα συστήματα ή διεργασίες απόφασης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι από-ασαφοποίησης [114]: <u>Το κριτήριο του μεγίστου (The max criterion method)</u>

Το κριτήριο αυτό παράγει το σημείο, στο οποίο η πιθανή κατανομή ενεργειών ελέγχου φτάνει τη μέγιστη τιμή της.

Μέθοδος μέσης τιμής των μεγίστων (Mean of Maxima - MOM)

Η στρατηγική MOM παράγει μια ενέργεια ελέγχου, η οποία αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή όλων των τοπικών ενεργειών ελέγχου, των οποίων οι συναρτήσεις συμμετοχής φτάνουν στο μέγιστο. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση διακριτού χώρου αναφοράς, η ενέργεια ελέγχου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$w_0 = \sum_{j=1}^m \frac{w_j}{m}$$
(5.56)

όπου το w_j είναι στοιχείο, για το οποίο η συνάρτηση συμμετοχής φτάνει τη μέγιστη τιμή $\mu_z(w_j)$, και *m* είναι ο αριθμός αυτών των στοιχείων.

Μέθοδος κέντρου βάρους (Center of Gravity, COG)

Η μέθοδος COG παράγει το κέντρο βάρους της πιθανής κατανομής μιας ενέργειας ελέγχου. Στην περίπτωση διακριτών χώρων αναφοράς η μέθοδος αυτή δίνει:

$$w_{0} = \frac{\sum_{i} w_{i} \mu_{B}(w_{i})}{\sum_{i} \mu_{B}(w_{i})}$$
(5.57)

Μέθοδος του ύψους

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει το w_0 ως μία μέση τιμή με βάρη h_i των αντιπροσωπευτικών σημείων w_i του B. Ισχύει:

$$w_0 = \frac{w_1 h_1 + \dots + w_n h_n}{h_1 + \dots + h_n}$$
(5.58)

Η επιλογή των αντιπροσωπευτικών σημείων *w_i* εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και τη μορφή της συνάρτησης συμμετοχής.

Η γενική δομή των ασαφών συστημάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18: Γενική αρχιτεκτονική ασαφούς συστήματος [114].

5.5 Εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης μέσω συστήματος ασαφούς λογικής

Ανάλογα προς τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, με τη θεωρία των ασαφών συνόλων και της ασαφούς συλλογιστικής βρίσκονται χρήσιμες και αποδοτικές λύσεις σε δύσκολα πρακτικά προβλήματα, για τα οποία δεν υπάρχουν ακριβείς περιγραφές και μοντέλα, όπως αυτό της εκτίμησης της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης σε μονωτήρες. Προκειμένου να εφαρμοστεί η ασαφής λογική, τα δεδομένα, αφού υποστούν τη διαδικασία της ασαφοποίησης, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της βάσης κανόνων. Κατόπιν, βάσει της εκάστοτε μεθόδου εξαγωγής συμπεράσματος, που χρησιμοποιείται, προκύπτει η προβλεπόμενη τιμή της εξόδου, η οποία αποασαφοποιείται, ώστε τα συμπεράσματα να είναι συγκρίσιμα με τα πειραματικά δεδομένα.

5.5.1 Μέθοδοι εκπαίδευσης ασαφούς συστήματος

Τα βασικά βήματα για τον υπολογισμό της εκτίμησης της τιμής της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης μονωτήρων με χρήση ασαφούς λογικής περιλαμβάνουν τα εξής [132]:

- Για κάθε μεταβλητή εισόδου καθορίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των συναρτήσεων συμμετοχής. Για την τριγωνική συνάρτηση, που χρησιμοποιήθηκε, είναι το εύρος της βάσης των τριγώνων και το πλήθος τους.
- Αφού καθοριστούν το πλήθος t των τριγώνων (3, 5, 7 ή 9) και το εύρος της βάσης κάθε τριγώνου, υπολογίζεται το κέντρο c_j του μεσαίου τριγώνου της μεταβλητής p_j βάσει της σχέσης:

$$c_{j} = \sum_{k=1}^{Y} p_{jk} / Y$$
 (5.59)

καθώς, επίσης, και η αρχική τιμή του εύρους της βάσης των τριγώνων b_j βάσει της σχέσης:

$$b_{jI} = 2\left(\max_{k=1,\dots,Y} p_{jk} - \min_{k=1,\dots,Y} p_{jk}\right) / (t_j - 1)$$
(5.60)

όπου Y είναι το πλήθος των διανυσμάτων, που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εκπαίδευσης.

Εναλλακτικά, το κέντρο c_j του μεσαίου τριγώνου μπορεί να προσδιοριστεί από οριζόμενες από το χρήστη τιμές ως:

$$c_{j} = \left(\max\{p_{jk}\} - \min\{p_{jk}\}\right) / 2$$
(5.61)

Ακολούθως, το εύρος της βάσης των τριγώνων μεταβάλλεται κατά ±α% με βήμα s%, ενώ το κέντρο του μεσαίου τριγώνου παραμένει σταθερό. Άρα, το πλήθος των τριγώνων για κάθε μεταβλητή είναι: $h = 2\lceil a/s \rceil + 1$. Συνεπώς, για n μεταβλητές εισόδου, το πλήθος των δυνατών συνδυασμών είναι h^n .

- Πραγματοποιείται η ασαφοποίηση των τιμών των μεταβλητών: οι μη ασαφείς τιμές των μεταβλητών του συνόλου εκπαίδευσης μετατρέπονται σε ασαφείς με τη χρήση της συνάρτησης συμμετοχής (τριγωνική).
- 4. Παράγονται από το σύνολο εκπαίδευσης οι κανόνες που θα αποτελέσουν τη βάση κανόνων. Η παραγωγή των κανόνων αυτών γίνεται μέσω της μεθόδου των βαρών ως εξής: για τους διάφορους συνδυασμούς υπολογίζεται η ασαφής τιμή της εξόδου του συνόλου εκπαίδευσης βάσει του μηχανισμού εξαγωγής συμπεράσματος. Σε κάθε ασαφή τιμή εξόδου αντιστοιχεί ένα βάρος, για παράδειγμα οι αριθμοί 1, 2, 3, 4, 5 αντιστοιχούν στις ασαφείς τιμές «Πολύ Αρνητικό», «Αρνητικό», «Μηδέν», «Θετικό», «Πολύ Θετικό». Αν για έναν κανόνα οι ασαφείς τιμές της εξόδου εμφανίζονται με την ακόλουθη συχνότητα: ΠΑ(1), Α(3), Μ(2), Θ(2), ΠΘ(2), τότε η τιμή της εξόδου θα ήταν «Αρνητικό», αν

ως κριτήριο χρησιμοποιηθεί η μέγιστη συχνότητα. Με τη διαδικασία χρήσης των βαρών η έξοδος είναι: $(1 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 4 + 2 \cdot 5)/(1 + 3 + 2 + 2 + 2) = 3.1$, δηλαδή «Μηδέν». Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ασαφής τιμή της εξόδου για κάθε κανόνα είναι εκείνη με τη μεγαλύτερη αξία σύμφωνα με τη διαδικασία εκπαίδευσης.

- 5. Εν συνεχεία, τα στοιχεία του συνόλου εκπαίδευσης χρησιμοποιούνται, ώστε να καθοριστεί το αριστερό μέλος (δηλαδή το μέλος της υπόθεσης) των κανόνων και να παραχθούν οι αντίστοιχες τιμές της εξόδου.
- 6. Με την εφαρμογή της μεθόδου του κέντρου βάρους, μέσω της σχέσης (5.57), παράγονται οι μη ασαφείς τιμές της εξόδου για το σύνολο εκπαίδευσης, οι οποίες, στη συνέχεια, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές, ώστε να εκτιμηθεί η ακρίβεια της προσέγγισης, που επιτεύχθηκε, και να συγκριθούν τα αποτελέσματα των διαφόρων συνδυασμών προς επιλογή του καταλληλότερου. Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος του βαθμού πλήρωσης, το κριτήριο του κέντρου βάρους είναι το καταλληλότερο. Η επιφάνεια, της οποίας υπολογίζεται το κέντρο βάρους, είναι αυτή που έχει προκύψει από το βήμα (iii) του μηχανισμού εξαγωγής συμπεράσματος (Παράγραφος 5.4.1.1). Η μέθοδος του κέντρου βάρους δίνει μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα εν συγκρίσει με τη μέθοδο του μεγίστου [133].

Επισημαίνεται ότι τα βήματα 1-6 εκτελούνται για το σύνολο εκπαίδευσης, ενώ τα βήματα 3, 5 και 6 εκτελούνται και για τα σύνολα αξιολόγησης και ελέγχου.

Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης με χρήση ασαφούς λογικής, ο οποίος υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran [132].

Μελετήθηκαν διάφορες παραλλαγές της βασικής μεθόδου εξαγωγής συμπερασμάτων της ασαφούς λογικής και συγκεκριμένα οι εξής τρεις μέθοδοι:

1. Επιλογή εξόδου με βάση τη μέγιστη συχνότητα.

Το συνολικό συμπέρασμα είναι εκείνο που εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα.

2. Επιλογή εξόδου με στρογγυλοποιημένο μέσο όρο.

Το συνολικό συμπέρασμα προκύπτει ως ένας σταθμισμένος μέσος όρος βάσει της

σχέσης: $y = \frac{\sum f_i y_i}{\sum f_i}$ (με στρογγυλοποίηση), όπου f_i είναι η συχνότητα εμφάνισης

της τιμής y_i της εξόδου.

3. Επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση.

Για τη διαμόρφωση του αποτελέσματος συμμετέχουν δύο τρίγωνα με βάση το σταθμισμένο μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση. Για παράδειγμα, αν η έξοδος βρεθεί ότι ανήκει στο τρίγωνο 2.75 με τη 2η μέθοδο θα γίνει η στρογγυλοποίηση στην τιμή 3 (30 τρίγωνο), ενώ με την 3η μέθοδο στην διαμόρφωση της τελικής τιμής της εξόδου θα συνεισφέρει το 30 τρίγωνο κατά 75% και το 20 τρίγωνο κατά 25%.

Για κάθε μια απ' αυτές τις μεθόδους εξετάζονται δύο υποπεριπτώσεις που αφορούν στον προσδιορισμό του κέντρου του μεσαίου τριγώνου, το οποίο:

- α. είτε υπολογίζεται ως η μέση τιμή των τιμών του συνόλου εκπαίδευσης,
- β. είτε ορίζεται εξωτερικά με βάση τα διαστήματα που εισάγει ο χρήστης του προγράμματος.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται συνοπτικά, για όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους εκπαίδευσης, οι μέσες τιμές των σφαλμάτων των συνόλων εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου, η συσχέτιση για κάθε σύνολο, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων των ασαφών συστημάτων, οι οποίες ρυθμίστηκαν σε κάθε μέθοδο εκπαίδευσης προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο, σε κάθε περίπτωση, αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι των ασαφών συστημάτων, που ρυθμίστηκαν για κάθε μεταβλητή, ήταν το πλήθος των τριγώνων (3, 5, 7 ή 9) και το εύρος της βάσης των τριγώνων κατά α=50% με βήμα s=5%.

Σε όλα τα αποτελέσματα (εκτός από την περίπτωση 3β) παρατηρήθηκε ένα συστηματικό σφάλμα (πόλωση), γεγονός που οδηγεί σε μη μηδενικό μέσο σφάλμα. Για να αποφευχθεί αυτό, προστέθηκε σε κάθε μία από τις εκτιμώμενες τιμές της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης η τιμή της πόλωσης, όπως προέκυψε για τα δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μηδενικό μέσο σφάλμα χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την τιμή της συσχέτισης.



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ροής του συστήματος ασαφούς λογικής.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ

- 10	Μέσο	Μέσο τετραγωνικό				τιμών D			
10 15	σφαλ	μα συνολ	10U	σι	νολου	K			
α/α μεθόδ εκπαίδευσ	ຣເκπαίδຍາອາເວ	໔້ຣູເບλόγησης	aoXLżyz3	รหสตเอียงตาร	aξιολόγησης	a0X <i>k</i> 3y3	Εύρος και πλήθος τριγώνων		
1α	0,50.10-15	0,6377	0,8016	0,90	0,89	0,84	$h_1=5, \alpha_1=-15\%, h_2=3, \alpha_2=0, h_3=3, \alpha_3=0, h_4=3, \alpha_4=-20\%, h_5=5, \alpha_5=25\%, h_6=9, \alpha_6=0$		
1β	1,05.10-15	0,3684	0,6101	0,88	0,86	0,83	$h_1=9, \alpha_1=35\%, h_2=3, \alpha_2=0, h_3=3, \alpha_3=0, h_4=5, \alpha_4=15\%, h_5=7, \alpha_5=15\%, h_6=5, \alpha_6=35\%$		
2α	0,68.10-15	0,2633	0,6143	0,92	0,90	0,93	$h_1=5, \alpha_1=5\%, h_2=3, \alpha_2=0, h_3=3, \alpha_3=0, h_4=9, \alpha_4=5\%, h_5=9, \alpha_5=0, h_6=5, \alpha_6=-5\%$		
2β	0,79·10 ⁻¹⁵	0,3736	0,5350	0,91	0,87	0,91	$\begin{array}{c} h_1 = 3, \ \alpha_1 = 25\%, \ h_2 = 3, \\ \alpha_2 = -30\%, \ h_3 = 3, \ \alpha_3 = 25\%, \\ h_4 = 5, \ \alpha_4 = 0, \ h_5 = 9, \ \alpha_5 = 45\%, \\ h_6 = 5, \ \alpha_6 = 5\% \end{array}$		
3α	0,1101	0,5383	0,6323	0,91	0,91	0,87	$h_1=3, a_1=0, h_2=7, a_2=5\%, h_3=5, a_3=0, h_4=3, a_4=0, h_5=5, a_5=0, h_6=5, a_6=-5\%$		
3β	0,30.10-15	0,3470	0,2193	0,94	0,92	0,97	$h_1=3, \alpha_1=0, h_2=3, \alpha_2=0, h_3=3, \alpha_3=0, h_4=9, \alpha_4=0, h_5=9, \alpha_5=-5\%, h_6=3, \alpha_6=-40\%$		

Πίνακας 5.4: Συνοπτική παρουσίαση του μέσου σφάλματος G_{av} των συνόλων εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ελέγχου, της συσχέτισης και των παραμέτρων του ασαφούς συστήματος για τις διάφορες μεθόδους.

5.5.1.1 Σύγκριση μεθόδων εκπαίδευσης του ασαφούς συστήματος

Κατά την εφαρμογή των δύο πρώτων μεθόδων προέκυψαν καλύτερα αποτελέσματα όταν η εύρεση της κορυφής του μεσαίου τριγώνου γίνεται βάσει της μέσης τιμής των τιμών του συνόλου εκπαίδευσης (περίπτωση α) και όχι όταν ορίζεται εξωτερικά με βάση τα διαστήματα που εισάγει ο χρήστης του προγράμματος (περίπτωση β). Στην τρίτη μέθοδο η περίπτωση β δίνει αισθητά καλύτερα αποτελέσματα εν συγκρίσει με την α. Η περίπτωση β επιτρέπει τη χρήση ενός πιο «ευρέος» διαστήματος τιμών, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα να συμπεριληφθούν τιμές στα σύνολα εκπαίδευσης και αξιολόγησης που θα προκύψουν από μεταγενέστερα πειράματα. Μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται με την τρίτη μέθοδο (περίπτωση 3β), σύμφωνα με την οποία στη διαμόρφωση του αποτελέσματος συμμετέχουν δύο τρίγωνα και ο προσδιορισμός του κέντρου του μεσαίου τριγώνου ορίζεται εξωτερικά με βάση τα διαστήματα που εισάγει ο χρήστης του προγράμματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του ασαφούς συστήματος, για το οποίο προέκυψε το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση

Προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός πλήθους τριγώνων για κάθε μία από τις 5 μεταβλητές εισόδου και για τη μεταβλητή εξόδου, γίνεται ένα 'τρέξιμο' του προγράμματος μεταβάλλοντας το πλήθος των τριγώνων ταυτόχρονα και για τις 6 μεταβλητές από 3 έως 9 (3, 5, 7, 9) και κρατώντας σταθερό το εύρος της βάσης των τριγώνων. Συνολικά πραγματοποιούνται 4⁶=4096 διαφορετικές εκτελέσεις. Κάθε φορά υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών, η οποία χρησιμοποιείται ως κριτήριο επιλογής. Προκειμένου να επιλεγεί ο βέλτιστος συνδυασμός, κατ' αρχάς, βρίσκεται ο συνδυασμός, για τον οποίο μεγιστοποιούνται οι συσχετίσεις του συνόλου εκπαίδευσης και του συνόλου αξιολόγησης. Κατόπιν διερευνάται ποιοι άλλοι συνδυασμοί δίνουν ικανοποιητική συσχέτιση π.χ. άνω του 95% και στο σύνολο εκπαίδευσης και τα δύο σύνολα εκπαίδευσης και αξιολόγησης, και όχι μόνο με το σύνολο αξιολόγησης είναι το μικρό μέγεθος του συνόλου αξιολόγησης. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει ότι τα παραπάνω ικανοποιούνται από τον εξής συνδυασμό: 3-3-3-9-9-3.

Στη συνέχεια, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη τιμή του εύρους και του πλήθους των τριγώνων για κάθε μία μεταβλητή, διατηρούνται σταθερές οι τιμές αυτές για όλες τις μεταβλητές εκτός από μία. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία αυτή για κάθε μία μεταβλητή διατηρώντας πάντα τη βέλτιστη τιμή του πλήθους και του εύρους των τριγώνων που έχουν ήδη υπολογιστεί για τις προηγούμενες μεταβλητές.

Στον Πίνακα 5.5 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των διαδοχικών εκτελέσεων του προγράμματος για τη συγκεκριμένη μέθοδο. Επειδή ορισμένοι συνδυασμοί οδηγούν σε παραπλήσια αποτελέσματα, μετά τις ξεχωριστές εκτελέσεις για κάθε μία μεταβλητή ακολουθεί μία τελική διερεύνηση συγχρόνως όλων των 'ισοδύναμων' συνδυασμών και των γειτονικών τους. Για την τελική εκτέλεση του προγράμματος επιλέχθηκαν οι εξής τιμές των παραμέτρων: h_1 =3, a_1 =0, h_2 =3, a_2 =0, h_3 =3, a_3 =0, h_4 =9, a_4 =0, h_5 =9, a_5 =-5%, h_6 =3, a_6 =-40%. Η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου προέκυψε ίση με 0,9714.

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ασαφούς συστήματος για τα 24 στοιχεία του συνόλου ελέγχου σε κοινό γράφημα με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Στο Σχήμα 5.21 απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών.

	x_1	x_2	x_3
	$h_{1}=[3, 5, 7, 9], \alpha_{1}=50\%, \\ s_{1}=5\%, h_{2}=3, h_{3}=3, \\ h_{4}=9, h_{5}=9, h_{6}=3, \\ \alpha_{2}=\alpha_{3}=\alpha_{4}=\alpha_{5}=\alpha_{6}=0$	$h_1=3, \alpha_1=0, h_2=[3, 5, 7, 9],$ $\alpha_2=50\%, s_2=5\%, h_3=3,$ $h_4=9, h_5=9, h_6=3,$ $\alpha_3=\alpha_4=\alpha_5=\alpha_6=0$	$ \begin{array}{l} h_1 = 3, \alpha_1 = 0, h_2 = 3, \alpha_2 = 0, \\ h_3 = [3, 5, 7, 9], \alpha_3 = 50\%, \\ s_3 = 5\%, h_4 = 9, h_5 = 9, \\ h_6 = 3, \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0 \end{array} $
Βέλτιστη επιλογή	<i>h</i> _{<i>l</i>} =3, <i>α</i> _{<i>l</i>} =0	$h_2=3, \alpha_2=0$	<i>h</i> ₃ =3, <i>α</i> ₃ =0
	x_4	x_5	У
	$\begin{array}{c} x_4 \\ h_1 = 3, \ \alpha_1 = 0, \ h_2 = 3, \ \alpha_2 = 0, \\ h_3 = 3, \ \alpha_3 = 0, \ h_4 = [3, \ 5, \ 7, \ 9], \ \alpha_4 = 50\%, \ s_4 = 5\%, \\ h_5 = 9, \ h_6 = 3, \ \alpha_5 = \alpha_6 = 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} x_5 \\ h_1 = 3, \alpha_1 = 0, h_2 = 3, \alpha_2 = 0, \\ h_3 = 3, \alpha_3 = 0, h_4 = 9, \alpha_4 = 0, \\ h_5 = [3, 5, 7, 9], \alpha_5 = 50\%, \\ s_5 = 5\%, h_6 = 3, \alpha_6 = 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} & y \\ h_1=3, \alpha_1=0, h_2=3, \alpha_2=0, \\ h_3=3, \alpha_3=0, h_4=9, \alpha_4=0, \\ h_5=9, \alpha_5=-5\%, h_6=[3, 5, \\ 7, 9], \alpha_6=50\%, s_6=5\% \end{array}$

Πίνακας 5.5: Διαδοχικές εκτελέσεις του προγράμματος για την εύρεση της βέλτιστης τιμής του εύρους και του πλήθους των τριγώνων για κάθε μεταβλητή χωριστά.



Σχήμα 5.20: Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση.



Σχήμα 5.21: Συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης του συνόλου ελέγχου για επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση.

Στο Σχήμα 5.22 καταγράφονται σε κοινή γραφική παράσταση η πειραματική τιμή και η εκτιμώμενη τιμή για τα δεδομένα του συνόλου αξιολόγησης, καθώς και το διάστημα εμπιστοσύνης με πιθανότητα ουράς ίση με 5% (το διάστημα εμπιστοσύνης να καλύπτει το 90% του πληθυσμού). Από το παρακάτω γράφημα προκύπτει ότι αφ' ενός μεν οι εκτιμώμενες τιμές είναι αρκετά κοντά στις πειραματικές, αφ' ετέρου δε τόσο οι πειραματικές, όσο και οι εκτιμώμενες τιμές βρίσκονται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης.



Σχήμα 5.22: Διάστημα εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης με 5% πιθανότητα ουράς για επιλογή εξόδου με μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση.

5.6 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Στο παρόν κεφάλαιο προτάθηκαν μοντέλα εκτίμησης της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης. Προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων και Ασαφών Συστημάτων, χρησιμοποιώντας σε κάθε περίπτωση τα ίδια δεδομένα εισόδου.

Όσον αφορά τη χρήση Ασαφούς Λογικής, υλοποιήθηκαν διάφορες μεθοδολογίες για τη δημιουργία Ασαφών Συστημάτων. Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν, όταν στη διαμόρφωση του αποτελέσματος συμμετείχαν δύο διαδοχικά τρίγωνα με βάση το σταθμισμένο μέσο όρο χωρίς στρογγυλοποίηση και το κέντρο του μεσαίου τριγώνου ορίζεται εξωτερικά με βάση τα διαστήματα που εισάγει ο χρήστης του προγράμματος. Η συσχέτιση για το σύνολο ελέγχου σε αυτήν την περίπτωση είναι 0,9714.

Προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα για περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μεθοδολογίες των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες παραλλαγές του αλγορίθμου ανάστροφης διάδοσης σφάλματος (δίκτυο επιβλεπόμενης μάθησης). Αρχικά, το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας έτοιμες συναρτήσεις του ΜΑΤLAB. Παρ' ότι το συγκεκριμένο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο χρειάζεται μικρό υπολογιστικό χρόνο και είναι εύκολο στο χειρισμό, η αδυναμία ελέγχου των παραμέτρων του οδηγεί σε τιμές σφαλμάτων, οι οποίες είναι δυνατό να βελτιωθούν. Για το λόγο αυτό υλοποιήθηκε αλγόριθμος, στον οποίο ήταν δυνατή η ρύθμιση όλων των παραμέτρων του. Για την εκπαίδευση των προτεινόμενων Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων εφαρμόστηκαν δώδεκα διαφορετικές μεθόδοι βελτιστοποιώντας κάθε φορά όλες τις παραμέτρους. Μεταξύ των μεθόδων τυχαίας παρουσίασης των προτύπων εκπαίδευσης, τα καλύτερα αποτελέσματα αποκτώνται κατά την εκπαίδευση ανά πρότυπο με χρήση ρυθμού εκπαίδευσης και όρου ορμής (φθίνουσες εκθετικές συναρτήσεις), όταν χρησιμοποιούνται ως κριτήρια τερματισμού: α) η μεταβολή στις τιμές των βαρών του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου από τη μία επανάληψη στην άλλη να μην ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο, β) ο αριθμός των εποχών να μην ξεπερνά μία μέγιστη τιμή και γ) η μεταβολή στην τιμή της συνάρτησης σφάλματος από τη μία επανάληψη στην άλλη να είναι μικρότερη μίας προκαθορισμένης τιμής. Τότε, η συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου είναι 0,9977. Μεταξύ των μεθόδων σειριακής παρουσίασης των προτύπων εκπαίδευσης, ο αλγόριθμος βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή, όταν γίνεται χρήση και των τριών προαναφερθέντων κριτηρίων τερματισμού, δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα με συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου ίση με 0,9986, τιμή δηλωτική της πολύ καλής σύγκλισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών.

Εκ πρώτης απόψεως τα αποτελέσματα του Ασαφούς Συστήματος φαίνονται χειρότερα από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, αλλά παρ' όλα αυτά είναι συγκρίσιμα, καθώς και στις δύο περιπτώσεις είναι εντός των ορίων σφάλματος των πειραματικών μετρήσεων.

Συμπερασματικά, κρίνοντας, τόσο από την τιμή της συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου, όσο και από την τιμή των μέσων σφαλμάτων, είναι προφανές ότι το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή, είναι δυνατό να εκτιμήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κρίσιμη τάση υπερπήδησης συγκρινόμενο τόσο με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, τα οποία στηρίζονται σε κάποιον από τους υπόλοιπους αλγορίθμους, όσο και με τα Ασαφή Συστήματα.

Η συμβολή της παρούσας διατριβής στην εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης έγκειται στη χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, κατάλληλα διαμορφωμένων για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Η διερεύνηση για την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου δεν περιορίστηκε στη χρήση έτοιμων εργαλείων διαθέσιμων σε πακέτα λογισμικού, αλλά επεκτάθηκε στην κατάλληλη τροποποίηση λογισμικού, το οποίο επιτρέπει την πλήρη επέμβαση στις παραμέτρους του. Προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, ελέγχθηκε αφ' ενός μεν πλήθος τεχνικών εκπαίδευσης, τόσο τεχνητών νευρωνικών δικτύων, όσο και ασαφών συστημάτων, αφ' ετέρου δε δοκιμάστηκε πλήθος τιμών των παραμέτρων της κάθε μεθόδου με στόχο τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, που είναι δυνατό να προκύψουν από την κάθε μέθοδο. Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών, που επιτεύχθηκε από την επιλεγείσα μέθοδο, κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικός, καθώς πλησιάζει τη μονάδα. Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων και των ασαφών συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα, που προέκυψαν από πειράματα διεξαχθέντα, τόσο από τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., όσο και από άλλους ερευνητές, γεγονός το οποίο διευρύνει το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου εκτίμησης της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης.

Κεφάλαιο 6

ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ

6.1 Γενική μεθοδολογία μοντελοποίησης προβλημάτων απόφασης

6.1.1 Η διαδικασία της απόφασης

Η λήψη αποφάσεων είναι ίσως το συνηθέστερο, αλλά και σημαντικότερο φαινόμενο της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Η έννοια της απόφασης υπονοεί πάντα την ύπαρξη ενός λήπτη της απόφασης, τον αποφασίζοντα. Ο αποφασίζων μπορεί να είναι ένα άτομο, ένα συλλογικό όργανο ή μια ακόμη πιο ασαφής οντότητα ή φορέας που επηρεάζει άμεσα τη διαδικασία της απόφασης. Μια απόφαση είναι το αποτέλεσμα της σύγκλισης μιας οργανωμένης διαδικασίας, που ονομάζεται διαδικασία της απόφασης. Ένας οποιοσδήποτε αποφασίζων θέλει να αποφασίζει ορθολογικά, παίρνοντας την καλύτερη δυνατή απόφαση. Ένα πρόβλημα απόφασης χαρακτηρίζεται, λοιπόν, από την ύπαρξη ενός συνόλου εναλλακτικών αποφάσεων ή λύσεων ή δραστηριοτήτων. Η δυσκολία ή πολυπλοκότητα ενός προβλήματος απόφασης οφείλεται αφ' ενός στον πολυδιάστατο χαρακτήρα των επιπτώσεων των δραστηριοτήτων και αφ' ετέρου στη βεβαιότητα ή αβεβαιότητα που διέπει τα δεδομένα του προβλήματος. Συνεπώς, οι περισσότερες αποφάσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως πολυδιάστατες ή πολυκριτηριακές.

6.1.2 Μεθοδολογία μοντελοποίησης

Το γενικό πλαίσιο μοντελοποίησης οριοθετείται από πέντε διαδοχικά, αλλά αλληλεπιδρώντα στάδια, όπως φαίνεται συνοπτικά στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Στάδια διαδικασίας μοντελοποίησης της απόφασης [134, 135].

Στη συνέχεια αναλύονται τα πέντε στάδια μοντελοποίησης της απόφασης [134, 135].

- Αντικείμενο της απόφασης: Στο στάδιο αυτό, είναι απαραίτητο να ολοκληρωθούν οι εξής δύο βασικές εργασίες:
 - αυστηρός ορισμός του συνόλου F των δράσεων
 - καθορισμός μιας προβληματικής

Το αντικείμενο της απόφασης οφείλει να αναλυθεί σε ένα πεπερασμένο ή συνεχές σύνολο δράσεων. Ο ορισμός μιας προβληματικής πάνω στο σύνολο F αποσκοπεί στο να δώσει επιχειρησιακό ρόλο στο έργο της υποστήριξης της απόφασης, σχετίζεται δηλαδή άμεσα με το ερώτημα «τι θέλουμε να επιτύχουμε;». Διακρίνονται τέσσερις προβληματικές αναφοράς:

- προβληματική α: επιλογή μιας και μόνης δράσης από το σύνολο F
- προβληματική β: ταξινόμηση των δράσεων σε ομογενείς προκαθορισμένες κατηγορίες
- προβληματική γ: κατάταξη των δράσεων του συνόλου F από την καλύτερη μέχρι τη χειρότερη και
- προβληματική δ: περιγραφή των δράσεων και των συνεπειών τους στη γλώσσα των αποφασιζόντων.

Μια και μόνη προβληματική δεν παραμένει αναγκαστικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας της απόφασης, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

 Ορισμός κριτηρίων: Κάθε δυνατή δράση από το σύνολο F αντανακλά ένα σύνολο στοιχειωδών επιπτώσεων (χαρακτηριστικά, ιδιότητες, πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα κ.λπ.), μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμησή της από τον αποφασίζοντα.

Ορίζεται ως κριτήριο κάθε μονότονη μεταβλητή, δηλωτική των προτιμήσεων ενός αποφασίζοντος. Ένα κριτήριο μπορεί να είναι, είτε ποσοτικό και να εκφράζεται από μια συνεχή κλίμακα, είτε ποιοτικό, για τη μοντελοποίηση του οποίου υιοθετείται μια συμβατική κλίμακα διακεκριμένων τιμών.

Τα κριτήρια αποτελούν μοντέλα σύγκρισης των δράσεων του προβλήματος και οφείλουν να πληρούν τρεις θεμελιώδεις συνθήκες: μονοτονία, επάρκεια, μη πλεονασμός. Ένα τέτοιο σύνολο κριτηρίων ονομάζεται συνεπής οικογένεια κριτηρίων. Το Σχήμα 6.2 δίνει μια παραστατική εικόνα της διαδικασίας αυτής.



Ελλειψη πληροφορίας η συνεπείας

Σχήμα 6.2. Διαδικασία μοντελοποίησης των κριτηρίων απόφασης.

Μια συνεπής οικογένεια κριτηρίων απεικονίζει το σύνολο των δράσεων F μέσα στον n-διάστατο πραγματικό χώρο Rn, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Πολυκριτηριακή απεικόνιση του συνόλου F.

Τέλος, με $g(a) = (g_1(a), g_2(a), ..., g_n(a))$ συμβολίζεται το διάνυσμα των εκτιμήσεων της δράσης $a \in F$ πάνω στα n κριτήρια, το οποίο εκφράζει πολυκριτηριακή εκτίμηση.

- Ορισμός συνόλου επιλογών: Καθορίζεται το σύνολο δυνατών επιλογών F.
- Αξιολόγηση: Σχηματίζεται ο πίνακας βαθμολογίας, ο οποίος εκφράζει τις επιδόσεις των δράσεων-λύσεων στα κριτήρια.
- Μοντέλο ολικής προτίμησης: Πρόκειται για τον κανόνα σύνθεσης των κριτηρίων (μερικές προτιμήσεις) μέσα από ένα μοντέλο ολικής προτίμησης. Οι δραστηριότητες του συνόλου F συγκρίνονται συνολικά με βάση το μοντέλο αυτό και τον τύπο προβληματικής που έχει οριστεί στο πρώτο στάδιο (αντικείμενο της απόφασης). Συμπληρωματικά ο αναλυτής αναζητεί και οργανώνει τα στοιχεία απάντησης σε συγκεκριμένα ερωτήματα που θέτει το ίδιο το πρόβλημα, καθώς επίσης και ο αποφασίζων.

6.2 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων

6.2.1 Οι μέθοδοι ELECTRE

Οι μέθοδοι ELECTRE είναι η πρώτη και σημαντικότερη κατηγορία μεθόδων, η οποία βασίστηκε στο μοντέλο των σχέσεων υπεροχής. Το σύνολο των μεθόδων αυτής της κατηγορίας φέρει το όνομα του Β. Roy, ο οποίος είναι ο εμπνευστής της θεωρίας των σχέσεων υπεροχής. Πιο συγκεκριμένα έχουν αναπτυχθεί οι μέθοδοι ELECTRE I (1968), ELECTRE II (1971), ELECTRE A (1977), ELECTRE III (1978), ELECTRE IV (1982) και ELECTRE Is (1984) [136, 137].

Οι μέθοδοι ELECTRE I και ELECTRE Is χρησιμοποιούνται για την επιλογή ενός υποσυνόλου, όσον το δυνατόν περισσότερο περιορισμένο, το οποίο, όμως, περιέχει τις περισσότερο ικανοποιητικές εναλλακτικές επιλογές. Στην περίπτωση αυτή, προσπαθούμε να απομονώσουμε το μικρότερο υποσύνολο, το οποίο είναι ικανό να δικαιολογήσει την απουσία των υπολοίπων εναλλακτικών επιλογών. Η μέθοδος ELECTRE A χρησιμοποιείται για τη σύνθεση της κάθε εναλλακτικής σε προκαθορισμένες κατηγορίες. Οι μέθοδοι ELECTRE II, ELECTRE III και ELECTRE IV χρησιμοποιούνται για την κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών σύμφωνα με τη φθίνουσα σειρά προτίμησης. Στην περίπτωση αυτή κατασκευάζεται μία μερική (ή ολική) σχέση διάταξης, όσο πλουσιότερη γίνεται, στο υποσύνολο των πιο ικανοποιητικών εναλλακτικών επιλογών [136, 137].

6.2.2 Η μέθοδος ELECTRE Ι

Η μέθοδος αυτή ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων υπεροχής και σχετίζεται άμεσα με την προβληματική a της επιλογής [136, 138]. Η μοντελοποίηση των προτιμήσεων μέσω της μεθόδου ELECTRE Ι είναι σχεσιακή, συγκρίνονται δηλαδή οι δράσεις ανά ζεύγη, πράγμα που επιτρέπει τη μοντελοποίηση μιας και επιπλέον ρεαλιστικής σχέσης μεταξύ δραστηριοτήτων, της ασυγκριτικότητας.

Η σχέση της υπεροχής μεταξύ δύο δράσεων (λύσεων) ορίζεται ως εξής:

a S b ⇔ "η a είναι τουλάχιστον τόσο καλή λύση όσο και η b" και παριστάνεται με γράφημα δύο κορυφών και ένα τόξο που έχει για αρχή την κορυφή a και για τέλος την κορυφή b (Σχήμα 6.4). Έτσι, για κάθε ζεύγος δράσεων μπορεί να παρουσιαστεί μια από τις τρεις καταστάσεις του Σχήματος 6.4.



138].

Η μέθοδος ELECTRE Ι μπορεί να παρασταθεί γραφικά μέσω του Σχήματος 6.5.



Σχήμα 6.5: Λογικό διάγραμμα της μεθόδου ELECTRE I [138].

Μετά την κατασκευή του πίνακα πολυκριτηριακών εκτιμήσεων (ποσοτικών ή ποιοτικών), κατασκευάζεται ο πίνακας (σχέση) υπεροχής με τη βοήθεια δύο ελέγχων: του ελέγχου συμφωνίας και του ελέγχου ασυμφωνίας.

Τα πρόσθετα δεδομένα της μεθόδου είναι τριών τύπων:

- συντελεστές σημαντικότητας (βάρη) των κριτηρίων w1, w2, w3,...,wn: Πρόκειται για θετικά βάρη των κριτηρίων, χωρίς συγκεκριμένη φυσική σημασία, που υπακούουν στη σχέση κανονικότητας: w1 + w2 + w3 +... + wn = 1.
- κατώφλι συμφωνίας â : Είναι καθαρός αριθμός που δίνεται από τον αναλυτή του προβλήματος και μειώνεται από το 1 κατά τη διάρκεια της επίλυσης.
- κατώφλι ασυμφωνίας d : Είναι καθαρός αριθμός που δίνεται από τον αναλυτή του προβλήματος και αυξάνεται από το 0 κατά τη διάρκεια της επίλυσης.

Ελεγχος συμφωνίας

Ορίζεται ως δείκτης συμφωνίας για κάθε διατεταγμένο ζεύγος δραστηριοτήτων η συνάρτηση A [134]:

$$A(a,b) = \frac{1}{W} \cdot \sum_{g_i(a) \ge g_i(b)} W_{Ci}$$
(6.1)

όπου g_i(a) είναι οι τιμές για την επιλογή a (με $a \in [P_1, P_M]$ και $a \neq b$), το σύνολο $[P_1, P_M]$ περιλαμβάνει τις πιθανές επιλογές και το W είναι το άθροισμα των βαρών

$$w_{Ci}$$
. ($W = \sum_{i=1}^{N} w_{Ci}$).

Για το δείκτη συμφωνίας ισχύει ότι 0 ≤ A ≤ 1.

Ο δείκτης συμφωνίας εκφράζει το μέτρο του ποσοστού των κριτηρίων που συμφωνούν ότι η λύση a επικρατεί της b.

Το ζεύγος (a, b) ικανοποιεί τη συνθήκη συμφωνίας όταν ισχύει:

 $A(a,b) \ge \hat{a}$, όπου \hat{a} το κατώφλι συμφωνίας.

Ελεγχος ασυμφωνίας

Αντίστοιχα με το δείκτη συμφωνίας υπολογίζεται ο δείκτης ασυμφωνίας D από τη σχέση [134]:

$$D(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{if} & g_i(a) \ge g_i(b) \\ \frac{1}{\delta} \max_{i} \cdot (g_i(b) - g_i(a)) & g_i(a) < g_i(b) \end{cases}$$
(6.2)

όπου $\delta = \max_{a,b,i} (g_i(a) - g_i(b)), \forall i.$

Για τον δείκτη ασυμφωνίας ισχύει ότι $0 \le D \le 1$.

Ο δείκτης ασυμφωνίας ελέγχει τις λύσεις, οι οποίες έχουν κακή επίδοση σε κάποιο κριτήριο.

Η συνθήκη ασυμφωνίας είναι:

 $D(a,b) \le \hat{d}$, όπου \hat{d} το κατώφλι ασυμφωνίας.

Σχέση επικράτησης

Με βάση τους δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας, η σχέση της υπεροχής για κάθε ζεύγος δράσεων (a, b) ορίζεται ως εξής:

 $a S b \Leftrightarrow A(a,b) \ge \hat{a} \text{ kan } D(a,b) \le \hat{d},$

δηλαδή το ζεύγος (a, b) ικανοποιεί τις συνθήκες συμφωνίας και ασυμφωνίας.

Πυρήνας

Ορίζεται ως πυρήνας του γραφήματος υπεροχής, ένα υποσύνολο Π του F για το οποίο ισχύουν οι δύο παρακάτω ιδιότητες [134]:

1. $\forall b \in F-\Pi$, $\exists a \in \Pi$ gia to option a S b

2. $\forall a \in \Pi \text{ kal } a' \in \Pi, a \$ a' \text{ kal } a' \$ a$

Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, ο πυρήνας περιέχει τις καλύτερες δράσεις (λύσεις) του συνόλου F, οι οποίες πρέπει να απασχολήσουν τον αποφασίζοντα.

Διαχείριση κυκλωμάτων

Κύκλωμα μέσα σε ένα γράφημα είναι μια διαδοχή τόξων, η οποία καταλήγει στην κορυφή από την οποία αρχίζει [138]. Ένα γράφημα υπεροχής που έχει κυκλώματα μπορεί να μην περιέχει πυρήνα ή αντίθετα να περιέχει περισσότερους από έναν πυρήνες. Απεναντίας, γράφημα χωρίς κανένα κύκλωμα περιέχει πάντα έναν και μοναδικό πυρήνα.

Σε περίπτωση ύπαρξης κυκλωμάτων, αυτά αντικαθίστανται από εικονικές κορυφές. Η κατανόηση της φύσης μιας τέτοιας κορυφής επιτυγχάνεται με τη βοήθεια πρόσθετων στοιχείων, όπως:

- οι δραστηριότητες που αποτελούν το κύκλωμα
- ο βαθμός συνάφειας των δράσεων του κυκλώματος, που καθορίζεται από το λόγο
 του αριθμού των τόξων που συνδέουν τις κορυφές του κυκλώματος προς το
 μέγιστο αριθμό τόξων που απαιτούνται για να θεωρηθούν όλες ως ισοδύναμες,
- τα ποσοστά σύνδεσης του κυκλώματος με τις άλλες δραστηριότητες

6.3 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας

6.3.1 Μεθοδολογία επιλογής βέλτιστου τύπου μονωτήρα

Προκειμένου να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα συνδυάστηκαν πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων και τεχνικές υψηλών τάσεων. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόστηκε προκειμένου να επιλεγεί ο βέλτιστος τύπος μονωτήρα που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα νέο δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης. Στην παρούσα εφαρμογή, η επιλογή έγινε ανάμεσα σε δέκα διαφορετικά είδη μονωτήρων τύπου cap and pin (P₁...P₁₀), από τους οποίους ο καθένας έχει διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κριτήρια, με βάση τα οποία έγινε η επιλογή, ήταν το κόστος, η κρίσιμη τάση υπερπήδησης, το μήκος ερπυσμού και η διάμετρος του μονωτήρα. Σε κάθε κριτήριο δόθηκε διαφορετική βαρύτητα, η οποία χαρακτηρίζει τη σημαντικότητα του κριτηρίου για τη λήψη της απόφασης.

Σύμφωνα με την πολυκριτηριακή μέθοδο λήψης αποφάσεων [134-138] το πιο κρίσιμο σημείο της συνολικής διαδικασίας είναι ο καθορισμός των κριτηρίων C_i (1 \leq i \leq N), τα οποία δεν πρέπει να είναι αλληλοεπικαλυπτόμενα για τις πιθανές επιλογές P_j (1 \leq j \leq M).

Ένας τελικός πίνακας διαστάσεων M×N περιλαμβάνει τα N κριτήρια και τις M πιθανές επιλογές. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των στοιχείων του πίνακα υπολογίζεται ο βαθμός συμφωνίας A και ο βαθμός ασυμφωνίας D. Συνδέοντας κατάλληλα τις τιμές του βαθμού συμφωνίας και ασυμφωνίας, η μέθοδος οδηγεί σε μοναδική λύση του προβλήματος.

Τα γεωμετρικά, ηλεκτρικά και οικονομικά χαρακτηριστικά (ύψος Η, συντελεστής μορφής F, μήκος ερπυσμού L, διάμετρος D_r, κρίσιμη τάση U_c, κόστος) των δέκα υπό εξέταση μονωτήρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

		Κριτ	τήρια	
Μονωτήρας / Η [cm] / F	C1	C_2	C ₃	C_4
	L [cm]	U _c [kV]	$D_r [cm]$	Κόστος [€]
P ₁ / 15,87 / 0,790	33,02	10,6	26,7	66
P ₂ / 15,87 / 0,860	40,64	11,8	26,8	70
P ₃ / 16,51 / 0,916	43,18	12,0	25,4	75
P ₄ / 14,60 / 0,840	27,94	10,0	25,4	65
P ₅ / 14,60 / 0,702	40,64	12,0	29,2	85
P ₆ / 14,60 / 0,716	31,75	10,2	25,4	83
P ₇ / 15,87 / 0,922	46,99	13,1	29,2	71
P ₈ / 15,56 / 0,757	36,83	11,3	27,9	73
P ₉ / 17,78 / 0,792	45,72	13,2	32,1	84
P ₁₀ / 19,68 / 0,754	42,54	12,7	32,1	77

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση μονωτήρων.

6.3.2 Κριτήρια για τη λήψη απόφασης

Κάθε κριτήριο πρέπει να είναι εκφρασμένο σε μία κοινή κλίμακα αναφοράς. Για αυτό το λόγο κάθε κριτήριο κανονικοποιείται, δηλαδή η πιο ικανοποιητική τιμή βαθμολογείται με 100 και η λιγότερο ικανοποιητική με 0. Εάν Μ είναι η μέγιστη τιμή του κριτηρίου και m είναι η ελάχιστη τιμή, οι κανονικοποιημένες τιμές για κάθε κριτήριο υπολογίζονται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\beta = \left| \frac{x - M}{m - M} \right| \cdot 100 \tag{6.3}$$

όπου β είναι η τιμή μετά την κανονικοποίηση και x είναι η τιμή πριν την κανονικοποίηση.

<u>Κριτήριο C1: Μήκος ερπυσμού</u>

Τα υψηλά επίπεδα ρύπανσης της ατμόσφαιρας οδηγούν σε σημαντική μείωση της μονωτικής ικανότητας των μονωτήρων. Επειδή η συμπεριφορά των μονωτήρων σε ρυπασμένο περιβάλλον επηρεάζεται σημαντικά από το μήκος ερπυσμού, το

τελευταίο χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου μονωτήρα. Οι τιμές του μήκους ερπυσμού για τις δέκα δυνατές επιλογές μονωτήρων έχουν ήδη αναφερθεί στον Πίνακα 6.1. Μετά την κανονικοποίηση των τιμών αυτών, με χρήση της εξίσωσης (6.3), οι τιμές για το μήκος ερπυσμού παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 6.2.

Κριτήριο C2: Η κρίσιμη τάση υπερπήδησης

Η τάση υπερπήδησης του κάθε μονωτήρα υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και έχει παρουσιαστεί στην Παράγραφο 1.4. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε η σχέση (1.18) χρησιμοποιώντας για τις σταθερές Α και η τις τιμές 124,8 και 0,409 [27], αντίστοιχα, και ρύπανση C=0,2mg/cm². Οι τιμές που προέκυψαν για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης κάθε μονωτήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1, ενώ οι κανονικοποιημένες τιμές παρουσιάζονται στην τρίτη στήλη του Πίνακα 6.2.

<u>Κριτήριο C3: Η διάμετρος</u>

Η αύξηση της διαμέτρου ενός μονωτήρα οδηγεί σε μείωση της μονωτικής ικανότητάς του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγαλύτερη επιφάνεια διευκολύνει την επικάθηση ρύπανσης. Επιπλέον η διάμετρος του μονωτήρα αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον υπολογισμό του ρεύματος. Στον Πίνακα 6.1 έχουν καταγραφεί οι πραγματικές τιμές της διαμέτρου D_r για τους υπό εξέταση μονωτήρες και στην τέταρτη στήλη του Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες τιμές.

<u>Κριτήριο C4: Το κόστος</u>

Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του καθενός από τους δέκα μονωτήρες παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1, τα αποτελέσματα μετά την κανονικοποίηση των τιμών παρουσιάζονται στην πέμπτη στήλη του Πίνακα 6.2. Πολύ σημαντικό ρόλο κατέχει και το κόστος συντήρησης των μονωτήρων, το οποίο προκύπτει κυρίως από την αναγκαιότητα για καθαρισμό των μονωτήρων σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να αποφεύγετε η αυξημένη επικάθηση ρύπανσης. Επειδή, όμως, όλοι οι τύποι μονωτήρων καθαρίζονται με τον ίδιο τρόπο, το κόστος αυτό είναι το ίδιο για όλους τους μονωτήρες και συνεπώς δεν αποτελεί κριτήριο για τη λήψη απόφασης.

<u>Επιπρόσθετα κριτήρια</u>

Ως επιπρόσθετα κριτήρια για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα είναι δυνατό να ληφθούν και άλλοι παράμετροι, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τον αποφασίζοντα να πάρει τη βέλτιστη απόφαση. Τέτοια κριτήρια μπορεί να είναι η αζιοπιστία των μονωτήρων, ο λόγος αξιοπιστίας – κόστους, η συμβατότητα με υπάρχοντες μονωτήρες, έτσι ώστε να υπάρξει μελλοντικά εξοικονόμηση ανταλλακτικών, η ύπαρξη προηγούμενης εμπειρίας, έτσι ώστε να υπάρχει τεχνογνωσία για την εγκατάσταση και τη συντήρηση, κ.λπ.. Τα ανωτέρω κριτήρια είναι δύσκολο να συμπεριληφθούν στην ομάδα βασικών κριτηρίων, διότι είτε είναι γνωστά μόνο για κάποιες από τις δυνατές επιλογές, είτε είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν.

6.3.3 Επίλυση του προβλήματος

Η παραπάνω ομάδα κριτηρίων είναι συνεπής καθώς παρουσιάζει μονοτονία, επάρκεια και μη πλεονασμό (δηλαδή τα κριτήρια επαρκούν για τη λήψη απόφασης, χωρίς να πλεονάζουν και δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους). Συνεπώς πληροί τις απαιτήσεις της πολυκριτηριακής θεωρίας [134-138] προκειμένου να εφαρμοστεί η πολυκριτηριακή μέθοδος λήψης απόφασης. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες τιμές όλων των κριτηρίων.

		Κριτήρια							
α/α επιλογής	C_1	C ₂	C ₃	C ₄					
	L	Uc	Dr	Κόστος					
P ₁	26,7	18,8	81,0	95,0					
P ₂	66,7	56,3	79,5	75,0					
P ₃	80,0	62,5	100,0	50,0					
P ₄	0,0	0,0	100,0	100,0					
P ₅	66,7	62,5	43,0	0,0					
P ₆	20,0	6,2	100,0	10,0					
P ₇	100,0	96,9	42,9	70,0					
P ₈	46,7	40,6	61,9	60,0					
P ₉	93,3	100,0	0,0	5,0					
P ₁₀	76,6	84,4	0,0	40,0					

Πίνακας 6.2: Κανονικοποιημένες τιμές.

Στη συνέχεια ορίζονται οι δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας με βάσει τους οποίους πραγματοποιείται η επίλυση του προβλήματος.

<u>Δείκτης συμφωνίας</u>

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του Πίνακα 6.2 και την εξίσωση (6.1) υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας Α.

<u>Δείκτης ασυμφωνίας</u>

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του Πίνακα 6.2 και την εξίσωση (6.2) υπολογίζεται ο δείκτης συμφωνίας D.

Κατασκευή του πυρήνα του προβλήματος

Ισχύει ότι a S b \Leftrightarrow A(a,b) \geq â και D(a,b) \leq d, όπου το σύμβολο S σημαίνει ότι η λύση a επικρατεί της λύσης b. Μειώνοντας το â και αυξάνοντας το d, το πλήθος των μελών του πυρήνα μειώνεται και προσδιορίζεται η τελική λύση.

Θέτοντας ως βάρη κριτηρίων $w_{c1}=2$, $w_{c2}=3$, $w_{c3}=1$ και $w_{c4}=4$ οι πίνακες συμφωνίας και ασυμφωνίας είναι οι Πίνακες 6.3 και 6.4 αντίστοιχα.

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P 9	P ₁₀
P ₁		0,5	0,4	0,5	0,5	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5
P ₂	0,5		0,4	0,5	0,7	0,9	0,5	1,0	0,5	0,5
P ₃	0,6	0,6		0,6	1,0	1,0	0,1	0,6	0,5	0,7
P ₄	0,5	0,5	0,5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
P ₅	0,5	0,5	0,3	0,5		0,5	0,1	0,5	0,1	0,1
P ₆	0,1	0,1	0,1	0,6	0,5		0,1	0,1	0,5	0,1
P ₇	0,5	0,5	0,9	0,5	0,9	0,9		0,9	0,7	1,0
P ₈	0,5	0,0	0,4	0,5	0,5	0,9	0,1		0,5	0,5
P ₉	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	0,5	0,3	0,5		0,6
P ₁₀	0,5	0,5	0,3	0,5	0,9	0,9	0,0	0,5	0,5	

Πίνακας 6.3: Πίνακας συμφωνίας.

_____ı

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P9	P ₁₀
P ₁		0,40	0,53	0,19	0,44	0,19	0,78	0,22	0,81	0,66
P ₂	0,20		0,21	0,25	0,06	0,21	0,41	0,15	0,44	0,28
P ₃	0,45	0,25		0,50	0,00	0,00	0,34	0,10	0,38	0,22
P ₄	0,27	0,67	0,80		0,67	0,20	1,00	0,47	1,00	0,84
P ₅	0,95	0,75	0,57	1,00		0,57	0,70	0,60	0,38	0,40
P ₆	0,85	0,65	0,60	0,90	0,56		0,91	0,50	0,94	0,78
P ₇	0,38	0,37	0,57	0,57	0,00	0,57		0,19	0,03	0,13
P ₈	0,35	0,20	0,38	0,40	0,22	0,38	0,56		0,59	0,44
P 9	0,90	0,79	1,00	1,00	0,43	1,00	0,65	0,62		0,35
P ₁₀	0,81	0,79	1,00	1,00	0,43	1,00	0,43	0,62	0,17	

Πίνακας 6.4: Πίνακας ασυμφωνίας.

Τελικά για τις τιμές \hat{a} =0.5 and \hat{d} =0.5 η μέθοδος οδηγεί στη βέλτιστη επιλογή τύπου μονωτήρα, ο οποίος είναι ο P₃. Αυτό είναι εμφανές από τον Πίνακα 6.5 καθώς η στήλη P₃ είναι η μόνη κενή στήλη του πίνακα.

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P9	P ₁₀
P ₁		S		S	S	S		S		
P ₂	S			S	S	S	S	S	S	S
P ₃	S	S		S	S	S		S	S	S
P ₄	S					S		S		
P ₅										
P ₆										
P ₇	S	S			S			S	S	S
P ₈	S			S	S	S				S
P ₉					S					S
P ₁₀					S				S	

Πίνακας 6.5: Επικρατούσα λύση.

Το μόνο μεταβλητό στοιχείο της παραπάνω επίλυσης είναι οι τιμές των βαρών κάθε κριτηρίου, καθώς η επιλογή τους εξαρτάται από τον ανθρώπινο παράγοντα. Συνεπώς, όλοι οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν ένα ποσοστό αβεβαιότητας οφειλόμενο στην υποκειμενική επιλογή των βαρών. Για το λόγο αυτό είναι

απαραίτητο να διεξαχθεί μία ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση.

Επειδή η επιλογή των βαρών είναι υποκειμενική, η επίλυση πραγματοποιήθηκε για έξι διαφορετικούς συνδυασμούς βαρών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6.

W _{c1}	W _{c2}	W _{c3}	W _{c4}	â	$\widehat{\mathbf{d}}$	Επιλογή
1	1	1	1	0,5	0,5	P ₃
1	1	1	2	0,5	0,5	P ₃
1	2	3	4	0,5	0,5	P ₃
2	3	1	4	0,5	0,5	P ₃
2	2	1	1	0,5	0,6	P ₇
4	3	2	1	0,5	0,7	P ₇

Πίνακας 6.6: Βέλτιστη επιλογή για διάφορους συνδυασμούς βαρών.

6.4 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Η μεθοδολογία, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, οδηγεί γρήγορα σε λύση και είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε πρόβλημα λήψης απόφασης, το οποίο μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή μονωτήρων από εταιρείες ελαχιστοποιώντας την υποκειμενικότητα της απόφασης. Τα βάρη των κριτηρίων είναι δυνατό να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση. Επίσης, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η αναγκαιότητα ή μη εμπλουτισμού της ομάδας κριτηρίων, ώστε να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι πιθανοί παράγοντες που επιδρούν στη λήψη απόφασης.

Κεφάλαιο 7

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Κεφάλαιο 1), αναφέρθηκαν διάφορα κυκλωματικά και μαθηματικά μοντέλα, τα οποία δημιουργήθηκαν για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης. Στο παρόν κεφάλαιο, τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών συγκρίθηκαν μεταξύ τους και αξιολογήθηκαν βάσει πειραματικών δεδομένων. Η αξιοπιστία των μοντέλων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των σταθερών του τόξου Α και η, οι οποίες εμπεριέχονται στα μοντέλα. Η τιμή των σταθερών αυτών εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του μονωτήρα, οι οποίες επηρεάζουν το μηχανισμό διάδοσης του τόξου, με αποτέλεσμα ο μονοσήμαντος ορισμός τους να είναι εξαιρετικά δύσκολος. Ο καθορισμός των τιμών των σταθερών αυτών αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, και συγκεκριμένα ελαχιστοποίησης του σφάλματος μεταξύ των αποτελεσμάτων των μοντέλων και των πειραματικών δεδομένων. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος ελαχιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε γενετικός αλγόριθμος.

7.2 Πειραματικά δεδομένα

Ο Wilkins [31], μελετώντας την ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων, προσομοίωσε τον μονωτήρα με ένα τετράγωνο διαστάσεων 10cm×10cm με σταθερή αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας, η τιμή της οποίας εξαρτάται από την ποσότητα υγρής ρύπανσης, περιέχουσα άλατα και οξείδια, της επιφάνειας του μονωτήρα. Η μεταβολή της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης U_c ως προς την ανά μονάδα μήκους αντίσταση r_p, όπως προέκυψε από τα πειράματα του Wilkins, παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.1.

			- 1 1-					r. J.	
r _p [kΩ/cm]	25,31	29,58	40,80	45,87	48,30	53,52	84,74	105,26	200,00
U _c [kV]	12,96	13,92	16,00	16,36	17,26	19,12	22,35	24,58	28,70

Πίνακας 7.1: Πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins [31].

Όμοια πειράματα με τον Wilkins, πραγματοποίησαν και οι Alston και Zoledziowski [29], οι οποίοι έλεγξαν την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός γυάλινου μονωτήρα μήκους 12cm υπό συνθήκες υγρής βιομηχανικής ρύπανσης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων των Alston και Zoledziowski παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Πειραματικά αποτελέσματα των Alston και Zoledziowski [29].

r _p [kΩ/cm]	24,30	25,13	31,17	63,25
U _c [kV]	14,60	15,36	15,60	18,80

Ο Cron [29] έλεγξε την ηλεκτρική συμπεριφορά κυλινδρικού μονωτήρα πορσελάνης μήκους 100cm υπό συνθήκες ρύπανσης, επιβάλλοντας εναλλασσόμενη τάση. Η ρύπανση περιείχε κυρίως άλατα. Τα πειράματα αυτά έχουν δύο βασικές διαφορές από τα πειράματα που διεξήγαγαν ο Wilkins [31] και οι Alston et al. [29], αφ' ενός μεν το μήκος του μονωτήρα είναι πολύ μεγαλύτερο (περίπου δέκα φορές), αφ' ετέρου δε η αντίσταση ανά μονάδα μήκους είναι πολύ μικρότερη (περίπου σαράντα φορές). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών περιέχονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3: Πειραματικά αποτελέσματα του Cron [29].

5	1 1		•		L J
r _p [kΩ/cm]	0,647	0,710	0,975	1,120	1,670
U _c [kV]	34,1	39,0	41,3	49,5	61,7

7.3 Μαθηματικά μοντέλα

7.3.1 Movτέλο Neumärker

Σύμφωνα με το, προτεινόμενο από τον Neumärker, μοντέλο [28], η κρίσιμη τάση υπερπήδησης ενός μονωτήρα με μήκος ερπυσμού L δίνεται από τη σχέση:

$$U_{c} = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_{p}^{\frac{n}{n+1}} \cdot L$$
(7.1)

όπου r_p είναι η αντίσταση ανά μονάδα μήκους σε Ω/cm, A και n οι σταθερές του τόξου και L το μήκος ερπυσμού σε cm. Ο Neumärker πρότεινε ως σταθερές του τόξου τις τιμές: A=63 και n=0,76.

7.3.2 Μοντέλο Ghoss και Chatterjee

Σύμφωνα με το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee [36], η κρίσιμη τάση υπερπήδησης δίνεται από τη σχέση:

$$U_{c} = \frac{1,3}{\sqrt{2}} \cdot L \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_{p}^{\frac{n}{n+1}}$$
(7.2)

Οι Ghoss και Chatterjee υποστήριξαν ότι προκειμένου η σχέση (7.2) να δίνει ακριβή αποτελέσματα είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι σταθερές Α και n ανάλογα με τη χημική σύσταση της ρύπανσης. Για το λόγο αυτό υπολόγισαν τις τιμές των Α και n για διάφορα είδη ρύπανσης. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4: Σταθερές τόξου συναρτήσει της σύστασης της ρύπανσης [36].

Ρύπανση	Α	n
NaCl	360	0,59
FeCl ₃	270	0,66
CuSO ₄	450	0,49
CaCl ₂	461	0,42

7.3.3 Μοντέλο Dhabi-Megriche και Beroual

Οι Dhabi-Megriche και Beroual [41] πρότειναν ένα κυκλωματικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο η κρίσιμη τάση υπερπήδησης δίνεται από τη σχέση:

$$U_{c} = n^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left\{ \frac{1}{(n+1)^{(n+1)}} + n^{(n-1)} \right\} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_{p}^{\frac{n}{n+1}} \cdot L$$
(7.3)

Oι Dhabi-Megriche και Beroual δεν πρότειναν συγκεκριμένες τιμές για τις σταθερές Α και n, αλλά προσδιόρισαν το εύρος τιμών που λαμβάνουν: $0,45 \le n \le 1$ και $3 \le A \le 200$.

7.3.4 Μοντέλο Obenhaus και Boehme

Οι Obenhaus και Boehme [24], χρησιμοποιώντας το κριτήριο του Hampton [30], κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης:

$$U_{c} = 0, 8 \cdot \sqrt{N} \cdot \sqrt{r_{p}} \cdot L \tag{7.4}$$

όπου Ν είναι μία σταθερά, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τόξου και
καθορίστηκε μετά από πειράματα να είναι ίση με 80V·A/cm.

7.3.5 Movτέλο Hurley και Limbourn

Οι Hurley και Limbourn [24], βασιζόμενοι σε εμπειρικές σχέσεις και στο μοντέλο του Obenhaus, κατέληξαν στην παρακάτω σχέση για την κρίσιμη τάση:

$$U_{c} = 47, 6 \cdot r_{p}^{1/3} \cdot L \tag{7.5}$$

Οι σταθερές διάδοσης του τόξου έχουν συμπεριληφθεί στους συντελεστές 47,6 και 1/3. Το μοντέλο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτει από το μοντέλο του Neumärker, στην περίπτωση που οι σταθερές διάδοσης του τόξου λάβουν τις τιμές A=328,4 και n=0,5.

7.4 Αξιολόγηση μαθηματικών μοντέλων

Τα μαθηματικά μοντέλα εφαρμόστηκαν για τις συνθήκες των προαναφερθέντων πειραμάτων (Παράγραφος 7.3) και ακολούθως συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την εφαρμογή των μοντέλων, με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αρχικά, για την εφαρμογή των μοντέλων, χρησιμοποιήθηκαν οι σταθερές του τόξου Α και n, που προτείνονταν από τους δημιουργούς του κάθε μοντέλου. Αν δεν δίνονταν συγκεκριμένες τιμές, αλλά εύρος τιμών, τότε επιλέχθηκαν τιμές εντός αυτού του εύρους. Σε περιπτώσεις, που η σύγκλιση δεν ήταν ικανοποιητική, δοκιμάστηκαν τιμές για τις σταθερές Α και n προτεινόμενες από άλλους ερευνητές (Πίνακας 1.1), και επιλέχθηκαν οι βέλτιστες τιμές με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής όλων των μοντέλων υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης U_c, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.1. Το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee εφαρμόστηκε θεωρώντας ως σταθερές του τόξου αυτές που αντιστοιχούν σε ρύπανση, η οποία περιέχει NaCl και FeCl₃, καθώς στα πειράματα του Wilkins η ρύπανση στην επιφάνεια του μονωτήρα περιείχε άλατα και οξείδια. Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου σφάλματος, που προέκυψαν από τη σύγκριση των



αποτελεσμάτων κάθε μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins.





Σχήμα 7.2: Μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins.

Το μοντέλο του Neumärker δεν προσφέρει καλή σύγκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας τις προταθείσες τιμές των σταθερών Α και n. Το μοντέλο δίνει μικρότερες τιμές για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης με μέσο σφάλμα 35,26%. Αντίθετα, η εφαρμογή του μοντέλου με χρήση των σταθερών A=140 και n=0,67, τις οποίες πρότεινε ο G. Zhicheng [33], οδηγεί σε βελτίωση της συμπεριφοράς του μοντέλου μειώνοντας το μέσο σφάλμα σε 15,24%. Από την εφαρμογή του μοντέλου των Ghoss και Chatterjee προέκυψε ότι η προσαρμογή των σταθερών του τόξου ανάλογα με τον τύπο της ρύπανσης επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Τέλος, ικανοποιητική συμπεριφορά παρουσιάζει τόσο το μοντέλο των Dhabi-Megriche και Beroual, όσο και το μοντέλο των Hurley και Limbourn δίνοντας αποτελέσματα με μέσο σφάλμα της τάξης του 5%.

Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα των Alston και Zoledziowski

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής όλων των μοντέλων, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα των Alston και Zoledziowski παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.3. Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα των Alston και Zoledziowski. Όπως και στην περίπτωση της σύγκρισης με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins, το μέσο σφάλμα, που προκύπτει από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου του Neumärker και των πειραματικών αποτελεσμάτων των Alston και Zoledziowski, είναι 29,19%, ενώ χρησιμοποιώντας τις τιμές A=140 και n=0,67 [33] ως σταθερές του τόξου το σφάλμα μειώνεται στο 7,70%. Το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee συγκλίνει μη ικανοποιητικά, ενώ μέτρια συμπεριφορά παρουσιάζουν τα μοντέλα των Obenhaus και Boehme.

<u>Σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Cron</u>

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής όλων των μοντέλων, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα του Cron παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.5. Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Cron. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων, τόσο του μοντέλου του Neumärker, όσο και του μοντέλου των Obenhaus και Boehme, από τις πειραματικές τιμές είναι της τάξεως του 50%. Στην περίπτωση εφαρμογής του μοντέλου του Neumärker με χρήση των σταθερών A=140 και n=0,67 [33], δεν παρατηρήθηκε ικανοποιητική μείωση του σφάλματος. Το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα (μέσο σφάλμα 7,68%), στην περίπτωση χρήσης των σταθερών A και n για ρύπανση που περιέχει FeCl₃. Αντίθετα, μέτρια σύγκλιση παρουσιάζουν τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από τα μοντέλα των Ghoss και Chatterjee, στην περίπτωση χρήσης των σταθερών του τόξου για ρύπανση περιέχουσα NaCl, των Hurley και Limbourn, καθώς και των Dhabi-Megriche και Beroual.



Σχήμα 7.3: Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων των Alston και Zoledziowski και των αποτελεσμάτων των μοντέλων.



Σχήμα 7.4: Μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα των Alston και Zoledziowski.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ



Σχήμα 7.5: Σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του Cron και των αποτελεσμάτων των μοντέλων.



Σχήμα 7.6: Μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Cron.

Συνοψίζοντας, αναφέρεται ότι, στην περίπτωση μονωτήρων με μικρό μήκος ερπυσμού και ήπια ρύπανση (πειράματα Wilkins και Alston et al.), το μοντέλο των Dhabi-Megriche και Beroual χρησιμοποιώντας ως σταθερές του τόξου τις προτεινόμενες από τον G. Zhicheng [33] (A=140, n=0,67) έδωσε τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Αντίθετα, στην περίπτωση μονωτήρων με μεγάλο μήκος ερπυσμού και βαριά ρύπανση (πειράματα Cron), το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee, επιλέγοντας τις σταθερές A και n ανάλογα με τον τύπο της ρύπανσης, επιτυγχάνει την καλύτερη πρόβλεψη της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης. Αρκετά μοντέλα έδωσαν υποεκτιμημένα αποτελέσματα για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης, γεγονός που

καθιστά ιδιαίτερα κρίσιμη την επιλογή, ανά περίπτωση, όχι μόνο του κατάλληλου μοντέλου, αλλά και των κατάλληλων σταθερών διάδοσης του τόξου A και n.

7.5 Αποτελέσματα υπολογισμού των σταθερών Α και η

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επιλογή των σταθερών του τόξου έχει πολύ μεγάλη σημασία για την ορθή πρόβλεψη της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης από το μοντέλο. Αν και πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορες τιμές για τις σταθερές αυτές, ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός τους δεν είναι εύκολος, καθώς εξαρτώνται από το μηχανισμό διάδοσης του τόξου, ο οποίος αποτελεί φαινόμενο με μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας.

Στο παρόν Κεφάλαιο, επιχειρήθηκε ο υπολογισμός των σταθερών Α και η με τη βοήθεια γενετικού αλγορίθμου [27]. Ο γενετικός αλγόριθμος, του οποίου η λειτουργία περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.3.1.1, τροποποιήθηκε κατάλληλα για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Για τον υπολογισμό των σταθερών Α και η συνδυάστηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα (του Neumärker [24], των Dhabi-Megriche και Beroual [41], των Hurley και Limbourn [24]) και τρεις διαφορετικές σειρές μετρήσεων (πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins [31], των Alston et al. [29] και του Cron [29]). Πραγματοποιώντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των προαναφερθέντων μοντέλων και πειραμάτων, ελέγχθηκε η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου. Ως κριτήριο ελέγχου της σύγκλισης χρησιμοποιήθηκε η εδαχιστοποίηση της συνάρτησης του μέσου εκατοστιαίου σφάλματος F_g μεταξύ θεωρητικών U_{cy} και πειραματικών τιμών U_{cu} :

$$F_{g} = 100 \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| U_{c9,i} - U_{c\mu,i} \right|}{U_{c\mu,i}}$$
(7.6)

Ο γενετικός αλγόριθμος εκτελέστηκε πολλές φορές για κάθε συνδυασμό πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρητικού μοντέλου, μεταβάλλοντας κάθε φορά τόσο το πλήθος γονέων, όσο και τον αριθμό επαναλήψεων. Στα Σχήματα 7.7 – 7.15 παρουσιάζεται η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου (A, n), το σφάλμα F_g , καθώς και η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των μοντέλων (χρησιμοποιώντας τις υπολογισθείσες από το γενετικό αλγόριθμο τιμές των A και n) και των πειραματικών τιμών για την κρίσιμη τάση U_c, ενώ οι βέλτιστες τιμές για τις σταθερές διάδοσης του τόξου A και n, που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο για κάθε περίπτωση, παρατίθενται στον Πίνακα 7.5.



Σχήμα 7.7: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g, U_c, με χρήση του μοντέλου του Neumärker και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins (U_c).



Σχήμα 7.8: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c , με χρήση του μοντέλου του Neumärker και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα των Alston et al. (U_c).



Σχήμα 7.9: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c , με χρήση του μοντέλου του Neumärker και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Cron (U_c).



Σχήμα 7.10: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c, με χρήση του μοντέλου των Dhabi-Megriche et al. και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins (U_c).



Σχήμα 7.11: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c , με χρήση του μοντέλου των Dhabi-Megriche et al. και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα των Alston et al. (U_c).



Σχήμα 7.12: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c , με χρήση του μοντέλου των Dhabi-Megriche et al. και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Cron (U_c).



Σχήμα 7.13: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c , με χρήση του μοντέλου των Hurley et al. και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins (U_c).



Σχήμα 7.14: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c , με χρήση του μοντέλου των Hurley et al. και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα των Alston et al. (U_c).



Σχήμα 7.15: Υπολογισμός των μεγεθών A, n, F_g , U_c , με χρήση του μοντέλου των Hurley et al. και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Cron (U_c).

Μοντέλο	Πείραμα	Α	n	F _g [%]
Neumärker	Wilkins	121,755	0,796	2,624
	Alston et al.	419,071	0,356	1,044
	Cron	116,831	1,672	3,396
Dhabi-Megriche και Beroual	Wilkins	84,119	0,795	2,625
	Alston et al.	321,659	0,356	1,049
	Cron	24,552	1,669	3,389
Hurley και Limbourn	Wilkins	14,455	0,443	2,624
	Alston et al.	82,093	0,267	1,092
	Cron	6,202	0,620	3,427

Πίνακας 7.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό των σταθερών A και n.

Από τον Πίνακα 7.5 προκύπτει ότι, οι σταθερές του τόξου Α και n, που υπολογίστηκαν από το γενετικό αλγόριθμο, μειώνουν σημαντικά το σφάλμα εφαρμογής του κάθε μοντέλου (Σχήμα 7.16). Επιπλέον, οι τιμές των σταθερών Α και n διαφοροποιούνται ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο και τις συνθήκες του πειράματος. Το μεγάλο αυτό εύρος τιμών οφείλεται στην εξάρτηση των σταθερών Α και n από τη μορφή των μονωτήρων, το είδος της ρύπανσης, τη μεταβολή της επιφανειακής ειδικής αντίστασης λόγω των θερμικών διαδικασιών και της ανομοιόμορφης ύγρανσης, την ανομοιομορφία των τόξων που σχηματίζονται στην περιοχή της επιφάνειας των μονωτήρων, τον τρόπο πολλαπλασιασμού των τόξων κ.α.. Συνεπώς, η κρίσιμη τάση υπερπήδησης ενός ρυπασμένου μονωτήρα είναι μια στατιστική μεταβλητή, η οποία χαρακτηρίζεται από σημαντική διασπορά, ακόμη και υπό ελεγχόμενες συνθήκες.



Σχήμα 7.16: Μέσο σφάλμα του κάθε μοντέλου, με χρήση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου (A, n), σε σύγκριση με τα διάφορα πειραματικά αποτελέσματα.

7.6 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Η πολυπλοκότητα, που παρουσιάζει το φαινόμενο της υπερπήδησης, οφείλεται, κυρίως, στους εξής λόγους:

- Η διάδοση των ηλεκτρικών εκκενώσεων είναι ένα δυναμικό στην εξέλιξή του φαινόμενο.
- Το φαινόμενο της υπερπήδησης είναι μη γραμμικό.
- Οι ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας (λειτουργία σε βιομηχανικό περιβάλλον, παραθαλάσσιες περιοχές, κ.λπ.) επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά διάδοσης των τόξων και, συνεπώς, τις τιμές των κρισίμων μεγεθών.

Οι ανωτέρω λόγοι ελαχιστοποιούν την πιθανότητα εύρεσης ενός γενικευμένου μοντέλου για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, το οποίο να δίνει ακριβή αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση εφαρμογής του. Πολλοί ερευνητές ανέπτυξαν διάφορα μαθηματικά μοντέλα και έλεγξαν την αξιοπιστία τους χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα. Παράλληλα, πρότειναν τιμές για τις σταθερές διάδοσης του τόξου (A, n), οι οποίες εμπεριέχονται στα μοντέλα. Για συγκεκριμένες τιμές των A και n, τα μοντέλα αυτά δίνουν ακριβή αποτελέσματα για τους τύπους των μονωτήρων και τις συνθήκες λειτουργίας των πειραμάτων, που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευσή τους.

Στο παρόν Κεφάλαιο ελέγχθηκε η αξιοπιστία μαθηματικών μοντέλων για μονωτήρες μικρού μήκους ερπυσμού με μικρή ποσότητα ρύπανσης (μεγάλη αντίσταση ανά μονάδα μήκους) και για μονωτήρες μεγάλου μήκους ερπυσμού με μεγάλη ποσότητα ρύπανσης (μικρή αντίσταση ανά μονάδα μήκους). Η σύγκριση των μοντέλων έδειξε την ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις σταθερές A και n. Το πεδίο τιμών των σταθερών A και n παρουσιάζει μεγάλο εύρος, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία $(20 \le A \le 460 \text{ και } 0, 25 \le n \le 1, 40)$ και από τον Πίνακα 7.5.

Για τον υπολογισμό των σταθερών διάδοσης του τόξου (A, n), για κάθε συνδυασμό μετρήσεων και πειραματικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε γενετικός αλγόριθμος. Το κριτήριο σύγκλισης του γενετικού αλγορίθμου ήταν η ελαχιστοποίηση του σφάλματος υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης από τα διάφορα μοντέλα, σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Ο γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποιήθηκε αφ' ενός μεν επιλέγοντας την κατάλληλη εξίσωση προσαρμογής

(μεταξύ των συναρτήσεων απολύτου σφάλματος, σχετικού απολύτου σφάλματος, μεγίστου απολύτου σφάλματος και τετραγωνικού σφάλματος) για τη σύγκλιση, αφ' ετέρου δε ελέγχοντας τόσο τον αρχικό πληθυσμό, όσο και τους γονείς, που συμμετέχουν στην αναπαραγωγή, με αποτέλεσμα να συγκλίνει σε μικρό αριθμό επαναλήψεων και με μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με άλλες τεχνικές βελτιστοποίσης.

Όπως προέκυψε από το Σχήμα 7.16, σε συνδυασμό με τα Σχήματα 7.2, 7.4 και 7. 6, το σφάλμα μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών μειώνεται σημαντικά με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου. Η ικανοποιητική σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου οδηγεί στη σκέψη ότι όλα τα μοντέλα είναι δυνατό να εφαρμοστούν σε κάθε περίπτωση με χρήση κατάλληλων τιμών για τα Α και n. Συνεπώς, η δημιουργία ενός νέου μοντέλου δεν θα συνεισέφερε σημαντικά στον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, καθώς θα είχε περιορισμένο πεδίο εφαρμογής. Από το Σχήμα 7.16 προκύπτει ότι, για κάθε σειρά μετρήσεων, η σύγκλιση μεταξύ των υπολογιστικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ανεξάρτητη του μοντέλου (χρησιμοποιώντας κατάλληλες σταθερές Α και n). Συνεπώς, η χρήση των υπαρχόντων μοντέλων, σε συνδυασμό με την εκτίμηση των κατάλληλων τιμών για τις σταθερές του τόξου, είναι δυνατό να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ο προτεινόμενος τρόπος υπολογισμού (γενετικός αλγόριθμος) των σταθερών του τόξου είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε συνδυασμό μοντέλου και πειραματικών αποτελεσμάτων, οδηγώντας σε ακριβή υπολογισμό των σταθερών του τόξου. Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στα υπάρχοντα μοντέλα και πειράματα, δείχνουν τη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε μοντέλου με κατάλληλη προσαρμογή στα Α και η και, επιπλέον, υπαγορεύουν την ανάγκη κατηγοριοποίησης των μονωτήρων, ανάλογα με τη μορφή τους και τη βαρύτητα της ρύπανσης στην επιφάνειά τους, έτσι ώστε να ευρεθεί το κατάλληλο ζεύγος τιμών (A, n) ανά κατηγορία μονωτήρων και ρύπανσης.

Συνεπώς, ο γενετικός αλγόριθμος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των σταθερών διάδοσης του τόξου ανά κατηγορία μονωτήρων, οδηγώντας σε εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης με ικανοποιητική ακρίβεια, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός γενικευμένου μοντέλου.

Κεφάλαιο 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Ανακεφαλαίωση της διατριβής

Η παρούσα διατριβή περιλαμβάνει την παρουσίαση της, σχετικής με τους μονωτήρες γραμμών μεταφοράς, βιβλιογραφίας, την περιγραφή των διεξαχθέντων πειραμάτων και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, την πεδιακή προσέγγιση των μονωτήρων, τη μελέτη των παράσιτων χωρητικοτήτων, που αναπτύσσονται σε αλυσοειδείς μονωτήρες, την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης μέσω Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων και Ασαφών Συστημάτων, την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα και την αξιολόγηση των διάφορων μαθηματικών μοντέλων, με παράλληλη βελτιστοποίηση των τιμών των παραμέτρων, που εμπλέκονται στα μοντέλα αυτά.

Τα κύρια σημεία της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι:

- Η πειραματική μελέτη της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την ανάρτηση γραμμών Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσεως.
- Η αξιοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων περί της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης, προκειμένου να υπολογιστούν οι παράσιτες χωρητικότητες ως προς τη γη και ως προς την υψηλή τάση, με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου.
- Η πεδιακή προσέγγιση των μονωτήρων, μέσω της δημιουργίας δισδιάστατων μοντέλων, αξιοποιώντας τη συμμετρία που παρουσιάζουν. Στα μοντέλα αυτά λαμβάνεται υπ' όψιν η πιθανότητα επικάθησης ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων.

- Η πεδιακή προσέγγιση των μονωτήρων, μέσω της δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων, λαμβάνοντας υπ' όψιν μη συμμετρικά στοιχεία πλησίον του μονωτήρα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα πειραμάτων, που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.
- Η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα, με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του και τη ρύπανσή του, με χρήση τόσο τεχνητού νευρωνικού δικτύου, όσο και συστήματος ασαφούς λογικής.
- Η αξιολόγηση υπαρχουσών αναλυτικών μεθοδολογιών υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μονωτήρα και της ρύπανσης. Η σύνθεση αυτών των μεθοδολογιών οδήγησε στον υπολογισμό των σταθερών του τόξου, με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου.
- Η ανάπτυξη πολυκριτηριακής μεθοδολογίας λήψης απόφασης, για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα.

Σκοπός της παρούσας διατριβής, όπως δηλώνεται με τον τίτλο της, είναι η μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων γραμμών μεταφοράς. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων είναι: η μορφή των μονωτήρων, το υλικό κατασκευής τους, το μέγεθός τους, οι παράσιτες χωρητικότητες, που αναπτύσσονται ως προς τη γη και ως προς την υψηλή τάση, το είδος και η ποσότητα της ρύπανσης που επικάθεται στην επιφάνειά τους. Για την ολοκληρωμένη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV και 400kV. Τα πειράματα αυτά, καθώς και προγενέστερα διεξαχθέντα πειράματα, αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθοδολογιών, καθώς και για την επικύρωση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών αυτών.

Όπως διαφάνηκε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ο προσδιορισμός της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα μονωτήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αξιολόγηση και την επιλογή του προς χρήση. Για το λόγο αυτό διεξήχθησαν μετρήσεις για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και του ηλεκτρικού πεδίου σε αλυσοειδείς μονωτήρες, που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV και 400kV. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διερευνήθηκε η επίδραση αφ' ενός μεν του σχήματος και του υλικού κατασκευής του μονωτήρα, αφ' ετέρου δε της επιφανειακής ρύπανσης των μονωτήρων τόσο στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, όσο και στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Οι ληφθείσες μετρήσεις αποτέλεσαν τη βάση για την αξιολόγηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από την πεδιακή επίλυση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης μονωτήρων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Από την επίλυση του κάθε μοντέλου υπολογίζεται το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον μονωτήρα. Οı δισδιάστατες περιβάλλοντα χώρο του προσομοιώσεις εκμεταλλεύονται την αξονική συμμετρία, που παρουσιάζει ένας μονωτήρας. Στις δισδιάστατες προσομοιώσεις, όμως, είναι αδύνατο να συμπεριληφθούν μη συμμετρικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται με το μονωτήρα, όπως η γραμμή μεταφοράς και ο πυλώνας, και επηρεάζουν τόσο την κατανομή της τάσης, όσο και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης των μονωτήρων. Η μοντελοποίηση σε τρεις διαστάσεις επέτρεψε να ληφθούν υπ' όψη μη συμμετρικά στοιχεία, συνδεόμενα με το μονωτήρα, κάτι που οδήγησε σε αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, και διαπιστώθηκε η ιδιαίτερα ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ αυτών, τόσο για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, όσο και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Επιπλέον, όπως αποδείχτηκε από τις προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά στην περίπτωση επίλυσης της εξίσωσης ροής ρεύματος σε συνδυασμό με την εξίσωση Poisson.

Ένα απ' τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται σε μονωτήρες Υψηλής Τάσης, όταν αυτοί λειτουργούν υπό συνθήκες ρύπανσης (βιομηχανικής ή θαλάσσιας), είναι η εμφάνιση του φαινομένου της υπερπήδησης. Συνεπώς, η γνώση των παραμέτρων, από τις οποίες εξαρτάται η υπερπήδηση, καθώς και των κρίσιμων τιμών αυτών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Ο τρόπος, με τον οποίο καθεμιά από τις παραμέτρους αυτές συμβάλλει στην εμφάνιση του φαινομένου, δεν είναι γνωστός και η πολυπλοκότητα του φαινομένου εισάγει αβεβαιότητα, η οποία οδηγεί στη υιοθέτηση προσεγγίσεων. Στο σημείο αυτό τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και η Ασαφής Λογική αποδεικνύονται πολύ χρήσιμα εργαλεία για την εκτίμηση και πρόβλεψη της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης. Προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης υλοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων και Ασαφών Συστημάτων, χρησιμοποιώντας σε κάθε περίπτωση τα ίδια δεδομένα εισόδου. Κρίνοντας, τόσο από την τιμή της συσχέτισης μεταξύ πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών του συνόλου ελέγχου, όσο και από την τιμή των μέσων σφαλμάτων, το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή, είναι δυνατό να εκτιμήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κρίσιμη τάση υπερπήδησης, απ' όση, είτε τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, τα οποία στηρίζονται σε κάποιον από τους υπόλοιπους αλγορίθμους, είτε τα Ασαφή Συστήματα.

Η πολυπλοκότητα, που παρουσιάζει το φαινόμενο της υπερπήδησης, οδήγησε πολλούς ερευνητές στην ανάπτυξη διάφορων μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν αδυναμίες, συνεπώς δεν δίνουν πάντα ακριβή αποτελέσματα. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, ελέγχθηκε η αξιοπιστία μαθηματικών μοντέλων για μονωτήρες μικρού μήκους ερπυσμού με μικρή ποσότητα ρύπανσης (μεγάλη αντίσταση ανά μονάδα μήκους) και για μονωτήρες μεγάλου μήκους ερπυσμού με μεγάλη ποσότητα ρύπανσης (μικρή αντίσταση ανά μονάδα μήκους). Για τα διάφορα μοντέλα υπολογίστηκαν οι βέλτιστες σταθερές διάδοσης του τόξου (A, n) με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου, ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης από τα διάφορα μοντέλα, σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στα υπάρχοντα μοντέλα και πειράματα, δείχνουν τη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε μοντέλου με κατάλληλη προσαρμογή των σταθερών του τόξου (A, n), ανεξάρτητα από τον τύπο του μονωτήρα και τη βαρύτητα της ρύπανσης. Για την προσαρμογή των σταθερών του τόξου είναι απαραίτητη η κατηγοριοποίηση των μονωτήρων, ανάλογα με τη μορφή τους και τη βαρύτητα της ρύπανσης στην επιφάνειά τους. Ο γενετικός αλγόριθμος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των σταθερών διάδοσης του τόξου ανά

κατηγορία μονωτήρων.

Εκτός από την επικύρωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων (πεδιακή προσέγγιση), οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες με χρήση γενετικού αλγορίθμου. Οι παράσιτες χωρητικότητες που εμφανίζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα ως προς γη και ως προς τον αγωγό υψηλής τάσης ευθύνονται για την ανομοιόμορφη κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης κατά μήκος ενός αλυσοειδούς μονωτήρα. Τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στους αλυσοειδείς μονωτήρες συγκλίνουν στις πειραματικές τιμές.

Τέλος, χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία για την επιλογή μονωτήρων, με στόχο την ελαχιστοποίηση της υποκειμενικότητας της απόφασης.

8.2 Συμβολή της διατριβής

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς μονωτήρων υψηλής τάσης, προκύπτει συσχετίζοντας τα εκτεθέντα στο τέλος κάθε ενότητας κυριότερα συμπεράσματά της με τις αντίστοιχες εργασίες άλλων ερευνητών, που ορίζουν το σημερινό επίπεδο γνώσεων στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορεί εν συντομία να συνοψιστεί στα ακόλουθα:

<u>Πειραματικό μέρος</u>

Πραγματοποιήθηκαν σειρές πειραμάτων για την εύρεση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε ρυπασμένους ή μη αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, καθώς και για την εύρεση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου σε ρυπασμένους ή μη αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV και 400kV. Οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συμβάλλουν σημαντικά στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων αποδεικνύοντας την επίδραση του υλικού κατασκευής του μονωτήρα, του σχήματός του και της θέσης τοποθέτησής του. Η διεξαγωγή τους

σε δοκίμια, τα οποία χρησιμοποιούνται στην πράξη για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ενισχύει την χρησιμότητα τους και αποτελεί συμβολή – πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής.

- Όσον αφορά στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, ο πλησιέστερος προς τον αγωγό υψηλής τάσης δισκοειδής μονωτήρας καταπονείται με μεγαλύτερο ποσοστό της τάσης, σε σχέση με τους υπόλοιπους μονωτήρες, ενώ, σταδιακά, η καταπόνηση των δισκοειδών μονωτήρων μειώνεται πλησιάζοντας προς τον πυλώνα, πλην, όμως, το ποσοστό της επιβαλλόμενης τάσης στον πρώτο ή σε καθένα από τους δύο πρώτους δισκοειδείς μονωτήρες (πλησίον του πυλώνα) είναι αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό του αμέσως επόμενου δισκοειδούς μονωτήρα. Αυτό οφείλεται στις τιμές, που λαμβάνουν οι παράσιτες χωρητικοτήτες ως προς τον αγωγό υψηλής τάσης και τον πυλώνα στους δισκοειδείς μονωτήρες πλησίον του πυλώνα (αύξηση της Ce, μείωση της Ch, άρα η ανισότητα μεταξύ των δύο αυτών παρασίτων χωρητικοτήτων επιτείνεται). Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα τείνει να γίνει πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή σε καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα. Αν και η επιδίωξη για ομοιόμορφη κατανομή φαίνεται να ικανοποιείται με την επικάθηση ρύπανσης, η ταυτόχρονη αύξηση των απωλειών ισχύος, η μείωση της κρίσιμης έντασης και ο κίνδυνος ανωμαλιών καθιστούν, προφανώς, ανεπιθύμητη την ύπαρξη ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων.
- Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σχετίζεται άμεσα με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, με αποτέλεσμα όσο πιο ομοιόμορφη είναι η κατανομή της τάσης, τόσο μικρότερες είναι οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.
- Όσον αφορά στη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, παρατηρείται ότι η απομάκρυνση από τον αγωγό υψηλής τάσης, είτε στο κάθετο, είτε στο οριζόντιο επίπεδο, οδηγεί σε μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Οι μετρήσεις αυτές συνέβαλαν στην επαλήθευση των προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.
- Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διαφάνηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και του υλικού κατασκευής του μονωτήρα τόσο στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης, όσο και στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, γεγονός το οποίο αποτέλεσε πολύτιμη πληροφορία για τη

βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων, που ακολούθησαν. Ο αλυσοειδής μονωτήρας με τις μεγαλύτερες διαστάσεις εμφανίζει πιο ομοιόμορφη κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης και, συνεπώς, μικρότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου. Επίσης, ο μονωτήρας υάλου παρουσιάζει πιο ομοιόμορφη κατανομή, συγκρινόμενος με μονωτήρα πορσελάνης ιδίων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

- Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες σειρές μετρήσεων για την κατανομή της τάσης και υπολογίστηκε η μέση τιμή και η διασπορά τους. Η μικρή διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων αποδεικνύει την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητά τους, αποτελεί δε ένδειξη, τουλάχιστον, για την ακρίβειά τους.
- Οι ληφθείσες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν αφ' ενός μεν για την επικύρωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής, τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση των αλυσοειδών μονωτήρων, αφ' ετέρου δε για την ανάπτυξη μίας νέας μεθοδολογίας υπολογισμού των παράσιτων χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες.

Πεδιακές προσομοιώσεις

- Προτάθηκαν και επιλύθηκαν δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια και αποτελούν αρωγό στην επιλογή του σωστού τύπου μονωτήρα για κάθε εφαρμογή. Η επίλυσή τους έγινε με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να υπολογιστεί το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο του μονωτήρα.
- Σε όλες τις προσομοιώσεις επιχειρήθηκε, με ικανοποιητικά αποτελέσματα, η βελτιστοποίηση του τρόπου μοντελοποίησης μονωτήρων υψηλής τάσης. Προς επίτευξη τούτου, ελέγχθηκε η επίδραση του μεγέθους του περιβάλλοντα χώρου του μονωτήρα, του οποίου η εξωτερική επιφάνεια θεωρήθηκε γειωμένη (άπειρη γη), αυξήθηκε κατάλληλα το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων σε κρίσιμες περιοχές του μοντέλου και βελτιώθηκε ο τρόπος σχεδίασης του μοντέλου. Στις δισδιάστατες προσομοιώσεις αξιοποιήθηκε, επιπλέον, η αξονική συμμετρία, που παρουσιάζει ένας μονωτήρας.
- Η ανάγκη δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης προέκυψε από την αδυναμία προσομοίωσης σε δύο διαστάσεις μη συμμετρικών στοιχείων,

συνδεόμενων με το μονωτήρα (γραμμή μεταφοράς και πυλώνας). Παράλληλα, η σύγκριση μεταξύ δισδιάστατων, τρισδιάστατων μοντέλων και πειραματικών αποτελεσμάτων επέτρεψε τη διερεύνηση του σφάλματος που υπεισέρχεται από τη χρήση δισδιάστατων μοντέλων προσομοίωσης των μονωτήρων.

- Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των μοντέλων ο ηλεκτροστατικός επιλύτης, ο οποίος λαμβάνει υπ' όψιν την επιτρεπτότητα, αλλά αγνοεί την αγωγιμότητα των υλικών. Ο επιλύτης αυτός είναι δυνατό να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο με κατάλληλη προσαρμογή της τιμής της επιτρεπτότητας των μεταλλικών μερών του μονωτήρα, ενώ είναι ακατάλληλος για την προσομοίωση της ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων. Η διαπίστωση της συγκεκριμένης αδυναμίας του ηλεκτροστατικού επιλύτη έγινε αποδεκτή από την εταιρεία ανάπτυξης του προγράμματος Opera, οδηγώντας την στη δημιουργία ενός νέου επιλύτη, ο οποίος στηρίζεται σε επαλληλία του ηλεκτροστατικού προβλήματος και του προβλήματος ροής φορτίου, δίνοντας τη δυνατότητα συγκεκριμένος επιλύτης (lossy dielectrics) είναι διαθέσιμος μόνο για την επίλυση δισδιάστατων προβλημάτων, ενώ στο άμεσο μέλλον θα είναι διαθέσιμος και για τρισδιάστατες προσομοιώσεις.
- Η αξιοπιστία των μοντέλων ενισχύεται από το γεγονός ότι, τα αποτελέσματα για την κατανομή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που προέκυψαν από το ίδιο μοντέλο προσομοίωσης, συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν από δύο διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες. Η σύγκλιση των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα οδηγεί στη σκέψη ότι, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ενός μονωτήρα, δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα. Παράλληλα, αποτελέσματα προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με υπολογιστικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών, οι οποίοι χρησιμοποιούν τη μέθοδο οριακών στοιχείων. Από τη σύγκριση αυτή διαπιστώθηκε η ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων, παρ' ότι η μεθοδολογία επίλυσης ήταν διαφορετική. Η διαδικασία δημιουργίας και βελτιστοποίησης των μοντέλων προσομοίωσης αποτελεί στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής.

<u>Εμπειρα συστήματα</u>

- Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μεθοδολογία για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και τη ρύπανση. Προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων και Ασαφών Συστημάτων, χρησιμοποιώντας, σε κάθε περίπτωση, τα ίδια δεδομένα εισόδου.
- Η συμβολή πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής στην εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης έγκειται στη χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, κατάλληλα διαμορφωμένων για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Η διερεύνηση για την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου επεκτάθηκε, πέραν της χρήσης έτοιμων εργαλείων διαθέσιμων σε πακέτα λογισμικού, στην κατάλληλη τροποποίηση λογισμικού, η οποία επιτρέπει την πλήρη επέμβαση στις παραμέτρους του Νευρωνικού Δικτύου.
- Προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, ελέγχθηκε αφ' ενός μεν πλήθος τεχνικών εκπαίδευσης, τόσο τεχνητών νευρωνικών δικτύων, όσο και ασαφών συστημάτων, αφ' ετέρου δε δοκιμάστηκε πλήθος τιμών των παραμέτρων της κάθε μιας μεθόδου, με στόχο τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, που είναι δυνατό να προκύψουν από την κάθε μέθοδο.
- Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις διάφορες μεθοδολογίες, προέκυψε ότι το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο βαθμωτής συζευγμένης μεταβολής κλίσης με εκπαίδευση ανά εποχή, αποτελεί τη βέλτιστη μέθοδο για την εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης (ίδετε και §8.1). Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών, που επιτεύχθηκε από την επιλεχθείσα μέθοδο, κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικός, καθώς πλησιάζει τη μονάδα.
- Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων και των ασαφών συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα, που προέκυψαν από πειράματα διεξαχθέντα τόσο από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., όσο

και από άλλους ερευνητές, γεγονός το οποίο διευρύνει το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου εκτίμησης της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης.

Κυκλωματική – μαθηματική προσέγγιση

- Η υπερπήδηση αποτελεί ένα μη γραμμικό φαινόμενο, το οποίο είναι δυναμικό στην εξέλιξή του και επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας του μονωτήρα.
 Η πολυπλοκότητα του φαινομένου της υπερπήδησης καθιστά ανέφικτη τη δημιουργία ενός κυκλωματικού μοντέλου, που να εφαρμόζεται σε όλους τους μονωτήρες δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα και ελέγχθηκε η αξιοπιστία τους. Η διαπίστωση της σημαντικής επίδρασης των σταθερών διάδοσης του τόξου (A, n) στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων κάθε μοντέλου οδήγησε στην ανάγκη υπολογισμού των σταθερών αυτών με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Οι βέλτιστες σταθερές διάδοσης του τόξου (A, n) επιλέχθηκαν, ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα υπολογισμού της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης από τα διάφορα μοντέλα, σε σχέση με τις πειραματικές τιμές. Το σφάλμα μεταξύ πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών μειώθηκε σημαντικά με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου, αποτελώντας στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής.
- Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στα υπάρχοντα μοντέλα και πειράματα, δείχνουν τη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε μοντέλου, με κατάλληλη προσαρμογή στα A και n και, επιπλέον, υπαγορεύουν την ανάγκη κατηγοριοποίησης των μονωτήρων, ανάλογα με τη μορφή τους και τη βαρύτητα της ρύπανσης στην επιφάνειά τους, έτσι ώστε να ευρεθεί το κατάλληλο ζεύγος τιμών (A, n) ανά κατηγορία μονωτήρων και ρύπανσης.
- Ο γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποιήθηκε αφ' ενός μεν επιλέγοντας την κατάλληλη εξίσωση προσαρμογής (μεταξύ των συναρτήσεων απολύτου σφάλματος, σχετικού απολύτου σφάλματος, μεγίστου απολύτου σφάλματος και τετραγωνικού σφάλματος) για τη σύγκλιση, αφ' ετέρου δε ελέγχοντας τόσο τον αρχικό πληθυσμό, όσο και τους γονείς που συμμετέχουν στην αναπαραγωγή, με

αποτέλεσμα να συγκλίνει σε μικρό αριθμό επαναλήψεων και με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης.

Ο προτεινόμενος τρόπος υπολογισμού (γενετικός αλγόριθμος) των σταθερών του τόξου είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε συνδυασμό μοντέλου και πειραματικών αποτελεσμάτων οδηγώντας σε ακριβή υπολογισμό των σταθερών του τόξου. Συνεπώς, ο γενετικός αλγόριθμος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των σταθερών διάδοσης του τόξου ανά κατηγορία μονωτήρων, οδηγώντας σε εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης με ικανοποιητική ακρίβεια, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός γενικευμένου μοντέλου.

<u>Άλλες εφαρμογές</u>

- 1. Μελέτη παράσιτων χωρητικοτήτων σε αλυσοειδείς μονωτήρες
 - Με τη βοήθεια των πειραματικών αποτελεσμάτων για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σε αλυσοειδείς μονωτήρες και τη χρήση γενετικού αλγορίθμου υπολογίσθηκαν οι παράσιτες χωρητικότητες ως προς τον πυλώνα (γη) και ως προς τον αγωγό υψηλής τάσης.
 - Η (κύρια) χωρητικότητα C του μονωτήρα εξαρτάται, προφανώς και κυρίως, από το υλικό κατασκευής του, το μέγεθος και το σχήμα του, ενώ οι παράσιτες χωρητικότητες C_e και C_h επηρεάζονται σημαντικά από αντικείμενα ευρισκόμενα πλησίον του αλυσοειδούς μονωτήρα. Συνεπώς, για να γίνει εφικτός ο καθορισμός των τιμών των χωρητικοτήτων (κυρίας και παρασίτων) είναι απαραίτητο να κατηγοριοποιηθούν οι μονωτήρες ανάλογα με τη μορφή και το υλικό κατασκευής τους και να διεξαχθούν πειράματα σε αυτούς. Με δεδομένο ότι, τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για την κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στους αλυσοειδείς μονωτήρες συγκλίνουν ικανοποιητικά με τις πειραματικές τιμές, η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό των χωρητικοτήτων (κυρίας και παρασίτων) μέσω γενετικού αλγορίθμου αποτελεί στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής.
 - Η γνώση του εύρους τιμών των χωρητικοτήτων ανά κατηγορία μονωτήρων καθιστά δυνατό τον υπολογισμό των ορίων, εντός των οποίων λαμβάνει τιμές η τάση καταπόνησης ανά δισκοειδή μονωτήρα, πληροφορία ιδιαίτερα χρήσιμη για τη σωστή διαστασιοποίηση της μόνωσης των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

- 2. Επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα
 - Η επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα για κάθε εφαρμογή αποτελεί ένα πρόβλημα λήψης απόφασης, η οποία είναι απαραίτητο να βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια και να είναι κατά το δυνατό αντικειμενική. Για την αποφυγή της υποκειμενικότητας, αναπτύχθηκε μία πολυκριτηριακή μεθοδολογία λήψης απόφασης για την επιλογή του βέλτιστου τύπου μονωτήρα. Στη μέθοδο αυτή τα διάφορα κριτήρια ποσοτικοποιούνται, ενώ, παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης επιπλέον κριτηρίων.

8.3 Επέκταση της διατριβής

Κλείνοντας, παρατίθενται κάποιες σκέψεις, οι οποίες θα μπορούσαν να υλοποιηθούν, στα πλαίσια μίας ενδεχόμενης επέκτασης της παρούσας διατριβής.

Η δυνατότητα για ελεγχόμενες συνθήκες ρύπανσης καθιστά δυνατή τη μέτρηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης για διάφορα επίπεδα ρύπανσης και διάφορα είδη μονωτήρων. Τα στοιχεία αυτά θα ήταν χρήσιμο να συμπεριληφθούν στο προτεινόμενο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, ώστε να αυξηθεί η ακρίβειά του και να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής του.

Η δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων στο πεδίο λειτουργίας των μονωτήρων θα επιτρέψει τη συλλογή πειραματικών αποτελεσμάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των αλυσοειδών μονωτήρων, εξαλείφοντας ή εν πάση περιπτώσει ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα επίδρασης γειτονικών αντικειμένων στην ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων. Επίσης, η δυνατότητα μέτρησης της κατανομής της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου υπό συνθήκες φυσικής ρύπανσης θα οδηγήσει σε συμπεράσματα περί της συσχέτισης μεταξύ ρύπανσης αφ' ετέρου, ενώ παράλληλα θα επιτρέψει τη μοντελοποίηση της ρύπανσης.

Όπως αποδείχτηκε από τη διαδικασία προσομοίωσης των μονωτήρων, στα αποτελέσματα επιδρά σημαντικά η επιτρεπτότητα των υλικών. Το διάστημα τιμών της επιτρεπτότητας κάθε εμπορικά διαθέσιμου υλικού είναι αρκετά ευρύ, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ιδιαίτερη σύνθεση του κάθε εμπορικού υλικού ανάλογα με την εφαρμογή του. Η δυνατότητα χρήσης πειραματικών τιμών για την επιτρεπτότητα του κάθε υλικού θα βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Η διεξαγωγή πειραμάτων για εύρεση της τιμής της επιτρεπτότητας των εμπορικών υλικών, σε συνδυασμό με τη γνώση της ακριβούς εσωτερικής δομής των μονωτήρων, είναι δυνατό να επιτευχθεί, υπό την προϋπόθεση συνεργασίας με τις εταιρίες κατασκευής των μονωτήρων.

Τέλος, η ενσωμάτωση στο τρισδιάστατο πρόγραμμα προσομοίωσης Opera-3d του κατάλληλου επιλύτη για την ταυτόχρονη επίλυση του ηλεκτροστατικού προβλήματος και του προβλήματος ροής ρεύματος αναμένεται να γίνει από την εταιρεία υποστήριξης του λογισμικού. Η χρήση του θα μειώσει το σφάλμα των μοντέλων προσομοίωσης, ενώ θα είναι δυνατή η μοντελοποίηση της ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων σε τρεις διαστάσεις. Παράλληλα, είναι δυνατή η δημιουργία υβριδικών προγραμμάτων προσομοίωσης, τα οποία θα συνδυάζουν περισσότερες της μίας αριθμητικές μεθόδους επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

- J.S.T. Looms, "Insulators for high voltages", Peter Peregrinus Ltd., London, Unighted Kingdom, 1990.
- [2] Κ.Θ. Δέρβος, "Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων", Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2001.
- [3] J.P. Holtzhausen, "High voltage insulators", Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.idc-online.com/assets/files/highvoltage.pdf.
- [4] Ι.Α. Σταθόπουλος, "Υψηλές Τάσεις Ι", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [5] IEC 815, "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions", 1986.
- [6] J. Mackevich, M. Shah, "Polymer outdoor insulating materials: Part I-Comparison of porcelain and polymer electrical insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, May/June1997, pp. 5-12.
- S.S. Bamji, "Electroluminescence A Technique to Detect the Initiation of Degradation in Polymeric Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No. 3, May/June 1999, pp. 9-14.
- [8] I.C. McNeill, "Fundamental Aspects of Polymer Degradation", Polymer Research Group, Chemistry Department, University of Glasgow.
- [9] C. Beisele, B. Kultzow, "Experiences with New Hydrophobic Cycloaliphatic Epoxy Outdoor Insulation Systems", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 17, No. 4, July/August 2001, pp. 33-39.
- [10] A.H. El-Hag, S.H. Jayaram, E.A. Cherney, "Influence of shed parameters on the aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 4, August 2003, pp. 655-664.
- [11] S.S. Bamji, A.T. Bulinski, R.J. Densley, "Degradation of polymeric insulation due to photoemission caused by high electric field", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 1, February 1989, pp. 91-98.
- [12] S.M. de Oliveira, C.H. de Tourreil, "Aging of distribution composite insulators under environmental and electrical stresses", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp. 1074-1077.

- [13] C.H. de Tourreil, P.J. Lambeth, "Aging of composite insulators: Simulation by electrical tests", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1558-1567.
- [14] T. Zhao, A. Bernstorf, "Ageing tests of polymeric housing materials for nonceramic insulators", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, No. 2, March/April 1998, pp. 26-33.
- [15] T.G. Gustavsson, S.M. Gubanski, H. Hillborg, S. Karlsson, U.W. Gedde, "Aging of silicone rubber under ac or dc voltages in a coastal environment", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 6, December 2001, pp. 1029-1039.
- [16] A.E. Vlastos, E. Sherif, "Natural ageing of EPDM composite insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990, pp. 406-414.
- [17] S.H. Kim, E.A. Cherney, R. Hackam, "Hydrophobic behavior of insulators coated with RTV silicone rubber", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, June 1992, pp. 610-622.
- [18] R. Hartings, "The AC-Behavior of a hydrophilic and hydrophobic post insulator during rain", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1584-1592.
- [19] Κ. Σιδεράκης, Ε. Θαλασσινάκης, Μ. Σιδερής, Δ. Αγορής, "Μηχανισμός ανάκαμψης της επιφανειακής υδροφοβίας λόγω της διάχυσης μορίων χαμηλού μοριακού βάρους σε επικαλύψεις RTV silicone rubber", Σύνοδος Αθήνα 2003, Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 27-28 Νοεμβρίου 2003.
- [20] S. Wang, X. Liang, Z. Cheng, X. Wang, Z. Li, Y. Zhou, Y. Yin, L. Wang, Z. Guan, "Hydrophobicity changing of silicone rubber insulators in service", CIGRE Session 2002, Paris, 26-30 August 2002, pp. 15 305.
- [21] K. Ikeda, M. Ito, T. Sanpei, R. Matsuoka, K. Kondo, S. Ito, "Evaluation methods of contamination flashover voltages of hydrophobic polymer insulators", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [22] STRI Guide, "Hydrophobicity Classification Guide", 1992.
- [23] IEC/TS 62073, "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces", 2003.

- [24] F.A.M. Rizk, "Mathematical models for pollution flashover", Electra, No. 78, October 1981, pp. 71-103.
- [25] F. Obenhaus, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Electrotechnik, Vol. 4, 1958, pp. 135-136.
- [26] G.I. Theodorakis, F.V. Topalis, I.A. Stathopulos, "Parameter identification of the polluted insulator model", Proceedings of international symposium on simulation and modelling, Lugano, Switzerland 1989, pp. 103-106.
- [27] I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopulos, "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.
- [28] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss, Berlin, Vol. 1, 1959, pp. 352-359.
- [29] L.L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of discharges on polluted insulation", Proc. IEE, Vol. 110, No. 7, July 1963, pp. 1260-1266.
- [30] B.F. Hampton, "Flashover mechanism of polluted insulation", Proc. IEE, Vol. 11, No. 5, July 1964, pp. 985-990.
- [31] R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films", Proc. IEE, Vol. 116, No. 3, March 1969, pp. 457-465.
- [32] P.S. Ghosh, N. Chatterjee, "Arc propagation over electrolytic surfaces under power frequency voltages", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 4, August 1996, pp. 529-536.
- [33] G. Zhicheng, Z. Renyu, "Calculation of dc and ac flashover voltage of polluted insulators", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 4, August 1990, pp. 723-729.
- [34] R. Sundararajan, R.S. Gorur, "Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 2, April 1993, pp. 209-218.
- [35] R. Sundararajan, R.S. Gorur, "Effect of insulator profiles on dc flashover voltage under polluted conditions - A study using a dynamic arc model", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 1, February 1994, pp. 124-132.

- [36] P.S. Ghosh, N. Chatterjee, "Polluted insulator flashover model for ac voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, February, 1995, pp. 128-136.
- [37] I.S. Hussain, S. Jaafar, P.S. Ghosh, S.A.K. Aljunid, "A new mathematical model to estimate critical flashover current of polluted insulator under power frequency voltages", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [38] M. Farzaneh, J. Zhang, X. Chen, "Modeling of the AC arc discharge on ice surfaces", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 325-338.
- [39] F.A.M. Rizk, A.Q. Rezazada, "Modeling of alitude effects on AC flashover of polluted high voltage insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997, pp. 810-822.
- [40] N. Dhahbi-Megriche, A. Beroual, L. Krähenbühl, "A new proposal model for flashover of polluted insulators", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 30, No. 5, March 1997, pp. 889-894.
- [41] N. Dhahbi-Megriche, A. Beroual, "Flashover dynamic model of polluted insulators under ac voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, April 2000, pp. 283-289.
- [42] I.F. Gonos, S.A. Suflis, F.V. Topalis, I.A. Stathopulos, "Computer methods for the determination of the critical parameters of polluted insulators", Proceedings of the 1st Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution (MEDPOWER '98), Session 7, Insulation Co-ordination and Optimisation, Lefkosia, (Nicosia), Cyprus, 16 – 18 November 1998.
- [43] R.J. Xavier, Y.N. Rao, "Study of surface conductivity and E.S.D.D. on contaminated porcelain insulating surfaces", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, August 1987, Vol. II, paper 51.12.
- [44] I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopulos, "A model for the flashover process on non-uniformly polluted insulators", International Journal of Modelling and Simulation, Vol. 22, No. 3, 2002, pp. 137-141.

- [45] S.A. Suflis, I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopulos, "Study of the dielectric behaviour of non-uniformly polluted insulators", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [46] IEC 507, "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems", 1991.
- [47] CIGRE Working Group 04 of Study Committee No. 33, "The measurement of site pollution severity and its application to insulator dimensioning for A.C. systems", Electra No. 64, May 1979, pp. 101-116.
- [48] IEC 1109, "Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V – Definitions, test methods and acceptance criteria", 1992.
- [49] K. Takasu, T. Shindo, N. Arai, "Natural contamination test of insulators with dc voltage energization at inland areas", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1847-1853.
- [50] M. Akbar, F. Zeban, "Performance of HV transmission line insulators in desert conditions (PART III: Polution measurements at a coastal site in the eastern region of Saudi Arabia)", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991, pp. 429-438.
- [51] F. Zeban, M. Akbar, "Performance of HV transmission line insulators in desert conditions (PART IV: Study of insulators at a semicoastal site in the eastern region of Saudi Arabia)", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991, pp. 439-447.
- [52] X. Lin, Z. Chen, X. Liu, K. Chu, K. Morita, R. Matsuoka, S. Ito, "Natural insulator contamination test results on various shed shapes in heavy industrial contamination", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, June 1992, pp. 593-600.
- [53] G.N. Ramos, M.T.R. Campillo, K. Naito, "A study on the characteristics of various conductive contaminants accumulated on high voltage insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, October 1993, pp. 1842-1850.
- [54] C.S. Richards, C.L. Benner, K.L. Butler-Purry, B. Don Russell, "Electrical behavior of contaminated distribution insulators exposed to natural wetting",

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, April 2003, pp. 551-558.

- [55] W.L. Vosloo, J.P. Holtzhausen, "Insulator pollution and wetting processes at a severe coastal site", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [56] J. Stefanakis, E. Thalassinakis, K. Siderakis, D. Agoris, E. Dialynas, "Fighting pollution in the Cretan Transmission System – 25 years of experience", Contamination Issues on High Voltage Installations (CIHVI), Conference, Heraklion Crete, Greece, April 2001.
- [57] D.S. McIlhagger, "Simultaneous measurement of surface tempeature and potential distribution over electrically stressed high-voltage insulators", Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E), Vol. 2, No. 2, 1969, pp. 741-742.
- [58] CIGRE Working Group 04 of Study Committee 33, "A critical comparison of artificial pollution test methods for HV insulators", Electra, No. 64, May 1979, pp. 117-136.
- [59] K. Ikonomou, G. Katsibokis, A. Kravaritis, I.A. Stathopulos, "Cool fog tests on artificially polluted insulators", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, August 1987, Vol. II, paper 52.13.
- [60] R.S. Gorur, E.A. Cherney, R. Hackam, "The AC and DC performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1892-1902.
- [61] R.S. Gorur, E.A. Cherney, R. Hackam, T. Orbeck, "The electrical performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 1157-1164.
- [62] R.S. Gorur, E.A. Cherney, R. Hackam, "Polymer insulator profiles evaluated in a fog chamber", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp. 1078-1085.

- [63] S.H. Kim, E.A. Cherney, R. Hackam, "The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coatings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1491-1500.
- [64] C.S. Engelbrecht, R. Hartings, H. Tunell, B. Engström, H. Janssen R. Hennings, "Pollution tests for coastal conditions on an 800kV composite bushing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, July 2003, pp. 953-959.
- [65] C.S. Engelbrecht, R. Hartings, B. Engström, D. Hübinette, K. Halsan, "The Dry-Salt-Layer method, a laboratory pollution test-method for marine pollution: Its repeatability and a comparison of field and laboratory results", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [66] A.S.H.A. Hamza, N.M.K. Abdelgawad, B.A. Arafa, "Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators", Energy Conversion & Management, Elsevier Science Ltd., Vol. 43, No. 17, November 2002, pp. 2437-2442.
- [67] P.T. Tsarabaris, P.G. Halaris, A.D. Polykrati, C.G. Karagiannopoulos, P.D. Bourkas, "Radiation emission phenomena in 20kV high voltage porcelain insulators", Proceedings of the Fourth IASTED International Conference Power and Energy Systems, Rhodes, Greece, June 2004.
- [68] S.V. Hörnfeldt, "DC probes for electric field distribution measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April 1991, pp. 524-529.
- [69] CIGRE Working Group 03 of Study Committee 22, "Comparative electric field calculations and measurements on high voltage insulators", Electra, No. 141, April 1992, pp. 69-77.
- [70] R. Hartings, "Electric field along a post insulator: AC measurements and calculations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp. 912-918.
- [71] D.C. Chaurasia, "Scintillation modelling for insulator strings under polluted conditions", XIth International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, August 1999, pp. 23-27.

- [72] F.A.M. Rizk, D.H. Nguyen, "AC source-insulator interaction in HV pollution tests", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 4, April 1984, pp. 723-732.
- [73] F.A.M. Rizk, D.H. Nguyen, "Digital simulation of source-insulator interaction in HVDC pollution tests", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, January 1988, pp. 405-410.
- [74] M. Khalifa, A. Mahdy, A. Haq Qureshi, "A simplified model for A.C. flashover of polluted insulators", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, No. 51.07, August 1987, Braunschweig, Germany.
- [75] Σ.Α. Σουφλής, Ι.Φ. Γκόνος, Φ.Β. Τοπαλής, Ι.Α.Σταθόπουλος, "Απλοποιημένο μοντέλο υπερπήδησης ρυπασμένων μονωτήρων υπό εναλλασσόμενη τάση", Σύνοδος Αθήνα '99, Ε.Ε. CIGRE, Δεκέμβριος 1999.
- [76] F.V. Topalis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "Dielectric behaviour of polluted porcelain insulators", IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 4, July 2001, pp. 269-274.
- [77] A.D. Tsanakas, G.I. Papaefthimiou, D.P. Agoris, "An approach to the affect of rainfall on the pollution performance of insulators in island networks", Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, August 1999.
- [78] P.T. Tsarabaris, C.G. Karagiannopoulos, N.J. Theodorou, "A model for high voltage polluted insulators suffering arcs and partial discharges", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 13, Issue 2, February 2005, pp.157-167.
- [79] P.T. Tsarabaris, C.G. Karagiannopoulos, N.J. Theodorou, "An experimental investigation of leakage current on high voltage contaminated insulators", EuroPES 2nd IASTED International Conference, June 2002, Crete, Greece.
- [80] K. Siderakis, D. Agoris, E. Pyrgioti, E Thalassinakis, "Investigation of leakage current on high voltage insulators. Field measurements", WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 3, Issue 5, July 2004, pp. 1188-1191.
- [81] K. Siderakis, D. Agoris, E Thalassinakis, "Field measurements of leakage current on porcelain and RTV silicone rubber coated insulators", Proceedings of the fourth IASTED International Conference Power and Energy Systems, June 2004, Rhodes, Greece, pp. 472-477.

- [82] J.L. Rasolonjanahary, L. Krähenbühl, A. Nicolas, "Computation of electric fields and potential on polluted insulaors using a boundary element method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 2, March 1992, pp. 1473-1476.
- [83] S. Chakravorti, P.K. Mukherjee, "Power frequency and impulse field calculation around a HV insulator with uniform or nonuniform surface pollution", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 1, February 1993, pp. 43-53.
- [84] A. Skopec, J.G. Wankowicz, B. Sikorski, "Electric field calculation for an axially-symmetric insulator with surface contamination", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 2, April 1994, pp. 332-339.
- [85] E.S. Asenjo, N.O. Morales, A.E. Valdenegro, "Solution of low frequency complex fields in polluted insuators by means of the finite element method", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 1, February 1997, pp. 10-16.
- [86] T. Zhao, M.G. Comber, "Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and trnsmission towers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp. 313-318.
- [87] N. Morales, E. Asenjo, A. Valdenegro, "Field solution in polluted insulators with non- symmetric boundary conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 2, April 2001, pp. 168-172.
- [88] I. Sebestyén, "Electric-field calculation for HV insulators using domaindecomposotion method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, March 2002, pp. 1213-1216.
- [89] W. Que, S.A. Sedo, "Typical cases of electric field and voltage distribution calculations along composite insulators under dry and wet conditions", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [90] W. Que, S.A. Sedo, "Discussions of possible simplifications for electric field and voltage distribution calculations along composite insulators", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.

- [91] W. Que, S.A. Sebo, "Electric field and potential distributions along dry and clean non-ceramic insulators", Department of Electrical Engineering, The Ohio State University, Columbus, U.S.A., Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.integratedsoft.com/Papers/research/Coulomb_High_Voltage_paper .pdf.
- [92] R. Gorur, B. Olsen, A. Kroese, F. Cook, S.S. Kumar, "Evaluation of critical components of non-ceramic insulators in service: Role of defective interfaces", Final Project Report, Power Systems Engineering Research Center, PSERC Publication 04-32, August 2004.
- [93] P.S. Ghosh, S. Chakravorti, N. Chatterjee, "Estimation of time-to-flashover characteristics of contaminated electrolytic surfaces using a Neural Network", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 6, December 1995, pp. 1064-1074.
- [94] Paul Cline, Will Lannes, Gill Richards, "Use of pollution monitors with a neural network to predict insulator flashover", Electric Power Systems Research, Elsevier Science Ltd., Vol. 42, No. 1, July 1997, pp. 27-33.
- [95] M. Ugur, D.W. Auckland, B.R. Varlow, Z. Emin, "Neural networks to analyse surface tracking on solid insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 6, December 1997, pp. 763-766.
- [96] S. Ghosh, N.K. Kishore, "Modeling PD inception voltage of epoxy resin post insulators using an adaptive neural network", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 1, February 1999, pp. 131-134.
- [97] Ahmad S. Ahmad, P.S. Ghosh, Syed Abdul Kader Aljunid, Hussein Ahmad Ismail Said, Halil Hussain, "Artificial neural network for contamination severity assessment of high voltage insulators under various meteorological conditions", AUPEC, Perth, September 2001.
- [98] Pradipkumar Dixit, H.G. Gopal, "ANN based three stage classification of arc gradient of contaminated porcelain insulators", International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, July 2004.
- [99] Ali Naderian Jahromi, Ayman H. El-Hag, Shesha H. Jayaram, Edward A. Cherney, M. Sanaye-Pasand, Hosein Mohseni, "A neural network based

method for leakage current prediction of polymeric insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 506-507.

- [100] Ali Naderian Jahromi, Ayman H. El-Hag, Shesha H. Jayaram, Edward A. Cherney, M. Sanaye-Pasand, Hosein Mohseni, "Prediction of leakage current of composite insulators in salt fog test using neural network", 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [101] A. Chatterjee, A. Rakshit, P.K. Mukherjee, "A self-organizing fuzzy inference system for electric field optimization of HV electrode systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 6, December 2001, pp. 995-1002.
- [102] A. Cavallini, G.C. Montanari, F. Puletti, "A fuzzy logic algorithm to detect electric trees in polymeric insulation systems", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 6, December 2005, pp. 1134-1144.
- [103] IEC 60060-1, "High voltage test technique, Part 1: General Definitions and test requirements", November 1989.
- [104] IEC 60060-2, "High voltage test technique, Part 2: Measuring systems", November 1994.
- [105] PMM 8053A: System for the electromagnetic fields measurement, User's Manual, PMM 2004.
- [106] Vector Fields, "OPERA-2d Reference Manual", Vector Fields Limited, England, November 2004.
- [107] Vector Fields, "OPERA-3d Reference Manual", Vector Fields Limited, England, November 2004.
- [108] S.M. Al Dhalaan, M.A. Elhirbawy, "Simulation of voltage distribution calculation methods over a string of suspension insulators", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, Texas, 7-12 September 2003, Vol. 3, pp. 909-914.
- [109] S.M. Al Dhalaan, M.A. Elhirbawy, "Investigation on the characteristics of a string of insulator due to the effect of dirt", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, Texas, 7-12 September 2003, Vol. 3, pp. 915-920.
- [110] A.S.A. Farag, F.M. Zedan, T.C. Cheng, "Analytical studies of HV insulators in Saudi Arabia: Theoretical aspects", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 3, June 1993, pp. 379-391.
- [111] W. Sima, F.P. Espino-Cortes, Edward A. Cherney, Shesha H. Jayaram, "Optimization of corona ring design for long-rod insulators using FEM based computational analysis", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, 19-22 September 2004, pp. 480-483.
- [112] Ι. Βλαχάβας, Π. Κεφαλάς, Ν. Βασιλειάδης, Ι. Ρεφανίδης, Φ. Κόκκορας, Η. Σακελλαρίου, "Τεχνητή Νοημοσύνη", Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη, 2002.
- [113] I.F. Gonos, N.C. Ilia, V.T. Kontargyri, I.A. Stathopulos, "Application of a genetic algorithm for calculating the capacitances on an insulator string", Computational Methods in Circuits and Systems Applications, Word Scientific and Engineering Society, 2003, pp. 333-337.
- [114] Σ.Γ. Τζαφέστας, "Υπολογιστική Νοημοσύνη", Τόμος Α: Μεθοδολογίες, Αθήνα 2002.
- [115] Αριστείδης Λύκας, "Υπολογιστική Νοημοσύνη", Ιωάννινα, Σεπτέμβριος 1999.
- [116] Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, "Συμβολή στη βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και ενέργειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μεθόδων αναγνώρισης πρότυπων", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Ιούνιος 2006.
- [117] M. Riedmiller, H. Braun, "A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm", Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 1, San Francisco, March 1993, pp. 586-591.
- [118] L.M. Saini, M.K. Soni, "Artificial neural network-based peak load forecasting using conjugate gradient methods," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No 3, August 2002, pp. 907-912.
- [119] Α. Μπακόπουλος, Ι. Χρυσοβέργης, "Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση", Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1994.
- [120] R. Fletcher, C.M. Reeves, "Function minimization by conjugate gradients", Computer Journal, Vol. 7, 1964, pp. 149-154.

- [121] E. Polak, "Computational Methods in Optimization: A Unified Approach", Academic Publication, New York, 1st edition, 1971.
- [122] M.J. Powell, "Restart procedures for the conjugate gradient method", Mathematical Programming, Vol. 12, 1977, pp. 241-254.
- [123] M.F. Moller, "A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning", Neural Networks, Vol. 6, 1993, pp. 525-533.
- [124] K. Levenberg, "A method for the solution of certain problems in least squares", Quart. Application Mathematics, Vol. 2, 1944, pp. 164-168.
- [125] D. Marquardt, "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters", SIAM Journal Application Mathematics, Vol. 11, 1963, pp. 431-441.
- [126] A.P.A. Silva, L.S. Moulin, "Confidence intervals for neural network based short-term load forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000, pp.1191-1196.
- [127] R. Sundararajan, N.R. Sadhureddy, R.S Gorur, "Computer-aided design of porcelain insulators under polluted conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, 1995, pp. 121-127.
- [128] V.T. Kontargyri, A.A Gialketsi, G.J. Tsekouras, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos, "Design of an Artificial Neural Network for the estimation of the flashover voltage on insulators", Elsevier Electric Power Systems Research, Vol. 77, Issue 12, October 2007, pp. 1532-1540.
- [129] Matlab Help, Version 6.5
- [130] G.J. Tsekouras, N.D. Hatziargyriou, E.N. Dialynas, "An Optimized Adaptive Neural Network for Annual Midterm Energy Forecasting", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 1, February 2006, pp. 385-391.
- [131] L.A. Zadeh, "Fuzzy Logic", IEEE Computer, April 1988, pp. 83-93.
- [132] Ch.N. Elias, G.J. Tsekouras, S. Kavatza, G.C. Contaxis, "A midterm energy forecasting method using Fuzzy Logic", WSEAS Transactions on Systems, Issue 5, Vol. 3, July 2004, pp. 2128-2135.
- [133] Lefteris H. Tsoukalas, Robert E. Uhrig, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", John Wiley & Sons, New York, 1997.

- [134] Ι. Ψαρράς, Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος "Πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων", Ε.Μ.Π..
- [135] "Γενική μεθοδολογία μοντελοποίησης προβλημάτων απόφασης", Εργαστήριο Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση http://dsslab.cs.unipi.gr.
- [136] M. Rogers, M. Bruen, L.-Y. Maystre, "ELECTRE and Decision Support", Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1999.
- [137] Δ. Λούκας, "Πολυκριτήρια υποστήριξη αποφάσεων με τη βοήθεια της παραγοντικής ανάλυσης των αντιστοιχιών", Διδακτορική διατριβή, Τμήμα εφαρμοσμένης πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, 2004.
- [138] "Απλά μοντέλα λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια", Εργαστήριο Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση http://dsslab.cs.unipi.gr.

Παράρτημα Α

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΔΙΟΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (PROBE)

Στο παρόν Παράρτημα περιγράφεται περιληπτικά ο τρόπος λειτουργίας του πεδιομέτρου PMM 8053A, σε συνδυασμό με τον αισθητήρα (probe) PMM EHP 50B (Σχήματα A.1 –A.3).





Σχήμα Α.1: Πεδιόμετρο.





Σχήμα Α.2: Αισθητήρας (probe).



Σχήμα Α.3: Σύνδεση πεδιομέτρου με την οπτική ίνα.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου και του αισθητήρα παρουσιάζονται στους Πίνακες Α.1 και Α.2 αντίστοιχα.

Εύρος συχνότητας	5Hz-40GHz
Μονάδες μέτρησης	V/m , kV/m , $\mu W/cm^2$, mW/cm^2 , W/m^2 , A/m , nT , μT , mT
Μέτρηση πεδίου	Χ, Υ, Ζ σε απόλυτες τιμές, επί τοις εκατό και συνολικό
Χρόνος	Εσωτερικό ρολόι
Εσωτερική μνήμη	Έως 32700 μετρήσεις
Έξοδος	Οθόνη LCD 72×72mm, RS232
Είσοδος	Απ' ευθείας ή μέσω οπτικής ίνας
Εσωτερική μπαταρία	Επαναφορτιζόμενες ΝiMH μπαταρίες (5·1,2V)
Χρόνος λειτουργίας	24 ώρες
Χρόνος επαναφόρτισης	< 4 ώρες
Τροφοδοσία	DC, 10-15V, I≈500mA
Θερμοκρασία λειτουργίας	-10°C έως 40°C
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-20°C έως 70°C
Μέγεθος	108×240×50mm
Βάρος	1,07kg

Πίνακας Α.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου PMM 8053Α.

Πίνακας Α.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα PMM EHP-50B.

	Ηλεκτρικό πεδίο	Μαγνητικό πεδίο
Εύρος συχνότητας	5Hz-1	00kHz
Επίπεδο κλίμακας	0.01V/m-100kV/m	1nT-10mT
Υπερφόρτιση	200kV/m (@50Hz)	20mT (@50Hz)
Ανάλυση	0.001V/m	1nT
Ευαισθησία	0.01V/m	1nT
Απόλυτο σφάλμα	± 0.5 dB (50Hz, 1 kV/m)	±0.5dB (50Hz, 0.1mT)
Ομαλότητα (40Hz-10kHz)	± 0,5dB	$\pm 0,5$ dB
Γραμμικότητα (50Hz)	\pm 0,2dB (1V/m-100kV/m)	$\pm 0,2$ dB (200nT-10mT)
SPAN	100Hz, 200Hz, 500Hz, 1k	Hz, 2kHz, 10kHz, 100kHz
Συχνότητα έναρξης	1,2% τα	ou SPAN
Συχνότητα λήξης	ίση με τ	ov SPAN
Απόρριψη ηλ. πεδίου	-	>20dB
Απόρριψη μαγν. πεδίου	>20dB	-
Βαθμονόμηση	Εσωτ	τερική
Σφάλμα θερμοκρασίας	0.050	lB/ °C
Διαστάσεις	96×96>	<115mm
Βάρος	52	25g
Εσωτερική μπαταρία	Επαναφορτιζόμενες Νi	ΜΗ μπαταρίες (5·1,2V)
Χρόνος λειτουργίας	>10 ώρες>150 ώρες σε χ	αμηλής ισχύος λειτουργία
Χρόνος επαναφόρτισης	< 4	ώρες
Εξωτερική DC τροφοδότηση	DC, 10-15	V, I≈200mA
Σύνδεση οπτικής ίνας	> 8	30m
Ενημέρωση λογισμικού	Μέσω σειρ	ιακής θύρας
Αυτόματος έλεγχος	Αυτόματα	όταν ανάβει
Θερμοκρασία λειτουργίας	-10°C έ	ως 40°C
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-20°C έ	ως 70°C

Ο αισθητήρας EHP-50B συνδέεται στο πεδιόμετρο 8053A με τη βοήθεια οπτικής ίνας, γεγονός το οποίο επιτρέπει το χειρισμό του πεδιομέτρου εκτός του πεδίου δοκιμών. Μετά τη σύνδεση της οπτικής ίνας είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση του αισθητήρα, ώστε να αναγνωριστεί ο τύπος του από το πεδιόμετρο. Κατά τη λειτουργία του πεδιομέτρου μία τυπική οθόνη είναι αυτή του Σχήματος A.4.



Σχήμα Α.4: Οθόνη του πεδιομέτρου κατά τη λειτουργία του.

Κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου υπάρχουν δύο κλίμακες: 1kV/m και 100kV/m, ενώ κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου οι κλίμακες είναι: 100μT και 10mT.

Το πεδιόμετρο έχει τις εξής δυνατότητες απεικόνισης των αποτελεσμάτων:

- ABS ή %: Παρουσιάζονται οι τρεις ανυσματικές συνιστώσες του μετρούμενου πεδίου σε απόλυτες και ποσοστιαίες τιμές.
- 2. MIN-MAX/AVG, MIN-MAX/RMS: Παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές εκφρασμένες ως αριθμητικοί μεσοί όροι (AVG) ή ως τετραγωνικοί μεσοί όροι (RMS). Οι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού για τους αριθμητικούς και τετραγωνικούς μέσους όρους δίνονται από τις σχέσεις:

$$AVG = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left| E_{(t)} \right| dt$$
(A.1)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left| E_{(t)} \right|^{2} dt}$$
(A.2)

3. SPECT MODE: Παρουσιάζεται η ανάλυση Fourier (FFT) της κυματομορφής της έντασης του πεδίου.

Παράρτημα Β

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ

Στο παρόν Παράρτημα παρατίθενται οι μετρήσεις της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης για τους αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV. Η διαδικασία μέτρησης της κατανομής της τάσης, που αναφέρθηκε στην §2.2.1, επαναλήφθηκε, για καθένα από τους ελεγχθέντες αλυσοειδείς μονωτήρες, δεκαπέντε (15) φορές. Σε έναν από τους αλυσοειδείς μονωτήρες μετρήθηκε η κατανομή της τάσης υπό συνθήκες ρύπανσης, ενώ, στη συνέχεια, αυτός καθαρίστηκε με στεγνό τρόπο και μετρήθηκε εκ νέου η κατανομή της τάσης. Οι δεκαπέντε σειρές μετρήσεων (U₁ έως U₁₅) για κάθε αλυσοειδή μονωτήρα παρουσιάζονται στους Πίνακες B.1, B.3, B.5, B.7, B.9 και B.11.

Για τον υπολογισμό της ποσοστιαίας κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης, από τις παραπάνω μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις (2.1) και (2.2). Τα αποτελέσματα για κάθε αλυσοειδή μονωτήρα παρουσιάζονται στους Πίνακες B.2, B.4, B.6, B.8, B.10 και B.12. Οι μετρήσεις θεωρήθηκε ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή και υπολογίστηκε η μέση τιμή μ και η τυπική απόκλιση σ. Προκειμένου να μειωθεί το σφάλμα των μετρήσεων, από τις δεκαπέντε ποσοστιαίες τιμές της τάσης καταπόνησης κάθε δίσκου, εξαιρούνται οι τιμές που βρίσκονται εκτός του διαστήματος [μ-2σ, μ+2σ], όπου μ είναι η μέση τιμή και σ η διασπορά των μετρήσεων. Η διαδικασία εξαίρεσης των τιμών επαναλαμβάνεται, έως ότου η νέα μέση τιμή μ' και η νέα διασπορά σ' οριοθετήσουν ένα διάστημα [μ'-2σ', μ'+2σ'], που να συμπεριλαμβάνει όλες τις εναπομείνασες ποσοστιαίες τιμές Στους Πίνακες B.2, B.4, B.6, B.8, B.10 και B.12 αναγράφονται οι τελικές τιμές για τη μέση τιμή και τη διασπορά, μετά την εξαίρεση των τιμών, που, κατά τα ανωτέρω, αποκλίνουν σημαντικά από τη μέση τιμή.

Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης, με διάμετρο 254mm, βήμα 146mm και μήκος ερπυσμού 305mm (εργαστηρίου).

α/α	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	U ₃ [kV]	U ₄ [kV]	U5 [kV]	U ₆ [kV]	U 7 [kV]	U ₈ [kV]	U9 [kV]	U ₁₀ [kV]	U ₁₁ [kV]	U 12 [kV]	U 13 [kV]	U 14 [kV]	U 15 [kV]
1	26,5	25,0	22,8	30,4	24,9	26,8	25,3	27,5	24,7	23,0	21,8	22,0	28,0	35,0	30,5
2	27,8	27,3	24,8	29,1	26,5	28,8	28,0	30,8	23,1	25,0	25,3	24,5	30,3	39,5	32,3
3	25,8	28,3	23,8	31,1	26,0	29,5	28,5	30,8	24,3	24,6	24,5	24,2	31,3	41,0	32,5
4	25,0	27,0	22,9	29,3	25,3	27,1	24,8	29,3	23,5	23,5	22,8	23,7	29,2	38,5	30,3
5	23,8	23,5	19,3	24,8	22,8	24,3	21,8	24,8	19,3	20,8	19,8	19,3	26,3	33,5	26,7
6	20,8	20,5	16,5	21,8	19,8	20,5	18,8	19,3	15,5	19,0	17,3	17,9	23,2	30,0	23,0
7	16,3	17,5	14,8	18,3	15,8	17,0	15,8	17,8	13,0	16,9	14,5	15,9	19,7	24,8	19,0
8	12,0	14,3	12,8	14,8	13,0	13,5	12,5	15,5	11,5	11,9	12,0	12,3	16,5	20,0	15,0
9	8,0	10,8	9,5	11,5	10,8	10,8	9,9	10,5	8,0	8,9	8,8	9,1	13,0	17,0	12,3
10	5,0	7,8	9,3	8,8	7,3	8,2	8,0	8,0	5,8	6,3	5,8	6,0	9,8	12,5	8,5

Πίνακας Β.1: Μετρήσεις.

Πίνακας Β.2: Ποσοστιαία κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης.

α/α	P ₁ [%]	P ₂ [%]	P ₃ [%]	P ₄ [%]	P ₅ [%]	P ₆ [%]	P ₇ [%]	P ₈ [%]	P9 [%]	P ₁₀ [%]	P ₁₁ [%]	P ₁₂ [%]	P ₁₃ [%]	P ₁₄ [%]	P ₁₅ [%]	μ΄ [%]	σ΄ [%]
1		6,78	6,84	6,05	6,46	6,43	6,39	6,39		6,36	6,39	6,50			6,22	6,44	0,22
2		6,22	6,29	6,32	6,07	5,98	5,76	5,71	5,80	5,85	5,50	5,84	6,51	6,38	5,88	6,01	0,30
3	5,45	6,00		5,92	6,18	5,83	5,66	5,71	5,52	5,95	5,67	5,92	6,31	6,15	5,84	5,87	0,25
4	5,61	6,28	6,81	6,29	6,37	6,35	6,52	6,01	5,70	6,22	6,11	6,05	6,75	6,55	6,27	6,26	0,34
5		7,21		7,43	7,07	7,10	7,42	7,10	6,96	7,04	7,04	7,41	7,49	7,53	7,12	7,22	0,20
6		8,27		8,45	8,14	8,40	8,60		8,64		8,06	8,01	8,51	8,40	8,25	8,34	0,21
7		9,69	10,55	10,07	10,21	10,15	10,24	9,90	10,30		9,59		10,03	10,19	9,98	10,08	0,27
8	11,69	11,90	12,21	12,47	12,37	12,75	12,91	11,34	11,64	12,31	11,58	11,68	11,94	12,61	12,64	12,14	0,49
9		15,77	16,39	15,99	14,96	16,01	16,34	16,74	16,74	16,47	15,89	15,72	15,22	14,83	15,48	15,89	0,61
10		21,88		21,01	22,18	20,99	20,17	21,97	23,28	23,39	24,17	23,84	20,21	20,17	22,31	21,97	1,41

Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δέκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, με διάμετρο 254mm, βήμα 146mm και μήκος ερπυσμού 290mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 033).

α/α	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	U ₃ [kV]	U ₄ [kV]	U5 [kV]	U ₆ [kV]	U 7 [kV]	U ₈ [kV]	U9 [kV]	U ₁₀ [kV]	U 11 [kV]	U 12 [kV]	U 13 [kV]	U 14 [kV]	U 15 [kV]
1	22,2	21,9	21,1	20,9	21,6	21,0	21,7	21,5	21,7	20,9	21,8	21,1	22,0	21,1	20,2
2	23,4	23,8	23,1	22,7	22,7	23,1	23,0	22,6	21,9	22,7	22,4	23,0	22,6	22,5	21,0
3	23,0	22,0	23,6	21,7	23,2	22,2	22,8	22,4	22,7	22,2	22,3	22,4	22,7	22,0	21,4
4	21,7	20,5	21,7	20,8	21,8	20,8	21,2	21,5	21,7	21,1	21,1	21,0	21,4	21,0	20,8
5	18,3	18,9	18,7	19,4	18,3	18,3	18,5	18,7	18,4	18,4	18,7	18,4	18,1	18,7	19,3
6	16,2	16,2	15,9	16,1	16,3	16,2	16,2	16,3	16,2	16,1	16,1	16,1	16,2	16,3	15,9
7	14,0	13,7	13,0	13,8	13,0	13,3	13,2	13,4	12,9	13,5	12,9	13,5	13,2	13,6	13,3
8	11,7	11,2	11,7	11,3	11,9	11,2	11,6	11,3	11,8	11,6	11,2	11,2	11,4	11,3	11,9
9	9,1	8,7	9,1	8,8	8,9	8,8	9,1	8,7	8,8	8,7	9,1	8,8	8,7	8,8	9,4
10	7,6	7,4	7,5	7,2	7,4	7,1	7,7	7,3	7,4	7,3	7,3	7,4	7,3	7,3	7,4

Πίνακας Β.3: Μετρήσεις.

Πίνακας Β.4: Ποσοστιαία κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης.

α/α	P ₁ [%]	P ₂ [%]	P ₃ [%]	P ₄ [%]	P ₅ [%]	P ₆ [%]	P ₇ [%]	P ₈ [%]	P9 [%]	P ₁₀ [%]	P ₁₁ [%]	P ₁₂ [%]	P ₁₃ [%]	P ₁₄ [%]	P ₁₅ [%]	μ΄ [%]	σ΄ [%]
1	6,50	6,43	6,77	6,69	6,57	6,60	6,59	6,53	6,50	6,71	6,44	6,65	6,39	6,66		6,57	0,11
2	6,18		6,18	6,17	6,25		6,22	6,22		6,18	6,26		6,20	6,23		6,21	0,03
3	6,28	6,42		6,44	6,11	6,25	6,29	6,27	6,21	6,30	6,30	6,28	6,18	6,38		6,29	0,09
4	6,66	6,89	6,58	6,72	6,49	6,66	6,75	6,53	6,50	6,63	6,64	6,69	6,57	6,67	6,90	6,66	0,12
5		7,45	7,64		7,73	7,57	7,76	7,53	7,66	7,61	7,49	7,64	7,75	7,49	7,45	7,60	0,11
6		8,72		8,68	8,71			8,64	8,68	8,69	8,73	8,74	8,68	8,62		8,69	0,04
7	10,34	10,28	10,96	10,17	10,93	10,41	10,84	10,47	10,94	10,37	10,91	10,43	10,62	10,30	10,29	10,55	0,29
8	12,38	12,58	12,23	12,43	11,94	12,42	12,34	12,42	11,97	12,06	12,57	12,52	12,30	12,40		12,33	0,21
9	15,86	16,17		15,96	15,98	15,87	15,83	16,15	16,02	16,21		15,92	16,11	15,93		16,00	0,13
10	19,02	19,13	19		19,28			19,24	19,11	19,23	19,25	19,02	19,21	19,31	19,15	19,16	0,11

Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα κοινούς δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης, με διάμετρο 254mm, βήμα 146mm και μήκος ερπυσμού 290mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 010).

α/α	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	U 3 [kV]	U ₄ [kV]	U5 [kV]	U ₆ [kV]	U 7 [kV]	U ₈ [kV]	U9 [kV]	U ₁₀ [kV]	U 11 [kV]	U 12 [kV]	U 13 [kV]	U 14 [kV]	U 15 [kV]
1	38,6	38,1	38,4	38,7	38,0	39,1	38,1	38,4	38,0	38,1	38,0	38,3	38,4	38,0	38,0
2	42,9	42,6	42,1	42,2	41,9	42,2	42,4	42,5	42,6	42,5	41,9	42,2	41,9	41,8	42,1
3	40,5	41,2	41,5	41,4	41,5	41,8	41,3	41,1	40,9	41,9	41,6	41,4	41,5	41,4	41,9
4	39,2	39,1	39,1	39,6	39,3	39,0	39,3	39,2	39,2	39,5	39,6	38,7	40,4	39,8	39,9
5	37,0	36,4	36,7	35,9	36,5	35,9	36,0	36,6	36,7	37,1	37,0	36,9	36,5	36,4	36,1
6	30,1	30,0	30,4	30,2	30,2	30,0	30,5	30,2	30,1	30,7	31,1	30,9	30,7	30,5	30,9
7	25,9	26,1	26,5	26,9	26,1	26,3	26,3	26,3	26,2	26,6	26,0	26,3	26,0	25,6	25,2
8	21,6	21,4	21,0	21,4	20,8	20,9	21,0	21,4	21,5	21,7	21,8	22,0	22,4	21,6	21,8
9	18,4	18,5	17,9	18,3	18,6	18,0	17,6	17,4	18,0	18,2	18,0	18,0	17,6	17,6	17,9
10	15,9	16,7	16,2	15,7	16,0	15,6	16,6	15,3	15,7	16,1	15,4	15,6	15,5	16,2	15,6
11	13,0	12,8	12,3	12,4	12,5	12,6	12,5	12,3	12,4	12,3	12,3	12,5	12,9	12,9	12,5
12	9,5	9,5	9,6	10,2	9,8	9,8	9,8	9,5	9,6	9,5	9,7	9,6	9,8	9,6	9,5

Πίνακας Β.5: Μετρήσεις.

Πίνακας Β.6: Ποσοστιαία κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης.

α/α	P ₁ [%]	P ₂ [%]	P ₃ [%]	P ₄ [%]	P5 [%]	P ₆ [%]	P ₇ [%]	P ₈ [%]	P9 [%]	P ₁₀ [%]	P ₁₁ [%]	P ₁₂ [%]	P ₁₃ [%]	P ₁₄ [%]	P ₁₅ [%]	μ΄ [%]	σ΄ [%]
1	4,75	4,82	4,72	4,77	4,81	4,69	4,78	4,70	4,81	4,79	4,82	4,77	4,81	4,83	4,79	4,78	0,05
2	4,27	4,31	4,31	4,37	4,35	4,34	4,29	4,25	4,30	4,29	4,37	4,33	4,42	4,39	4,33	4,33	0,05
3		4,46	4,37	4,46	4,40	4,38	4,41	4,39	4,47	4,36	4,40	4,41	4,46	4,44	4,35	4,41	0,04
4	4,67	4,69	4,64	4,67	4,65	4,70	4,63	4,60	4,66	4,62	4,63	4,72	4,58	4,61	4,56	4,64	0,04
5	4,96	5,04	4,94	5,14	5,01	5,11	5,06	4,94	4,99	4,92	4,95	4,95	5,07	5,05	5,05	5,01	0,07
6	6,10	6,11	5,97	6,12	6,04	6,11	5,98	5,98	6,08	5,94	5,89	5,92	6,02	6,02	5,89	6,01	0,08
7	7,07	7,04	6,85	6,86	6,99	6,97	6,92	6,88	6,98	6,86	7,04	6,95	7,12	7,18		6,98	0,10
8	8,48	8,59	8,63	8,62	8,77	8,76	8,69	8,45	8,50	8,42	8,41	8,30	8,27	8,51	8,35	8,52	0,16
9	9,95	9,94	10,12	10,11	9,84	10,20	10,35	10,37	10,18	10,05	10,20	10,18	10,51	10,45	10,18	10,17	0,19
10	11,74	11,36	11,72	11,83	11,89	11,41	11,63	11,80		11,69	11,44	11,63	11,41		11,46	11,62	0,18
11	14,14	14,38	14,73	14,94	14,60	14,59	14,57	14,67	14,80	14,89	14,88	14,67	14,33	14,28	14,63	14,61	0,24
12	19,33	19,26	19,02		18,66	18,74	18,68	18,96	19,19	19,17	18,98	19,17	18,99	19,25	19,16	19,04	0,22

Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, με διάμετρο 255mm, βήμα 127mm και μήκος ερπυσμού 390mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161).

α/α	U ₁ [kV]	U 2 [kV]	U 3 [kV]	U ₄ [kV]	U5 [kV]	U ₆ [kV]	U 7 [kV]	U ₈ [kV]	U9 [kV]	U ₁₀ [kV]	U 11 [kV]	U 12 [kV]	U 13 [kV]	U ₁₄ [kV]	U 15 [kV]
1	40,2	39,7	38,9	39,3	40,7	40,3	40,7	41,1	40,1	39,8	40,4	40,2	40,1	40,2	40,3
2	47,3	47,6	47,6	47,3	47,8	47,9	47,7	47,9	47,7	47,6	47,4	48,0	48,5	48,0	47,7
3	46,0	45,6	45,9	45,7	46,0	46,0	45,7	46,3	46,4	46,2	46,6	46,9	46,9	46,4	47,5
4	42,8	42,3	41,9	42,7	42,6	42,7	41,5	42,1	41,9	42,9	43,3	41,9	42,5	42,1	41,9
5	37,8	37,2	37,0	37,2	37,1	39,5	38,5	37,8	37,3	37,4	38,4	38,6	37,8	37,6	37,4
6	33,5	34,1	33,4	33,4	33,0	32,8	32,8	33,5	33,6	33,0	34,2	33,1	33,7	33,2	33,5
7	28,0	27,4	27,7	27,9	27,6	27,2	27,2	27,3	27,4	27,6	27,7	27,0	27,5	27,4	27,2
8	22,8	22,6	23,1	22,9	22,7	23,1	23,0	22,9	23,4	23,1	22,9	22,7	22,9	22,6	23,4
9	18,4	18,3	17,4	17,5	18,7	17,5	18,0	17,9	18,1	18,0	17,9	18,0	18,0	18,1	18,3
10	15,2	14,0	15,1	14,3	14,1	13,9	14,4	14,3	14,5	14,4	14,5	14,4	14,2	14,6	14,6
11	10,9	10,9	10,9	11,1	11,6	11,0	10,8	11,0	11,1	11,2	11,2	11,0	10,9	11,0	11,2
12	8,8	8,8	8,8	8,8	9,0	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,7	8,8	8,7	8,8	8,8

Πίνακας Β.7: Μετρήσεις

Πίνακας Β.8: Ποσοστιαία κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης.

α/α	P ₁ [%]	P ₂ [%]	P ₃ [%]	P ₄ [%]	P ₅ [%]	P ₆ [%]	P ₇ [%]	P ₈ [%]	P9 [%]	P ₁₀ [%]	P ₁₁ [%]	P ₁₂ [%]	P ₁₃ [%]	P ₁₄ [%]	P ₁₅ [%]	μ΄ [%]	σ΄ [%]
1	4,50	4,49			4,46	4,43			4,49	4,52	4,47	4,45	4,46	4,46	4,48	4,47	0,03
2	3,82	3,75	3,76	3,77	3,79	3,72	3,74	3,74	3,78	3,77	3,80	3,73		3,74	3,78	3,76	0,03
3	3,93	3,91	3,9	3,91	3,94	3,88	3,91	3,87	3,88	3,89	3,87	3,82	3,81	3,86	3,80	3,88	0,04
4	4,23	4,22	4,28	4,19	4,26	4,17	4,30	4,26	4,30	4,19	4,17	4,27	4,21	4,25	4,31	4,24	0,05
5	4,79	4,80	4,84	4,80	4,89		4,64	4,74	4,82	4,80	4,70	4,64	4,73	4,76	4,83	4,77	0,07
6	5,40		5,36	5,35	5,50	5,43	5,44	5,350	5,35	5,45	5,28	5,41	5,31	5,40	5,40	5,39	0,06
7	6,46	6,52	6,47		6,57	6,56	6,56	6,57	6,56	6,52	6,51	6,64	6,50	6,55	6,64	6,55	0,05
8	7,92	7,91	7,77	7,80	8,01	7,71	7,76	7,83	7,69	7,80	7,87	7,91	7,81	7,94	7,71	7,83	0,10
9	9,82	9,75	10,29	10,2	9,72	10,18	9,94	10,01	9,94	10,01	10,07	9,98	9,93	9,90	9,89	9,98	0,16
10				12,48			12,40	12,53	12,41	12,52	12,43	12,43	12,63	12,31	12,36	12,45	0,09
11	16,65	16,36	16,42	16,15		16,27	16,60	16,29	16,21	16,04	16,10	16,28	16,40	16,36	16,12	16,30	0,18
12	20,56	20,32	20,41	20,40	20,31	20,32	20,31	20,44	20,58	20,48		20,43	20,51	20,47		20,43	0,09

Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, με διάμετρο 255mm, βήμα 127mm και μήκος ερπυσμού 390mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 161), υπό συνθήκες ρύπανσης.

α/α	U ₁ [kV]	U 2 [kV]	U 3 [kV]	U 4 [kV]	U5 [kV]	U ₆ [kV]	U 7 [kV]	U ₈ [kV]	U9 [kV]	U ₁₀ [kV]	U 11 [kV]	U 12 [kV]	U ₁₃ [kV]	U ₁₄ [kV]	U 15 [kV]
1	47,7	45,4	47,6	47,1	47,1	47,7	46,0	47,2	47,0	48,6	47,3	46,0	45,9	45,5	45,1
2	49,6	50,2	49,9	50,0	50,0	49,5	49,8	49,8	49,6	49,9	51,6	52,0	49,4	49,3	49,9
3	50,1	49,3	49,1	49,6	49,6	48,8	48,9	49,1	48,6	50,7	50,2	48,9	49,1	49,2	49,0
4	46,7	46,8	46,3	46,5	46,3	47,0	47,1	47,6	46,4	47,0	47,2	46,6	48,1	49,0	48,2
5	42,2	42,4	43,2	42,9	42,5	43,3	43,3	43,4	43,7	43,4	43,2	43,5	43,4	43,0	43,1
6	38,6	39,4	38,9	40,0	39,9	39,7	40,0	39,4	39,0	40,1	38,3	38,9	38,3	39,0	39,2
7	33,5	33,6	33,7	33,1	33,2	33,6	34,1	34,2	33,1	33,8	33,6	33,1	33,7	33,5	34,2
8	28,0	28,1	28,7	28,3	28,9	28,4	29,4	28,7	29,2	29,9	30,1	29,8	29,9	28,5	28,8
9	23,6	24,2	23,5	22,7	23,3	23,4	23,6	23,3	23,9	23,9	22,7	24,0	22,7	24,3	22,9
10	18,9	19,2	19,7	19,1	19,0	19,4	18,3	19,3	20,0	20,1	19,1	20,4	18,8	19,4	18,8
11	14,1	14,5	14,2	14,4	15,1	14,1	14,4	14,4	14,6	14,6	15,0	15,4	15,5	15,7	15,4
12	11,8	12,3	11,7	11,6	11,8	11,8	11,9	11,6	11,6	11,7	11,7	11,6	11,7	11,8	11,6

Πίνακας Β.9: Μετρήσεις.

Πίνακας Β.10: Ποσοστιαία κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης.

α/α	P ₁ [%]	P ₂ [%]	P ₃ [%]	P ₄ [%]	P5 [%]	P ₆ [%]	P ₇ [%]	P ₈ [%]	P9 [%]	P ₁₀ [%]	P ₁₁ [%]	P ₁₂ [%]	P ₁₃ [%]	P ₁₄ [%]	P ₁₅ [%]	μ΄ [%]	σ΄ [%]
1	4,67	4,99	4,72	4,73	4,79	4,70	4,88	4,75	4,80	4,69	4,78	4,98	4,921	5,01	4,99	4,83	0,12
2	4,49	4,51	4,50	4,45	4,51	4,53	4,51	4,51	4,55	4,57			4,57		4,51	4,52	0,03
3	4,44	4,59	4,57	4,49	4,55	4,59	4,59	4,57	4,64	4,50	4,50	4,68	4,60	4,64	4,59	4,57	0,06
4	4,77	4,84	4,85	4,79	4,87	4,77	4,76	4,72	4,86	4,85	4,79	4,91	4,69	4,65	4,67	4,79	0,08
5	5,28	5,34	5,19	5,19	5,31	5,17	5,18	5,17	5,17	5,25	5,23	5,26	5,20	5,30	5,22	5,23	0,06
6	5,77	5,75	5,77	5,57	5,65	5,64	5,61	5,70	5,78	5,69	5,89	5,88	5,90	5,84	5,74	5,75	0,10
7	6,65	6,74	6,67	6,73	6,80	6,68	6,57	6,56	6,81	6,74	6,72		6,71	6,80	6,58	6,70	0,08
8	7,95	8,07	7,82	7,87	7,80	7,90	7,63	7,82	7,74	7,62	7,5	7,68	7,55	8,01	7,82	7,79	0,17
9	9,46	9,36	9,55	9,83	9,68	9,57	9,52	9,65	9,44	9,53	9,97	9,55	9,94	9,38	9,84	9,62	0,20
10	11,78	11,79	11,39	11,69	11,90	11,58	12,28	11,62	11,27	11,36	11,85	11,21	12,00	11,78	11,99	11,70	0,30
11	15,85	15,61	15,80	15,46	14,94	15,89	15,62	15,58	15,50	15,66	15,10	14,84	14,56	14,56	14,65	15,31	0,48
12	18,87		19,18	19,20	19,19	18,98	18,84	19,34	19,44	19,55	19,29	19,71	19,37	19,40	19,39	19,27	0,25

Αλυσοειδής μονωτήρας, αποτελούμενος από δώδεκα δισκοειδείς μονωτήρες υάλου, τύπου ομίχλης, με διάμετρο 280mm, βήμα 146mm και μήκος ερπυσμού 430mm (κωδικός Δ.Ε.Η.: 069).

α/α	U ₁ [kV]	U 2 [kV]	U 3 [kV]	U 4 [kV]	U5 [kV]	U ₆ [kV]	U 7 [kV]	U ₈ [kV]	U9 [kV]	U ₁₀ [kV]	U 11 [kV]	U 12 [kV]	U 13 [kV]	U ₁₄ [kV]	U 15 [kV]
1	32,4	32,2	32,4	32,7	32,3	32,8	32,5	32,3	32,1	32,1	32,3	32,2	32,6	32,2	32,5
2	34,5	35,4	35,0	35,5	35,2	35,4	35,5	35,2	35,0	35,3	34,8	35,2	35,2	36,5	35,2
3	35,2	35,2	34,9	34,3	34,3	34,4	35,1	34,5	34,4	35,1	34,5	34,7	34,3	34,9	34,5
4	33,5	33,4	33,9	33,5	34,9	33,8	34,3	34,3	33,5	34,2	34,8	33,8	34,3	34,2	33,9
5	31,1	31,0	30,7	30,1	30,7	30,5	31,4	32,8	30,9	31,2	31,0	32,1	31,1	31,7	30,8
6	28,3	28,8	28,6	28,1	28,1	29,2	29,2	28,6	29,7	29,4	29,2	28,8	29,6	29,1	28,2
7	26,3	25,7	25,7	25,6	25,9	25,7	26,0	26,4	25,7	25,9	25,5	25,1	25,0	25,0	25,1
8	22,3	21,7	22,1	22,1	22,0	22,7	22,4	22,3	21,8	21,6	22,5	22,4	22,9	21,7	22,3
9	18,2	18,6	18,6	18,5	18,8	18,7	18,6	19,1	18,6	18,1	18,3	18,2	18,1	18,7	18,8
10	16,1	16,1	15,8	16,5	16,6	16,3	16,5	16,8	16,2	16,1	16,7	16,1	16,5	16,6	16,7
11	12,9	13,0	13,0	12,9	13,0	13,1	12,9	12,5	12,8	12,5	13,0	12,7	13,0	12,6	12,5
12	10,9	10,7	10,5	10,5	10,5	10,9	10,4	10,4	10,7	10,9	10,6	10,8	10,9	10,6	10,8

Πίνακας Β.11: Μετρήσεις.

Πίνακας Β.12: Ποσοστιαία κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης.

α/α	P ₁ [%]	P ₂ [%]	P ₃ [%]	P ₄ [%]	P5 [%]	P ₆ [%]	P ₇ [%]	P ₈ [%]	P9 [%]	P ₁₀ [%]	P ₁₁ [%]	P ₁₂ [%]	P ₁₃ [%]	P ₁₄ [%]	P ₁₅ [%]	μ΄ [%]	σ΄ [%]
1	5,56	5,58	5,53		5,57	5,54	5,55	5,59	5,59	5,58	5,59	5,58	5,55	5,58	5,54	5,57	0,02
2		5,09	5,11		5,11	5,13	5,08	5,13	5,12	5,07		5,11	5,14		5,10	5,11	0,02
3	5,12	5,11	5,13	5,23	5,24	5,28	5,14	5,23	5,21	5,10	5,24	5,18	5,28	5,14	5,21	5,19	0,06
4	5,38	5,39	5,27	5,35	5,16	5,38	5,25	5,27	5,36	5,24	5,19	5,32	5,28	5,26	5,30	5,29	0,07
5	5,79	5,80	5,83	5,95	5,87	5,96	5,75		5,81	5,75	5,83		5,83	5,66	5,83	5,82	0,08
6	6,36	6,24	6,25	6,38	6,40	6,22	6,18	6,32	6,03	6,09	6,20	6,24	6,12	6,17	6,38	6,24	0,11
7	6,85	7,01	6,97	6,99	6,94	7,06	6,94	6,83	6,99	6,93	7,10	7,16	7,24	7,20	7,16	7,02	0,12
8	8,08	8,29	8,11	8,10	8,17	7,99	8,05	8,09	8,24	8,31	8,03	8,02	7,92	8,27	8,06	8,11	0,12
9	9,89	9,67	9,61	9,68	9,59	9,71	9,69	9,47	9,66	9,89	9,90	9,87	10,00	9,63	9,56	9,72	0,15
10	11,19	11,20	11,32	10,85	10,86	11,17	10,92	10,77	11,10	11,13	10,81	11,16	10,97	10,85	10,79	11,01	0,18
11	13,96	13,83	13,75	13,88	13,88	13,91	14,02	14,43	14,06	14,39	13,89	14,14	13,98	14,31	14,37	14,05	0,22
12	16,60	16,80	17,11	17,05	17,20	16,65	17,41	17,35	16,83	16,51	17,04	16,63	16,69	17,02	16,71	16,91	0,28



Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί υποέργο του προγράμματος: "Ηράκλειτος: Υποτροφίες έρευνας με προτεραιότητα στην βασική έρευνα".

Το πρόγραμμα χρηματοδοτείται κατά 25% από Εθνικούς Πόρους και κατά 75% από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ) - ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ – ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ.

The project is co-funded by the European Social Fund (75%) and National Resources (25%) - EPEAEK II – HRAKLEITOS.