



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

**Κυκλωματικά και μαθηματικά μοντέλα μονωτήρων  
για τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δημήτριος Κ. Πέππας

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Δεκέμβριος 2004

*Στους γονείς μου*



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

121

**Κυκλωματικά και μαθηματικά μοντέλα μονωτήρων  
για τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δημήτριος Κ. Πέππας

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2004.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Δεκέμβριος 2004

Δημήτριος Κ. Πέππας

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

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	i
Περίληψη	iii
Abstract	iv
Πρόλογος	v
<b>Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	2
1.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	4
1.4 ΥΛΙΚΑ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ	6
1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ	9
1.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ	13
<b>Κεφάλαιο 2: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ</b>	<b>15</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
2.2 ΡΥΠΑΝΣΗ	15
2.3 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ (flashover)	18
2.4 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	20
<b>Κεφάλαιο 3: ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ</b>	<b>24</b>
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	24
3.2 ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	24
<b>Κεφάλαιο 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>	<b>47</b>
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	47
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	47
4.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑ R.SUNDARARAN – R.S.GORUR	47
4.2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ GHOSH-CHATERJEE	51

4.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ALSTON _____	57
4.2.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ZEDAN-AKBAR _____	58
4.2.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ZHICHENG-RENYU _____	61
4.2.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ Δ.Ε.Η ΚΑΙ Ε.Μ.Π _____	64
<b>Κεφάλαιο 5: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ _____</b>	<b>68</b>
5.1 ΓΕΝΙΚΑ _____	68
5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ _____	68
5.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ WILKINS ΚΑΙ ALSTON _____	68
5.2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ NEUMARKER-RIZK _____	69
5.2.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟ GHOSS-CHATTERJEE _____	73
5.2.1.3 ΜΟΝΤΕΛΟ DHABI-MEGRICHE, BEROUAL _____	75
5.2.1.4 ΜΟΝΤΕΛΟ OBENAUS-BOEHME _____	77
5.2.1.5 ΜΟΝΤΕΛΟ HURLEY-LIMBOURN _____	79
5.2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ VON CRON _____	80
5.2.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ NEUMARKER-RIZK _____	81
5.2.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ GHOSS-CHATTERJEE _____	83
5.2.2.3 ΜΟΝΤΕΛΟ DHABI-MEGRICHE, BEROUAL _____	84
5.2.2.4 ΜΟΝΤΕΛΟ OBENAUS-BOEHME _____	84
5.2.2.5 ΜΟΝΤΕΛΟ HURLEY-LIMBOURN _____	85
5.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ZHICHENG RENYU _____	86
5.2.3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Ε.Μ.Π. ____	87
<b>Κεφάλαιο 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ _____</b>	<b>89</b>
<b>Βιβλιογραφία _____</b>	<b>95</b>

## *Περίληψη*

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των μαθηματικών και κυκλωματικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη των κρίσιμων μεγεθών τάσης και ρεύματος σε ρυπασμένους μονωτήρες.

Για τον σκοπό αυτό, ελέγχθηκαν τα σημαντικότερα και περισσότερο χρησιμοποιούμενα μαθηματικά μοντέλα που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές. Η αξιολόγηση έγινε με βάση πλήθος πειραματικών αποτελεσμάτων τα οποία αναζητήθηκαν στην βιβλιογραφία. Με βάση αυτά εξετάστηκε η συσχέτιση που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των τιμών που προβλέπουν τα μαθηματικά μοντέλα. Παράλληλα ελέγχθηκε η επίδραση που έχουν οι διάφορες παράμετροι όπως το σχήμα του μονωτήρα, το επίπεδο και ο τύπος ρύπανσης στην συμπεριφορά του μοντέλου. Επίσης έγινε προσπάθεια να βρεθούν οι βέλτιστες σταθερές τόξου για κάθε προταθέν μοντέλο ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τύπου μονωτήρα. Έτσι τελικά καθορίστηκαν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων και καθορίστηκε το εύρος της εγκυρότητας τους.

## *Λέξεις Κλειδιά*

Μαθηματικά μοντέλα, Μονωτήρας, Υπερπήδηση, Υψηλή Τάση, Κρίσιμα μεγέθη, Ρύπανση, Ηλεκτρικό Τόξο, Μερικές εκκενώσεις, Εγκυρότητα Μοντέλων, ESDD.



## ***Abstract***

The scope of this thesis was the study of mathematical and physical models that have been developed for the prediction of the critical values of voltage and current in case of contaminated insulators, which are used in high voltage applications.

For that purpose were examined the most significant and widely used mathematical models that have been proposed from several researchers. The evaluation was based on experimental datas that exist in bibliography. Based on those, was examined the correlation between them and the results from the mathematical models. Additionally, was checked the effect of several parameters such as the shape of insulator, the type and the amount of contamination in the behaviour of the model. Finally, it was made an effort to be determined the arc constants of each model depended on the specific features of each insulator. As a result of the previous methodology was the determination of similarities and contradictions between different models and the definition of their appropriate scope of validity.

## ***Key Words***

Mathematical Models, Insulator, Flashover, High Voltage, Critical Values, Contamination, Electric Arc, Partial Discharges, Model Validity, ESDD

## *Πρόλογος*

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση των μαθηματικών μοντέλων που έχουν προταθεί για την πρόβλεψη των κρίσιμων μεγεθών στην περίπτωση ρυπασμένων μονωτήρων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε πειραματικά δεδομένα, τα οποία αναζητήθηκαν στην βιβλιογραφία.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη των μονωτήρων και στην συνέχεια παρατίθενται μια σειρά ορισμών που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της εργασίας. Επίσης, γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους μονωτήρων που χρησιμοποιούνται καθώς και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του φαινομένου της υπερπήδησης και αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη του. Επιπλέον προτείνονται τρόποι για τον περιορισμό του.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των κυκλωματικών και μαθηματικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή του φαινομένου από τους διάφορους ερευνητές. Σ' αυτό περιλαμβάνονται, η πρώτη προσέγγιση του φαινομένου από το στατικό μοντέλο του Obenaus μέχρι τα πιο πρόσφατα δυναμικά μοντέλα των Sundararajan-Gorur.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα πειράματα μεγάλου αριθμού ερευνητών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μοντέλων. Σε αυτά φαίνεται η εξάρτηση των κρίσιμων μεγεθών που μας ενδιαφέρουν συναρτήσει διάφορων παραμέτρων, όπως της ισοδύναμης ποσότητας εναποθέματος αλατιού (ESDD), του τύπου ρύπανσης, των γεωμετρικών παραμέτρων του μονωτήρα κ.α.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των πειραματικών δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί από διαφορετικούς τύπους μονωτήρων στα μαθηματικά μοντέλα που έχουν προταθεί. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκε η συμπεριφορά των μοντέλων για δύο διαφορετικές περιπτώσεις μονωτήρων. Στην πρώτη περίπτωση, εφαρμόστηκαν για μονωτήρα μικρού μήκους ερπυσμού και μεγάλης επιφανειακής αντίστασης, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, για μονωτήρα μεγάλου μήκους ερπυσμού και μικρής επιφανειακής αντίστασης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά τα συμπεράσματα από την προηγούμενη μελέτη και γίνεται κατάταξη των μοντέλων με βάση την ικανότητα ακριβούς πρόβλεψης των κρίσιμων μεγεθών.

Στο σημείο αυτό νιώθω την υποχρέωση να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους:

Τον κο. Ιωάννη. Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την ενθάρρυνση και την αμέριστη συμπαράσταση που προσέφερε καθώς και το ευχάριστο κλίμα που δημιούργησε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Την κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την ουσιαστική και πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε πρόθυμα και αδιάκοπα καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Επίσης, την ευχαριστώ για την παραχώρηση της υποέγκρισης ενδιάμεσης κρίσης της με θέμα «Ρύπανση Μονωτήρων» που αποτέλεσε πολύτιμο βοήθημα στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Τον κο. Ιωάννη. Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την υποστήριξη και την συνεργασία που μου παρείχε στην εργασία αυτή.

# ***Κεφάλαιο 1***

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Οι μονωτήρες, οι οποίοι αποτελούν το αντικείμενο της παρούσης εργασίας, χρησιμοποιούνται σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς υψηλής τάσης.

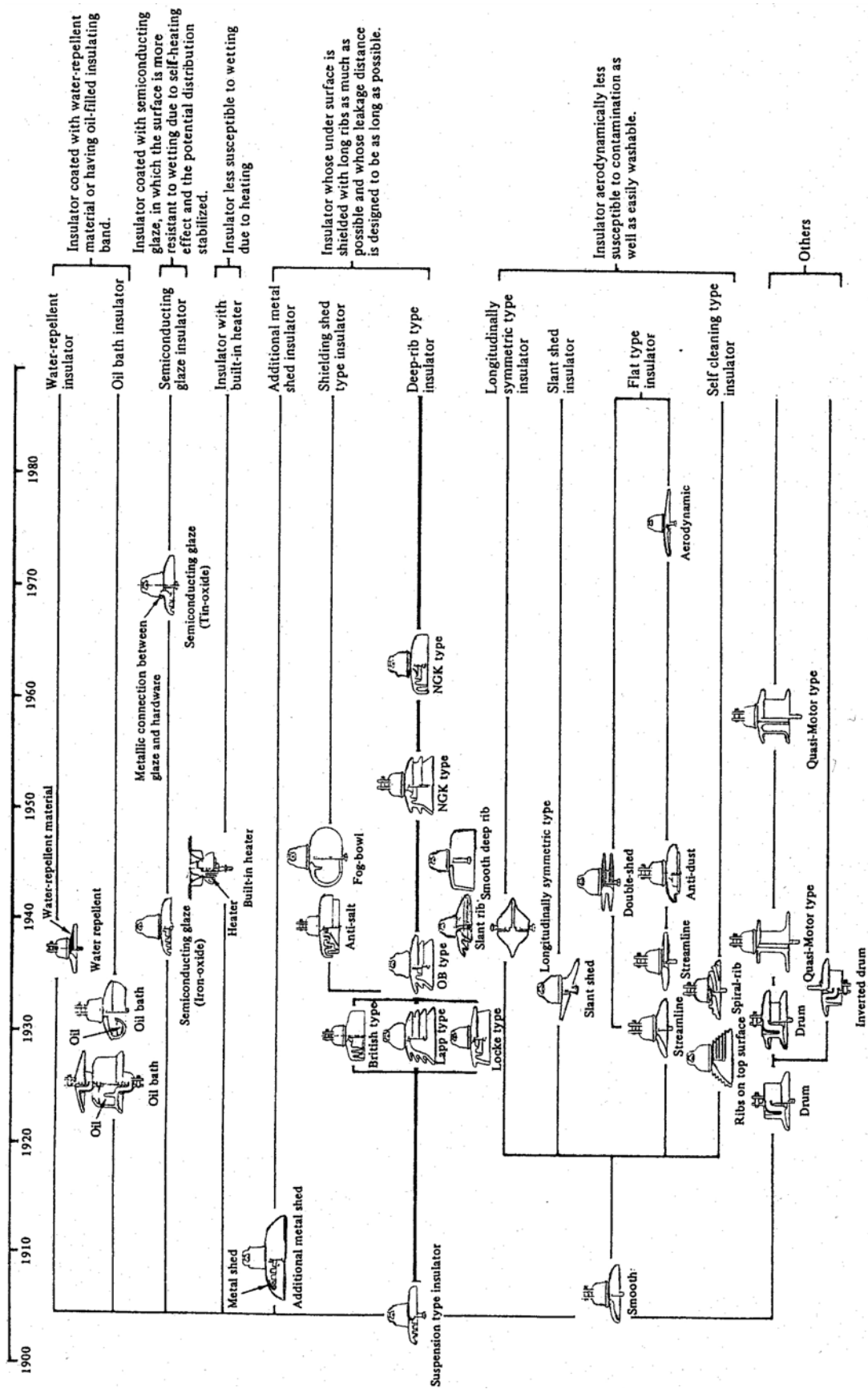
Οι μονωτήρες πρέπει να καλύπτουν τόσο ηλεκτρικές, όσο και μηχανικές λειτουργικές ανάγκες, οι οποίες συνήθως εμφανίζουν αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις κατά τη σχεδίαση. Ο σημαντικότερος παράγοντας, από τον οποίο πηγάζει η πολυπλοκότητα του φαινομένου, είναι η αδυναμία δημιουργίας ενός ιδανικά μη αγώγιμου 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. Το επιφανειακό στρώμα ενός αντιπροσωπευτικά ρυπασμένου μονωτήρα περιέχει αδρανή ορυκτά ύλη, ηλεκτρικά αγώγιμη σκόνη, όπως άνθρακα ή οξειδία μετάλλου, διαλυτά άλατα στο νερό 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, εκτεθειμένο σε ατμοσφαιρική υγρασία και 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].

## 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι μονωτήρες εμφανίστηκαν αρχικά στα πρώτα δίκτυα τηλεγράφων το 1835 [1]. Η χρήση τους για μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος έγινε για πρώτη φορά το 1882 σε γραμμή συνεχούς τάσης 1343 V που συνέδεε το Miesbach με το Μόναχο. Η ανάπτυξη από τότε στην μεταφορά ισχύος ήταν ραγδαία, ανάπτυξη την οποία έπρεπε να ακολουθήσει και η τεχνολογία των μονωτήρων. Οι νέες απαιτήσεις σύντομα αποκάλυψαν σοβαρές ελλείψεις όχι μόνο στα υλικά αλλά και στα σχέδια των μονωτήρων τα οποία αρχικά ήταν απλά αντίγραφα των τύπων που χρησιμοποιούνταν στους τηλεγράφους. Οι ηλεκτρικές και μηχανικές τάσεις στις οποίες έπρεπε να ανθίστανται τώρα οι μονωτήρες ήταν προφανώς πολύ μεγαλύτερες από εκείνες των τηλεγραφικών μονωτήρων. Ειδικότερα, η διάτρηση από τις ηλεκτρικές τάσεις των κεραμικών που είχαν πόρους ή ελαττώματα, οι ρωγμές που προκαλούνταν από τη θερμική διαστολή ή οι διαβρωτικές συνέπειες στο μέταλλο ή το τσιμέντο και οι υπερπηδήσεις με τόξα που δημιουργούνται από τους επιφανειακούς ρύπους σε συνδυασμό με την υγρασία, έδειχναν την ανάγκη εξέλιξης των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών κανόνων. Αυτή η εξέλιξη έχει βασιστεί περισσότερο σε μια μέθοδο δοκιμής και λάθους παρά σε μια μεθοδική πρόοδο και συνεχίζει την άτακτη πορεία της μέχρι σήμερα (σχήμα 1.1).

Με το σταδιακό πέρασμα σε όλο και υψηλότερες τάσεις, τα μειονεκτήματα της απώλειας απόδοσης και οι βλάβες στις εγκαταστάσεις των σταθμών παραγωγής που προέρχονταν από τόξα γύρω από τους μονωτήρες των γραμμών αυξήθηκαν σημαντικά. Έτσι η έρευνα στράφηκε στη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης των μονωτήρων σε συνθήκες ρύπανσης. Η απαίτηση για αυξημένη ηλεκτρική αξιοπιστία οδήγησε στην ανάπτυξη μονωτήρων με μεγάλο μήκος ερπυσμού θέτοντας τις βάσεις, για την κατασκευή μεγάλων μονωτήρων στους υποσταθμούς, που θα έδιναν την δυνατότητα να συνεργάζονται ανάλογα με αυτούς των εναέριων γραμμών.

Λίγο πριν το 1962 διαπιστώθηκε ότι η απόδοση των μονωτήρων θα μπορούσε να προβλεφθεί από εργαστηριακές δοκιμές και έτσι η γεωμετρία και ο όγκος τους ελέγχονταν επιστημονικά και συγκρίνονταν μεταξύ τους. Η σημαντικότερη δοκιμή ήταν η δοκιμή λειτουργίας σε περιβάλλον ομίχλης και αλάτων βάσει της οποίας απορρίφθηκαν αρκετά παράδοξα σχήματα μονωτικών που είχαν σχεδιαστεί σύμφωνα με λανθασμένες φυσικές υποθέσεις και ερμηνείες μη έγκυρων δοκιμών.



Σχήμα 1.1: Χρονολογική κατάταξη των κανόνων σχεδιασμού των μονωτήρων με στόχο την αποφυγή εναπόθεσης ρύπανσης. [2]

Εξαιτίας της αύξησης των τάσεων μεταφοράς και της εισαγωγής πολλαπλών αγωγών ανά φάση, τα μηχανικά φορτία που έπρεπε να στηριχθούν από τους μονωτήρες εναέριων γραμμών υπερέβησαν το κατωφλικό επίπεδο των 40 τόννων, που προξενεί θραύση σε έναν απλό δίσκο πορσελάνης λογικού βάρους και όγκου. Κατασκευές ενισχυμένες με πολλαπλές συνθετικές ίνες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για παράδειγμα στη Βρετανία, είχαν όμως το μειονέκτημα της αντιαισθητικής εμφάνισης και μηχανικής πολυπλοκότητας. Αυτό οδήγησε στην χρήση πολυμερών μονωτικών, τα οποία χρησιμοποιούσαν ινώδη συνθετικά υλικά και εμφάνιζαν υψηλές αναλογίες αντοχής εφελκυσμού ως προς το μέγεθος και το βάρος τους.

Η πρόσφατη ιστορία ανάπτυξης των μονωτήρων δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα τεχνολογικά επιτεύγματα, αλλά από διαρκείς αυξήσεις στο μέγεθος, προκειμένου να αντιμετωπιστούν επιτυχώς οι απαιτήσεις μεταφοράς συνεχούς ρεύματος και υπερυψηλής τάσης.

### 1.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Μονωτικά υλικά ή διηλεκτρικά: Είναι τα υλικά στα οποία όλοι οι φορείς (ηλεκτρόνια) είναι πλήρως και σταθερά δεσμευμένα στα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος και μια συνηθισμένη προσφορά ενέργειας δεν μπορεί να δημιουργήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια, άρα δεν παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα [1].

Μονωτήρες δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας: Είναι εξαρτήματα των γραμμών μεταφοράς, αποτελούμενα κυρίως από μονωτικό υλικό, τα οποία χρησιμοποιούνται για να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς τάσης.

Μήκος ερπυσμού (L): Είναι η συντομότερη διαδρομή επί της επιφανείας του μονωτήρα ανάμεσα σε δύο μεταλλικά άκρα του (μήκος της εξωτερικής ημιπεριμέτρου του μονωτικού υλικού σε επίπεδο τομής διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα [3] .

Ειδικό μήκος ερπυσμού ( $L_s$ ): Είναι το ολικό μήκος ερπυσμού ενός μονωτήρα διαιρεμένο με το γινόμενο της rms τιμής της τάσης επί  $\sqrt{3}$  . Συνήθως εκφράζεται σε mm/kV [3].

Συντελεστής μορφής (F): 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 ( $l$ ) 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 [3]:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{p(l)} \quad (1.1)$$

Αν  $D(l)$  είναι η διάμετρος του μονωτήρα, τότε η σχέση 1.1 τροποποιείται ως εξής [8]:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{\pi \cdot D(l)} \quad (1.2)$$

Αλμυρότητα: Η συγκέντρωση αλατιού σε διάλυμα προερχόμενο από νερό βρύσης, εκφρασμένο σε ποσότητα αλατιού διαιρεμένη με τον όγκο του διαλύματος. Συνήθως εκφράζεται σε  $\text{kg/m}^3$ .

Στρώμα ρύπανσης: Είναι ένα αγωγίμο ηλεκτρολυτικό στρώμα στην επιφάνεια του μονωτήρα, το οποίο αποτελείται από αλάτι και αδρανή υλικά [3].

Αγωγιμότητα στρώματος: Η αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή μορφής. Συνήθως εκφράζεται σε  $\mu\text{S}$  [3].

Πυκνότητα εναποθέματος αλατιού (salt deposit density – SDD): Η ποσότητα αλατιού που εναποτίθεται σε δεδομένη επιφάνεια του μονωτήρα (μεταλλικά μέρη και υλικά σύνδεσης δεν πρέπει να συμπεριλαμβάνονται σε αυτή την επιφάνεια) διαιρεμένη με το εμβαδό της επιφάνειας. Συνήθως εκφράζεται σε  $\text{mg/cm}^2$  [3].

Ισοδύναμη πυκνότητα εναποθέματος αλατιού (equivalent salt deposit density – ESDD): Είναι η ισοδύναμη ποσότητα εναποθέματος σε  $\text{mg NaCl}$  ανά  $\text{cm}^2$  στην επιφάνεια ενός μονωτήρα, η οποία έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με το πραγματικό εναπόθεμα διαλυμένο στην ίδια ποσότητα νερού.

Διαβρεξιμότητα (wettability): Είναι η ικανότητα μίας επιφάνειας να υγρανθεί από ένα υγρό (π.χ. νερό) [4].

Υδροφοβικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με χαμηλό βαθμό διαβρεξιμότητας.



Μία υδρόφοβη επιφάνεια έχει χαμηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να απωθεί το νερό[18].

Υδροφιλικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με υψηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδρόφιλη επιφάνεια έχει υψηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να υγραίνεται από το νερό, το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα πάνω στην επιφάνεια [4].

## 1.4 ΥΛΙΚΑ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

Τα κυριότερα διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται σε μονωτήρες είναι κεραμικά και πολυμερή [1]. 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.

Το πυρίτιο ενώνεται με το οξυγόνο για το σχηματισμό ενός κρυσταλλικού ορυκτού, του χαλαζία, η δομή του οποίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και αποτελείται από κανονικά τετράεδρα Si-O, ή μιας άμορφης κατάστασης, που είναι γνωστή με την ονομασία “fuzed silica”. Όταν προστεθούν και άλλα στοιχεία στις δύο δομές που προαναφέρθηκαν, δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός πυριτικών αλάτων, κρυσταλλικής ή άμορφης δομής. Η ηλεκτρική πορσελάνη αποτελείται από ένα υαλώδες πλέγμα (άμορφη δομή) που περιλαμβάνει κρυστάλλους διαφορετικών ειδών και κόκκους από τα αρχικά συστατικά των ορυκτών, ορισμένα από τα οποία έχουν διαλυθεί μερικώς. Το ηλεκτρικό γυαλί, στην ιδανική περίπτωση, είναι ένα μείγμα πυριτικών αλάτων υαλώδους μορφής χωρίς προσμείξεις και ακαθαρσίες. Στην πράξη όμως, πάντα εμπεριέχονται παγιδευμένες φυσαλίδες αερίων και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό τα οποία εισάγουν ατέλειες στη δομή του υλικού. Οι μονωτήρες πορσελάνης κατασκευάζονται πάντα άμορφα υλικά (υαλώδης κατάσταση).

Ο άνθρακας ενώνεται με άνθρακα, όπως επίσης και με υδρογόνο, οξυγόνο και πολλά άλλα στοιχεία, για το σχηματισμό αλυσίδων και δακτυλίων που μπορούν να συνδέονται σταυροειδώς σε πολύπλοκες δομές σχηματίζοντας μακρομόρια. Τα καθαρά πολυμερή αποτελούνται από ένα επαναλήψιμο βασικό είδος μορίων, και είναι απαλλαγμένα από ξένες ουσίες. Αυτά, σπάνια χρησιμοποιούνται στην

κατασκευή μονωτήρων, καθώς η τακτική παγκοσμίως είναι να χρησιμοποιούνται συμπολυμερή και ορυκτά πληρωτικά μέσα για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των παραγομένων προϊόντων.

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 το εύθραυστο) και τέλος υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα.

Όμως, η ύπαρξη των ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια συμβάλλουν 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 αγωγίμες επιφανειακές οδούς και είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά 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 από ότι τα κεραμικά υλικά.

Από τα πρώτα στάδια της εξελικτικής πορείας των μονωτήρων έχει καταγραφεί η

αναγκαιότητα της εκμετάλλευσης των καλών ιδιοτήτων των κεραμικών, με ταυτόχρονη απαίτηση μείωσης:

- i. Της επιφανειακής τους υγροσκοπικότητας
- ii. Της ανεπιθύμητης έλξης ρύπων

Η έρευνα για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί συνεχίζεται ακόμα και σήμερα.

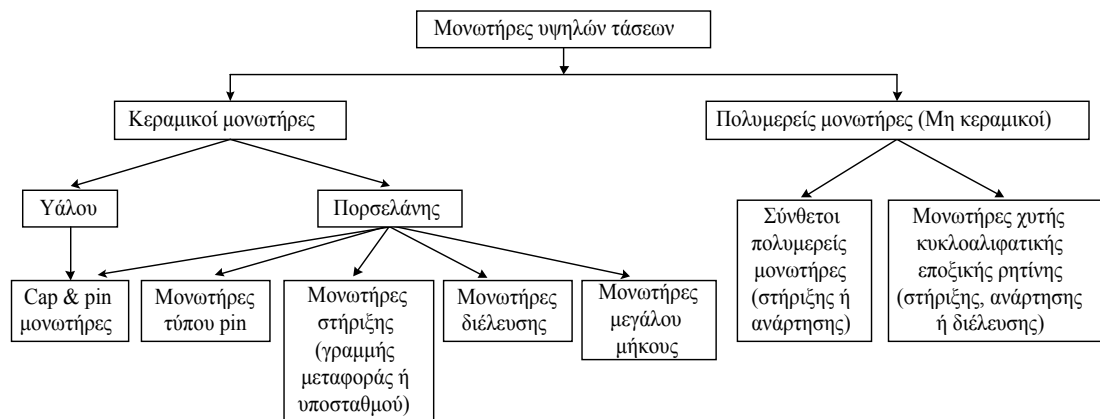
Οι κυριότερες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Ιδιότητα	Υαλώδης πορσελάνη	Σκληρομένο γυαλί	Πολυμερές	Υαλώδεις ίνες συνδεδεμένες με ρητίνη
Ποκνότητα [g/cm]	2.3 – 3.9	2.5	0.9 – 2.5	2.1 – 2.2
Αντοχή σε εφελκυσμό [Mpa]	30 – 100	100 – 120	20 – 35	1300 – 1600
Αντοχή σε θλίψη [Mpa]	240 – 820	210 – 300	80 – 170	700 – 750
Συντελεστής εφελκυσμού [Gra]	50 – 100	7.2	0.6 – 16	43 – 60
Θερμική αγωγιμότητα [W/m °K]	1 – 4	1.0	0.17 – 0.9	0.2 – 1.2
Διασταλτικότητα (20 – 100 °C) [10 <sup>-6</sup> / °K]	3.5 – 9.1	8.0 – 9.5	45 – 200	7.5 – 20
Διηλεκτρική σταθερά (50 – 60 Hz)	5.0 – 7.5	7.3	2.3 – 5.5	2.5 - 6.5
Εφαπτομένη απωλειών (50 – 60 Hz) [10 <sup>-3</sup> ]	20 – 40	15 – 50	0.1 – 5.0	5.0 – 20
Πεδιακή αντοχή [kV/mm]	10 – 20	>25	>25	3.0 – 20
Ειδική αντίσταση [Ω cm]	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>17</sup>	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>14</sup>

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών [1]

## 1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

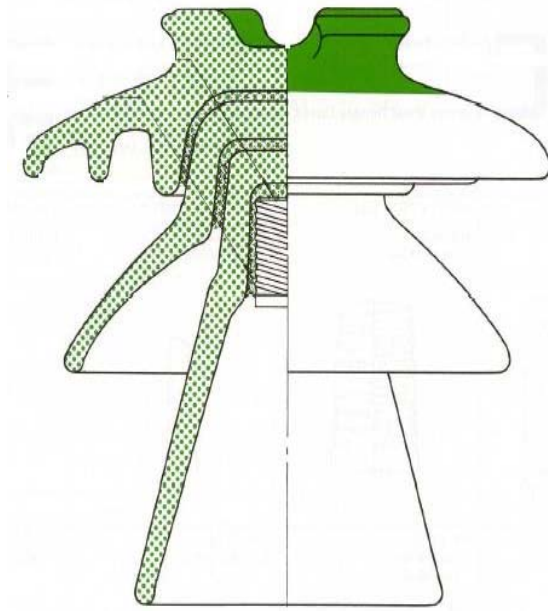
Οι μονωτήρες υψηλής τάσης έχουν εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια προκειμένου να σχεδιαστούν κατάλληλα, ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις που υπαγορεύουν ηλεκτρολογικές, μηχανολογικές και περιβαλλοντολογικές παράμετροι. Έτσι, κατασκευάστηκαν μονωτήρες από διαφορετικό υλικό και διαφορετικού σχήματος. Μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, ενώ στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές κατηγορίες μονωτήρων [5].



Σχήμα 1.2: Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης.

### Μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin (porcelain pin type insulators)

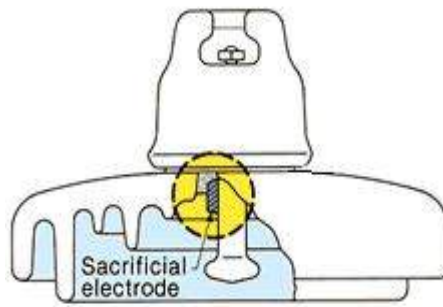
Ο τύπος αυτός μονωτήρα ήταν ο πρώτος που χρησιμοποιήθηκε στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και προέρχεται από τους πρώτους μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε τηλεγραφικές γραμμές [6]. Το ύψος του κάθε φορά καθορίζεται ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική και μηχανική αντοχή στην εγκατάσταση στην οποία λειτουργεί. Ο μονωτήρας αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3.



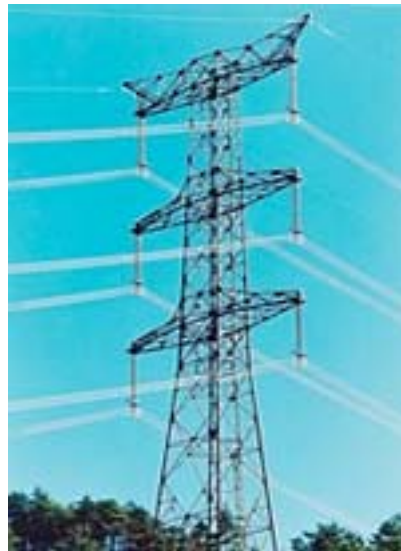
Σχήμα 1.3: Μονωτήρας τύπου pin.

Μονωτήρες τύπου cap and pin (cap and pin insulators)

Οι μονωτήρες αυτοί προέρχονται από τους μονωτήρες τύπου pin. Περιέχουν χαλύβδινα καλύμματα (caps) και πείρους (pins) που τους επιτρέπουν την σύνδεση τους με άλλες μονάδες με αποτέλεσμα το σχηματισμό αλυσίδων μονωτήρων με αυξημένη ηλεκτρική και μηχανική αντοχή. Η σύνδεση των μεταλλικών μερών με την πορσελάνη γίνεται με τσιμέντο κάτω από αυστηρά καθορισμένες συνθήκες ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη αντοχή. Οι εκτεθειμένες επιφάνειες του μονωτήρα επιστρώνονται συνήθως με βερνίκια που επιτρέπουν την εύκολη απομάκρυνση της ρύπανσης από την επιφάνεια τους. Από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι μονωτήρες αυτού του είδους είναι η οξείδωση που εμφανίζεται στην περιοχή του πείρου, υποβαθμίζοντας έτσι την ηλεκτρική και μηχανική αντοχή του. Γι' αυτό το λόγο οι σύγχρονες σχεδιαστικές τεχνικές προβλέπουν επίστρωση του χαλύβδινου πείρου με ψευδάργυρο πριν την συγκόλληση του μονωτήρα. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται ένας τυπικός cap and pin μονωτήρας ενώ στο σχήμα 1.5 διακρίνεται μια αλυσίδα cap and pin μονωτήρων που χρησιμοποιείται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς [6].



Σχήμα 1.4: Μονωτήρας τύπου cap and pin [5].



Σχήμα 1.5: Αλυσίδες στήριξης cap and pin μονωτήρων σε γραμμή μεταφοράς [5].

#### Μονωτήρες στήριξης (post type insulators)

Οι μονωτήρες αυτοί αποτελούνται από έναν συμπαγή πορσελάνινο κύλινδρο με πτυχώσεις στην επιφάνεια του, που αυξάνουν το μήκος ερπυσμού του ενώ παράλληλα του προσδίδουν αεροδυναμική μορφή που περιορίζει την εναπόθεση ρύπανσης. Χρησιμοποιούνται είτε σαν μονωτήρες στήριξης σε υποσταθμούς (σχήμα 1.6), είτε σαν μονωτήρες στήριξης στην άφιξη των γραμμών μεταφοράς σε πυλώνες υψηλής τάσης (σχήμα 1.7). Σήμερα υπάρχουν στην αγορά μονωτήρες στήριξης με ηλεκτρική αντοχή έως 2050 kV [6].

#### Μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους (longrod insulators)

Οι μονωτήρες μεγάλου μήκους είναι παρόμοιοι με τους μονωτήρες στήριξης, αλλά

είναι ελαφρύτεροι, λεπτότεροι και χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης.



*Σχήμα 1.6: Μονωτήρας τύπου post σε υποσταθμό [5].*



*Σχήμα 1.7: Μονωτήρας τύπου post σε γραμμή ΥΤ [5].*

#### Σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες (composite polymeric insulators)

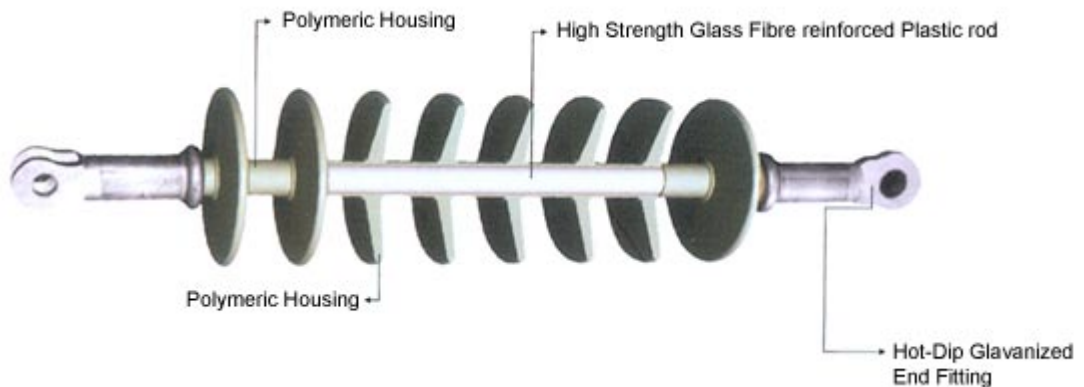
Αυτοί οι μονωτήρες είναι παρόμοιοι με τους πορσελάνινους μονωτήρες μεγάλου μήκους ως προς το σχήμα, αλλά διαφέρουν ως προς τα υλικά κατασκευής, τα οποία είναι τα εξής:

- Ένας πυρήνα ρητίνης ενισχυμένο με υαλώδεις ίνες (glass fibre), ο οποίος παρέχει

μηχανική αντοχή, ενώ ταυτόχρονα ανθίσταται και στην ηλεκτρική καταπόνηση.

- Ένα ελαστομερές περίβλημα (sheath/housing) για να προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες.
- Ελαστομερείς δίσκοι (sheds), τα αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ώστε να ανθίσταται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα. Δύο ευρέως χρησιμοποιημένα υλικά είναι το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και το αιθυλένιο-προπυλένιο-διένιο μονομερές καουτσούκ (ethylene propylene diene monomer – EDPM).

Ένας τυπικός μονωτήρας αυτού του τύπου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8 [6]. Οι μεταλλικοί ακροδέκτες είναι συνήθως στερεωμένες πάνω στην εξωτερική πλευρά της ράβδου του πυρήνα και τα συγκεκριμένα σημεία επαφής μεταξύ του ελαστομερούς και των ακροδεκτών είναι πολύ σημαντικά. Οι δοκιμές που εξασφαλίζουν την ποιότητα των σύνθετων μονωτήρων περιλαμβάνονται στο IEC 1109 [7]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90% σε σύγκριση με τους αντίστοιχους κεραμικούς.



Σχήμα 1.8: Σύνθετος πολυμερής μονωτήρας.

## 1.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

Για να μπορέσουμε να προβλέψουμε τις σχεδιαστικές τάσεις που πρόκειται να επικρατήσουν στους μελλοντικούς μονωτήρες πρέπει να μελετήσουμε τα νέα δεδομένα που υπάρχουν στην μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος [1]. Τα επίπεδα τάσης τείνουν να αυξηθούν σε επίπεδα άνω των 1000 kV ενώ η μεταφορά με HVDC προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά. Με βάση λοιπόν την λειτουργία γραμμών



μεταφοράς τόσο μεγάλης ισχύος είναι απαραίτητο τα σφάλματα από γεφυρώσεις να διατηρηθούν πολύ χαμηλά. Έτσι όλες οι σχεδιαστικές παράμετροι όπως το υλικό, το σχήμα και η μηχανική αντοχή είναι αναγκαίο να βελτιστοποιηθούν με πιθανή αύξηση του κόστους.

Μια λογική πρόβλεψη είναι ότι οι μελλοντικοί μονωτήρες τέτοιων χρήσεων θα είναι σχεδόν αποκλειστικά από πολυμερή υλικά. Οι πιθανοί συνδυασμοί των πολυμερών υλικών είναι τόσοι πολλοί που καθιστούν εφικτό τον σχεδιασμό υλικών με πολύ συγκεκριμένες ιδιότητες γεγονός που τα καθιστά πολύ ελκυστικότερα έναντι των κεραμικών. Πάντως οι κεραμικοί μονωτήρες θα εξακολουθήσουν να υπάρχουν εξαιτίας της καλής μηχανικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν η οποία θα είναι μεγάλο ζητούμενο στις μελλοντικές σχεδιαστικές απαιτήσεις αφού προβλέπεται μεγάλη αύξηση του βάρους των γραμμών μεταφοράς. Υποσχόμενες λύσεις στο πρόβλημα αυτό φαίνεται να είναι η ανάπτυξη νέων κεραμικών υλικών μεγαλύτερης μηχανικής αντοχής. Επιπλέον αναγκαία είναι η έρευνα για τον σχεδιασμό νέων σχημάτων μονωτήρων οι οποίοι θα ελαχιστοποιούν την ποσότητα υγρασίας και ρύπων στην επιφάνεια τους. Να σημειωθεί όμως ότι η προσπάθεια αυτή θα βρίσκεται πάντα σε αντίθεση με το κόστος κατασκευής τους και θα σταματά όχι εκεί που βελτιστοποιούνται οι ηλεκτρικές ιδιότητες του μονωτήρα αλλά εκεί που βελτιστοποιείται η σχέση μεταξύ του κόστους του και της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του.

## *Κεφάλαιο 2*

# **ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών η ζήτηση της ηλεκτρικής ισχύος αυξάνεται σταθερά. Για να ικανοποιηθεί η αυξημένη αυτή ζήτηση είναι αναγκαίο να κατασκευαστούν γραμμές μεταφοράς μεγαλύτερης χωρητικότητας και αυξημένης αξιοπιστίας. Για διάφορους λόγους η αύξηση της τάσης φαίνεται να είναι η πιο αποδοτική τακτική. Όμως αυτές οι συνθήκες λειτουργίας των γραμμών μπορούν να τις οδηγήσουν σε δύο βασικές μη ομαλές συνθήκες λειτουργίας με αποτέλεσμα την δημιουργία τόξων και την διακοπή της τροφοδοσίας. Οι συνθήκες αυτές είναι:

1. Υπερτάσεις που προκαλούνται από χειρισμούς (ζεύξη, απόζευξη και επανάζευξη γραμμών).
2. Μερικές ηλεκτρικές εκκενώσεις στην επιφάνεια των μονωτήρων προκαλούμενες από την ρύπανση που υπάρχει στην επιφάνεια του.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να μελετήσει την δεύτερη ανεπιθύμητη περίπτωση λειτουργίας η οποία εμφανίζεται στις γραμμές υψηλής τάσης.

### **2.2 ΡΥΠΑΝΣΗ**

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μονωτική ικανότητα των μονωτικών υλικών, σε περίπτωση που είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό χώρο, είναι η ρύπανση. Με τον όρο ρύπανση προσδιορίζεται η επικάλυψη 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 τη μορφή καταιωνισμένου νερού 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 (40% έως 80%) με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου [8].

Συνεπώς η παρατεταμένη ξηρασία, η περιβαλλοντολογική ρύπανση καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα μεταβάλλουν τη συμπεριφορά των μονωτικών υλικών που εκτίθενται σε αυτές με αποτέλεσμα να χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης.

Στο πρότυπο IEC 815/1986 [9], προκειμένου να υπάρχει μία κατηγοριοποίηση των περιοχών ανάλογα με το ποσοστό ρύπανσης, έχουν καθοριστεί ποιοτικά τέσσερα επίπεδα ρύπανσης (Πίνακας 2.1). Για κάθε επίπεδο ρύπανσης το αντίστοιχο ελάχιστο ονομαστικό ειδικό μήκος ερπυσμού (minimal nominal specific creepage distance), μετρούμενο σε mm/kV (πολική τάση) της υψηλότερης εφαρμοζόμενης τάσης στο μονωτήρα παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

<b>Επίπεδο ρύπανσης</b>	<b>Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού [mm/kV]</b>
I. Ελαφριά	16
II. Μεσαία	20
III. Βαριά	25
IV. Πολύ βαριά	31

*Πίνακας 2.1: Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού συναρτήσει του επιπέδου ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815 [9].*

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα επίπεδα ρύπανσης και για καθένα από αυτά περιγράφονται κατά προσέγγιση μερικές τυπικές περιοχές.

Επίπεδο ρύπανσης	Παράδειγμα τυπικού περιβάλλοντος
I. Ελαφριά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης.</li> <li>• Περιοχές με μικρή πυκνότητα βιομηχανιών ή κατοικιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις.</li> <li>• Αγροτικές περιοχές.</li> <li>• Ορεινές περιοχές.</li> </ul> <p>Όλες αυτές οι περιοχές πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 10km με 20km από τη θάλασσα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε ανέμους κατ' ευθείαν από τη θάλασσα.</p>
II. Μεσαία	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιοχές με βιομηχανίες, οι οποίες δεν παράγουν ιδιαίτερα ρυπασμένο καπνό, και/ή με μέση πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης.</li> <li>• Περιοχές με υψηλή πυκνότητα κατοικιών και/ή βιομηχανιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις.</li> <li>• Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους από τη θάλασσα, αλλά όχι πολύ κοντά στην ακτή (τουλάχιστον σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων ανάλογα με τη μορφολογία της παράκτιας περιοχής και τις συνθήκες ανέμου).</li> </ul>
III. Βαριά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιοχές με υψηλή πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με υψηλή πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης, οι οποίες παράγουν ρύπανση.</li> <li>• Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή κάθε περιοχή που εκτίθεται σε σχετικά ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα.</li> </ul>
IV. Πολύ βαριά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιοχές περιορισμένης έκτασης εκτεθειμένες σε αγωγήμη σκόνη και βιομηχανικό καπνό προκαλώντας αγωγίμες εναποθέσεις σημαντικού πάχους.</li> <li>• Περιοχές περιορισμένης έκτασης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε ακτή και εκτίθενται σε ψεκασμό θαλασσινού νερού ή σε πολύ δυνατό και ρυπασμένο αέρα από τη θάλασσα.</li> <li>• Περιοχές ερήμου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έλλειψη βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι και υποβάλλονται σε κανονική συμπίκνωση.</li> </ul>

Πίνακας 2.1: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815 [9].

### **2.3 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ (flashover)**

Το φαινόμενο της υπερπήδησης συμβαίνει στις υγρές επιφάνειες μονωτήρων στις οποίες έχουν συγκεντρωθεί ρύποι από το περιβάλλον με συνέπεια την δημιουργία αγωγίμου στρώματος. Όταν λοιπόν η διάδοση των μερικών ηλεκτρικών εκκενώσεων, οι οποίες ξεκινούν από το κέντρο του, γίνουν αρκετά ισχυρές ώστε να γεφυρώσουν τον μονωτήρα τότε αυτός χάνει εντελώς την ηλεκτρική του αντοχή. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι υπόλοιποι εν σειρά συνδεδεμένοι μονωτήρες θα υποστούν ολόκληρο το μέγεθος της τάσης και όταν και σε αυτούς εξελιχθεί το παραπάνω φαινόμενο θα οδηγηθούμε σε ολική γεφύρωση και διακοπή της τροφοδοσίας [10].

Οι απαραίτητες παράμετροι για την εκδήλωση του φαινομένου είναι η υγρασία και η ύπαρξη ρύπανσης [10]. Η διαδικασία της υπερπήδησης λοιπόν λαμβάνει χώρα ως εξής: Αρχικά κατά την διάρκεια ξηρών περιόδων διάφορες ουσίες που περιλαμβάνουν διαλυτικά ιοντικά στοιχεία, όπως το κοινό αλάτι, επικάθονται στην επιφάνεια του μονωτήρα. Όταν η επιφάνεια του μονωτήρα υγραίνεται, από την παρουσία βροχής, ομίχλης, πάγου κ.τ.λ, έχουμε ιονισμό των σωματιδίων αυτών και έτσι η επιφάνεια αρχίζει να γίνεται ηλεκτρικά αγωγή. Συνεπώς έχουμε την διέλευση υπολογίσιμου ρεύματος διαρροής το οποίο προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας με συνέπεια την ξήρανση των ζωνών αυτών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ξηρών ζωνών στην επιφάνεια του μονωτήρα οι οποίες γεφυρώνονται από τόξα ρευμάτων μικρής έντασης. Καθώς οι ξηρές ζώνες στο αρχικό αυτό στάδιο είναι απομονωμένες η ηλεκτρική δραστηριότητα συνεχίζεται μέσα στην περιοχή της ζώνης. Τα θερμικά φαινόμενα των τόξων αυτών προκαλούν την εξάτμιση επιπλέον υγρασίας με αποτέλεσμα την επέκταση της ξηρής ζώνης καθώς και του τόξου. Κάποιες φορές η εκκένωση επεκτείνεται μέχρι ενός σημείου και σβήνει, ενώ άλλες φορές το τόξο επιμηκύνεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να δημιουργείται γεφύρωση με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα.

Να σημειωθεί επιπλέον ότι 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 για τα οποία ευθύνονται. Μόνο πολύ σπάνια ο συνδυασμός αγωγιμότητας και ηλεκτρικής τάσης θα είναι

τέτοιος που θα επιτρέπει την ανάπτυξη ενός τόξου με τόσο ρεύμα ώστε να αυτοδιατηρείται 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

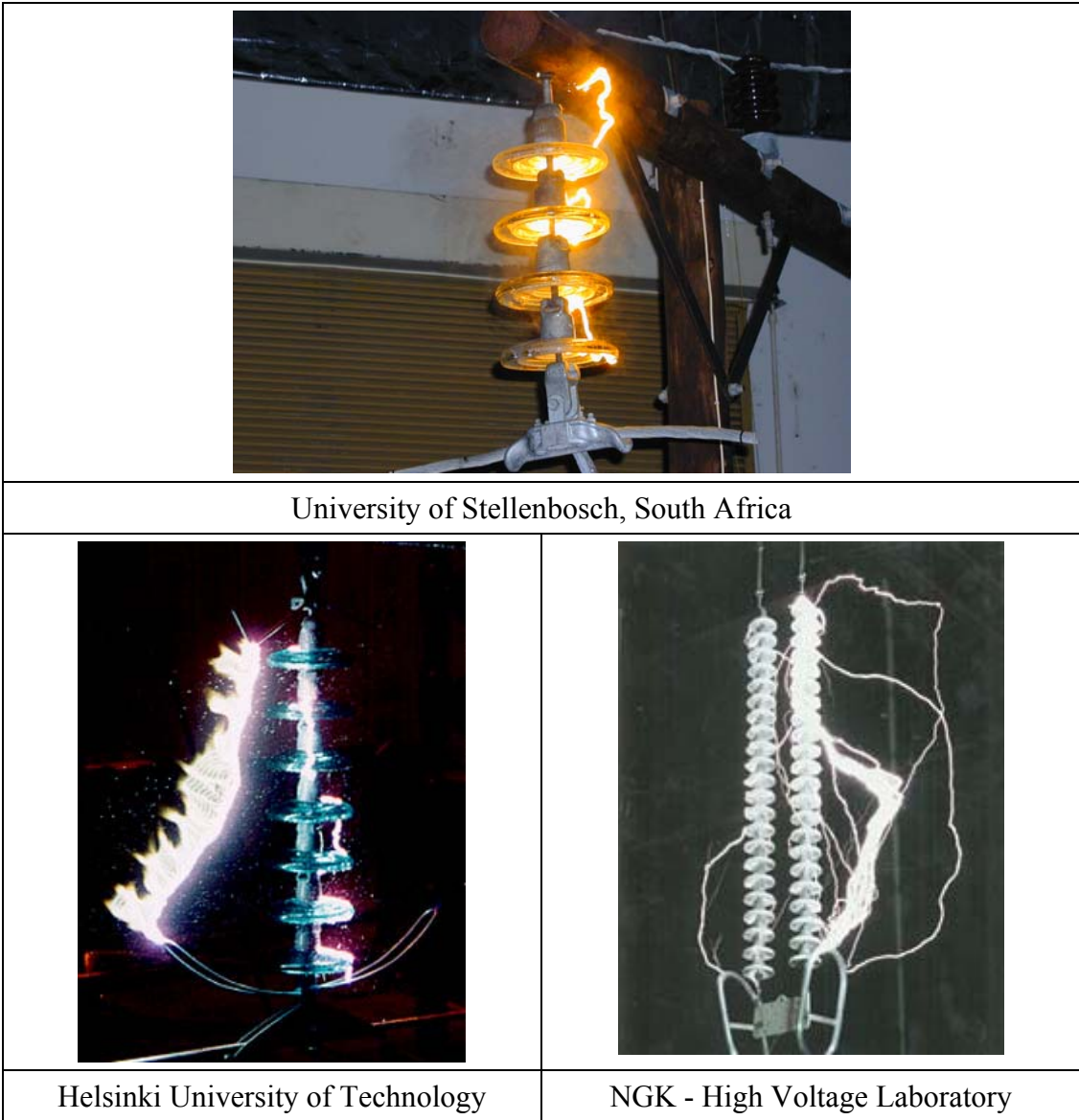
Συγκεντρωτικά μπορούμε να πούμε ότι το φαινόμενο της υπερπήδησης που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια των μονωτήρων αποτελείται από τα εξής τέσσερα βήματα [10]:

1. Εναπόθεση αγωγίμων αλάτων και υγρασίας στην επιφάνεια του.
2. Δημιουργία ξηρών ζωνών.
3. Μερικές γεφυρώσεις των ξηρών ζωνών.
4. Διάδοση της εκκένωσης κατά μήκος της επιφάνειας με αποτέλεσμα την ηλεκτρική γεφύρωση του μονωτήρα.

Αν κάποιο από τα προηγούμενα στάδια δεν πραγματοποιηθεί το φαινόμενο της υπερπήδησης δεν είναι δυνατόν να εκδηλωθεί.

Πολλές φυσικές διεργασίες, οι οποίες ακόμα δεν είναι πλήρως γνωστές, περιλαμβάνονται στην παραπάνω διαδοχή των γεγονότων. Όμως βασικός παράγοντας για την εξάπλωση τους είναι η κατάσταση της επιφάνειας. Ένας καινούργιος και καθαρός μονωτήρας κατά κανόνα θα παρουσιάζει ηλεκτρική συμπεριφορά πολύ καλύτερη από έναν παλιό και ρυπασμένο. Στην επιφάνεια του πρώτου η υγρασία διαλύεται σχηματίζοντας διαχωρισμένες σταγόνες ενώ στην περίπτωση του δεύτερου η υγρασία εξαπλώνεται σε όλη την επιφάνεια του με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρεύματος διαρροής και την εκκίνηση εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων. Η απαίτηση λοιπόν της ύπαρξης καθαρών μονωτήρων ή μονωτήρων με υδροφοβικές επιφάνειες έχει γίνει βασικό κριτήριο κατά τον σχεδιασμό τους. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του φαινομένου της υπερπήδησης προερχόμενες από ιστοσελίδες Εργαστηρίων Υψηλών Τάσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.

Μετά την εκδήλωση του ανεπιθύμητου αυτού φαινομένου τα μέσα προστασίας θα προκαλέσουν αφαίρεση της γραμμής από το δίκτυο έως ότου διορθωθεί το πρόβλημα και η γραμμή μπορέσει να υποστηρίξει την μεταφορά ξανά. Επίσης στις περιπτώσεις αυτές οι μονωτήρες αρκετά συχνά καταστρέφονται πλήρως και πρέπει να αντικατασταθούν από νέους.



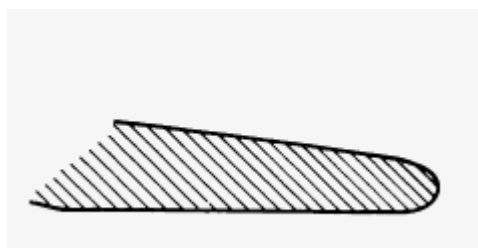
Σχήμα 2.1: Φωτογραφίες στις οποίες φαίνεται το φαινόμενο της υπερπήδησης.

## 2.4 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Καθώς η ρύπανση από φυσικές και βιομηχανικές πηγές έχει αυξηθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες σε συνδυασμό με την αύξηση των επιπέδων της τάσης μεταφοράς έχουν ως αποτέλεσμα το πρόβλημα της υπερπήδησης να έχει γίνει πολύ σοβαρό και με μεγάλο κόστος. Οπότε είναι αναγκαίο να ληφθούν μέτρα για τον μετριασμό του στις περιπτώσεις που η συχνότητα του υπερβεί κάποια αποδεκτά όρια. Τα όρια αυτά κάθε φορά καθορίζονται από την σημασία της γραμμής ή του υποσταθμού καθώς και από την απαιτούμενη αξιοπιστία της τροφοδοσίας. Οι πιο συνηθισμένες λύσεις στην περίπτωση αυτή εξαρτώνται από το είδος του μονωτήρα και σε κάθε περίπτωση είναι:

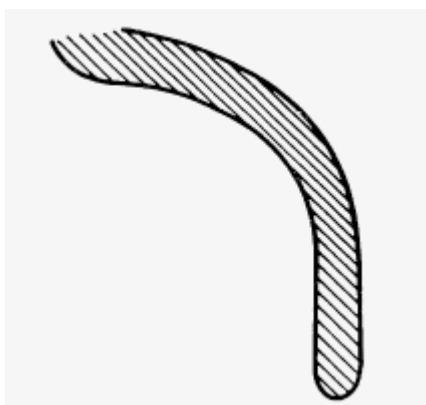
## Μονωτήρες πορσελάνης

1. Βελτιστοποίηση σχήματος μονωτήρων. Μεγάλη έρευνα έχει γίνει για τον σχεδιασμό μονωτήρων πολύπλοκων σχημάτων τα οποία θα επιτρέπουν στους μονωτήρες να ανθίστανται στην συσσώρευση στερεής ρύπανσης. Οι πιο κοινοί τρόποι για να το πετύχουμε αυτό είναι [10]:
  - α. Χρησιμοποιώντας τέλεια λειασμένες οριζόντιες επιφάνειες οι οποίες επιτρέπουν τον καθαρισμό τους με την επίδραση του αέρα (σχήμα 2.2).



*Σχήμα 2.2: Επίπεδη μορφή δίσκου μονωτήρα κατάλληλη για καθαρισμό υπό την επίδραση του ανέμου.*

- β. Χρησιμοποιώντας επιμήκεις κάθετες επιφάνειες οι οποίες κρατούν την ελάχιστη δυνατή ποσότητα νερού (σχήμα 2.3). Έχει αποδειχθεί ότι αύξηση κατά 10% της κλίσης ισοδυναμεί με μείωση κατά 50% της επιφανειακής αγωγιμότητας γεγονός που δείχνει την μεγάλη πρακτική αξία της μεθόδου [1].



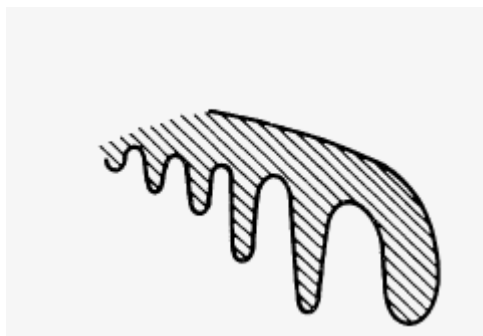
*Σχήμα 2.3: Μονωτήρας μεγάλης κλίσης που αποτρέπει την επιφανειακή συγκέντρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού.*

Το σχήμα των μονωτήρων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για να αυξηθεί το μήκος ερπυσμού. Αυτό επιτυγχάνεται με τους εξής σχεδιασμούς:

- α. Αυξάνοντας το μήκος ερπυσμού στην προστατευόμενη κάτω επιφάνεια του μονωτήρα όπου συνήθως έχουμε την μεγαλύτερη συγκέντρωση ρύπανσης

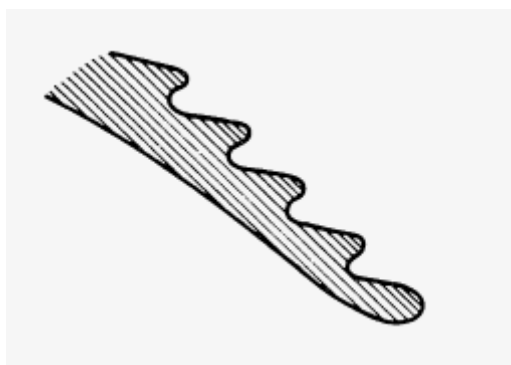


αφού εκεί δεν επιδρά αξιοσημείωτα ο άνεμος και η βροχή για την απομάκρυνση της (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Μονωτήρας με αυξημένο μήκος ερπυσμού στην κάτω επιφάνεια του.

β. Αυξάνοντας το μήκος ερπυσμού στην εξωτερική του επιφάνεια όπου συνήθως παρουσιάζεται η μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Μονωτήρας με αυξημένο εξωτερικό μήκος ερπυσμού.

2. Πλύσιμο. Οι μονωτήρες είναι δυνατόν να πλυθούν είτε βρίσκονται υπό τάση, είτε όχι με σκοπό την απομάκρυνση του αγωγίμου στρώματος ρύπανσης της επιφάνειας τους [1]. Αν και η τακτική αυτή είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση της ρύπανσης συνοδεύεται από μεγάλο λειτουργικό κόστος και για αυτό τον λόγο πρέπει να χρησιμοποιείται έπειτα από ορθολογικό προγραμματισμό.

3. Επιφανειακές επιστρώσεις. Γράσο ή πολυμερής επίστρωση εφαρμόζεται στην πορσελάνη προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητές της υπό συνθήκες ρύπανσης [10]. Όπως έχει ήδη τονιστεί απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της υπερπήδησης είναι η παρουσία υγρασίας. Ο ρόλος των επιφανειακών επιστρώσεων στην περίπτωση αυτή είναι να εμποδίσουν την δημιουργία ενιαίου στρώματος ύγρανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα διατηρώντας τις σταγόνες νερού απομακρυσμένες μεταξύ τους. Επιπλέον τα υλικά αυτά έχουν την ικανότητα να

‘αιχμαλωτίζουν’ τα μόρια της στερεής ρύπανσης και με αυτόν τον τρόπο εμποδίζουν την περαιτέρω διάσπαση τους σε ιόντα.

Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι αν και η τακτική αυτή βελτιώνει την ηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων δεν αποτελεί μόνιμη θεραπεία στο πρόβλημα. Μετά από ένα ή δύο χρόνια χρήσης ο μονωτήρας πρέπει να καθαριστεί και έπειτα να χρησιμοποιηθεί νέα επίστρωση αφού η προηγούμενη θα έχει χάσει δραματικά την αποτελεσματικότητά της.

### **Πολυμερείς μονωτήρες**

Στα πολυμερή υλικά σπάνια χρησιμοποιούνται πρόσθετα μέτρα για την αποφυγή υπερπηδήσεων. Απαιτείται, όμως, ιδιαίτερη προσοχή κατά τη δημιουργία του υλικού και το σχεδιασμό του μονωτήρα .

Τα πολυμερή μονωτικά υλικά είναι απαραίτητο να έχουν δύο αμυντικούς μηχανισμούς κατά της ρύπανσης και κατ’ επέκταση της δημιουργίας υπερπηδήσεων. Αυτοί είναι:

1. Έλεγχος του ρεύματος διαρροής. 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. Το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί, τόσο με την επιλογή του κατάλληλου υλικού, όσο και με τον κατάλληλο σχεδιασμό του μονωτήρα.
2. Αντοχή στη διάβρωση. 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 υδροφοβικότητα 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 υδροφοβικότητά του, υπερτερεί ενός υλικού, το οποίο μπορεί να επανακτήσει την υδροφοβικότητά του, αλλά έχει μικρή αντοχή στη διάβρωση.

## *Κεφάλαιο 3*

# ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Είναι γνωστό ότι τα κύρια φαινόμενα που οδηγούν στην υπερπήδηση ενός ρυπασμένου μονωτήρα υπό την τάση λειτουργίας περιλαμβάνουν το σχηματισμό ενός αγωγίμου στρώματος στην επιφάνεια του μονωτήρα, την αύξηση του ρεύματος διαρροής σε συνδυασμό με τον σχηματισμό ξηρών ζωνών και την ανάπτυξη μερικών εκκενώσεων, και τη διάδοση των τόξων κατά μήκος της επιφάνειας των μονωτήρων, τα οποία μπορεί τελικά να επεκταθούν τελικά σε ολόκληρο τον μονωτήρα.

Στη βιβλιογραφία τα φαινόμενα που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του μονωτήρα έχουν μελετηθεί από πολλές διαφορετικές πλευρές και έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετοί τρόποι προσέγγισής τους. Αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού των παραμέτρων του φαινομένου, οι οποίες στηρίχθηκαν σε μαθηματικά μοντέλα, πειραματικές διατάξεις και προγράμματα προσομοίωσης, ενώ σε κάθε περίπτωση εξετάστηκε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων με μεγάλη προσοχή.

### 3.2 ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα φαινόμενα σχηματισμού τόξου, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε ρυπασμένες επιφάνειες, είναι τόσο σύνθετα, που 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 ανομοιομορφία στη μορφή των μονωτήρων και το είδος της ρύπανσης, τη μεταβολή της επιφανειακής ειδικής αντίστασης λόγω των θερμικών διαδικασιών και την ανομοιομορφη ύγρανση, την ανομοιομορφία των τόξων που σχηματίζονται στην περιοχή της επιφάνεια των μονωτήρων, πολλαπλασιασμός των τόξων, επίδραση των παραμέτρων του κυκλώματος τροφοδοσίας στη συμπεριφορά μονωτήρων, κ.α. Η τάση υπερπήδησης ενός ρυπασμένου μονωτήρα είναι μια στατιστική μεταβλητή, η οποία χαρακτηρίζεται

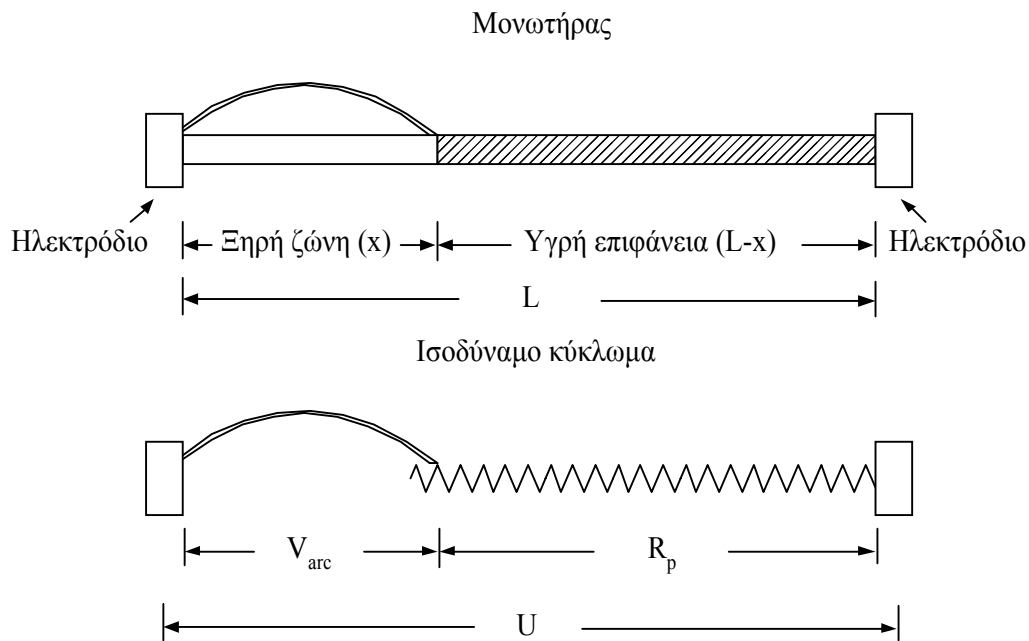
από σημαντική διασπορά, ακόμη και υπό ελεγχόμενες συνθήκες [11].

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

Υπάρχουν δύο θεμελιώδη σημεία στη μοντελοποίηση του φαινομένου σχηματισμού τόξου σε ρυπασμένες επιφάνειες: Από τη μία πλευρά είναι η διατύπωση της ελάχιστης τάσης, απαραίτητης να στηρίζει 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 στηρίζει, τότε το τόξο αποσβένει 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 στεγνώνει το στρώμα ρύπανσης αποφεύγοντας, με αυτό τον τρόπο, τη δημιουργία και συνεπώς μειώνοντας τον κίνδυνο υπερπήδησης. Στη βιβλιογραφία διαφαίνεται ότι έχει γίνει ιδιαίτερη προσπάθεια ως προς τη διατύπωση των εκφράσεων για την ελάχιστη τάση, η οποία είναι απαραίτητη να στηρίζει μία μερική εκκένωση, αλλά πολύ ελάχιστα έχουν γίνει ως προς την ποσοτικοποίηση του μηχανισμού διάδοσης τόξων. Αυτό απορρέει από την έλλειψη λεπτομερούς γνώσης για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στη μετακίνηση τόξων και, επίσης, οφείλεται στον ισχυρισμό πολλών ερευνητών ότι το κριτήριο για την ύπαρξη τόξων είναι το σημαντικότερο για τη δημιουργία υπερπήδησης [12].

Μία από τις πρώτες ποσοτικές προσεγγίσεις των τόξων που δημιουργούνται σε

ρυπασμένες επιφάνειες είναι αυτή του Obenaus. Σε αυτό το μοντέλο, το οποίο είναι κυκλωματικό, υπάρχει ένα τόξο μήκους  $x$ , το οποίο παριστάνει το τόξο που δημιουργείται 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 Obenaus παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.1 [11].



Σχήμα 3.1: Το μοντέλο του Obenaus.

Η τάση του τόξου  $V_{arc}$  εκφράζεται από τη σχέση:

$$V_{arc} = \frac{x \cdot A}{i^n} \quad (3.1)$$

όπου  $n$  και  $A$  είναι σταθερές εξαρτώμενες από τα χαρακτηριστικά του στατικού τόξου και  $i$  είναι το ρεύμα. Για τόξα που λαμβάνουν χώρα στον αέρα οι παραπάνω σταθερές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών  $0.45 \leq n \leq 1.30$  και  $50 \leq A \leq 200$ . Στη συνέχεια, οι σταθερές αυτές προσδιορίστηκαν με διάφορους τρόπους και τα όρια τροποποιήθηκαν σε  $0.3 \leq n \leq 1$  και  $50 \leq A \leq 400$  (από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. έχουν προταθεί οι τιμές  $n = 0.374$  και  $A = 131.5$  [13], καθώς και  $n = 0.409$  και  $A = 124.8$  [14]). Χρήσιμη στο σημείο αυτό είναι η παράθεση του πίνακα 3.1 στον οποίο φαίνονται οι σταθερές  $A$ ,  $n$  που έχουν προταθεί από τους διάφορους ερευνητές [15].

A.A	ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ	A	n	Τύπος Τροφοδοσίας	Μέσο Διάδοσης
1	Suits C.G (1939)	65,0 220,0 81,0	0,60 0,60 0,60	NS NS NS	Αέρας Ατμός Άζωτο
2	Obenaus et. al. (1959)	100,0	0,70	AC	Αέρας
3	Alston LL et. al. (1963)	63,0	0,76	AC	Αέρας
4	E.Nasser et.al (1963)	63,0	0,76	DC	Αέρας
5	Hampton et.al (1964)	65,0 52,0	0,80 0,10	NS NS	Αέρας Ατμός
6	E.Los et.al (1971)	52,0	0,43	DC	Αέρας
7	Nottingham (1973)	44,0 31,0 39,2 20,3	0,67 0,99 0,67 1,38	DC	Αέρας
8	Claverip et.al (1974)	113,0 98,9	0,50 0,50	AC	Αέρας
9	Jolly D.C et.al (1974)	296,0	0,40	AC	Αέρας
10	El-arbaty et.al (1979)	40,0	0,80	AC	Αέρας
11	Rizk F.A.M (1981)	130,0	0,45 έως 1,30	DC	Αέρας
12	Gers et.al (1981)	46,0 44,7 43,8 59,6	0,91 0,82 0,82 0,77	DC ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ DC DC	Αέρας
13	M.P Varma (1981)	53,4	0,50	AC	Αέρας
14	Mayr's et.al (1986)	40,6 50,2 114,0	0,72 0,71 0,71	DC	Αέρας Ήλιο Άζωτο
15	Swift D.A (1989)	80 60	0,50	DC	Αέρας
16	G.Shicheng et.al (1990)	138,0 140,0	0,69 0,67	DC AC	Αέρας
17	Topalis F.L (1992)	131,5	0,37	AC	Αέρας
18	R.Sunder Rajan et.al (1993)	60 63	0,80 0,50	DC	Αέρας
19	R.P Sign et.al (1993)	31 έως 100	0,43 έως 0,98	AC	Αέρας
20	H.G.Gopal et.al (1995)	60 100	0,25 1,20	NS	Αέρας
21	Chaurasia D.C et.al (1996)	50 100	0,25 έως 1,10	AC	Αέρας

Πίνακας 3.1 Προτεινόμενες τιμές των A, n από διάφορους ερευνητές [15].

Αν η τάση  $V_{arc}$  εκφραστεί κυκλωματικά, τότε η εξίσωση (3.1) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$x = \frac{i^n}{A} \cdot (U - i \cdot R_p) \quad (3.2)$$

Το μέγιστο μήκος του τόξου, το οποίο μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά με μία σταθερή αντίσταση  $R_p$  σε ένα κύκλωμα τροφοδοτούμενο από συνεχή τάση  $U$  μπορεί να υπολογιστεί διαφορίζοντας ως προς το ρεύμα  $i$  τη σχέση (3.2) και εξισώνοντας τη με το μηδέν. Το κρίσιμο ρεύμα  $i_{cx}$  δίνεται από τη σχέση:

$$i_{cx} = \frac{n}{n+1} \cdot I_{sc}^* \quad (3.3)$$

όπου  $I_{sc}^* = U/R_p$  είναι το ρεύμα που θα έρεε το κύκλωμα αν το τόξο αντικατασταθεί από βραχυκύκλωμα. Το κρίσιμο μήκος του τόξου  $x_c$  δίνεται από τη σχέση:

$$x_c = \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}} \cdot U \cdot \frac{I_{sc}^{*n}}{A} \quad (3.4)$$

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

$$U_{cx} = \frac{n+1}{\frac{n}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot x^{\frac{1}{n+1}} \cdot R_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (3.5)$$

Το μοντέλο του Obenaus 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 Obenaus, οι Neumärker και Rizk [12] ποσοτικοποίησαν την ομοιόμορφη ρύπανση μέσω μίας αντίστασης  $\bar{r}_p$  ανά μονάδα μήκους ερπυσμού  $L$ .

$$R_p = \bar{r}_p \cdot (L - x) \quad (3.6)$$

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

$$\frac{n \cdot A}{r_p} \cdot \left[ \frac{U_{cx}}{(1+n) \cdot A \cdot L} \right]^{\frac{n+1}{n}} = \left( \frac{x}{L} \right)^{\frac{1}{n}} - \left( \frac{x}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (3.7)$$

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

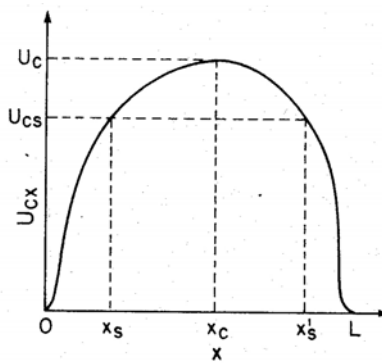
$$E_c = \frac{U_c}{L} = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{-\frac{n}{n+1}} \quad (3.8)$$

Το κρίσιμο ρεύμα σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο δίνεται από τη σχέση:

$$i_c = \left( \frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.9)$$

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

Οι Alston και Zoledziowski [16] κατέληξαν στο ίδιο μοντέλο με τους Neumärker και Rizk. 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 κρίσιμη τάση σχηματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



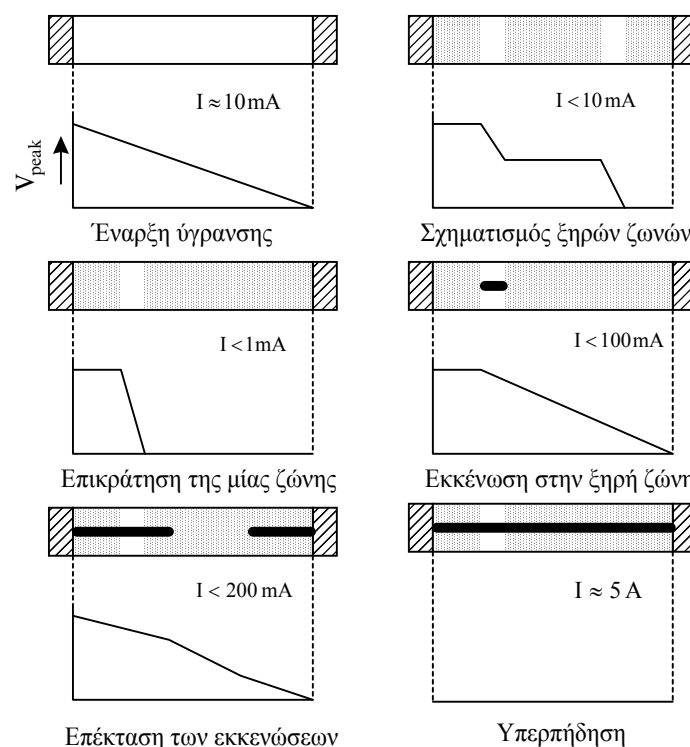
Σχήμα 3.2: Η κρίσιμη τάση συναρτήσει του μήκους του τόξου.

Αν εφαρμοστεί στα άκρα του μονωτήρα μία τάση  $U_{cx}$  η εκκένωση που δημιουργείται έχει αρχικά μικρό μήκος και σταδιακά αναπτύσσεται μέχρι  $x = x_s$ , αλλά όχι περισσότερο, γιατί σε αντίθετη περίπτωση η τάση θα υπερέβαινε την τιμή  $U_{cx}$ .



Αντίστοιχα, αν το μήκος του τόξου αρχικά υπερβεί την τιμή  $x'_s$ , τότε επιπλέον αύξησή του μπορεί να μειώσει την τάση συντήρησης του τόξου (burning voltage), τόσο ώστε το τόξο να οδηγήσει σε υπερπήδηση. Τα παραπάνω ισχύουν όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από την κρίσιμη τάση  $U_c$ . Υπερπήδηση είναι αδύνατο να συμβεί αν η εφαρμοζόμενη τάση και το αρχικό μήκος του τόξου είναι μικρότερα από τις κρίσιμες τιμές τους. Η εγκυρότητα του μοντέλου ελέγχθηκε τόσο με πειράματα των ίδιων των συγγραφέων, όσο και με πειράματα άλλων.

Ο Hampton [1] εξέτασε πειραματικά το μηχανισμό υπερπήδησης χρησιμοποιώντας στρώματα τεχνητής ρύπανσης. Κάλυψε λωρίδες γυαλιού με στρώματα διατομίτη, δεξτρίνης και άλατος. Τα στρώματα αυτά ψεκάστηκαν με νερό, σε ειδικό θάλαμο, και καταγράφηκε η διαδικασία της υπερπήδησης. Η παραπάνω πειραματική διαδικασία των οδήγησε στο μοντέλο, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 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.



Σχήμα 3.3: Η εξέλιξη της διαδικασίας της υπερπήδησης.

Ο Hampton έδειξε ότι το κριτήριο για τη διάδοση των εκκενώσεων στην επιφάνεια του μονωτήρα προκαλώντας υπερπήδηση είναι η ένταση του υγρού στρώματος,  $E_p$ ,

να υπερβαίνει την ένταση του τόξου,  $E_a$  ( $E_a < E_p$ ). Γενικά, όσο η  $E_a$  είναι μεγαλύτερη της  $E_p$ , οποιαδήποτε φυσική εξάπλωση του τόξου οδηγεί σε μείωση του ρεύματος, με περαιτέρω μείωση της  $E_a$ , καθώς εκφράζεται από τη σχέση (3.10). Έτσι, η επέκταση του τόξου σταματά.

$$E_a = A \cdot i^{-n} \quad (3.10)$$

όπου  $i$  είναι το ρεύμα και  $A$ ,  $n$  είναι σταθερές.

Ο Hampton μέτρησε τη σχέση τάσης / ρεύματος 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 απ' τις θεωρητικές μελέτες των Obenaus 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.

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

Ο Wilkins [17] 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 εκείνο με το μέγιστο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας. Αν  $x$  είναι το μήκος της εκκένωσης, επέκταση της εκκένωσης θα συμβεί όταν:

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (3.11)$$

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

$$\frac{di}{dx} > 0 \quad (3.12)$$

Η σχέση (3.12) 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 αυτή τιμή.

Το γενικευμένο κριτήριο για την διάδοση των εκκενώσεων, το οποίο εκφράζεται από τη σχέση (3.11), υποστήριξαν αργότερα οι Ghosh και Chatterjee, κατόπιν πειραματικής έρευνας που διεξήγαγαν [18].

Ο Wilkins χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Σχήματος 3.4 υπολόγισε το κρίσιμο ρεύμα και την κρίσιμη τάση λαμβάνοντας υπόψη και το πλάτος της ρυπασμένης λωρίδας. Σύμφωνα με την διάταξη αυτή η εφαρμοσμένη τάση δίνεται από

$$V = x \cdot A \cdot i^{-n} + 2 \cdot i \cdot R \quad (3.13)$$

όπου R η εν σειρά αντίσταση της ρυπασμένης επιφάνειας μεταξύ κάθε άκρου της εκκένωσης και του αντίστοιχου ηλεκτροδίου.

Ο Wilkins στην ανάλυση του θεώρησε δύο περιπτώσεις για την αντίσταση R. Στην πρώτη, το πλάτος του εν σειρά στρώματος ρύπανσης είναι μικρότερο από το μήκος του και τότε η αντίσταση ισούται:

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s} \cdot \left\{ \frac{\pi \cdot (L - x)}{\alpha} + \log \frac{\alpha}{2 \cdot \pi \cdot r_d} \right\} \quad (3.14)$$

ενώ η κρίσιμη τάση προκύπτει:

$$V_c = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \cdot \left\{ L + \frac{\alpha}{2 \cdot \pi} \cdot \log \frac{S \cdot a^2}{4 \cdot \pi \cdot i_c} \right\} \quad (3.15)$$

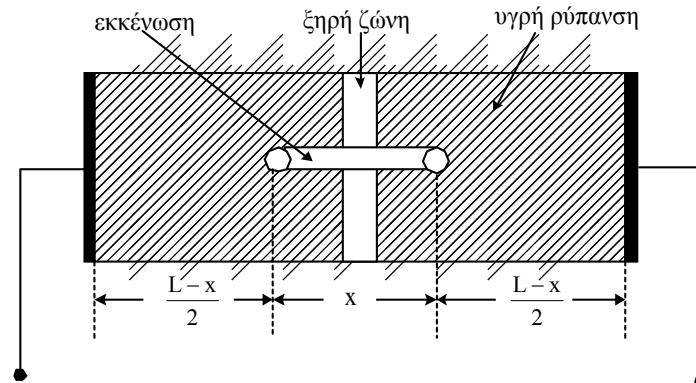
$$\text{όπου } S = \frac{i}{\pi \cdot r_d^2} \quad (3.16)$$

Στην δεύτερη, το πλάτος του εν σειρά στρώματος ρύπανσης είναι μεγαλύτερο του μήκους του. Στην περίπτωση αυτή:

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s} \cdot \left\{ \log \frac{2 \cdot L}{\pi \cdot r_d} - \log \tan \frac{\pi \cdot x}{2 \cdot L} \right\} \quad (3.17)$$

και τελικά

$$V_c = \frac{i_c}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s} \cdot \log \frac{4 \cdot L^2 \cdot S}{\pi \cdot i_c} + \frac{L}{2} \cdot A \cdot i_c^{-n} \quad (3.18)$$



Σχήμα 3.4: Μοντέλο υπερπήδησης κατά τον Wilkins.

Συγκρίνοντας την κρίσιμη τιμή του ρεύματος με εκείνη που υπολογίστηκε από τους Alston και Zoledziowski [16] 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.

Σε μια προσπάθεια καλύτερης προσομοίωσης της αντίστασης της ρυπασμένης επιφάνειας ενός μονωτήρα οι Obenaus, Boehme [12] θεώρησαν δύο εν σειρά στρώματα ρύπανσης με ανά μονάδα μήκους αντίσταση  $\overline{r_{p1}}$  και  $\overline{r_{p2}}$  και επιμέρους μήκη ερπυσμού  $L_1$  και  $L_2$  αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας το κριτήριο του Hampton με  $n=1$  καθώς και διαστάσεις μονωτήρων ευρέως χρησιμοποιημένους καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση για την κρίσιμη τάση υπερπήδησης

$$\frac{U_c}{L} = 0,8 \cdot \sqrt{N} \cdot \sqrt{r_{p1}} \quad (3.19)$$

Θεωρώντας  $N=80$  VA/cm το μοντέλο έδειξε καλή συμφωνία με αποτελέσματα πειραμάτων AC στην περίπτωση ήπιας ρύπανσης και μάλλον κακά αποτελέσματα στην περίπτωση βαριάς ρύπανσης.

Εκτός από τα μοντέλα συνεχούς ρεύματος, αναπτύχθηκαν και μοντέλα εναλλασσομένου ρεύματος. Οι Hurley και Limbourn [12] 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:

$$U_{cx} = \text{const.} \cdot x^{2/3} \cdot R_p^{1/3} \quad (3.20)$$

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:

$$U_c = \text{const.} \cdot r_p^{-1/3} \cdot L_a^{2/3} \cdot L^{1/3} \quad (3.21)$$

όπου  $L_a$  είναι το μήκος του τόξου.

Πειραματική έρευνα έδειξε ότι στην περίπτωση χρησιμοποίησης γραμμικού μοντέλου

με  $L_a = \frac{2}{3}L$  προκύπτει

$$U_c = 47,6 \cdot r_p^{-1/3} \cdot L \quad (3.22)$$

Στη συνέχεια από το μοντέλο των Claverie και Porcheron [12] προέκυψε η ακόλουθη εμπειρική σχέση που συνδέει την ελάχιστη τάση επικράτησης του τόξου με το ρεύμα του τόξου:

$$U_{cx} = \frac{800 \cdot x}{\sqrt{i}} \quad (3.23)$$

Οι Zhicheng και Renyu [10] , το 1990, 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 των τόξων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι πιο σύνθετη. Το μήκος και η ένταση των τόξων εναλλασσόμενου ρεύματος αλλάζουν πολλές φορές ανά δευτερόλεπτο. Το τόξο απέκτησε μεγάλη ένταση μόνο κοντά στη μέγιστη τάση, ενώ κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου χρόνου το τόξο μειώθηκε και στη συνέχεια επανέκτησε την έντασή του ακολουθώντας την εναλλασσόμενη τάση. Συγκεκριμένα παρατήρησαν δύο διαφορετικά φαινόμενα σχετικά με τη διάδοση τόξων εναλλασσόμενου ρεύματος. Στη μια περίπτωση το τόξο εξαλείφθηκε κατά τη μετάβαση του ρεύματος από το μηδέν και έπειτα ξαναδημιουργήθηκε. Στην άλλη περίπτωση το τόξο δεν εξαλείφθηκε, αλλά αποδυναμώθηκε και μίκρυνε σε μήκος κατά τη μετάβαση του ρεύματος από το μηδέν. Στηριζόμενοι οι Zhicheng και Renyu εφ' ενός μεν στα παραπάνω συμπεράσματα και εφ' ετέρου στο μοντέλο που αποτελείται από ένα τοπικό τόξο σε σειρά με την αντίσταση του στρώματος ρύπανσης, κατέληξαν σε μαθηματικές εκφράσεις για την τιμή του κρίσιμου ρεύματος και της κρίσιμης τάσης τόσο για την περίπτωση συνεχούς ρεύματος, όσο και για την περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην περίπτωση συνεχούς τάσης η διαδικασία που εφαρμόστηκε ήταν: Η συνήθης εξίσωση περιγραφής της υπερπήδησης είναι

$$U = A \cdot X \cdot I^{-n} + R(x) \cdot I \quad (3.24)$$

όπου  $U$  η εφαρμοσμένη στον μονωτήρα τάση,  $I$  το ρεύμα που διαρρέει την επιφάνεια του μονωτήρα,  $R(x)$  η αντίσταση του ρυπασμένου στρώματος,  $X$  το μήκος του τόξου και  $A, n$  οι χαρακτηριστικές σταθερές του τόξου. Θεωρώντας το  $X$  σταθερό και χρησιμοποιώντας  $\frac{dU}{dI} = 0$  η ελάχιστη τάση  $U_n$  η ικανή να διατηρήσει ένα τόξο μήκους  $X$  είναι:

$$I_n = \left[ \frac{n \cdot A \cdot X}{R(x)} \right]^{1/n+1} \quad (3.25)$$

$$U_n = \left[ 1 + \frac{1}{n} \right] \cdot [n \cdot A \cdot X]^{1/n+1} \cdot R(x)^{n/n+1} \quad (3.26)$$

Από την συνθήκη  $\frac{dU_n}{dx} = 0$  προκύπτει η

$$R(x) = -n \cdot x \cdot \frac{dR(x)}{dx} \quad (3.27)$$

Το κρίσιμο μήκος τόξου  $X_c$  προκύπτει με αριθμητική επίλυση αυτής, έτσι τελικά τα κρίσιμα μεγέθη τάσης και έντασης είναι:

$$I_c = \left[ \frac{n \cdot A \cdot X_c}{R(X_c)} \right]^{1/n+1} \quad (3.28)$$

$$U_c = \left[ 1 + \frac{1}{n} \right] \cdot [n \cdot A \cdot X_c]^{1/n+1} \cdot R(X_c)^{n/n+1} \quad (3.29)$$

Οι Zhicheng και Renyu εξέτασαν επιπλέον και την επίδραση που έχει η τυχαιότητα ανάπτυξης των τόξων στην κρίσιμη τάση. Είναι γνωστό ότι η κρίσιμη τάση παρουσιάζει διακύμανση ακόμα και όταν οι συνθήκες λειτουργίας παραμένουν σταθερές. Οι λόγοι για την διακύμανση αυτή είναι αρκετά πολύπλοκοι, αλλά ένας από τους σημαντικότερους είναι τα φαινόμενα των τόξων που συμβαίνουν στην επιφάνεια των μονωτήρων. Τέτοια φαινόμενα όπως η απομάκρυνση των εκκενώσεων από την επιφάνεια του μονωτήρα η ύπαρξη περισσότερων του ενός τόξου στην επιφάνεια παρουσιάζουν μεγάλη στοχαστικότητα και επηρεάζουν έντονα το φαινόμενο της υπερπήδησης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω οι Zhicheng και Renyu κατέληξαν στην παρακάτω εξίσωση για την κρίσιμη τάση:

$$U = A \cdot X \cdot K \cdot I^{-n} + \left[ \frac{K \cdot I}{\pi \cdot \gamma_\varepsilon} \right] \cdot \ln \left[ \frac{L - X}{K \cdot R_0} \right] \quad (3.30)$$

όπου  $K$  ο λόγος του μήκους του τόξου προς το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα και  $\gamma_\varepsilon$  η τιμή της επιφανειακής αγωγιμότητας την στιγμή της γεφύρωσης.

Οι Sundararajan και Gorur [19] παρουσίασαν ένα δυναμικό μοντέλο για τον υπολογισμό της υπερπήδησης σε ρυπασμένους μονωτήρες συνεχούς τάσης. Το μοντέλο τους είναι βασισμένο στη μελέτη του Obenaus και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5. 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 των τόξων αλλάζει δυναμικά κατά το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα.

Το νέο στην περίπτωση του μοντέλου αυτού είναι ότι κάθε στιγμή υπολογίζεται η νέα αντίσταση τόξου καθώς αυτό διαδίδεται ως  $R_{\text{arc}(\text{new})} = R_{\text{arc}(\text{old})} + dR_{\text{arc}}$  καθώς και ο νέος συντελεστής μορφής του τόξου. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα διαρροής κάθε στιγμή. Έπειτα υπολογίζεται η ένταση του τόξου

$$E_a = A \cdot I^{-n} \quad (3.31)$$

καθώς και την ένταση του υγρού στρώματος

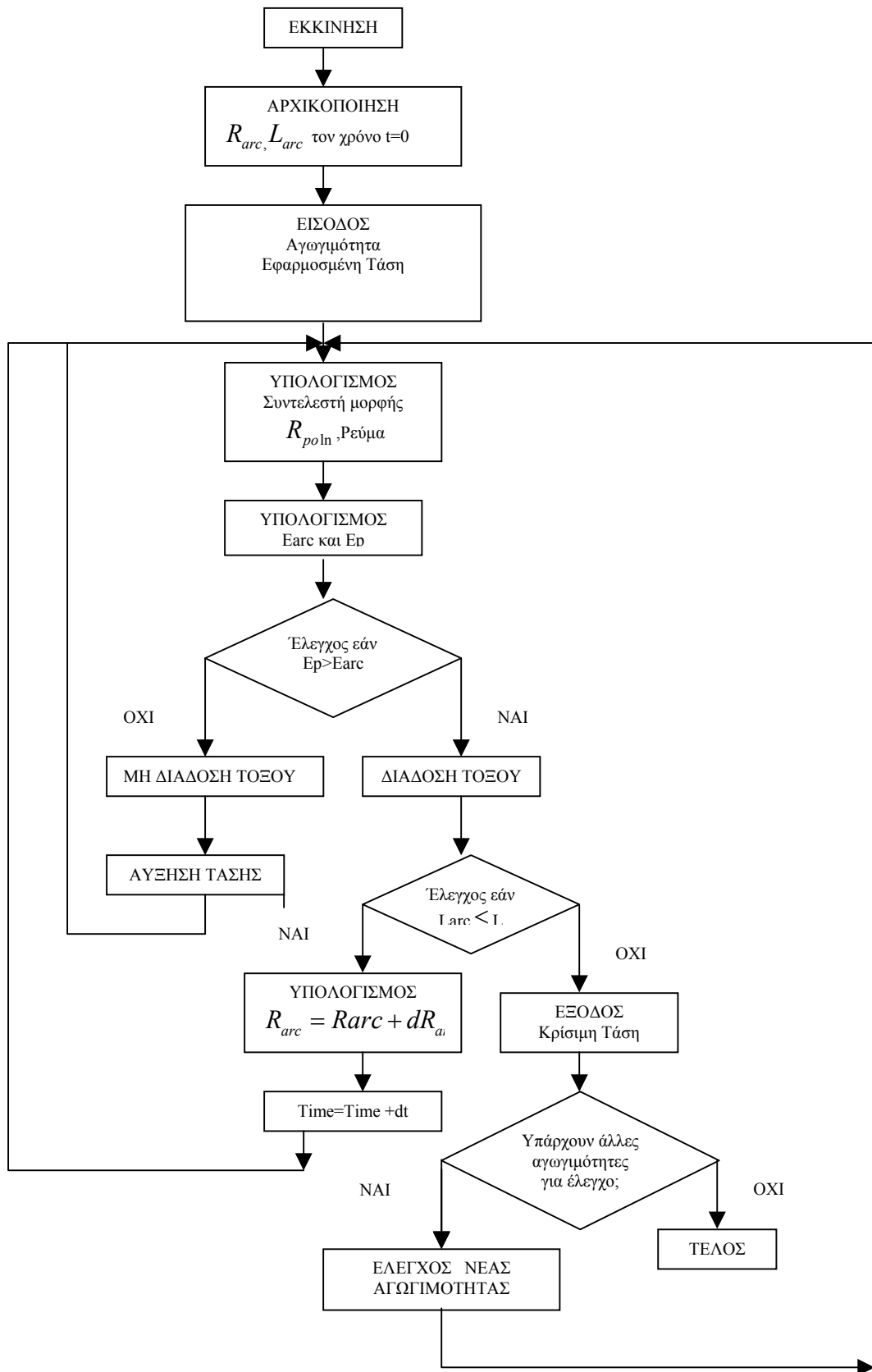
$$E_p = A^{1/n+1} \cdot R_p^{n/n+1} \quad (3.32)$$

Συγκρίνοντας τα παραπάνω μεγέθη το μοντέλο αποφαίνεται για την εξάπλωση του τόξου εάν ισχύει

$$E_p > E_a \quad (3.33)$$

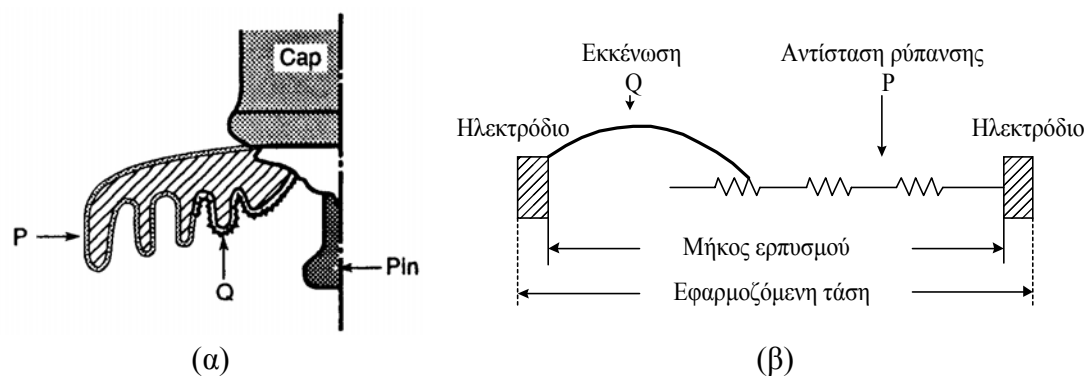
ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα έχω εξαφάνιση του τόξου. Εάν  $E_a > E_p$  τότε το τόξο εξαλείφεται, η τάση τροφοδοσίας αυξάνεται, τότε επαναπροσδιορίζω τα νέα μεγέθη  $E_a$  και  $E_p$  και ελέγχεται ξανά το κριτήριο διάδοσης. Εάν  $E_p > E_a$  τότε έχω επιμήκυνση του τόξου και εφόσον το μήκος του πλησιάζει το κρίσιμο μέγεθος αυτό αντιπροσωπεύει γεφύρωση του μονωτήρα. Στην αντίθετη περίπτωση προσδιορίζω την νέα αντίσταση, το νέο συντελεστή μορφής και επαναλαμβάνω τα παραπάνω βήματα. Το διάγραμμα ροής των παραπάνω βημάτων φαίνεται στο σχήμα 3.5 .





Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ροής μοντέλου διάδοσης μερικών εκκενώσεων [19]

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 γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



P: Στρώμα υγρής ρύπανσης, Q: Ξηρό στρώμα γεφυρωμένο με τόξο

Σχήμα 3.6: (α) Ρυπασμένος μονωτήρας έχοντας αναπτυχθεί τόξο στην ξηρή ζώνη, (β) Μοντέλο ρυπασμένου μονωτήρα.

Επιπλέον, προσομοίωσαν 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 θεωρώντας την ίδια μέση ποσότητα ρύπανσης (ESDD).

Σε επόμενη εργασία τους οι Sundararajan και Gorur [20] εφάρμοσαν το μοντέλο τους σε μία μεγάλη ποικιλία από cap and pin μονωτήρες παρατηρώντας την επίδραση του γεωμετρικού σχήματος του μονωτήρα στην τάση υπερπήδησης υπό συνθήκες ρύπανσης.

Οι Ghosh και Chatterjee [18] 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 [12, 16, 17]. Στην περίπτωση DC τροφοδοσίας η τάση που εφαρμόζεται στον ρυπασμένο μονωτήρα δίνεται

$$V_s = X \cdot A \cdot I_s^{-n} + r_p \cdot (L - x) \cdot I_s + U_o \quad (3.34)$$

Είναι όμως γνωστό ότι ο μηχανισμός υπερπήδησης είναι διαφορετικός στην περίπτωση AC τροφοδοσίας. Η σχέση που προτάθηκε από τον Renyu για να περιγραφεί η διαδικασία υπερπήδησης στην περίπτωση αυτή είναι:

$$V_m = X \cdot A \cdot I_m^{-n} + r_p \cdot (L - X) \cdot I_m \quad (3.35)$$

Συνδυάζοντας τις 3.34 και 3.35 και θεωρώντας ένα συντελεστή 1,3 μεταξύ του πλάτους της τάσης  $V_m$  στην AC και  $V_s$  της DC, όπως προτάθηκε από τον Machiaroli η εξίσωση 3.35 μπορεί να ξαναγραφεί αγνοώντας την εσωτερική αντίσταση της πηγής ως εξής:

$$V_e = K \cdot X \cdot A \cdot I_e^{-n} + r_p \cdot (L - X) \cdot I_e + U_e \quad (3.36)$$

$$\text{όπου } K = \left[ \frac{\sqrt{2}}{1,3} \right]^{-(n+1)}$$

Το παραπάνω αποτελεί το προταθέν μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό των κρίσιμων μεγεθών. Συγκεκριμένα αυτά προκύπτουν από την επίλυση της  $\frac{dU_e}{dI_e} = 0$

από όπου προκύπτει

$$V_{ec} = L \cdot k^{\frac{1}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (3.37)$$

$$I_{ec} = \left( \frac{k \cdot A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.38)$$

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  $A$  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  $A$ ,  $n$  για διάφορα είδη ρύπανσης. Οι πειραματικές τιμές που προτάθηκαν φαίνονται στον πίνακα 3.2 .

Ρύπανση	A	n
NaCl	360	0,59
FeCl <sub>3</sub>	270	0,66
CuSO <sub>4</sub>	450	0,49
CaCl <sub>2</sub>	461	0,42

Πίνακας 3.2 Σταθερές τόξου συναρτήσεως της 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. [21] 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 εναποθέματος αλατιού (ESDD) και κατέληξαν στην παρακάτω σχέση για το κρίσιμο ρεύμα  $I_{ec}$ .

$$I_{ec} = k^{\frac{1}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot ESDD^{\frac{-1}{n+1}} \cdot K_1^{\frac{1}{n \cdot (n+1)}} \quad (3.39)$$

όπου A και n είναι οι σταθερές του τόξου,  $k = (\sqrt{2}/1.3)^{-(n+1)}$  και  $K_1 = (\alpha \cdot b)^{n-1}$ , ενώ α, b είναι οι διαστάσεις του επίπεδου μονωτήρα.

Από τη σχέση (3.39) φαίνεται ότι το κρίσιμο ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με τη χημική σύσταση του ηλεκτρολύτη και με 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 rms τιμή του κρίσιμου ρεύματος υπερπήδησης με μέσο απόλυτο σφάλμα μικρότερο από 5%.

Οι Farzaneh et al. [22] δημιούργησαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της τάσης υπερπήδησης μονωτήρων, οι οποίοι τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση και είναι τοποθετημένοι στις κρύες περιοχές του πλανήτη. Στις περιοχές αυτές το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές μονωτήρων είναι ο σχηματισμός πάγου στην επιφάνεια του μονωτήρα προκαλώντας μείωση της ηλεκτρικής ικανότητας του μονωτήρα. Το μοντέλο, που παρουσίασαν, είναι βασισμένο στην κύρια ιδέα του μοντέλου του Obenaus, αλλά λαμβάνει υπόψη του τη μεταβολή της αγωγιμότητας στην παγωμένη επιφάνεια του μονωτήρα ως συνάρτηση της αγωγιμότητας του παγωμένου νερού. Από πειραματική έρευνα, που διεξήγαγαν,

προσέγγισαν τις σταθερές του τόξου, οι οποίες εμπεριέχονται στην εξίσωση (3.1), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι αν το μήκος του τόξου είναι λιγότερο από 7cm τότε επηρεάζει εμφανώς τα χαρακτηριστικά του τόξου. Αντίθετα, όταν το τόξο είναι μεγαλύτερο από 7cm, η επιρροή του μήκους του στα χαρακτηριστικά του τόξου δεν είναι αξιόλογη. Για τον υπολογισμό της τάσης υπερπήδησης ενός μονωτήρα υπό συνθήκες πάγου υποστήριξαν ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα δυναμικά αναπτυσσόμενο τόξο με μήκος μεγαλύτερο από 7cm. Έτσι, κατέληξαν ότι η κρίσιμη ένταση  $E_c$ , σε V/cm ως συνάρτηση της μέγιστης τιμής του ρεύματος  $I_m$ , σε A, δίνεται από τη σχέση:

$$E_c = 204.7 \cdot I_m^{-0.5607} \quad (3.40)$$

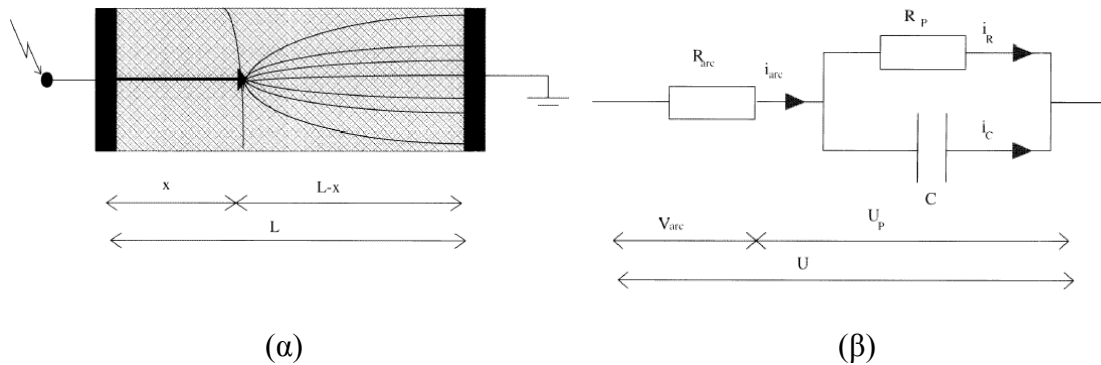
Επιπλέον, σύμφωνα με τους Farzaneh et al. οι συνθήκες επαναδημιουργίας του τόξου σε μονωτήρες καλυμμένους με πάγο ως συνάρτηση της μέγιστης τιμής της τάσης του τόξου  $V_m$ , σε V, του μήκους του τόξου  $x$ , σε cm, και της μέγιστης τιμής του ρεύματος διαρροής  $I_m$ , σε A, μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$V_m \geq \frac{1118 \cdot x}{I_m^{0.5277}} \quad (3.41)$$

Οι Rizk και Rezazada [23] αναθεώρησαν τις παραμέτρους προγενέστερου μοντέλου για τον υπολογισμό της τάσης υπερπήδησης σε μονωτήρες εναλλασσομένου ρεύματος με θαλάσσια ρύπανση. Το νέο μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και την ποσότητα της ρύπανσης, όσο τις θερμικές ιδιότητες του αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες και την ατμοσφαιρική πίεση. Από τη διεξαγωγή πειραμάτων και την εφαρμογή του μοντέλου διαπιστώθηκε ότι το κρίσιμο ρεύμα επηρεάζεται περισσότερο από την ατμοσφαιρική σε σχέση με την κρίσιμη τάση, ενώ το κρίσιμο μήκος του τόξου, το οποίο ανέρχεται περίπου στο 65% του μήκους ερπυσμού, είναι σχεδόν ανεξάρτητο από την ποσότητα της ρύπανσης και την ατμοσφαιρική πίεση.

Οι Dhahbi-Megrache, Beroual και Krähenbühl [24] 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 θεώρησαν 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 3.7α), μοντελοποιείται ως ένα τόξο μήκους  $x$  και αντίστασης  $R_{arc}$  σε σειρά με μια αντίσταση  $R_p$  και έναν πυκνωτή  $C$  συνδεδεμένο παράλληλα (Σχήμα 3.7β). Το στοιχείο  $R_p$  και  $C$  εκφράζουν την αντίσταση και τη χωρητικότητα, αντίστοιχα, του ρυπασμένου στρώματος.



Σχήμα 3.7: (α) Επίπεδο μοντέλο μονωτήρα, (β) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.

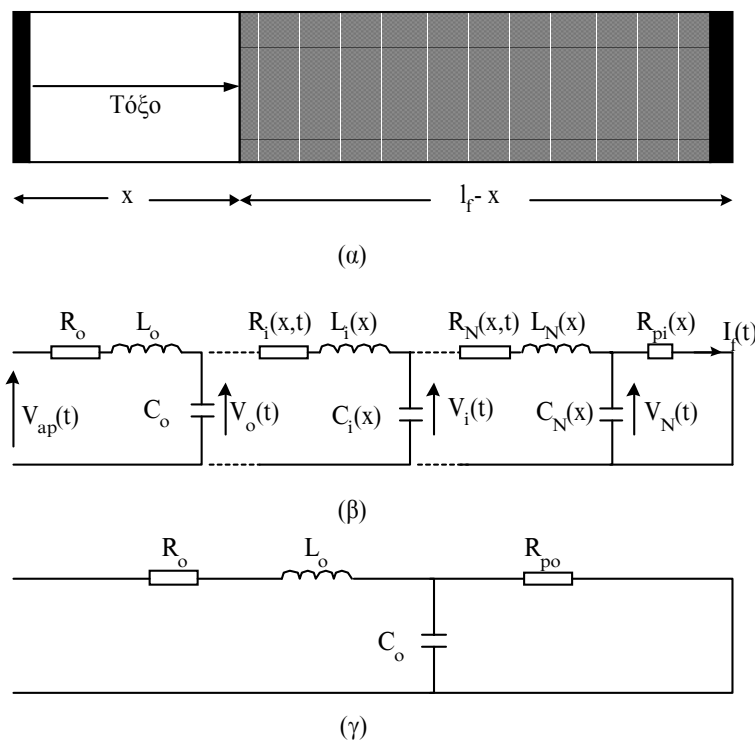
Επιπλέον οι Dhahbi-Megrache, Beroual και Krähenbühl στο ίδιο άρθρο τους πρότειναν ένα κριτήριο για τη διάδοση του τόξου. Αυτό το κριτήριο διαφοροποιεί την περίπτωση στην οποία το τόξο επιμηκύνει έως ότου να εμφανιστεί η συνολική υπερπήδηση από την περίπτωση στην οποία το τόξο σταματά προτού να φθάσει στο τέλος του μονωτήρα. Απέδειξαν ότι το τόξο μπορεί να επεκταθεί, υπό ορισμένες συνθήκες, ακόμα κι αν το κριτήριο Hampton, το οποίο έχει ήδη αναφερθεί, δεν ικανοποιείται. Έτσι, το τόξο μπορεί να επεκταθεί ακόμα κι όταν  $E_a > E_p$  ( $E_a$  είναι η ένταση του τόξου και  $E_p$  είναι η ένταση του υγρού στρώματος), σε αντίθεση με το κριτήριο Hampton, χωρίς όμως να φθάσει στο τέλος του μονωτήρα.

Ένα δυναμικό μοντέλο, το οποίο επιτρέπει την πρόβλεψη των εκκενώσεων ικανών να οδηγήσουν σε υπερπήδηση, ανέπτυξαν οι Dhahbi-Megrache και Beroual [25]. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο ο ρυπασμένος μονωτήρας και η διαδικασία διάδοσης του τόξου αναπαριστώνται με μία ισοδύναμη ηλεκτρική διάταξη (Σχήμα 3.8α). Η διαδικασία διάδοσης του τόξου μεταξύ των ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται σε βήματα. Το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του τόξου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8β. Κάθε αναπήδηση  $i$  του τόξου μοντελοποιείται μέσω αντίστασης  $R_i$ , επαγωγής  $L_i$  και χωρητικότητας  $C_i$  συνδεδεμένων σε σειρά μεταξύ τους. Η προσθήκη 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  $I_f$  και αντίσταση που εκφράζει τη ρύπανση με  $R_{pi}$ . Το κύκλωμα του Σχήματος 3.8γ

αντιπροσωπεύει το τόξο που έχει δημιουργηθεί αρχικά, πριν αυτό επεκταθεί. Από κυκλωματική ανάλυση στο παραπάνω μοντέλο προέκυψαν οι παρακάτω εκφράσεις για τα κρίσιμα μεγέθη

$$I_c = n^{1/n+1} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left(\frac{k}{r_p}\right)^{1/n+1} \quad (3.42)$$

$$U_c = n^{1/n+1} \cdot \left\{ \frac{1}{(n+1)^{(n+1)} + n^{(n-1)}} \right\} \cdot k^{1/n+1} \cdot r_p^{n/n+1} \cdot L \quad (3.43)$$



Σχήμα 3.8: Μοντέλο για την επέκταση των εκκενώσεων κατά τους Dhabbi-Megrache και Beroual.

Από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. [13] παρουσιάστηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο για τον υπολογισμό της τάσης υπερπήδησης ενός ρυπασμένου μονωτήρα, το οποίο στηρίζεται κυρίως στο μοντέλο του Obenaus και του Alston [16]. Η κρίσιμη τάση  $U_c$ , σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$U_c = \frac{A}{n+1} \cdot (L + \pi \cdot n \cdot D_m \cdot F \cdot K) \cdot \left(\pi \cdot A \cdot D_m \cdot \sigma_s\right)^{\left(\frac{n}{n+1}\right)} \quad (3.44)$$

όπου  $L$  είναι το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα,  $D_m$  είναι η μέγιστη διάμετρος του

δίσκου του μονωτήρα,  $F$  είναι ο συντελεστής μορφής και  $A$ ,  $n$  είναι οι σταθερές του τόξου. Η επιφανειακή αγωγιμότητα  $\sigma_s$  (σε  $\Omega^{-1}$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_s = (369.05 \cdot C + 0.42) \cdot 10^{-6} \quad (3.45)$$

όπου  $C$  είναι ισοδύναμη πυκνότητα εναποθέματος αλατιού (ESDD) σε  $\text{mg}/\text{cm}^2$ .

Ο συντελεστής της αντίστασης του στρώματος ρύπανσης  $K$ , στην περίπτωση που ο μονωτήρας είναι cap-and-pin, εκφράζεται από τη σχέση:

$$K = 1 + \frac{n+1}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot n} \cdot \ln\left(\frac{L}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot F}\right) \quad (3.46)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα του βήματος του τόξου, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$R = \sqrt{\frac{I}{\pi \cdot 1.45}} = 0.469 \cdot (\pi \cdot A \cdot D_m \cdot \sigma_s)^{\frac{1}{2(n+1)}} \quad (3.47)$$

Στην περίπτωση μονωτήρων stab-type (post) ο συντελεστής  $K$  δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{N \cdot (n+1)}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot n} \cdot \left( \ln\left(\frac{4 \cdot L}{\pi \cdot N \cdot R}\right) - \ln\left(\tan \frac{\pi}{2 \cdot (n+1)}\right) \right) \quad (3.48)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των “δίσκων”.

Οι τιμές για τις σταθερές  $A$ ,  $n$  που είχαν προταθεί από προηγούμενους ερευνητές (πίνακας 3.1) δίνουν μη συμβατά αποτελέσματα σε σχέση με αυτά των πειραμάτων. Ο προσδιορισμός των σταθερών αυτών είναι αρκετά δύσκολη υπόθεση εξαιτίας της πολύπλοκης επίδρασης των θερμικών φαινομένων στην ρυπασμένη επιφάνεια του μονωτήρα καθώς και του τύπου της ρύπανσης.

Με εφαρμογή των εξισώσεων 3.44 έως 3.48 σε διάφορους τύπων μονωτήρων προέκυψε ο προσδιορισμός των σταθερών  $A$ ,  $n$ . Έτσι προέκυψε ένα σύστημα 84 εξισώσεων με αγνώστους τα  $A$ ,  $n$ .

$$U_{ci} = f_i(A, n, L, D_m, C) \Rightarrow g_i(A, n) = 0, i = 1, 2, 3, \dots, 84 \quad (3.49)$$

Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος εφαρμόστηκε η τεχνική των ελαχίστων τετραγώνων. Η λύση που προέκυψε είναι:

$$A = 131,5 \pm 2,5 \quad n = 0,374 \pm 0,006$$

Οπότε για τις σταθερές  $A$ ,  $n$  προτάθηκαν οι τιμές



$$A=131,5 \quad n=0,374$$

Στη συνέχεια μία ανάλογη προσέγγιση με χρήση γενετικών αλγορίθμων [16] κατέληξε σε ένα νέο ζεύγος λύσεων  $A=124,8$  και  $n=0,409$ .

Στη συνέχεια το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο επεκτάθηκε, ώστε να καλύπτει περιπτώσεις ανομοιόμορφης ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα [26]. Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο το μήκος ερπυσμού χωρίζεται σε τμήματα και σε κάθε τμήμα θεωρείται σταθερή ποσότητα ρύπανσης. Τελικά, υπολογίζεται μία μέση τιμή της ισοδύναμης πυκνότητας εναποθέματος αλατιού (ESDD), η οποία υπεισέρχεται στη σχέση (3.44) προκειμένου να υπολογιστεί η κρίσιμη τάση σε μονωτήρα ρυπασμένο ανομοιόμορφα.

## *Κεφάλαιο 4*

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

#### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Παράλληλα με την θεωρητική μελέτη για την ανάπτυξη μαθηματικών και φυσικών μοντέλων για την περιγραφή των φαινομένων που συμβαίνουν στην επιφάνεια ενός ρυπασμένου μονωτήρα μεγάλη είναι και η πειραματική έρευνα που έχει γίνει προς την κατεύθυνση αυτή. Επικουρικά με την θεωρητική μελέτη μεγάλος αριθμός πειραμάτων έχει πραγματοποιηθεί από τους ερευνητές με στόχο την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση μοντέλων. Εξάλλου λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας που παρουσιάζει το φαινόμενο διάδοσης των μερικών εκκενώσεων και της έντονης διακύμανσης των τιμών των κρίσιμων μεγεθών που είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας των μονωτήρων είναι απαραίτητη η πειραματική έρευνα για την αξιολόγηση των μοντέλων που έχουν προταθεί. Παρακάτω παρατίθενται μια σειρά πειραμάτων που έγιναν για το σκοπό αυτό και οι διαπιστώσεις που προέκυψαν.

#### **4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ**

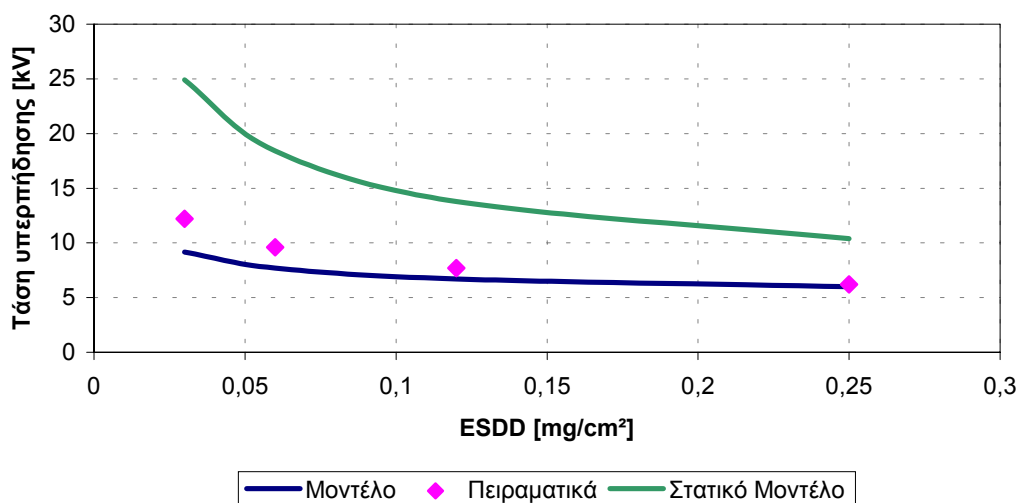
##### **4.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑ R.SUNDARARAN – R.S.GORUR**

Οι Sundararajan-Gorur ανέπτυξαν ένα δυναμικό μοντέλο [19] για την διάδοση των ηλεκτρικών εκκενώσεων το οποίο βασίζεται στην ισχύ του κριτηρίου διάδοσης  $E_p > E_a$ . Η ισχύς του μοντέλου ελέγχθηκε με βάση πειραματικά αποτελέσματα [20] που προέκυψαν από εφαρμογή DC τάσης σε μια σειρά μονωτήρων των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Μονωτήρας	Τύπος	Ύψος (mm)	Διάμετρος (mm)	Συντελεστής F	Μήκος Ερπυσμού (mm)
A	Standard	146	254	0,800	280
B	Fog	146	254	0,916	432
C	DC	165	320	0,957	512
D	Fog	180	320	0,957	545
E	Standard	197	320	0,792	457
F	DC	197	400	1,021	686
G	Standard	250	420	0,990	718
H(14 δίσκοι)	Standard	---	366	---	2128
I (20 δίσκοι)	Long Rod	---	302	---	1876
J (7 δίσκοι)	Long Rod	---	370	---	3040

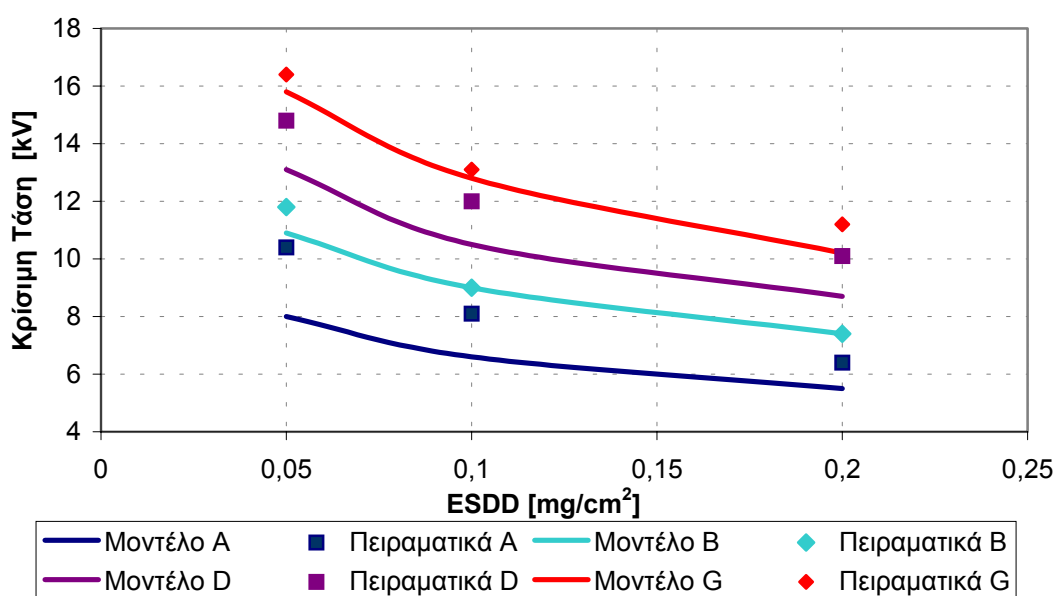
Πίνακας 4.1 : Διαστάσεις μονωτήρων

Στα πειράματα αυτά μετρήθηκε η τάση υπερπήδησης συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων όπως της πυκνότητας ρύπανσης, της επιφανειακής αγωγιμότητας, του ειδικού μήκους ερπυσμού κτλ. Στο διάγραμμα 4.1 δείχνεται σύγκριση μεταξύ της τάσης υπερπήδησης, συναρτήσει της έντασης της ρύπανσης, μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων, του παρόντος δυναμικού μοντέλου και του στατικού μοντέλου που αναπτύχθηκε από τον R.Wilkins [17] για τον μονωτήρα τύπου A.



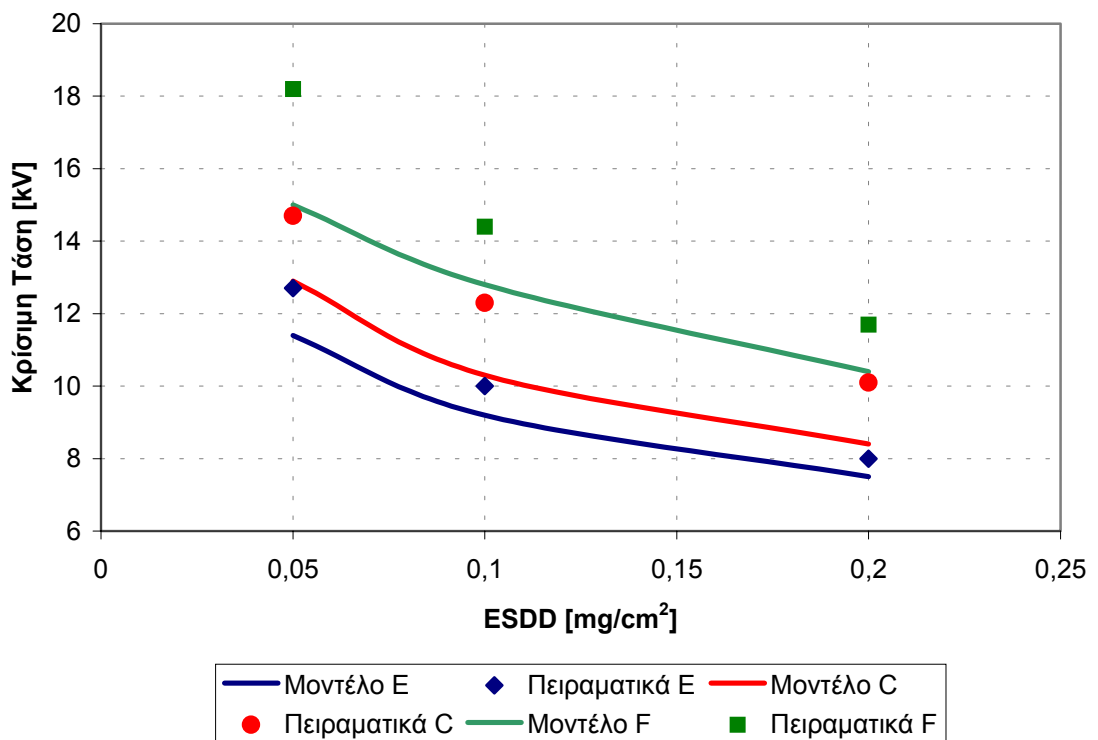
Διάγραμμα 4.1 : Σύγκριση στατικού μοντέλου, πειραμάτων και παρόντος μοντέλου για τον μονωτήρα τύπου A.

Διαπιστώνεται καλή συμφωνία μεταξύ των τιμών που δίνει το παρόν μοντέλο και των πειραμάτων για υψηλές τιμές ESDD ενώ ελαφρώς υποεκτιμημένα είναι τα αποτελέσματα που δίνει για χαμηλότερες τιμές της ESDD. Πάντως σε κάθε περίπτωση το παρόν μοντέλο δίνει καλύτερη συσχέτιση αποτελεσμάτων σε σχέση με το στατικό μοντέλο του R. Wilkins γεγονός που επιβεβαιώνει την αξία της δυναμικής εκτίμησης των μεγεθών κατά την εξέλιξη του φαινομένου. Ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται και για τους υπόλοιπους εξεταζόμενους τύπους μονωτήρων. Παρακάτω στα διαγράμματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών της κρίσιμης τάσης σε συνάρτηση της ESDD για τους τύπους μονωτήρων Α έως Γ [20].

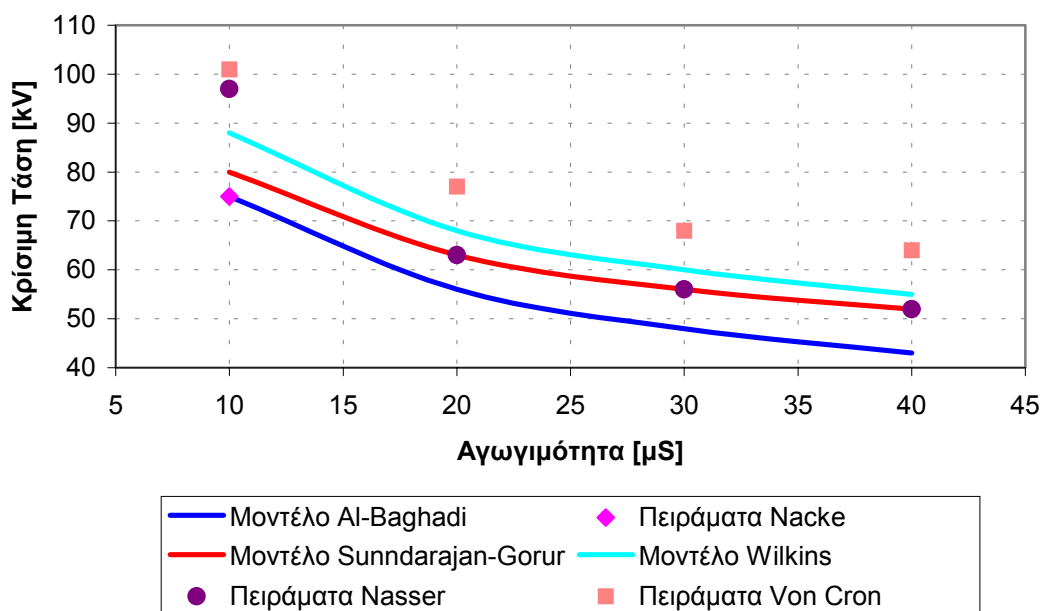


Διάγραμμα 4.2: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της τάσης υπερπήδησης για τους μονωτήρες Α, Β, D και Γ

Φαίνεται ότι υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ τους με το μοντέλο να δίνει πιο συντηρητικές τιμές. Ωστόσο επειδή η διαφορά είναι περίπου 10% , για όλες τις πρακτικές περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμες με εκείνες που προέρχονται πειραματικά.



Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της τάσης υπερπήδησης για τους μονωτήρες E, C και F



Διάγραμμα 4.4: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τον μονωτήρα τύπου H

Στο διάγραμμα 4.4, γίνεται σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τον μονωτήρα H. Σε αυτό φαίνεται η σύγκριση μεταξύ

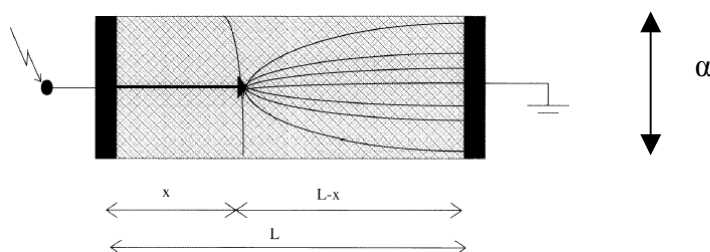
πειραματικών αποτελεσμάτων του Van Cron, Nasse, Nacke, των θεωρητικών αποτελεσμάτων από τα μοντέλα των Wilkins και Al-Baghadī με τα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου [20].

Φαίνεται ότι το μοντέλο των Sundararajan-Gogur δίνει αποτελέσματα τα οποία βρίσκονται μεταξύ των ακραίων τιμών που δίνονται από τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος των πειραματικών αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι το μοντέλο δύναται να δώσει τιμές ίδιας ακρίβειας με αυτές των πειραμάτων.

Οι Sundararajan-Gogur έλεγξαν το μοντέλο τους και στην περίπτωση ανομοιομορφης ρύπανσης [20], περίπτωση περισσότερο αντιπροσωπευτική σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η ανομοιομορφία στην ρύπανση εμφανίζεται μεταξύ της κορυφής και της βάσης του μονωτήρα, κατά μήκος της περιφέρειας του καθώς και κατά μήκους του. Η ανομοιομορφία αυτή επιτυγχάνεται χωρίζοντας τον μονωτήρα σε ζώνες διαφορετικής πυκνότητας ρύπανσης. Έπειτα έδειξαν ότι σ' αυτήν την περίπτωση η τάση υπερπήδησης είναι σχεδόν ίση ή υψηλότερη της κρίσιμης. Το μέγεθος της απόκλισης εξαρτάται κάθε φορά από την μορφή του μονωτήρα και το ποσοστό της ανομοιομορφίας της ρύπανσης μεταξύ της κορυφής και της βάσης του.

#### 4.2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ GHOSH-CHATERJEE

Οι Ghosh-Chaterjee [18] στην προσπάθεια προσομοίωσης του ρυπασμένου μονωτήρα χρησιμοποίησαν έναν επίπεδο δίσκο (flat plate) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

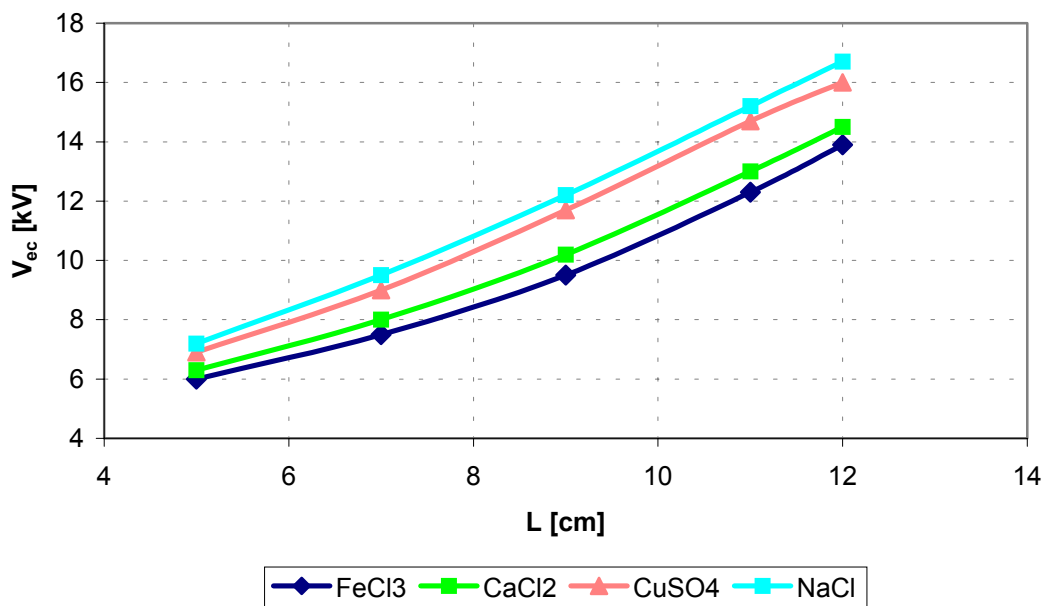


Σχήμα 4.1: Δισδιάστατο μοντέλο επίπεδου δίσκου

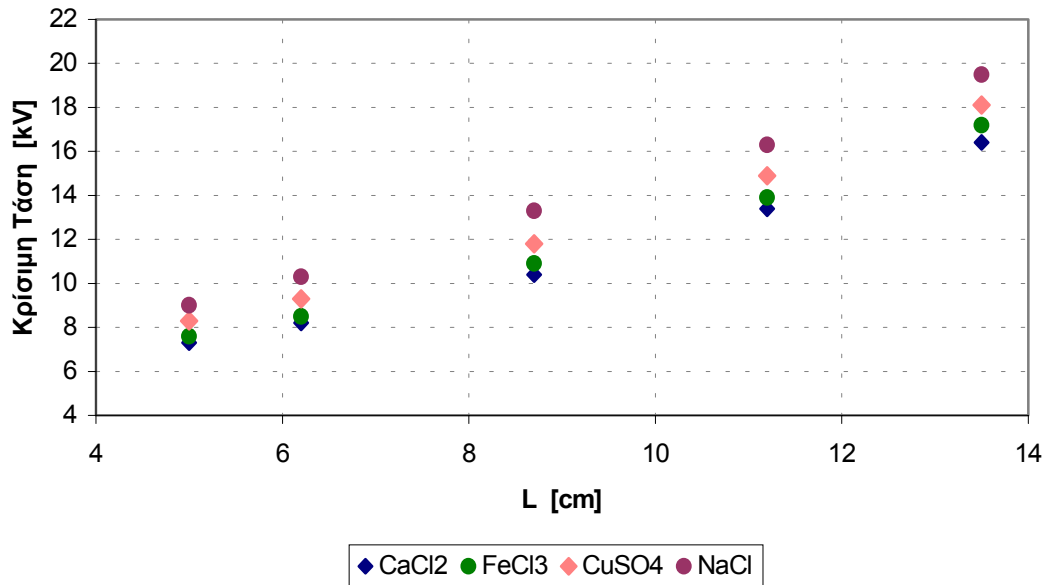
Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την εύκολη μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων όπως του μήκους  $L$ , του πλάτους  $a$  του στρώματος ρύπανσης, της ανά μονάδας

μήκους αντίστασης ρύπανσης  $r_p$  καθώς και την μεταβολή των συστατικών της ρύπανσης με την ταυτόχρονη παρατήρηση της επίδρασης των μεταβολών αυτών στα μεγέθη των κρίσιμων τιμών. Στο υπό εξέταση δείγμα εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση αυξανόμενης τιμής μέχρι το σημείο όπου παρατηρείται γεφύρωση. Μετά την γεφύρωση ο ηλεκτρολύτης εναλλάσσεται με νέο.

Οι Ghoss-Chaterjee υπολόγισαν την rms τιμή της τάσης υπερπήδησης  $V_{ec}$ , την rms τιμή του κρίσιμου ρεύματος  $I_{ec}$  καθώς και τον χρόνο για την πραγματοποίηση γεφύρωσης για μήκη ρύπανσης μεταξύ 5 και 12 cm και αντίσταση ηλεκτρολύτη μεταξύ 10 και 25 KΩ. Η ρύπανση που χρησιμοποιήθηκε περιείχε τα άλατα:  $NaCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $FeCl_3$  και  $CuSO_4$ . Στα διαγράμματα 4.5 και 4.6 που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση του διαφορετικού τύπου ρύπανσης στην κρίσιμη τάση ως συνάρτηση του μήκους του μονωτήρα για δύο διαφορετικές τιμές της αντίστασης  $r_p$ .

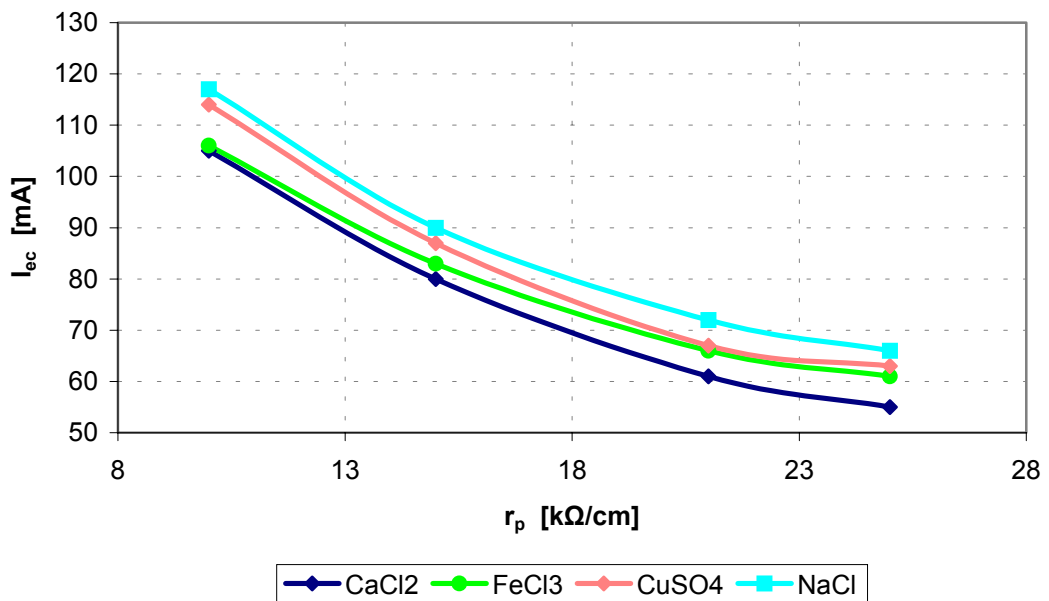


Σχήμα 4.5: Rms τιμή συναρτήσεως του μήκους ρύπανσης για διαφορετικούς ηλεκτρολύτες με  $r_p = 10K\Omega/cm$



Σχήμα 4.6: Rms τιμή συναρτήσει του μήκους ρύπανσης για διαφορετικούς ηλεκτρολύτες με  $r_p = 25 \text{ K}\Omega / \text{cm}$

Από τα παραπάνω φαίνεται η σημαντική επίδραση που έχει ο τύπος ρύπανσης στο μέγεθος της κρίσιμης τάσης, με τις μεγαλύτερες τιμές να δίνει η ύπαρξη του ηλεκτρολύτη  $\text{NaCl}$  ενώ τις χαμηλότερες η ύπαρξη του ηλεκτρολύτη  $\text{FeCl}_3$ . Να σημειωθεί επίσης ότι όμοια διακύμανση τιμών παρουσιάζεται και στις δύο διαφορετικές τιμές της  $r_p$ .

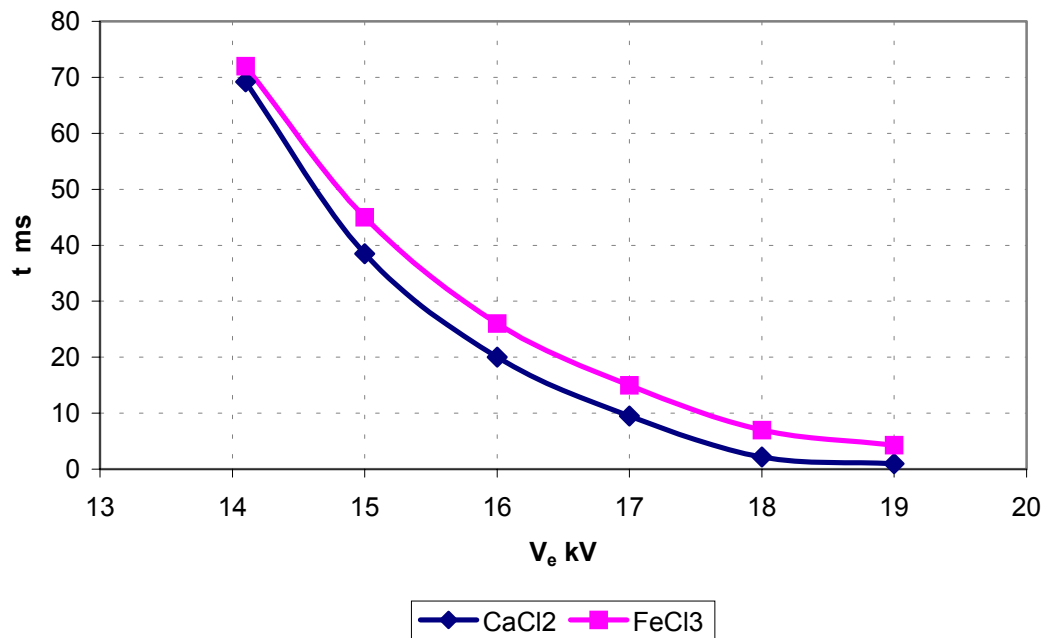


Σχήμα 4.7: Μεταβολή του κρίσιμου ρεύματος  $I_{ec}$  συναρτήσει της  $r_p$  για διαφορετικούς ηλεκτρολύτες.

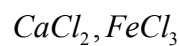


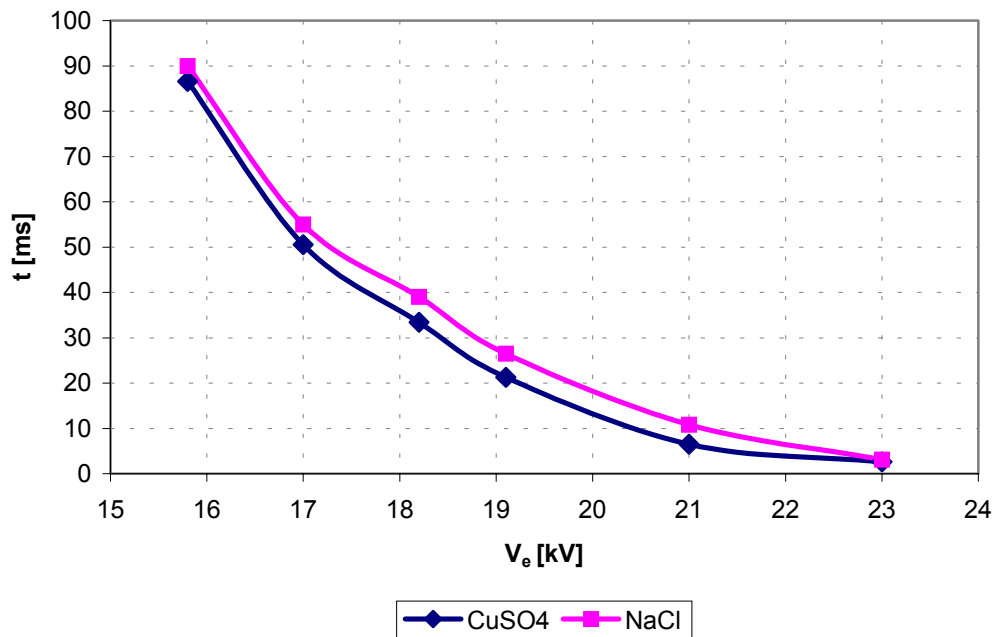
Οι Ghoss-Chaterjee επίσης μελέτησαν και την εξάρτηση του κρίσιμου ρεύματος  $I_{ec}$  σε σχέση με την  $r_p$  για διάφορους τύπους ηλεκτρολυτών. Τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 4.7 έδειξαν ότι το κρίσιμο ρεύμα είναι ανεξάρτητο από την μεταβολή του μήκους L.

Επιπλέον οι Ghoss-Chaterjee μελέτησαν και την σχέση μεταξύ του χρόνου που απαιτείται για την εκδήλωση της γεφύρωσης και των μεγεθών  $V_e$ ,  $r_p$ , L για διαφορετικούς τύπους ηλεκτρολυτών. Τα πειραματικά αυτά δεδομένα παρουσιάζονται στα σχήματα 4.8 και 4.9.

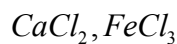


Σχήμα 4.8: Χρόνος για την εκδήλωση υπερπήδησης συναρτήσει της rms τιμής της εφαρμοσμένης τάση για  $r_p = 10 \text{ k}\Omega/\text{cm}$  και  $L = 12 \text{ cm}$  στην περίπτωση ηλεκτρολυτών





Σχήμα 4.9: Χρόνος για την εκδήλωση υπερπήδησης συναρτήσει της rms τιμής της εφαρμοσμένης τάσης για  $r_p = 10 \text{ k}\Omega/\text{cm}$  και  $L = 12 \text{ cm}$  στην περίπτωση ηλεκτρολυτών



Αυτό που παρατηρείται είναι ότι με αύξηση της τάσης ο χρόνος για την πραγματοποίηση γεφύρωσης μειώνεται. Επιπλέον όμως να σημειωθεί ότι για μια συγκεκριμένη τιμή της τάσης  $V_e = V_{em}$  για την οποία ο χρόνος υπερπήδησης είναι 1ms παρατηρείται ότι περαιτέρω αύξηση της  $V_e$  δεν οδηγεί σε αξιοσημείωτη μεταβολή του χρόνου.

Το νέο στο μοντέλο των Ghoss-Chatterjee είναι η μελέτη της επίδρασης του τύπου του ηλεκτρολύτη στα κρίσιμα μεγέθη. Έτσι η βέλτιστη επιλογή των χαρακτηριστικών σταθερών  $A$ ,  $n$  του τόξου θα εξαρτάται κάθε φορά και από την χημική σύσταση της ρύπανσης. Στην παρούσα μελέτη διεξοδική πειραματική έρευνα έγινε για τέσσερις τύπους ηλεκτρολυτών:  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$  και  $\text{CuSO}_4$  [18]. Με την βοήθεια των πειραμάτων και του προταθέντος μοντέλου υπολογίστηκαν οι βέλτιστοι συνδυασμοί των  $A$ ,  $n$  για τους παραπάνω τύπους ηλεκτρολυτών όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2.

<b>Ρύπανση</b>	<b>A</b>	<b>n</b>
<b>NaCl</b>	360	0,59
<b>FeCl<sub>3</sub></b>	270	0,66
<b>CuSO<sub>4</sub></b>	450	0,49
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	461	0,42

Πίνακας 4.2: Σταθερές A, n για διάφορους τύπους ηλεκτρολυτών [18]

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές των A, n οι Ghoss-Chaterjee έλεγξαν την εγκυρότητα του μοντέλου τους πειραματικά για τους τέσσερις παραπάνω ηλεκτρολύτες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.3.

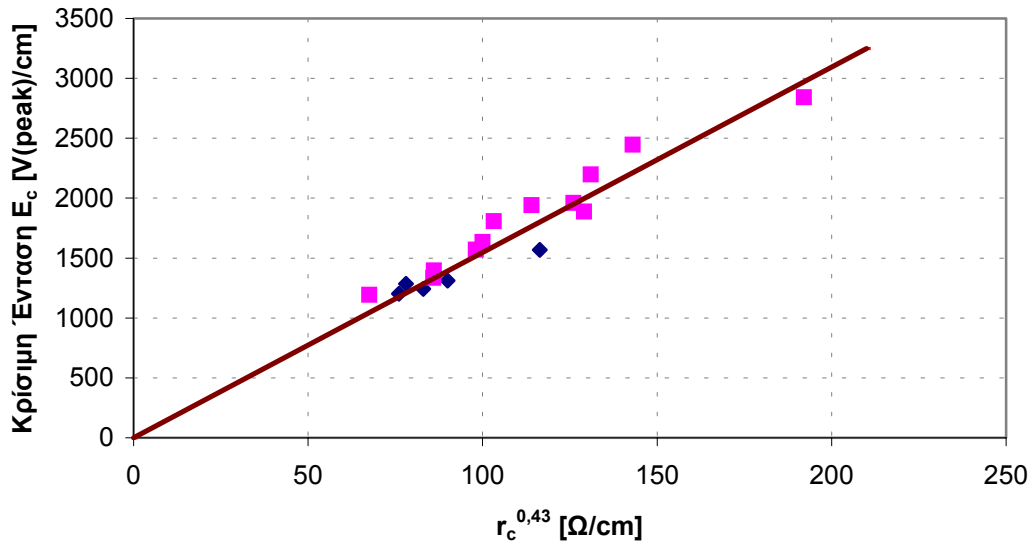
<b>Ηλεκτρολύτης</b>	<b>r<sub>p</sub> kΩ/cm</b>	<b>L cm</b>	<b>V<sub>ec</sub> (πειρ) kV</b>	<b>V<sub>ec</sub> (μοντέλο) kV</b>
<b>NaCl</b>	10,0	8,0	11,0	10,35
	15,0	5,0	8,0	7,80
	21,6	10,0	17,0	16,60
	25,0	12,0	21,0	20,77
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	10,0	12,0	14,0	13,60
	15,0	8,0	11,0	10,45
	21,6	5,0	6,0	7,55
	25,0	10,0	15,0	14,75
<b>FeCl<sub>3</sub></b>	10,0	5,0	7,0	6,60
	15,0	12,0	18,0	16,5
	21,6	8,0	12,0	12,00
	25,0	8,0	14,0	13,20
<b>CuSO<sub>4</sub></b>	10,0	10,0	12,0	11,33
	15,0	10,0	13,0	13,10
	21,6	12,0	13,0	17,87
	25,0	5,0	6,6	8,42

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μοντέλου και πειραμάτων [18]

Φαίνεται από τα παραπάνω μια πολύ καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν πειραματικά και εκείνων που προβλέπονται από το μοντέλο με μέσο απόλυτο σφάλμα 3,8%.

### 4.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ALSTON

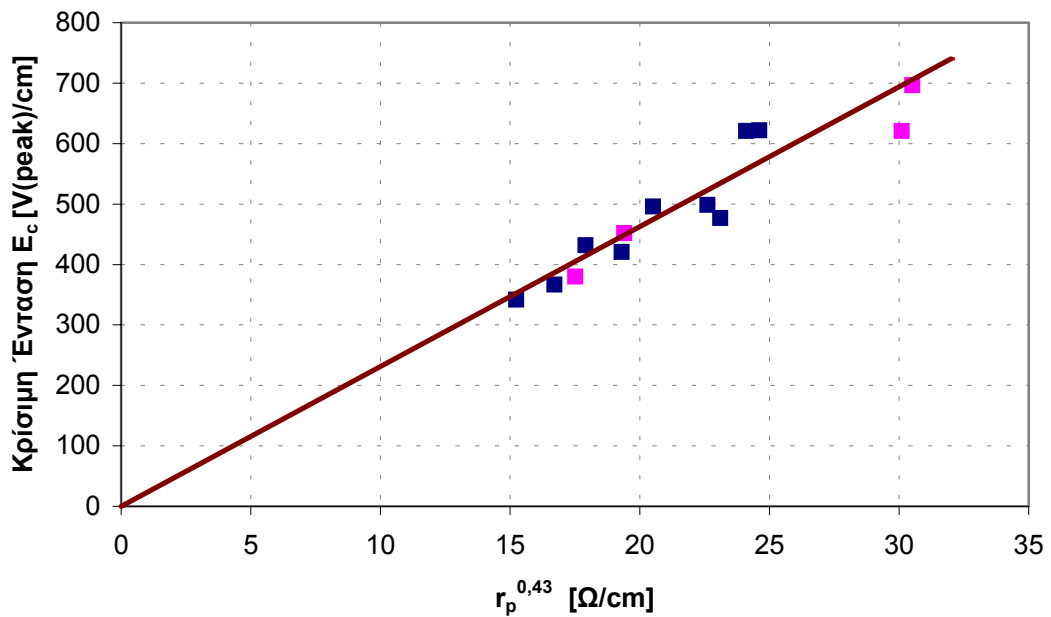
Για την εξακρίβωση της αξιοπιστίας του μοντέλου του, ο Alston [16] προχώρησε σε πειράματα τεχνητής ρύπανσης. Στα πειράματα αυτά η εφαρμοζόμενη τάση στον μονωτήρα αυξάνεται βαθμιαία μέχρι την εκδήλωση της γεφύρωσης οπότε η τιμή της πεδιακής έντασης την στιγμή αυτή θεωρείται ίση με την κρίσιμη  $E_c$ . Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν επίπεδοι και κυλινδρικοί τύποι μονωτήρων στους οποίους η ρύπανση τοποθετήθηκε έτσι ώστε να δώσει σταθερή  $r_p$  κατά μήκος της επιφάνειας. Έπειτα οι κρίσιμες τιμές της πεδιακής έντασης σχεδιάστηκαν συναρτήσει της ποσότητας  $r_c^{\frac{n}{n+1}}$  όπου η σταθερά  $n$  βρέθηκε 0,76 οπότε  $r_c^{\frac{n}{n+1}} = r_c^{0,43}$ . Με αυτήν την διαδικασία προήλθαν τα διαγράμματα 4.10 και 4.11.



Σχήμα 4.10: Κρίσιμη ένταση για επίπεδο μονωτήρα γυαλιού, ρυπασμένο με βιομηχανική ρύπανση

- 12 cm μήκος δείγματος, αντίσταση σταθερή ανά τετραγωνικό cm ίση με 170kΩ και μεταβολή πλάτους δείγματος από 3 σε 8cm
- 10cm x 10cm δείγμα, με αντίσταση ανά τετραγωνικό cm μεταβαλλόμενη με αύξηση της υγρασίας της ρύπανσης

Η εξίσωση της παρεμβλλόμενης ευθείας είναι  $E_c = 15,6 \cdot r_c^{0,43}$



Σχήμα 4.11: Κρίσιμη ένταση για πορσελάνινους κυλινδρικούς μονωτήρες μήκους 100cm ρυπασμένοι με αλάτι.

- Δείγμα διαμέτρου 15 cm
- Δείγμα διαμέτρου 7,5 cm

Η εξίσωση της παρεμβλλόμενης ευθείας είναι  $E_c = 21,5 \cdot r_c^{0,43}$

Παρά την διασπορά που υπάρχει, τα πειραματικά αποτελέσματα υπάρχουν κατά μήκος ευθειών γραμμών γεγονός που επιβεβαιώνει την ισχύ της εξίσωσης

$$E_c = k \cdot r_c^{\frac{n}{n+1}}$$

#### 4.2.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ZEDAN-AKBAR

Οι Zedan-Akbar [27] υπολόγισαν την τάση υπερπήδησης διαφόρων τύπων αλυσοειδών μονωτήρων, οι οποίοι λειτουργούν σε περιβάλλον ερήμου. Οι Zedan-Akbar έλεγξαν εργαστηριακά τους τύπους αυτούς, οι οποίοι πρώτα είχαν ρυπανθεί φυσικά σε σταθμό δοκιμών στην Σαουδική Αραβία. Η έρευνα έδειξε ότι αξιοσημείωτα υψηλή ρύπανση παρατηρήθηκε στην περιοχή η οποία ξεπέρασε το  $0,1mg/cm^2$  σε περίπου δέκα μήνες έκθεσης. Η τεχνική που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων ήταν: Ο ρυπασμένος μονωτήρας

υποβλήθηκε σε κατ' εκτίμηση τάση τιμής 20% υψηλότερη της κρίσιμης και στην συνέχεια άρχισε η διαδικασία ύγρανσης του. Αν δεν συνέβη γεφύρωση είτε στα πρώτα 25 λεπτά είτε όταν το ρεύμα διαρροής φθάσει στην μέγιστη τιμή του, η τάση αυξάνεται με βήμα 5%/λεπτό μέχρι την υπερπήδηση. Αφού το φαινόμενο της γεφύρωσης πραγματοποιηθεί ο μονωτήρας υποβάλλεται πλέον σε τάση 10,5% - 13,5% χαμηλότερη της προηγούμενης κρίσιμης. Έπειτα η επιβαλλόμενη τάση αυξάνεται με βήμα 3,5% - 4,5% ανά 3 λεπτά μέχρι την πραγματοποίηση γεφύρωσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και η ελάχιστη εκ των μετρήσεων που σημειώνονται ορίζεται ως κρίσιμη τάση του μονωτήρα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών φαίνονται στον πίνακα 4.4 ,ενώ στον πίνακα 4.3 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των μονωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν.

<b>Τύπος Μονωτήρα</b>	<b>Ύψος (mm)</b>	<b>Διάμετρος (mm)</b>	<b>Μήκος Ερπυσμού</b>	<b>Επιφάνεια</b>	<b>Συντελεστής F</b>
<b>SP1</b>	170	280	370	2170	0,82
<b>SP2</b>	170	280	370	2448	0,74
<b>FP1</b>	160	320	545	3580	1,03
<b>FP2</b>	161	320	475	3534	0,85
<b>AP2</b>	146	380	340	2469	0,59
<b>AG1</b>	160	390	360	2401	0,61
<b>FG1</b>	160	320	545	3501	1,04
<b>LRAP1</b>	1290	215	3800	16652	10,03
<b>LRAP3</b>	1485	207	4225	21200	11,50
<b>LRFP1</b>	1575	195	4800	20764	13,22

*Πίνακας 4.3: Γεωμετρικές παράμετροι εξεταζόμενων μονωτήρων [27]*

Τύπος Μονωτήρα	Αριθμός δίσκων στην εξεταζόμενη αλυσίδα	Μήκος της εξεταζόμενης αλυσίδας(mm)	Μήκος ερπυσμού της εξεταζόμενης αλυσίδας(mm)	ESDD της αλυσίδας (mg/sq.cm)	Ελάχιστη Τάση Υπερπήδησης KV min	Kvmin Ανά μέτρο του μήκους ερπυσμού	Αξιολόγηση Με βάση το Μήκος Ερπυσμού	kVmin Ανά μέτρο Του μήκους αλυσίδας	Αξιολόγηση με βάση το ισοδύναμο ύψος της αλυσίδας
<b>SP1</b>	5	850	1850	0,274	85,0	46,0	100,00%	100,0	72,00%
<b>SP1</b>	5	850	1850	0,293	84,4	45,6	98,70%	99,3	71,50%
<b>AP2</b>	5	730	1700	0,088	71,9	42,3	92,00%	98,5	71,00%
<b>AP2</b>	5	730	1700	0,101	68,4	40,9	88,90%	93,7	67,50%
<b>AG1</b>	5	800	1800	0,111	70,2	39,0	84,80%	87,8	63,30%
<b>FG1</b>	5	800	2725	0,230	100,0	36,7	79,80%	125,0	90,10%
<b>FG1</b>	5	800	2725	0,256	99,4	36,5	79,50%	124,3	89,60%
<b>FP2</b>	5	805	2575	0,210	95,0	40,0	87,00%	118,0	85,00%
<b>FP1</b>	5	800	2725	0,240	111,0	40,7	88,50%	138,8	100,00%
<b>FP1</b>	7	1120	3815	0,255	151,2	39,5	86,10%	135,0	97,30%
<b>LRAP3</b>	25	1125	3231	0,064	114,4	35,4	77,00%	101,3	73,30%

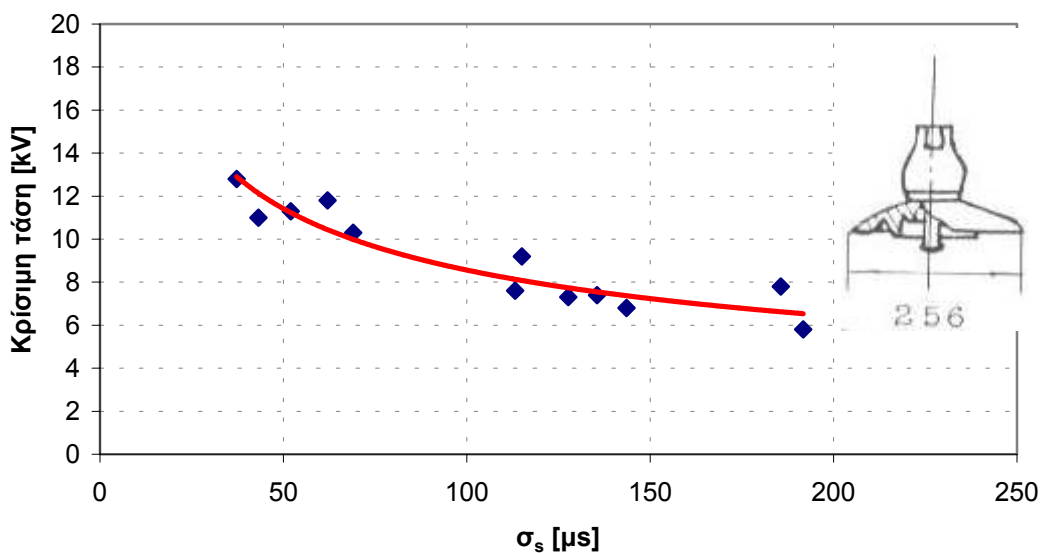
Πίνακας 4.4: Εργαστηριακά αποτελέσματα ρυπασμένων μονωτήρων [27]

Για την σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων μονωτήρων μπορούμε να αξιολογήσουμε την ηλεκτρική συμπεριφορά τους είτε με βάση το ισοδύναμο μήκος ερπυσμού είτε με βάση το ισοδύναμο ύψος της εξεταζόμενης αλυσίδας. Γι' αυτό το λόγο η κρίσιμη τάση κάθε αλυσίδας μονωτήρων έχει αναχθεί σε όρους kVmin/m και ως προς το μήκος ερπυσμού αλλά και ως προς το ύψος κάθε αλυσίδας μονωτήρων. Από τον πίνακα 4.4 φαίνεται ότι την χειρότερη συμπεριφορά παρουσιάζει ο μονωτήρας LRAP3 ο οποίος παρουσιάζει αντοχή 23% μικρότερη του SP1 ο οποίος έχει την καλύτερη ηλεκτρική συμπεριφορά. Με πρώτη ματιά φαίνεται κάπως ασυνήθιστο ο SP1 να παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά αφού έχει την μεγαλύτερη ποσότητα ρύπανσης. Αυτό δηλώνει ότι μάλλον είναι αναξιόπιστη η αξιολόγηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων με βάση μόνο την ποσότητα ρύπανσης που περιέχουν.

Οι σχεδιαστές μονωτήρων και οι ερευνητές συμφωνούν από πρακτικής άποψης ότι το καλύτερο κριτήριο για την σύγκριση διαφορετικών μονωτήρων είναι το ισοδύναμο ύψος, αφού είναι πάντα επιθυμητή η μείωση του όγκου των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Με αυτήν την παραδοχή φαίνεται ότι την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει ο FP1 έπειτα έρχονται οι FG1, FG2 (τύπου anti-fog) και ακολουθούν οι : LRAP3, SP1, AP2 και AG1 [27].

#### 4.2.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ZHICHENG-RENYU

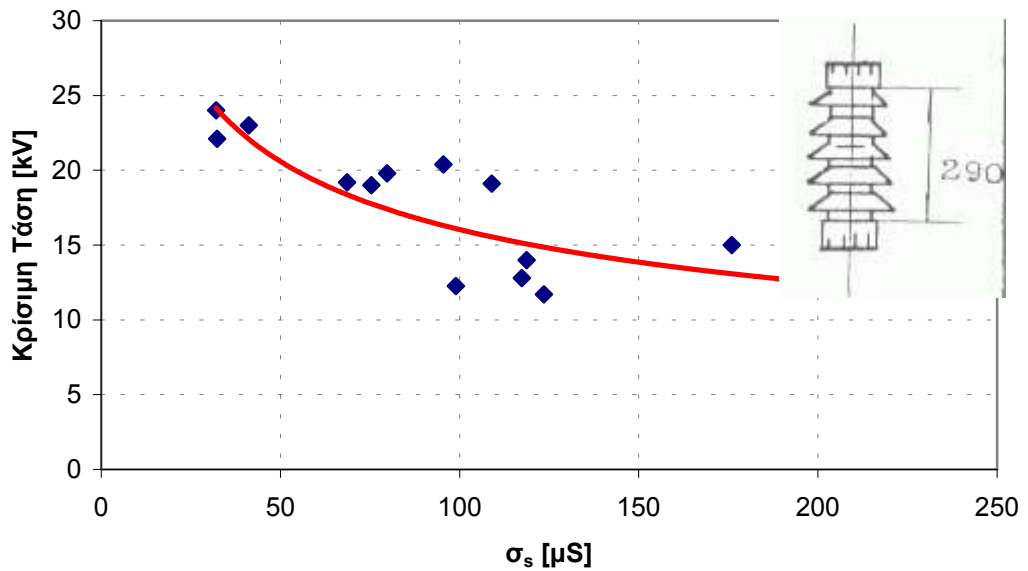
Οι Zhicheng-Renyu [30] μελέτησαν την διάδοση μερικών εκκενώσεων στην επιφάνεια μονωτήρων πολύπλοκων σχημάτων εφαρμόζοντας τόσο συνεχή όσο και εναλλασσόμενη τάση. Η μελέτη αυτή έγινε με την βοήθεια κάμερας υψηλής ταχύτητας οι φωτογραφίες από την οποία έδειξαν εμφανής διάκριση στην διάδοση του τόξου στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις τροφοδοσίας. Παρατήρησαν ότι στην περίπτωση της dc τροφοδοσίας είχαμε σταθερή επιμήκυνση της εκκένωσης στην επιφάνεια του μονωτήρα και όταν αυτή έφτανε τα 2/3 του μήκους ερπυσμού αυτού τότε ξαφνικά εμφανιζόταν υπερπήδηση. Διαφορετικά και πιο πολύπλοκα ήταν τα φαινόμενα στην περίπτωση της ac τροφοδοσίας. Το μήκος και η ένταση του τόξου άλλαζαν πολλές φορές το δευτερόλεπτο. Από τις φωτογραφίες παρατηρήθηκαν δύο διαφορετικά φαινόμενα διάδοσης, αυτά ήταν: Σε μία περίπτωση το τόξο εξαφανιζόταν και έπειτα ξαναδημιουργόταν όταν το ρεύμα έφτανε την τιμή μηδέν. Στην δεύτερη περίπτωση το τόξο δεν μηδενιζόταν με μηδενισμό του ρεύματος αλλά έφθινε σημαντικά τότε και έπειτα άρχιζε να γίνεται εντονότερο. Εξαιτίας λοιπόν της σημαντικής αυτής διαφοράς μεταξύ ac και dc τροφοδοσίας οι Zhicheng-Renyu κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι διαφορετικά μοντέλα πρέπει να αναπτυχθούν για τους δύο τύπους τροφοδοσίας.



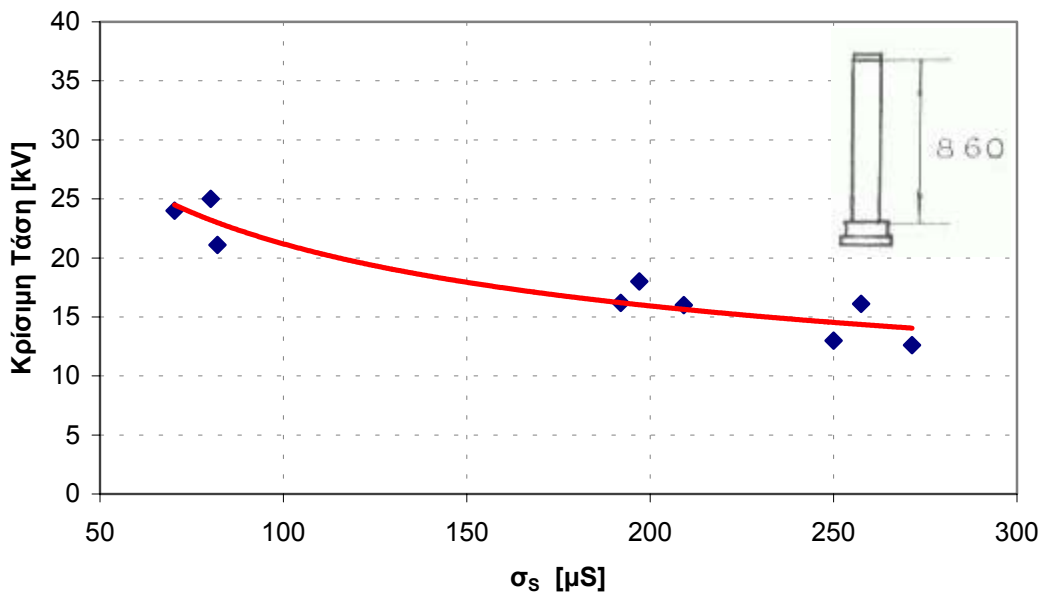
Σχήμα 4.12: Κρίσιμη τάση συναρτήσει της επιφανειακής αγωγιμότητας για dc τροφοδοσία. Η καμπύλη έχει σχεδιαστεί με βάση το προτεινόμενο μοντέλο για  $k=0,9$ .



Στην περίπτωση dc τροφοδοσίας τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα διαγράμματα 4.12 , 4.13 και 4.14 για τρεις διαφορετικούς τύπους μονωτήρων [28].

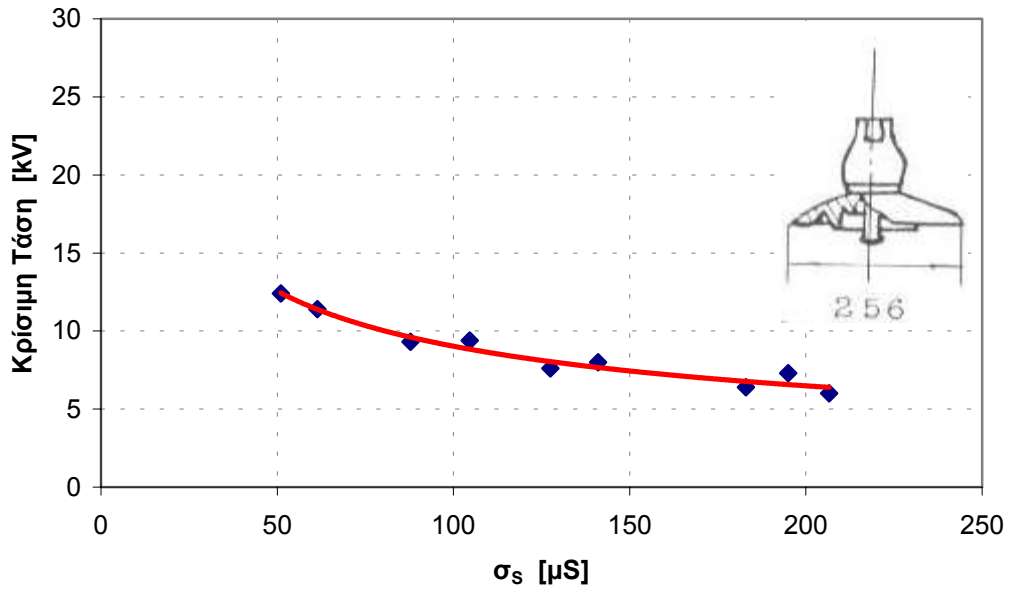


Σχήμα 4.13: Κρίσιμη τάση συναρτήσει της επιφανειακής αγωγιμότητας για dc τροφοδοσία. Η καμπύλη έχει σχεδιαστεί με βάση το προτεινόμενο μοντέλο για  $k=2$ .

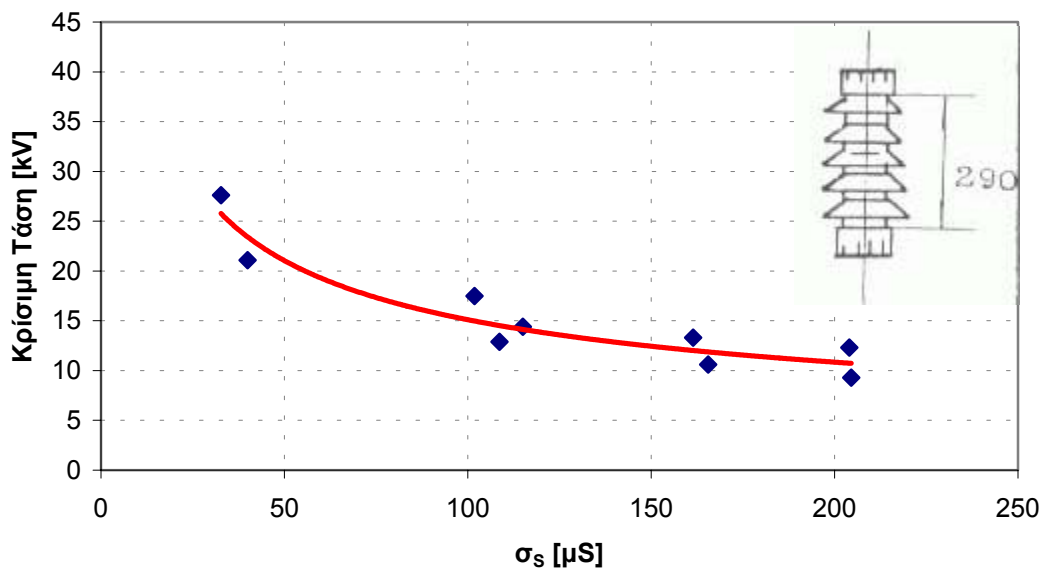


Σχήμα 4.14: Κρίσιμη τάση συναρτήσει της επιφανειακής αγωγιμότητας για dc τροφοδοσία. Η καμπύλη έχει σχεδιαστεί με βάση το προτεινόμενο μοντέλο για  $k=2$ .

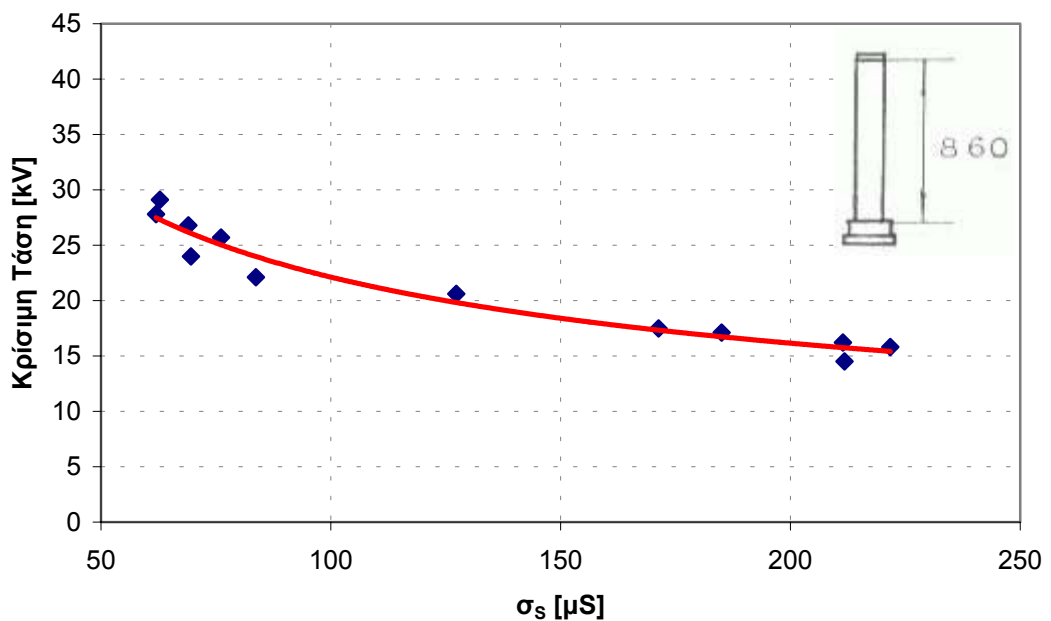
Στην περίπτωση ac τροφοδοσίας για τους ίδιους τύπους μονωτήρων προέκυψαν τα πειραματικά αποτελέσματα που φαίνονται στα διαγράμματα 4.15 , 4.16 και 4.17.



Σχήμα 4.15: Κρίσιμη τάση συναρτήσει της επιφανειακής αγωγιμότητας για ac τροφοδοσία. Η καμπύλη έχει σχεδιαστεί με βάση το προτεινόμενο μοντέλο για  $k=0,9$ .



Σχήμα 4.16: Κρίσιμη τάση συναρτήσει της επιφανειακής αγωγιμότητας για ac τροφοδοσία. Η καμπύλη έχει σχεδιαστεί με βάση το προτεινόμενο μοντέλο για  $k=2$ .



Σχήμα 4.17: Κρίσιμη τάση συναρτήσει της επιφανειακής αγωγιμότητας για ac τροφοδοσία. Η καμπύλη έχει σχεδιαστεί με βάση το προτεινόμενο μοντέλο για  $k=2$

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι στην περίπτωση της ac τροφοδοσίας τα κρίσιμα μεγέθη έχουν υψηλότερη τιμή. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η τάση στην περίπτωση ac τροφοδοσίας μηδενίζεται αρκετές φορές το δευτερόλεπτο φαινόμενο που οδηγεί στην μείωση του μήκους του τόξου και στην εξασθένηση της έντασης του. Επομένως για την συντήρηση του τόξου και την πραγματοποίηση γεφύρωσης απαιτείται μεγαλύτερη τιμή τάσης τροφοδοσίας. Επίσης από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται αρκετά καλή σύμπτωση αποτελεσμάτων μεταξύ του προταθέντος μοντέλου και των πειραμάτων, σύμπτωση όμως που εξαρτάται και από την βέλτιστη επιλογή της σταθεράς  $K$ .

#### 4.2.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ Δ.Ε.Η. ΚΑΙ Ε.Μ.Π

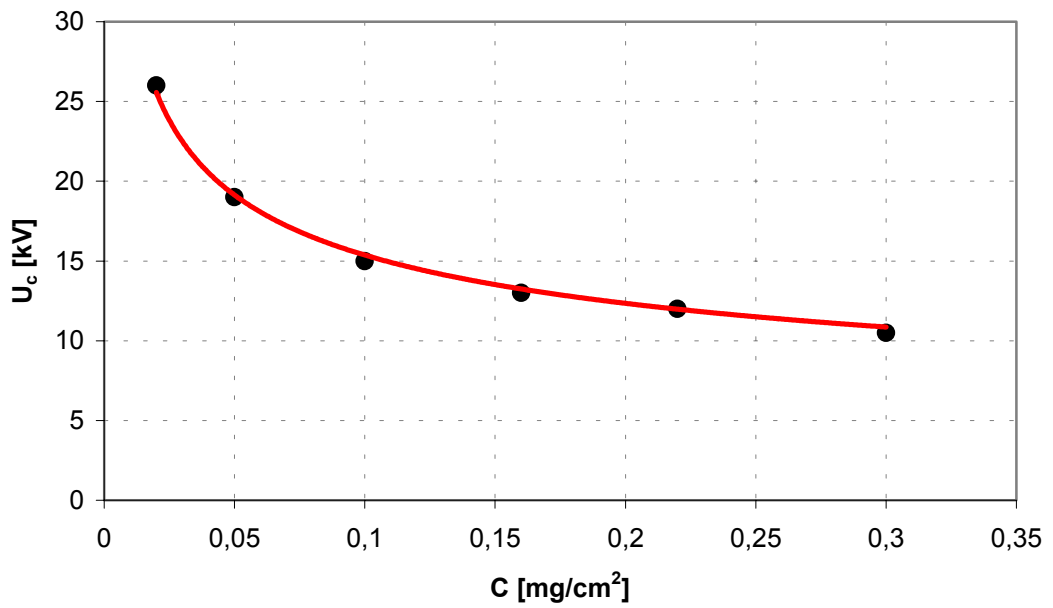
Στη Δ.Ε.Η. σε συνεργασία με το Ε.Μ.Π πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την εύρεση της τάσης υπερπήδησης μονωτήρων [28, 29]. Τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των κρίσιμων μεγεθών ρυπασμένων μονωτήρων [13]. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα πειράματα που έγιναν στη Δ.Ε.Η. [28, 29] καθώς και πειραματικά δεδομένα άλλων ερευνητών [30]. Τα δεδομένα αυτά που αφορούσαν διάφορους τύπους μονωτήρων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη, επέτρεψαν

τον υπολογισμό των απαραίτητων για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου, αριθμητικών σταθερών του τόξου [14]. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν οι δίσκοι καλύφθηκαν με τεχνητή ρύπανση ή σύνθεση της οποίας είναι αντιπροσωπευτική του τύπου ρύπανσης που συναντάται σε περιοχές με υψηλά επίπεδα μόλυνσης στην Ελλάδα. Υψηλή τάση, προοδευτικά αυξανόμενης τιμής, εφαρμόστηκε στους μονωτήρες όταν η αγωγιμότητα τους έγινε μέγιστη, μέχρι την πραγματοποίηση της υπερπήδησης. Η μέγιστη επιφανειακή αγωγιμότητα των μονωτήρων καθορίστηκε μετρώντας την μέγιστη τιμή του ρεύματος διαρροής. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση δίσκων φαίνονται στον πίνακα 4.5.

Στα πειράματα αυτά μετρήθηκε τόσο η κρίσιμη τάση όσο και το κρίσιμο ρεύμα, έναν κύκλο πριν την δημιουργία τόξου γεφύρωσης. Τα μεγέθη που καταγράφηκαν με αυτό τον τρόπο θεωρήθηκαν ως κρίσιμα. Παρακάτω στα διαγράμματα 4.18 και 4.19 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και του προταθέντος μοντέλου [13].

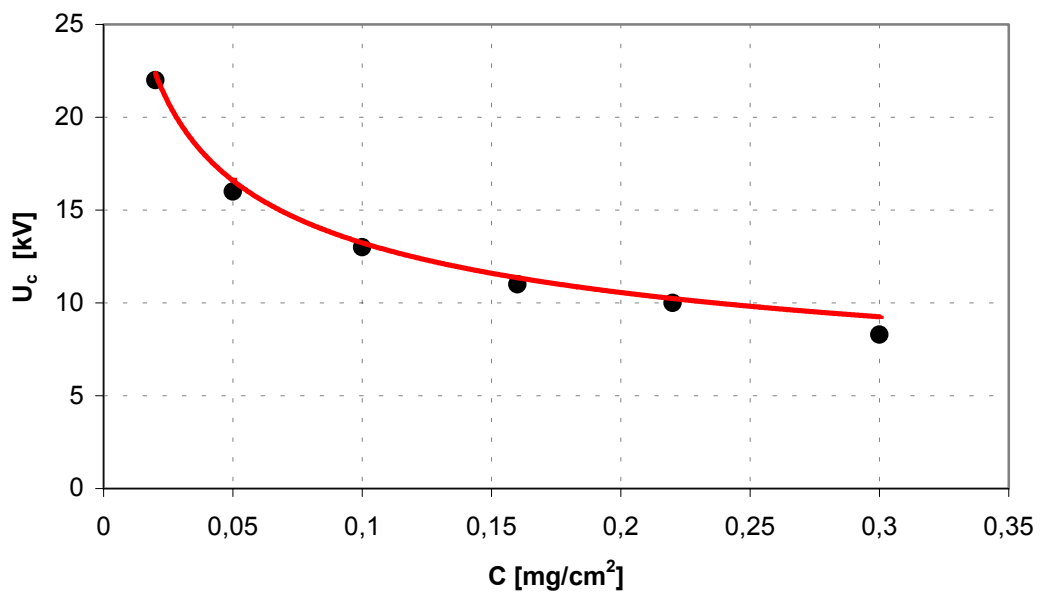
A/A	Διάμετρος D <sub>m</sub> [mm]	Ύψος H [mm]	Μήκος Ερπυσμού L [mm]	Συντελεστής Μορφής F
1	268	159	330	0,79
2	268	159	406	0,86
3	254	165	432	0,90
4	254	146	279	0,68
5	254	146	432	0,92
6	254	146	318	0,72
7	292	159	470	0,92
8	279	156	368	0,76
9	321	178	546	0,96
10	254	146	305	0,70
11	280	170	370	0,80
12	254	145	305	0,74
13	200	165	400	1,29
14	229	166	432	1,38
15	180	290	605	1,43
16	200	320	690	2,04
17	150	248	370	1,06
18	150	294	400	1,14
19	180	290	480	0,71

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων μονωτήρων



Σχήμα 4.18: Κρίσιμη τάση μονωτήρα No 5 (fog type) συναρτήσσει ESDD

- Πειραματικά αποτελέσματα
- Εφαρμογή μοντέλου



Σχήμα 4.19: Κρίσιμη τάση μονωτήρα No 10 (cap-and-pin) συναρτήσσει ESDD

- Πειραματικά αποτελέσματα
- Εφαρμογή μοντέλου

Με βάση τα παραπάνω πειράματα αποδείχθηκε ότι η RMS τιμή της κρίσιμης τάσης  $U_c$  (σε kV) μεταβάλλεται ως συνάρτηση της ισοδύναμης πυκνότητας εναποθέματος αλατιού  $C$  σύμφωνα με την σχέση

$$U_c = K_c \cdot C^{-m}$$

όπου  $K_c$  είναι γραμμική συνάρτηση του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα  $L$  (σε cm) σύμφωνα με

$$K_c = 0,12 \cdot L + 2,43$$

Ο εκθέτης  $m$  εξαρτάται από τον συντελεστή μορφής του μονωτήρα και η τιμή του για έναν συνηθισμένο cap-and-pin μονωτήρα κυμαίνεται στο εύρος  $0,325 \pm 0,009$  με το  $C$  εκφρασμένο σε  $mg/cm^2$ .

### ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

#### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως φάνηκε από τα προηγούμενα μεγάλος αριθμός πειραμάτων έχει πραγματοποιηθεί από πλήθος ερευνητών με σκοπό την εξήγηση του φαινομένου της υπερπήδησης και την ποσοτικοποίηση του. Στην προσπάθεια τους αυτή ελέχθησαν πειραματικά πλήθος μονωτήρων διαφορετικών ως προς το σχήμα τις διαστάσεις αλλά και τον τύπο ρύπανσης της επιφάνειάς τους. Με βάση λοιπόν τα πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία θα επιχειρηθεί παρακάτω να γίνει αξιολόγηση της ικανότητας ακριβούς πρόβλεψης των κρίσιμων μεγεθών ενός μονωτήρα με βάση τα γνωστότερα μαθηματικά μοντέλα. Επίσης σε κάθε περίπτωση θα επιχειρηθεί να αξιολογηθούν οι σταθερές του τόξου που προτείνουν οι ερευνητές και όπου είναι αναγκαίο να προταθούν νέες για τον συγκεκριμένο τύπο μονωτήρα.

#### 5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

##### 5.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ WILKINS ΚΑΙ ALSTON

Ο Wilkins [17] για την εξακρίβωση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων προσομοίωσε τον μονωτήρα με έναν επίπεδο δίσκο διαστάσεων 10cm × 10cm με σταθερή αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία μεταβάλλεται με μεταβολή της ποσότητας ύγρανσης της επιφάνειας του μονωτήρα. Η στερεή ρύπανση για το δείγμα αυτό πάρθηκε από έναν ηλεκτρικό σταθμό οπότε αναμένεται να περιέχει άλατα και οξείδια. Όμοια με τον Wilkins ο Alston [16] έλεγξε την ηλεκτρική συμπεριφορά μονωτήρα γυαλιού μήκους 12cm ο οποίος είχε ρυπανθεί με υγρή βιομηχανική ρύπανση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους πίνακες 5.1 και 5.2, όπου δείχνεται η μεταβολή της κρίσιμης τάσης  $V_c$  ως προς την ανά μονάδα μήκους αντίσταση  $r_p$ .

A.A	$r_p$ (kΩ/cm)	Κρίσιμη Τάση $V_c$ (kV)
1	25,31	12,96
2	29,58	13,92
3	40,80	16,00
4	45,87	16,36
5	48,30	17,26
6	53,52	19,12
7	84,74	22,35
8	105,26	24,58
9	200,00	28,70

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα πειράματος Wilkins [4]

A.A	$r_p$ (kΩ/cm)	Κρίσιμη Τάση $V_c$ (kV)
1	24,3	14,6
2	15,36	15,36
3	15,6	15,6
4	18,8	18,8

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα πειράματος Alston [3]

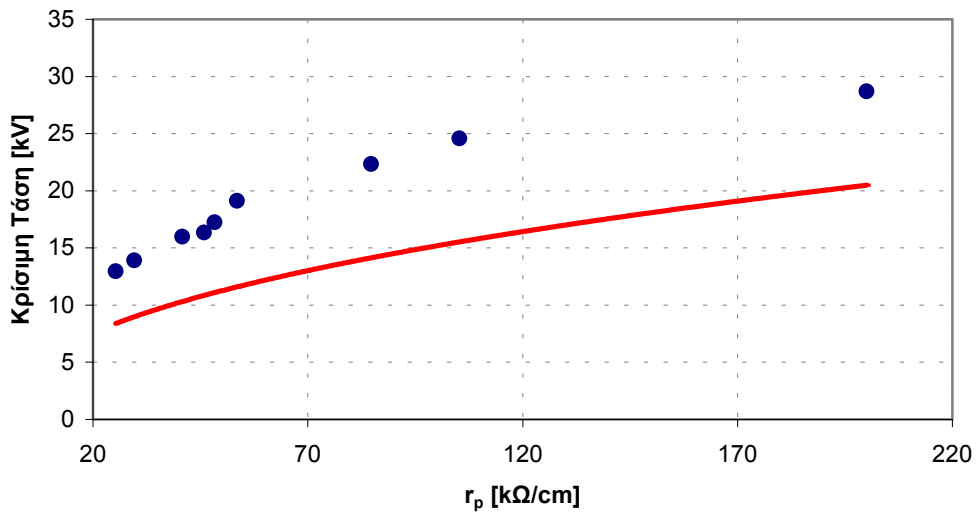
### 5.2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ NEUMARKER-RIZK

Σύμφωνα με το μοντέλο που πρότειναν οι Neumarker και Rizk [12] η τάση υπερπήδησης ενός μονωτήρα μήκους L θα δίνεται

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \cdot L \quad (5.1)$$

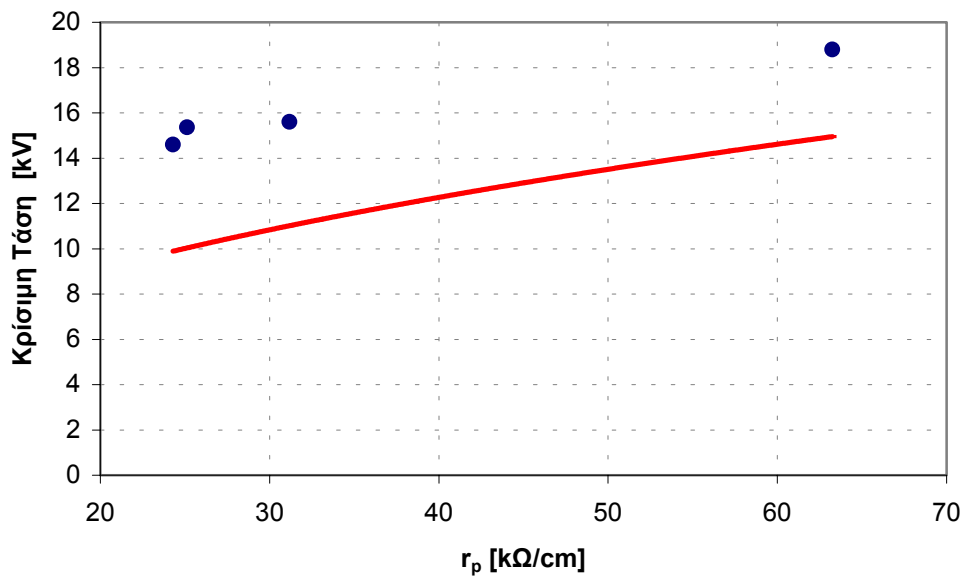
όπου  $r_p$  σε Ω/cm και L σε cm. Οι Neumarker και Rizk πρότειναν ως σταθερές του τόξου τις τιμές: A=63 και n=0,76. Εφαρμόζοντας το μοντέλο και συγκρίνοντας το με τα πειραματικά αποτελέσματα του Wilkins παίρνουμε το διάγραμμα 5.1 ενώ στο διάγραμμα 5.2 γίνεται σύγκριση με το πείραμα του Alston.





Διάγραμμα 5.1 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων Wilkins για  $A=63$  και  $n=0,76$

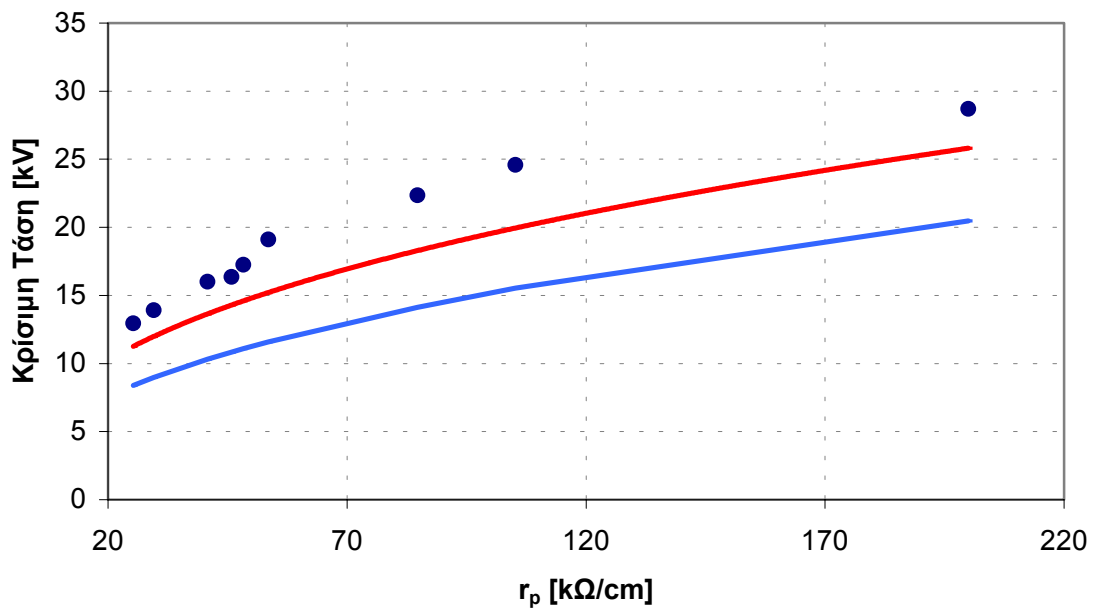
- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Neumarker-Rizk



Διάγραμμα 5.2 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων Alston για  $A=63$  και  $n=0,76$

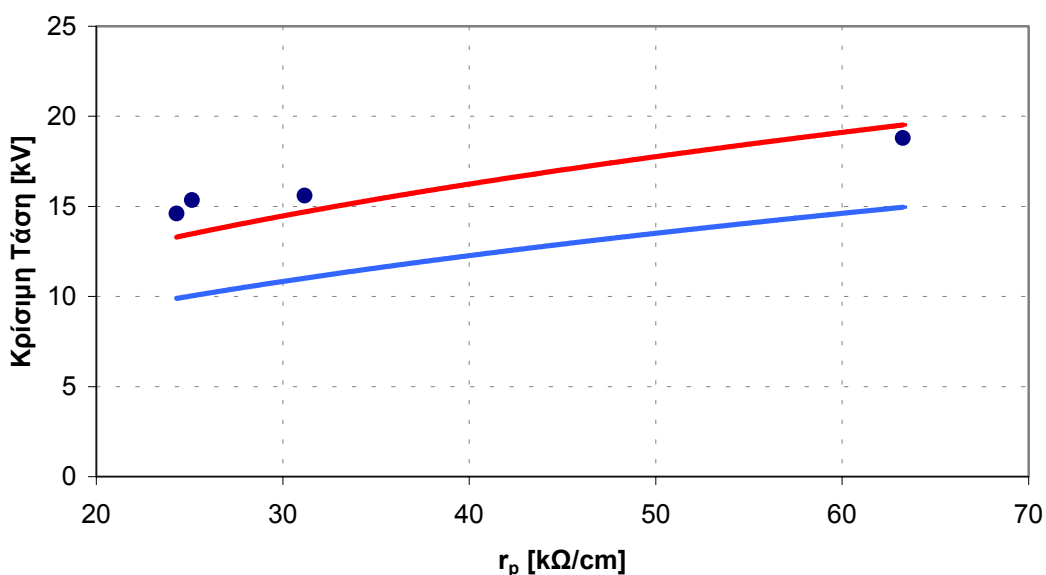
- Πείραμα Alston
- Μοντέλο Neumarker-Rizk

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πολύ κακή συμφωνία του μοντέλου με το πείραμα για τις προταθέντες τιμές των σταθερών  $A$ ,  $n$ . Το μοντέλο στην περίπτωση αυτή δίνει πολύ συντηρητικά αποτελέσματα με μέσο σφάλμα περίπου 35% στην περίπτωση του πειράματος του Wilkins ενώ 30% στην περίπτωση του πειράματος του Alston. Η συμπεριφορά του μοντέλου αλλάζει σημαντικά με μεταβολή των σταθερών του τόξου, οπότε θα επιχειρήσουμε με βάση την εργασία άλλων ερευνητών να προσδιορίσουμε την βέλτιστη επιλογή των σταθερών αυτών. Θα χρησιμοποιήσουμε την εργασία του G.Shicheng [15] ο οποίος αναλύοντας σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων πρότεινε ως σταθερές τις τιμές  $A=140$  και  $n=0,67$ . Η συσχέτιση που παρουσιάζουν στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 5.3 και 5.4 αντίστοιχα όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τις σταθερές  $A$ ,  $n$  που είχαν προταθεί από τους Neumarker και Rizk [12].



Διάγραμμα 5.3 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων Wilkins

- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Neumarker-Rizk (σταθερές G.Shicheng [15])
- Μοντέλο Neumarker-Rizk (σταθερές Neumarker-Rizk  $A=63$  και  $n=0,76$ )



Διάγραμμα 5.4 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων Alston

- Πείραμα Alston
- Μοντέλο Neumarker-Rizk (σταθερές G.Shicheng [15])
- Μοντέλο Neumarker-Rizk (σταθερές Neumarker-Rizk A=63 και n=0,76)

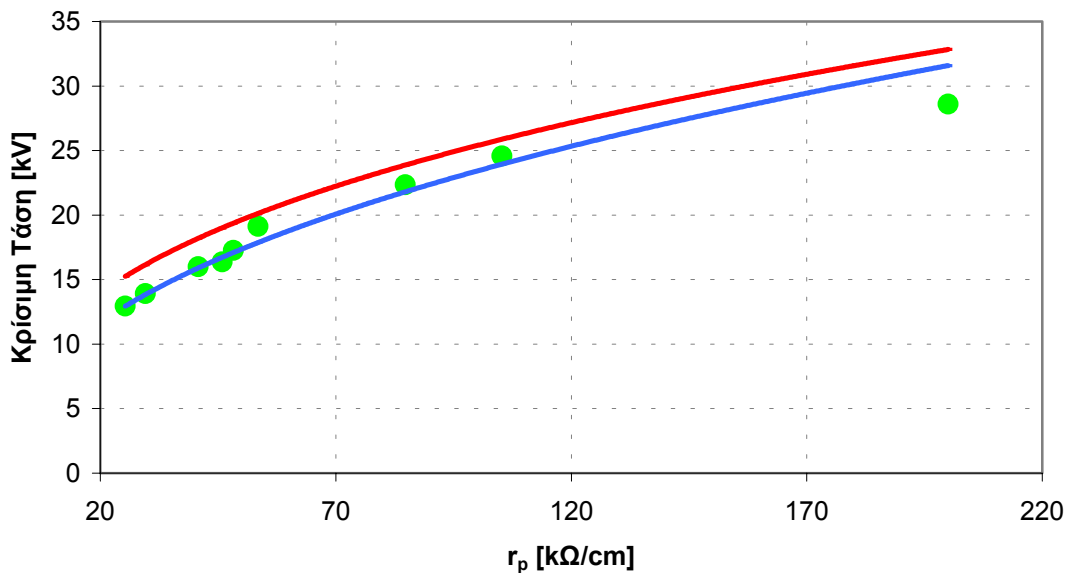
Στην περίπτωση αυτή έχουμε πολύ καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα με μέσο σφάλμα περίπου 14% στο πείραμα του Wilkins και 8% στο πείραμα του Alston με καλύτερη πρόβλεψη στις χαμηλότερες τιμές ρύπανσης. Το αρνητικό όμως είναι πως και με αυτές τις σταθερές έχουμε υποεκτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων κάτι που πρέπει στην πράξη να αποφεύγεται. Φαίνεται δηλαδή η μεγάλη σημασία που έχει η σωστή επιλογή των σταθερών του τόξου η οποία όμως σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας του μονωτήρα οι οποίες με την σειρά τους θα επηρεάζουν τον μηχανισμό διάδοσης του τόξου. Έτσι είναι εξαιρετικά δύσκολος έως αδύνατος ένας μονοσήμαντος ορισμός των σταθερών αυτών. Πάντως να σημειωθεί ότι το μοντέλο σε κάθε περίπτωση ακολουθεί την εκθετική διασπορά των πειραματικών δεδομένων.

### 5.2.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟ GHOSS-CHATTERJEE

Σύμφωνα με το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee [18] η κρίσιμη τάση θα ισούται:

$$V_{ec} = L \cdot k^{\frac{1}{n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (5.2)$$

όπου στην περίπτωση αυτή οι σταθερές A,n εξαρτώνται από τον τύπο της ρύπανσης. Οι τιμές που προτάθηκαν βρίσκονται στον πίνακα 3.1. Η ρύπανση που είχαν οι μονωτήρες περιελάμβανε άλατα και οξείδια, θα επιχειρήσουμε λοιπόν να εφαρμόσουμε το μοντέλο με ρύπανση  $NaCl$  και  $FeCl_3$ , οπότε δεχόμαστε αντίστοιχα ( $A=360, n=0,59$ ) και ( $A=270$  και  $n=0,66$ ). Η συσχέτιση που προκύπτει στην περίπτωση αυτή φαίνεται στο διάγραμμα 5.5 για το πείραμα του Wilkins ενώ στο διάγραμμα 5.6 για το πείραμα του Alston.

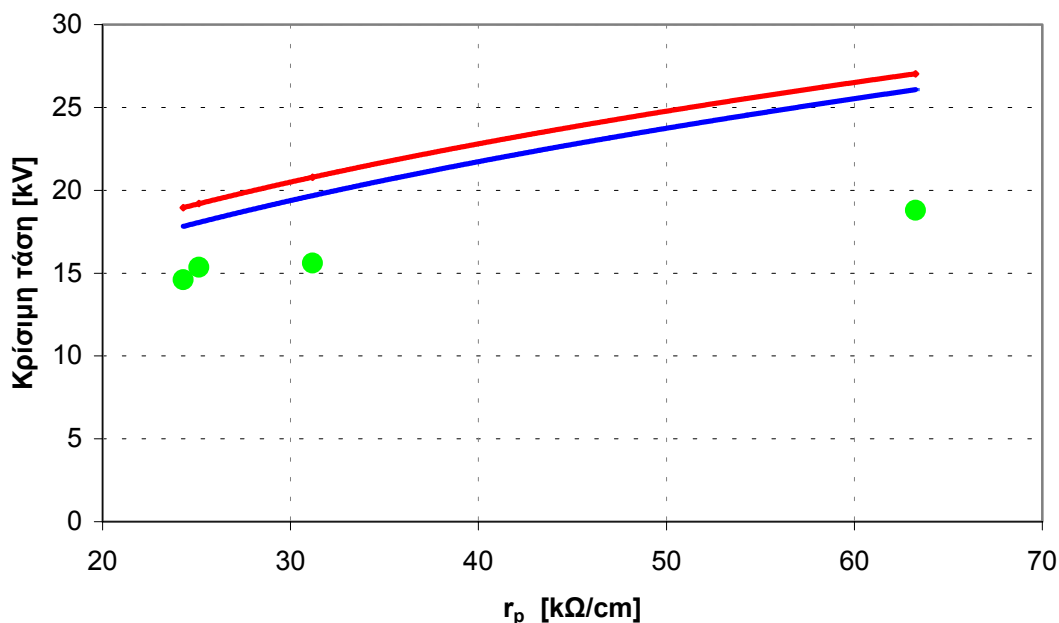


Διάγραμμα 5.5 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Ghoss-Chatterjee και πειραμάτων Wilkins

- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Ghoss-Chatterjee για ρύπανση  $NaCl$  ( $A=360$  και  $n=0,59$ )
- Μοντέλο Ghoss-Chatterjee για ρύπανση  $FeCl_3$  ( $A=270$  και  $n=0,66$ )

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η εξαιρετικά καλή σύμπτωση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων ιδιαίτερα στην περίπτωση μεγάλης

ρύπανσης. Παρατηρείται μέσο όρο σφάλματος 6,5% στην περίπτωση ρύπανσης  $FeCl_3$  και 10% στην περίπτωση ρύπανσης  $NaCl$ . Οπότε με γνώση του τύπου ρύπανσης του μονωτήρα και ανάλογη προσαρμογή των σταθερών του τόξου το μοντέλο δίνει εξαιρετικά αξιόπιστα αποτελέσματα.

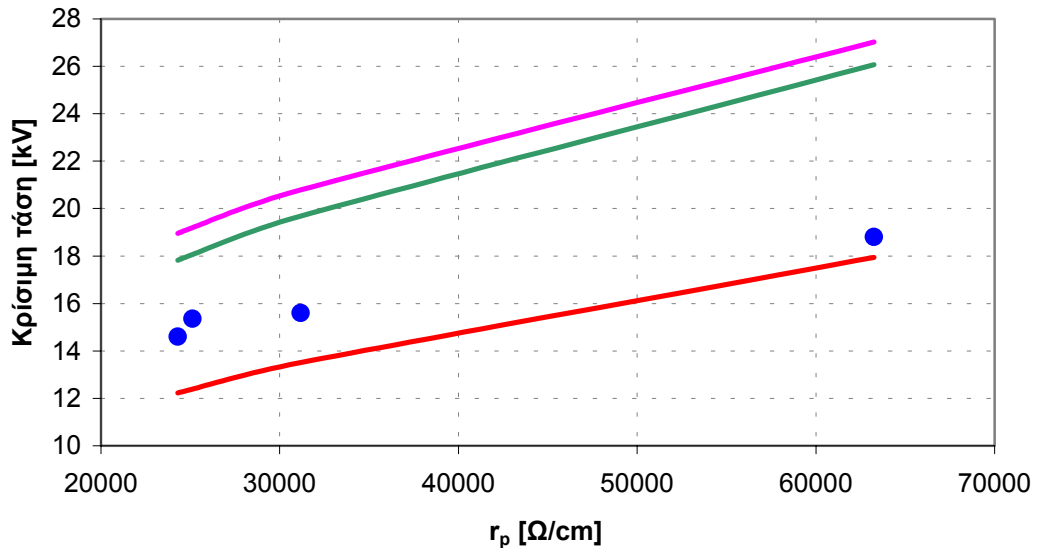


Διάγραμμα 5.6: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Ghoss-Chatterjee και πειραμάτων Alston

- Πείραμα Alston
- Μοντέλο Ghoss-Chatterjee για ρύπανση  $NaCl$  ( $A=360$  και  $n=0,59$ )
- Μοντέλο Ghoss-Chatterjee για ρύπανση  $FeCl_3$  ( $A=270$  και  $n=0,66$ )

Στην περίπτωση όμως του πειράματος του Alston τα αποτελέσματα δεν ήταν τόσο καλά όσο στην προηγούμενη περίπτωση. Εδώ είχαμε ένα σφάλμα της τάξης του 20% στην περίπτωση ρύπανσης  $FeCl_3$  ενώ ένα μέσο σφάλμα περίπου 30% στην περίπτωση  $NaCl$ . Η αστοχία αυτή προέρχεται από την αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού των σταθερών του τόξου. Η ρύπανση στην περίπτωση αυτή είναι βιομηχανικής φύσεως και συνεπώς η θεώρηση μας ότι αυτή είναι είτε  $FeCl_3$  είτε  $NaCl$  οδηγεί στο παραπάνω σφάλμα. Εάν ήταν γνωστή η σύσταση της ρύπανσης και επομένως πιο ακριβής ο προσδιορισμός των σταθερών  $A$ ,  $n$  η συσχέτιση των αποτελεσμάτων θα ήταν σαφώς καλύτερη.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου των Ghoss-Chatterjee με εφαρμογή των σταθερών  $A$  και  $n$ , οι οποίες έχουν προταθεί από τους ίδιους και από τον G.Shicheng [12].



Διάγραμμα 5.7: Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων πειράματος Alston και μοντέλου Ghoss-Chatterjee για διάφορες τιμές των σταθερών  $A$ ,  $n$

- Πείραμα Alston
- Μοντέλο Ghoss-Chatterjee ( $\text{NaCl}$   $A=360$ ,  $n=0,59$ )
- Μοντέλο Ghoss-Chatterjee ( $\text{FeCl}_3$   $A=270$   $n=0,66$ )
- Μοντέλο Ghoss-Chatterjee (G.Shicheng [12]  $A=140$   $n=0,67$ )

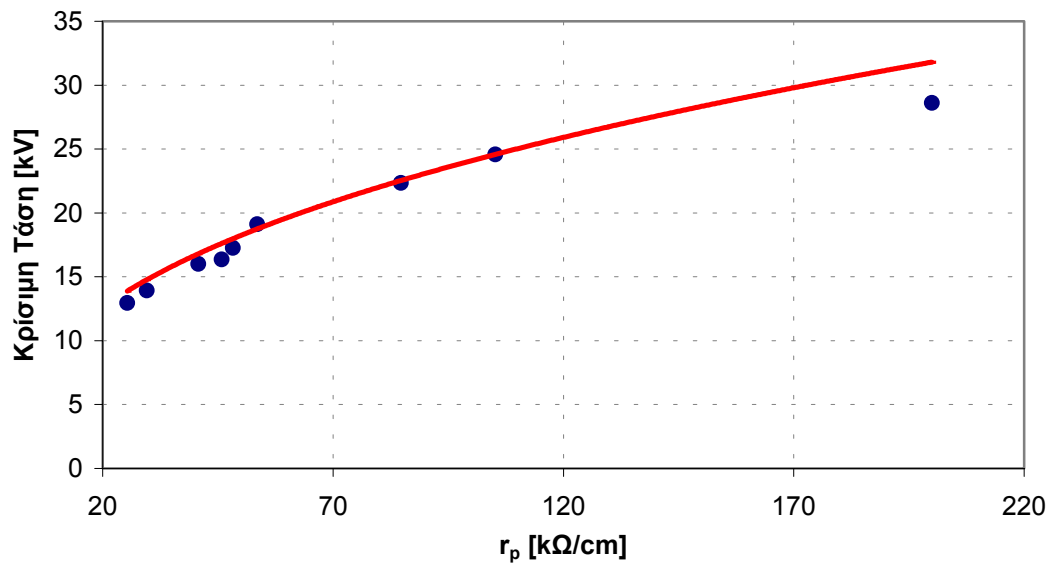
Οι σταθερές από τον G.Shicheng εξακολουθούν να δίνουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά και στο μοντέλο των Ghoss-Chatterjee σε σχέση με τις σταθερές που είχαν προταθεί από τους ίδιους γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία τους στις περιπτώσεις μονωτήρων μικρού μήκους και μεγάλης επιφανειακής αντίστασης.

### 5.2.1.3 ΜΟΝΤΕΛΟ DHABI-MEGRICHE, BEROUAL

Οι Dhabi-Megrache και Beroual [25] στηριζόμενοι στο ενεργειακό ισοζύγιο, σε ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και στα φυσικά χαρακτηριστικά του τόξου πρότειναν ότι η κρίσιμη τιμή της τάσης υπερπήδησης θα ισούται με:

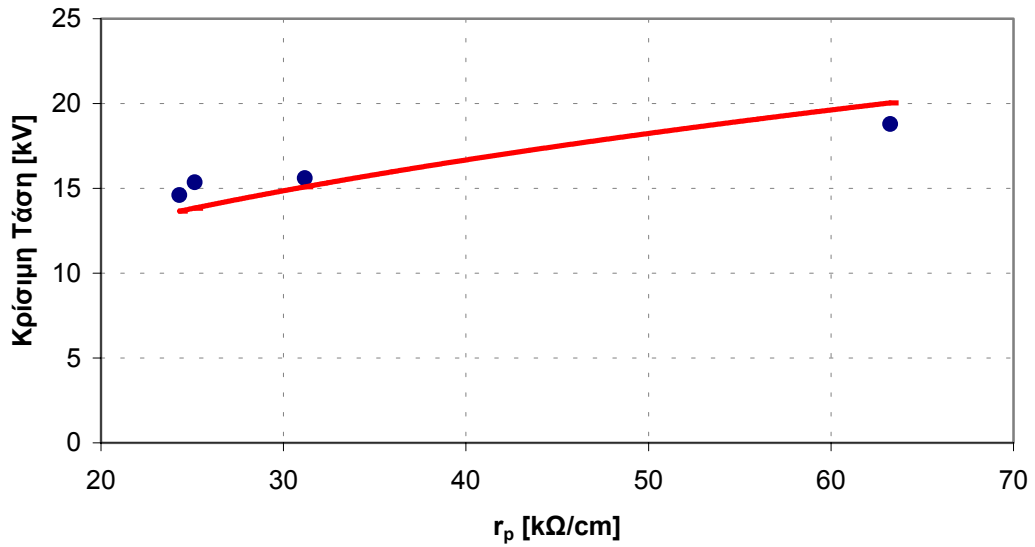
$$U_c = n^{1/n+1} \cdot \left\{ \frac{1}{(n+1)^{(n+1)}} + n^{(n-1)} \right\} \cdot A^{1/n+1} \cdot r_p^{n/n+1} \cdot L \quad (5.3)$$

Οι Dhabi-Megrache και Beroual δεν πρότειναν συγκεκριμένες τιμές για τις σταθερές  $A$ ,  $n$  για τις οποίες όμως προσδιόρισαν ότι θα βρίσκονται στις εξής περιοχές:  $0,45 \leq n \leq 1$  και  $3 \leq A \leq 200$ . Θα χρησιμοποιήσουμε και στην περίπτωση τις σταθερές που πρότεινε ο G.Zhicheng [15]. Στα παρακάτω διάγραμμα 5.8 και 5.9 φαίνεται η σύγκριση του μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Διάγραμμα 5.8 Σύγκριση μεταξύ μοντέλου Dhabi-Megrache και πειραμάτων Wilkins για  $A=140$  και  $n=0,67$

- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Dhabi-Megrache και Beroual



Διάγραμμα 5.9 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Dhabi-Megrache και πειραμάτων Alston για  $A=140$  και  $n=0,67$

- Πείραμα Alston
- Μοντέλο Dhabi-Megrache και Beroual

Φαίνεται από τα παραπάνω άψογη συμπεριφορά του μοντέλου με βάση τις σταθερές που έχουν προταθεί από τον G.Zhicheng.

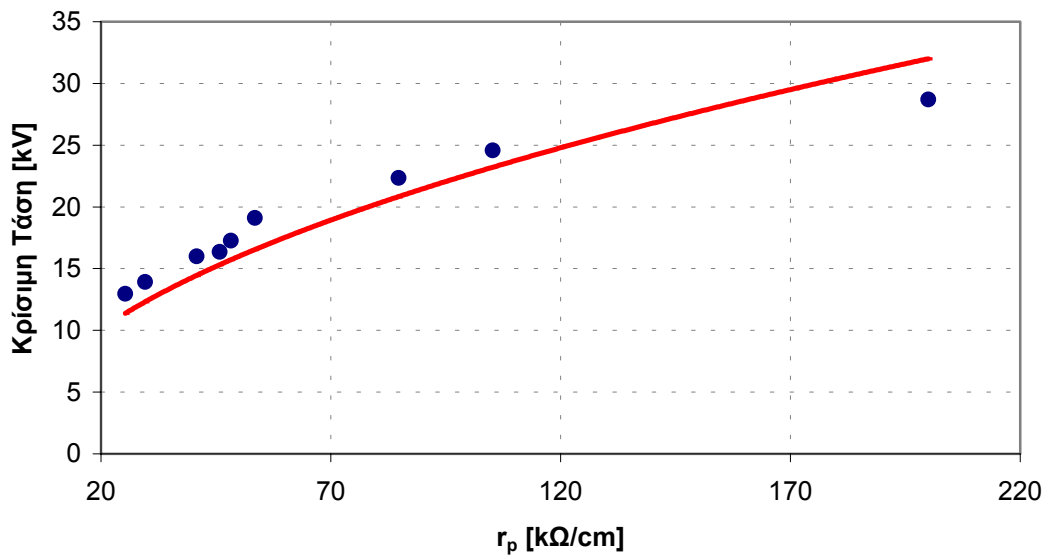
#### 5.2.1.4 ΜΟΝΤΕΛΟ OBENSAUS-BOEHME

Οι Obenaus-Boehme [12] χρησιμοποιώντας το κριτήριο του Hampton κατέληξαν στην ακόλουθη έκφραση για την κρίσιμη τάση:

$$U_C = 0,8 \cdot \sqrt{N} \cdot \sqrt{r_{p1}} \cdot L \quad (5.4)$$

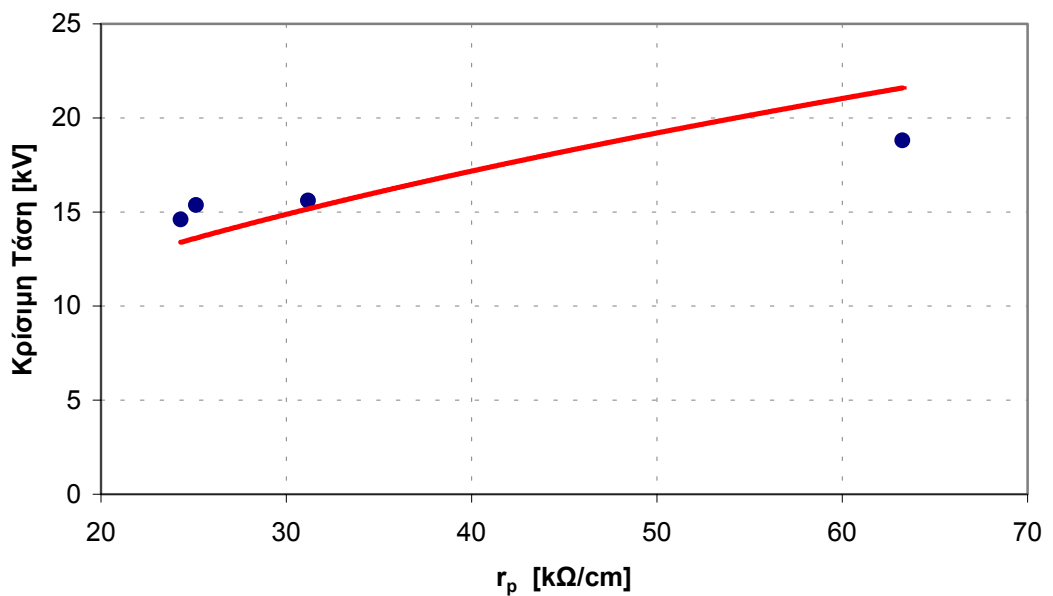
Όπου  $N$  σταθερά η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τόξου και τις διαστάσεις του μονωτήρα και η οποία καθορίστηκε μετά από πειράματα να είναι ίση με  $80V \cdot A/cm$ . Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων θεωρητικών και πειραματικών φαίνονται για τα δύο πειράματα στα διαγράμματα 5.10 και 5.11.





Διάγραμμα 5.10 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου *Obenaus-Boehme* και πειραμάτων *Wilkins*

- Πείραμα *Wilkins*
- Μοντέλο *Obenaus-Boehme*



Διάγραμμα 5.11 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου *Obenaus-Boehme* και πειραμάτων *Alston*

- Πείραμα *Alston*
- Μοντέλο *Obenaus-Boehme*

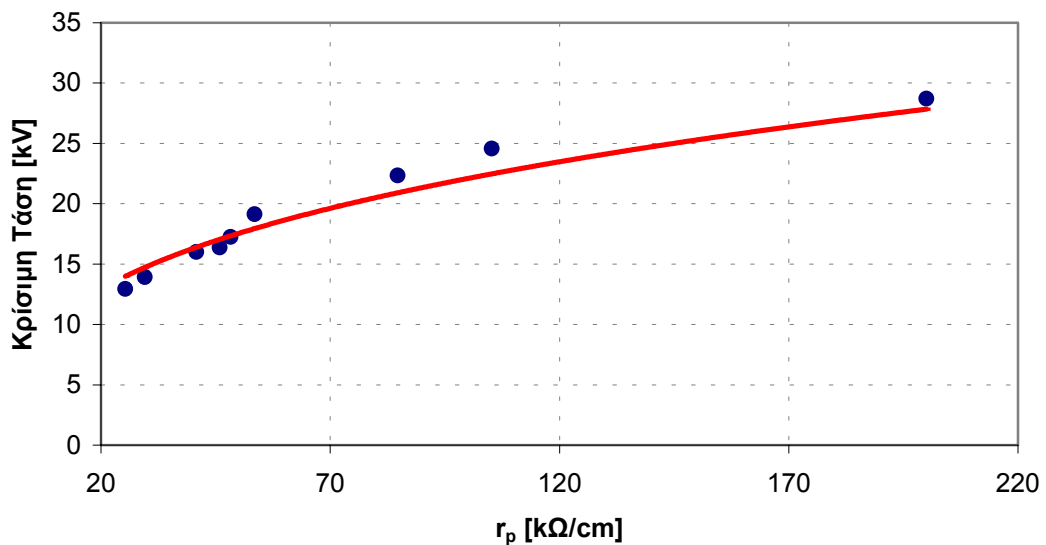
Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μια πολύ καλή προσέγγιση των θεωρητικών με τα πειραματικά με ένα σφάλμα της τάξης του 10% στην πρώτη περίπτωση και 6% στην δεύτερη. Το αρνητικό στην περίπτωση αυτή είναι ότι η χρησιμοποίηση του μοντέλου δίνει υπο-διαστασιολογημένα αποτελέσματα κάτι που στην πράξη πρέπει να αποφεύγεται.

#### 5.2.1.5 ΜΟΝΤΕΛΟ HURLEY-LIMBOURN

Οι Hurley και Limbourn [12] βασιζόμενοι σε εμπειρικές σχέσεις και στο μοντέλο του Obenaus κατέληξαν στην εξής έκφραση για την κρίσιμη τάση:

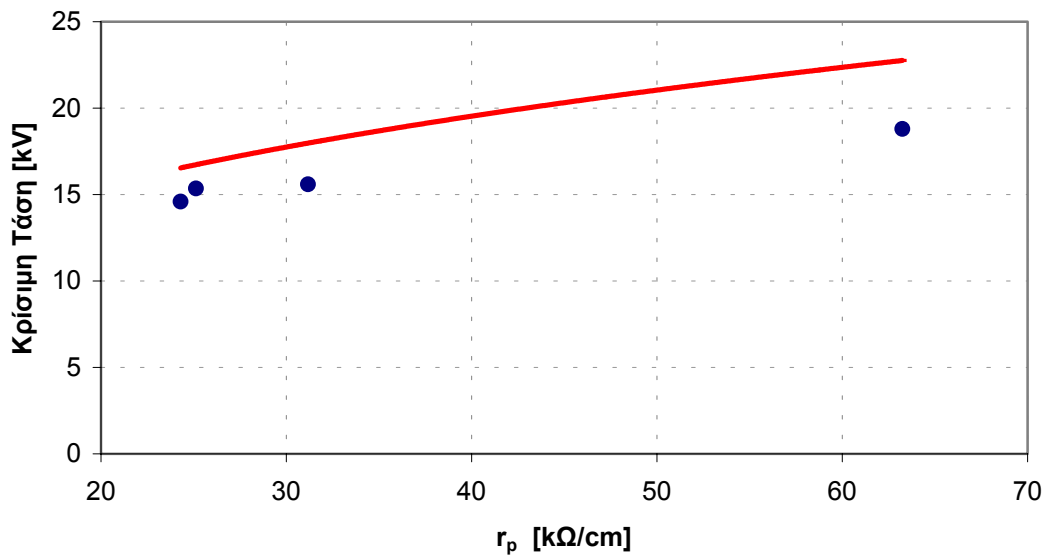
$$U_c = 47,6 \cdot \bar{r}_p^{-1/3} \cdot L \quad (5.5)$$

Στο διαγράμματα 5.12 και 5.13 φαίνεται η συσχέτιση των μοντέλων με τα δεδομένα του πειράματος.



Διάγραμμα 5.12 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Hurley-Limbourn και πειραμάτων Wilkins

- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Hurley-Limbourn



Διάγραμμα 5.13 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Hurley-Limbourn και πειραμάτων Alston

• Πείραμα Alston

— Μοντέλο Hurley-Limbourn

Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά σε όλο το εύρος της ποσότητας ρύπανσης με ένα μέσο σφάλμα της τάξης του 5% στην πρώτη περίπτωση και 10% στην δεύτερη. Το πολύ σημαντικό στην περίπτωση αυτή είναι ότι δεν χρησιμοποιώ διαφορετικές σταθερές διάδοσης του τόξου σε κάθε περίπτωση, αλλά αυτές έχουν καθορίσει τις σταθερές 47,6 και 1/3 γεγονός που κάνει το μοντέλο ιδιαίτερα εύχρηστο.

### 5.2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ VON CRON

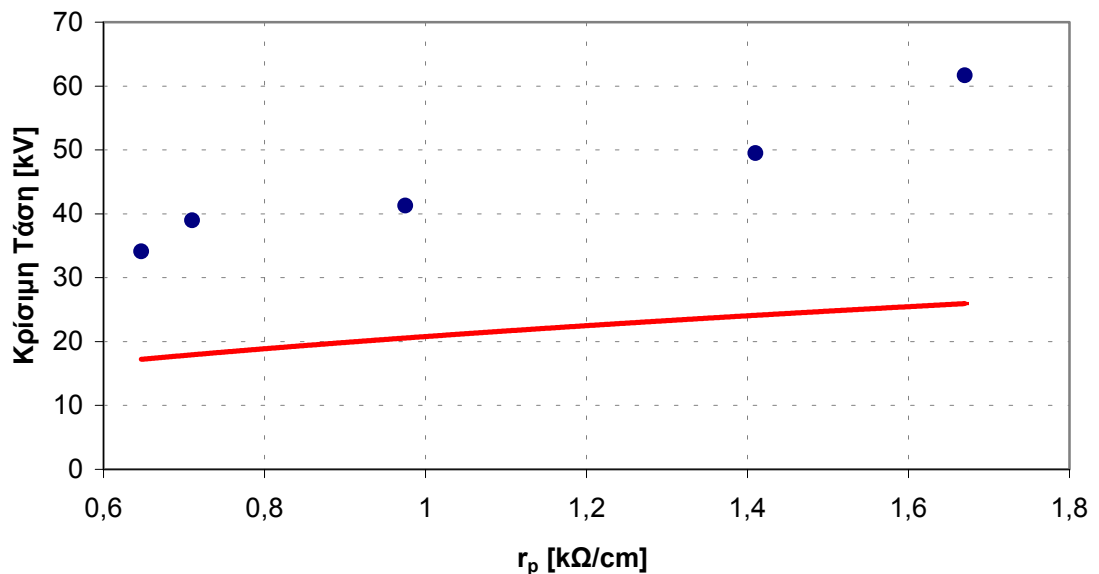
Ο von Cron [16] έλεγξε την ηλεκτρική συμπεριφορά κυλινδρικού μονωτήρα πορσελάνης μήκους 100cm ο οποίος είχε ρυπανθεί με μόλυνση που περιείχε άλατα χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενη τάση. Το νέο στην περίπτωση αυτή είναι εκτός από το μεγάλο μήκος του εξεταζόμενου μονωτήρα-περίπου 10 φορές μεγαλύτερος από τους προηγούμενους- και η πολύ μικρότερη αντίσταση ανά μονάδα μήκους- περίπου 40 φορές μικρότερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις-οπότε παρουσιάζει ενδιαφέρον η συμπεριφορά των μοντέλων στα νέα αυτά δεδομένα. Τα αποτελέσματα του πειράματος περιέχονται στον πίνακα 5.3.

A.A	$r_p$ (kΩ/cm)	Κρίσιμη Τάση $V_c$ (kV)
1	0,647	34,1
2	0,710	39
3	0,975	41,3
4	1,12	49,5
5	1,67	61,7

Πίνακας 5.3: Πειραματικά αποτελέσματα von Cron

### 5.2.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ NEUMARKER-RIZK

Εφαρμόζοντας το μοντέλο των Neumarker και Rizk [12] (σχέση 5.1) για τις σταθερές  $A$ ,  $n$  που είχαν προτείνει ( $A=63$ ,  $n=0,76$ ) και συγκρίνοντας το με τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει το διάγραμμα 5.14.

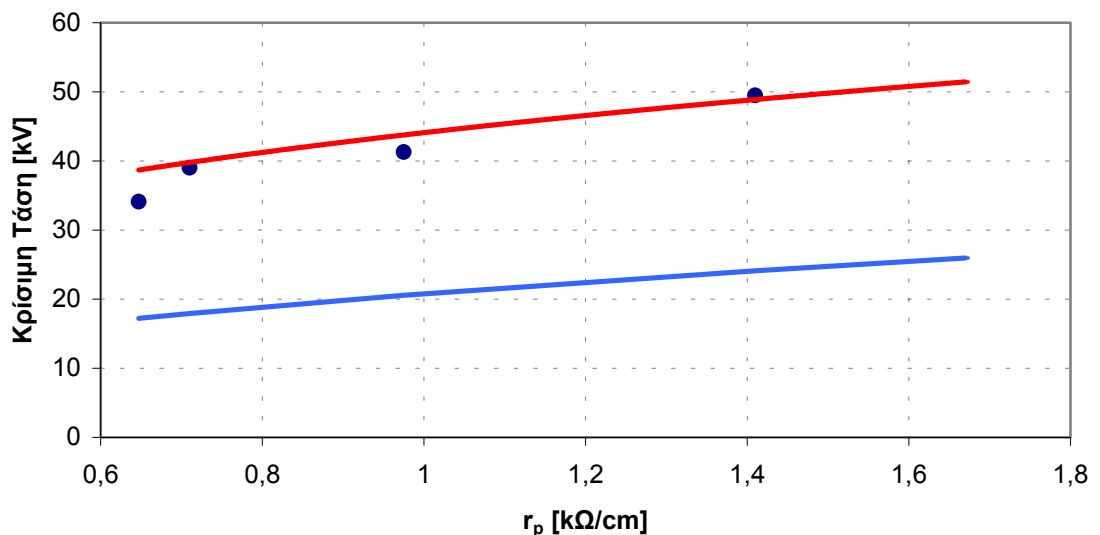


Διάγραμμα 5.14 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων von Cron για  $A=63$  και  $n=0,76$

- Πείραμα von Cron
- Μοντέλο Neumarker-Rizk

Όπως φάνηκε στο πρώτο μέρος της μελέτης έτσι και εδώ επιβεβαιώνεται ότι οι σταθερές που είχαν προτείνει οι Neumarker και Rizk δίνουν πολύ κακά αποτελέσματα. Στην περίπτωση μας όπου η ρύπανση είναι σχετικά μεγάλης

ποσότητας και το μήκος του μονωτήρα μεγάλο το μοντέλο προβλέπει μεγέθη περίπου μισά των πραγματικών. Η χρησιμοποίηση των σταθερών του G.Zhicheng στην περίπτωση δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τις σταθερές των Neumarker και Rizk με μέσο σφάλμα περίπου 25%. Επειδή το σφάλμα όμως είναι αρκετά μεγάλο φαίνεται ότι οι σταθερές αυτές δεν δίνουν εξίσου καλά αποτελέσματα στην περίπτωση μεγάλων μονωτήρων. Στην περίπτωση αυτή την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι σταθερές που έχουν προταθεί από τον R.P.Singh [15],  $A=310$  και  $n=0,43$ . Τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς του μοντέλου με βάση τις σταθερές αυτές φαίνονται στο διάγραμμα 5.15 όπου συγκρίνεται και με την επίδοση του μοντέλου με βάση τις σταθερές των Neumarker και Rizk .



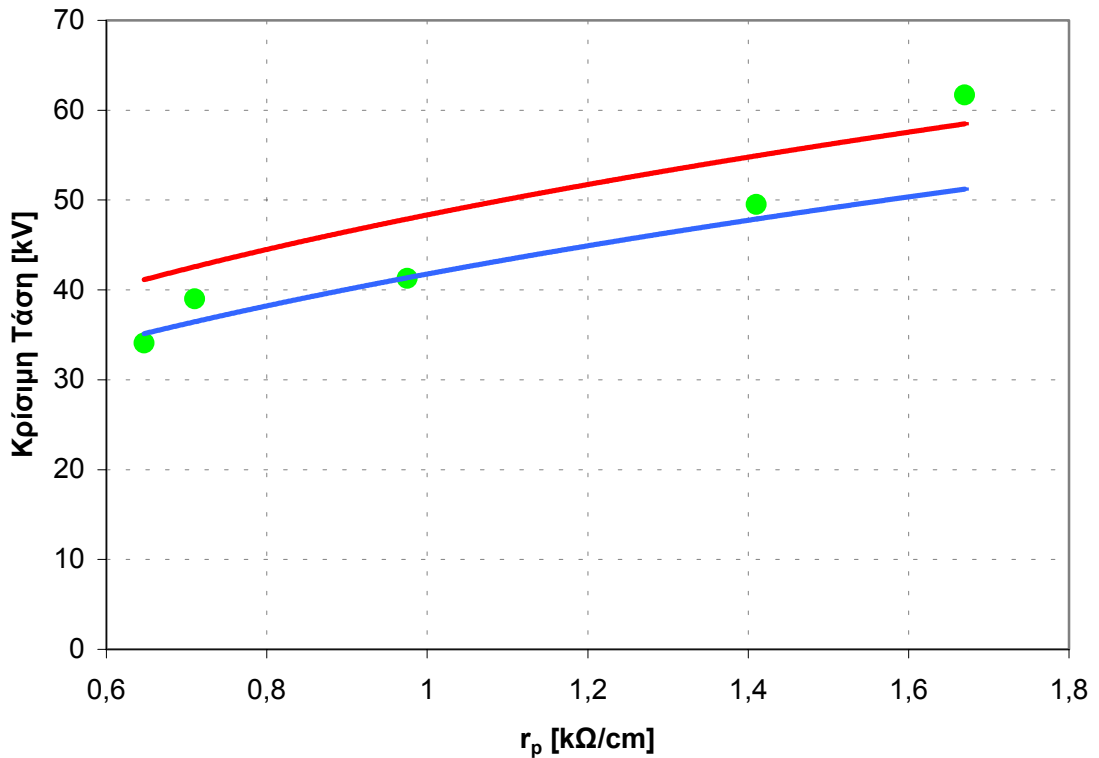
Διάγραμμα 5.15 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων von Cron

- Πείραμα von Cron
- Μοντέλο Neumarker-Rizk (σταθερές R.P.Singh [12])
- Μοντέλο Neumarker-Rizk ( $A=63$  και  $n=0,76$ )

Με την επιλογή λοιπόν των σταθερών αυτών όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα πετυχαίνουμε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων με μία τάση όμως απόκλισης στις χαμηλές τιμές της ρύπανσης.

### 5.2.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ GHOSS-CHATTERJEE

Εφαρμόζοντας το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee [18] (εξίσωση 5.1) για τους ίδιους τύπους ρύπανσης όπως και στο πρώτο μέρος δηλαδή για  $NaCl$  και  $FeCl_3$ , και συγκρίνοντας το με τα πειραματικά δεδομένα του von Cron προκύπτει το διάγραμμα 5.16 .



Διάγραμμα 5.16 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Ghoss-Chatterjee και πειραμάτων von Cron

● Πείραμα von Cron

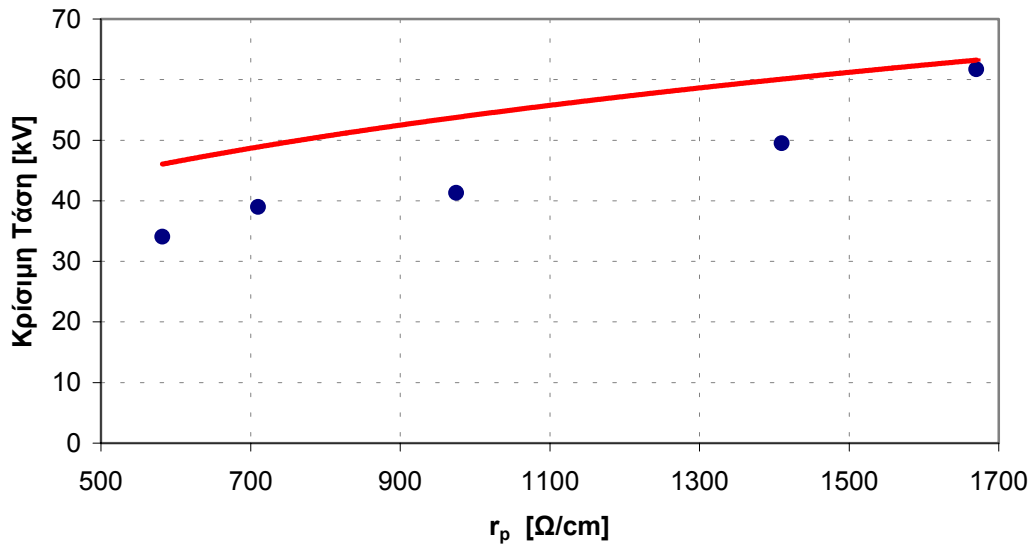
— Μοντέλο Ghoss-Chatterjee για ρύπανση  $NaCl$  ( $A=360$  και  $n=0,59$ )

— Μοντέλο Ghoss-Chatterjee για ρύπανση  $FeCl_3$  ( $A=260$  και  $n=0,66$ )

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η πολύ καλή αξιοπιστία του μοντέλου των Ghoss και Chatterjee και σε αυτήν την περίπτωση μονωτήρα. Η συσχέτιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι πολύ καλή σε όλο το εύρος του μεγέθους της αντίστασης ρύπανσης ,έτσι στην περίπτωση θεώρησης ρύπανσης  $NaCl$  το μέσο σφάλμα είναι  $\leq 12\%$  ενώ στην περίπτωση  $FeCl_3$  είναι  $\leq 7\%$ .

### 5.2.2.3 MONTEΛΟ DHABI-MEGRICHE, BEROUAL

Για την εφαρμογή του μοντέλου των Dhabi-Megrache και Beroual [25] πρέπει να γίνει εκτίμηση των σταθερών  $A, n$  του τόξου. Εφαρμόζοντας σταθερές που έχει προτείνει ο R.P.Singh [12] παίρνουμε το διάγραμμα 5.17.



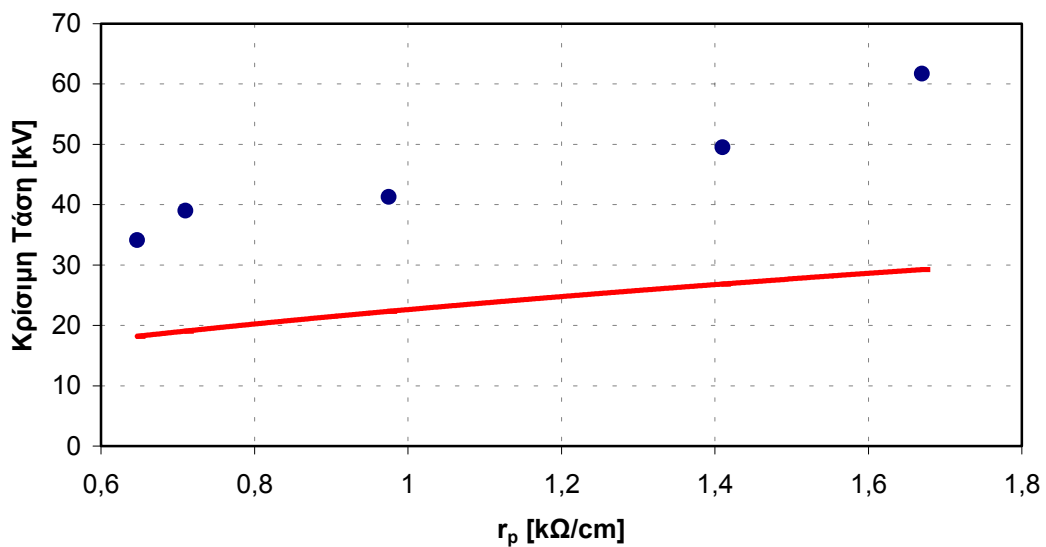
Διάγραμμα 5.17 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Dhabi-Megrache και Beroual και πειραμάτων von Cron για σταθερές  $A=310$  και  $n=0,43$

- Πείραμα von Cron
- Μοντέλο Dhabi-Megrache

Στην περίπτωση αυτή πετυχαίνουμε πρόβλεψη με μέσο όρο σφάλματος 20% με τάση καλύτερης συμφωνίας στις χαμηλότερες ποσότητες ρύπανσης. Παρατηρείται ότι οι σταθερές αυτές σε σχέση με το μοντέλο των Neumarker και Rizk αδυνατούν να δώσουν πολύ καλή συμφωνία αλλά παρόλα αυτά εξακολουθούν να είναι ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ των σταθερών που προτείνονται στην βιβλιογραφία.

### 5.2.2.4 MONTEΛΟ OBENSAUS-BOEHME

Από την εφαρμογή του μοντέλου των Obenaus και Boehme [12] (εξίσωση 5.4) και των πειραματικών δεδομένων του van Cron προκύπτει το διάγραμμα 5.18.



Διάγραμμα 5.18 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου *Obenaus-Boehme* και πειραμάτων von *Cron*

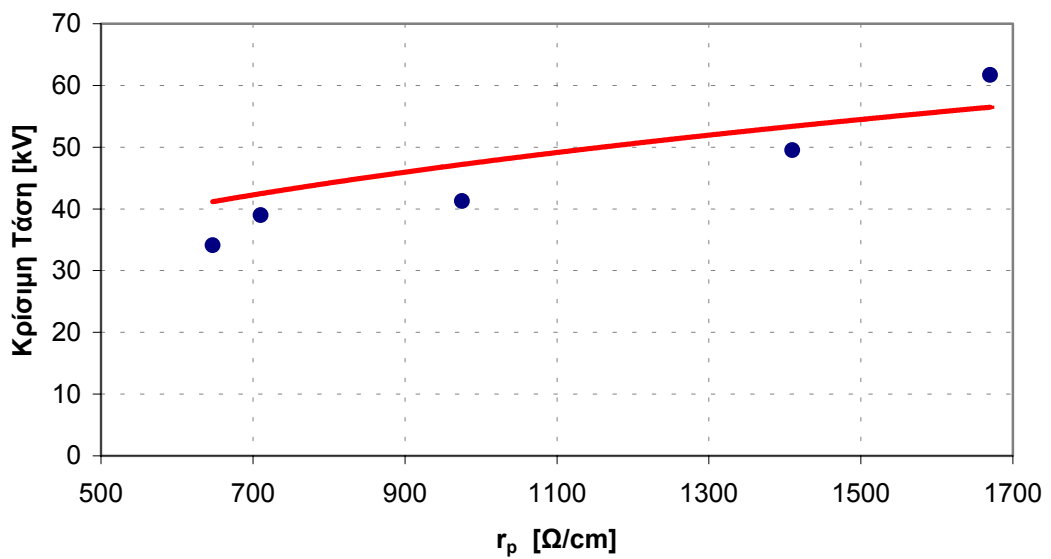
- Πείραμα von *Cron*
- Μοντέλο *Obenaus-Boehme*

Το μοντέλο στην περίπτωση αυτή έχει πολύ κακή συμπεριφορά αφού δίνει αποτελέσματα υπο-εκτιμημένα κατά περίπου 50% σε όλο το εύρος ρύπανσης. Από την αναλυτική έκφραση του μοντέλου (εξίσωση 5.4) φαίνεται ότι αν και το μήκος  $L$  αυξάνει (οπότε θα περιμέναμε αύξηση της  $V_c$ ) η μείωση της  $r_p$  είναι περισσότερο καθοριστική στα αποτελέσματα που δίνει η εξίσωση. Οπότε η χρήση του μοντέλου αυτού πρέπει να αποφεύγεται στις περιπτώσεις που η ποσότητα της ρύπανσης είναι μεγάλη.

#### 5.2.2.5 ΜΟΝΤΕΛΟ HURLEY-LIMBOURN

Τελευταίο μοντέλο που θα εφαρμόσουμε στο πείραμα του von *Cron* είναι εκείνο των Hurley και Limbourn [12] (εξίσωση 5.5). Τα πειραματικά αποτελέσματα μαζί με τις προβλέψεις του μοντέλου φαίνονται στο διάγραμμα 5.19.





Διάγραμμα 5.19 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Hurley-Limbourn και πειραμάτων von Cron

• Πείραμα von Cron

— Μοντέλο Hurley-Limbourn

Πολύ καλή και στην περίπτωση αυτή του κυλινδρικού μονωτήρα των 100cm η επίδοση του μοντέλου των Hurley και Limbourn. Καταφέρνει να προβλέψει την κρίσιμη τάση με ένα μέσο σφάλμα 10% για όλο το εύρος της ποσότητας ρύπανσης. Επειδή τα αποτελέσματα είναι όμοια με την περίπτωση των μονωτήρων του πρώτου μέρους ενισχύεται ακόμη περισσότερο η αρχική διαπίστωση για την ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά του μοντέλου αυτού, το οποίο επιπλέον παρουσιάζει μεγάλη χρηστικότητα λόγω της ιδιαίτερα απλής αναλυτικής μορφής του.

### 5.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ZHICHENG RENYU

Οι Zhicheng και Renyu [28] έλεγξαν την ηλεκτρική συμπεριφορά cap & pin μονωτήρων εφαρμόζοντας εναλλασσόμενη τάση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών για καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4.

<i>Διάμετρος</i> <i>D<sub>m</sub> [cm]</i>	<i>Ύψος</i> <i>H [cm]</i>	<i>Μήκος</i> <i>ερπυσμού</i> <i>L [cm]</i>	<i>Συντελεστής</i> <i>μορφής</i> <i>F</i>	<i>Αγωγιμότητα</i> <i>σ<sub>s</sub> [μS]</i>	<i>Κρίσιμη τάση</i> <i>V<sub>c</sub> [kV]</i>
25,4	14,6	27,9	0,68	46,9	12,05
				58,2	11,1
				86,4	8,8
				102,5	9,23
				126,8	7,63
				138,2	8
				180,5	6,3
				194,8	6,9
				204,2	6,32

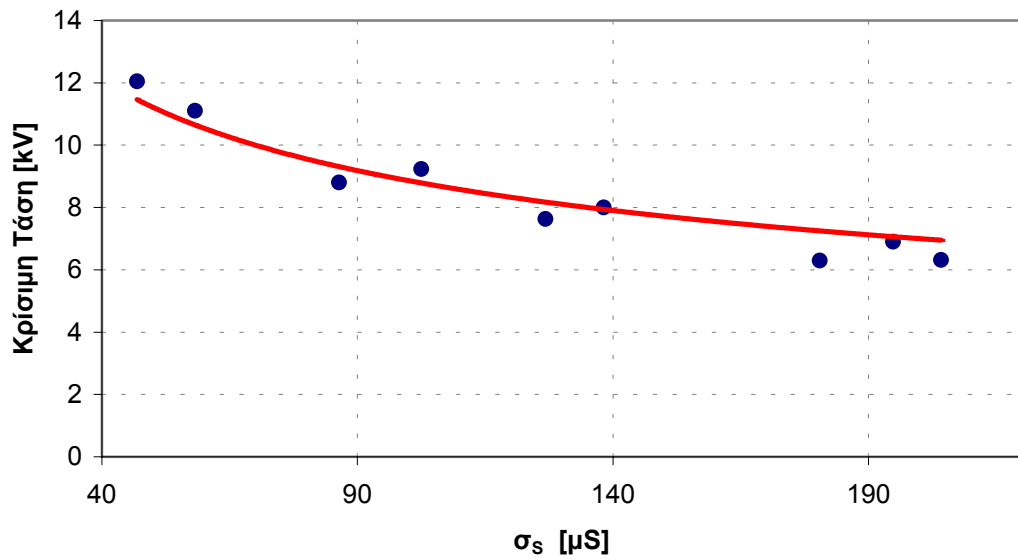
Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά μονωτήρα A (cap and pin)

#### 5.2.3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Ε.Μ.Π

Με βάση τα πειράματα των Zhicheng και Renyu [28] θα επιχειρήσουμε να αξιολογήσουμε το παραπάνω μοντέλο το οποίο δίνει την κρίσιμη τάση ενός μονωτήρα όταν σε αυτόν εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση. Η μαθηματική έκφραση για αυτό είναι :

$$U_c = \frac{A}{n+1} \cdot (L + \pi \cdot n \cdot D_m \cdot F \cdot K) \cdot (\pi \cdot A \cdot D_m \cdot \sigma_s)^{-\left(\frac{n}{n+1}\right)} \quad (5.6)$$

Στα παρακάτω διαγράμματα 5.20 και 5.21 φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα μαζί με τις προβλέψεις που δίνει το μοντέλο για κάθε περίπτωση.



Διάγραμμα 5.20 Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου *E.M.Π.* και πειραμάτων *Zhicheng-Renyu* για μονωτήρα *A* ( $A=131,5$  και  $n=0,374$ )

- Πείραμα *Zhicheng-Renyu*
- Μοντέλο *E.M.Π*

Από το διάγραμμα 5.20 φαίνεται ότι για *cap* and *pin* μονωτήρες το μοντέλο δίνει άριστα αποτελέσματα για όλες τις τιμές της επιφανειακής αγωγιμότητας (το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και από την εφαρμογή του μοντέλου και σε αποτελέσματα πειραμάτων άλλων ερευνητών).

## Κεφάλαιο 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεγάλη σημασία που έχει το φαινόμενο της υπερπήδησης στην απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου υψηλής τάσης έχει οδηγήσει πολλούς ερευνητές στην διεξοδική μελέτη του. Αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής, αλλά και της μεγάλης πολυπλοκότητας που παρουσιάζει το φαινόμενο, είναι ο μεγάλος αριθμός μαθηματικών και φυσικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν για την ερμηνεία του.

Από την προηγούμενη μελέτη φάνηκε ότι τα εγγενή προβλήματα και οι αδυναμίες που παρουσιάζουν τα μοντέλα αυτά οφείλονται στους εξής λόγους:

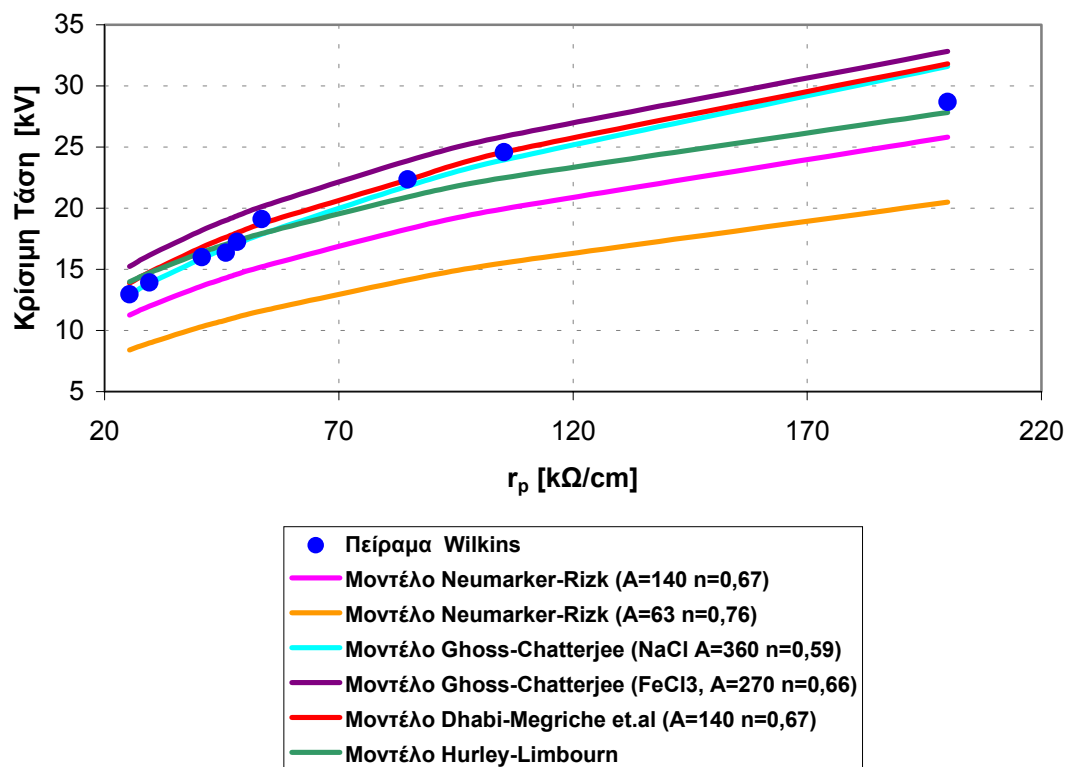
- ✓ Σε αντίθεση με την διάδοση των ηλεκτρικών εκκενώσεων που είναι ένα δυναμικό στην εξέλιξη του φαινόμενο, η πλειοψηφία των προταθέντων μοντέλων είναι στατικής φύσεως κάτι που στις περισσότερες περιπτώσεις οδηγεί στην υποβάθμιση της αξιοπιστίας τους. Πάντως πρέπει να τονιστεί ότι η έρευνα τα τελευταία χρόνια έχει εστιαστεί αποκλειστικά στην ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων γεγονός που θα δώσει λύση στην παραπάνω αδυναμία.
- ✓ Επιπλέον, αν και το φαινόμενο είναι καθαρά μη γραμμικό τα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί είναι σχεδόν στο σύνολο τους γραμμικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για δεδομένες σταθερές διάδοσης ( $A, n$ ), να προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα, για μια δεδομένη περιοχή τιμών επιφανειακής αγωγιμότητας, ενώ έξω από αυτήν να δίνουν αποτελέσματα μικρής ακρίβειας. Μια μερική λύση στο πρόβλημα αυτό είναι ο καθορισμός συγκεκριμένων σταθερών διάδοσης για κάθε περιοχή αγωγιμότητας και εφαρμογή των μοντέλων με τα δεδομένα αυτά.
- ✓ Επίσης οι ιδιαίτερες κάθε φορά συνθήκες λειτουργίας (βιομηχανικό περιβάλλον, λειτουργία σε υπαίθριες αγροτικές ή παραθαλάσσιες περιοχές) επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά διάδοσης των τόξων και συνεπώς τα επίπεδα των κρίσιμων μεγεθών. Οι ιδιαίτερες αυτές συνθήκες δεν είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν στην ανάπτυξη ενός ενιαίου μοντέλου για όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας μονωτήρων, γεγονός που αποδεικνύεται από τον μεγάλο αριθμό προταθέντων μοντέλων.

Παρ' όλες τις αδυναμίες που παρουσιάζουν τα μοντέλα λόγω των αναπόφευκτων προσεγγίσεων που εμπεριέχουν είναι απολύτως απαραίτητα για δύο κυρίως λόγους:

- ✓ Είναι χρήσιμα για την ορθολογική οργάνωση των πειραμάτων και για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους.
- ✓ Αποτελούν πολύτιμο εργαλείο στην διάθεση των σχεδιαστών μονωτήρων για την βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών παραμέτρων τους.

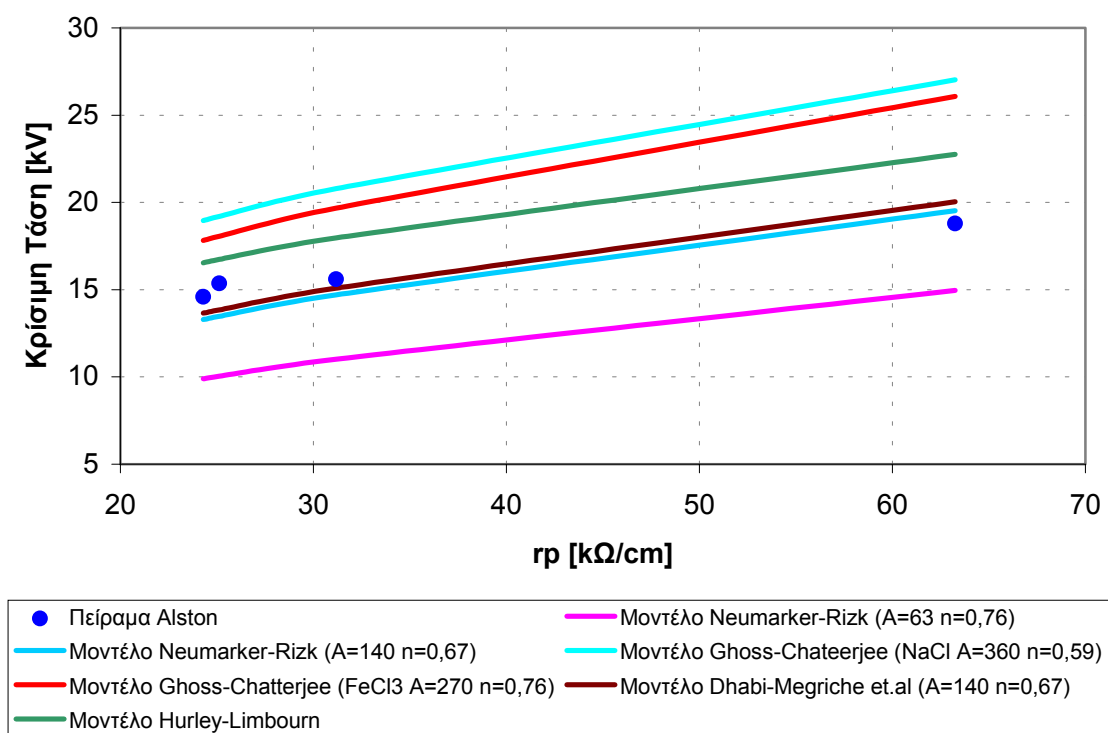
Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη μελέτη ελέχθησαν για δύο διαφορετικές περιπτώσεις μονωτήρων. Στην πρώτη περίπτωση ελέχθησαν για μονωτήρες μικρού μήκους ερπυσμού, της τάξης των 10cm, και μικρής ποσότητας ρύπανσης (μεγάλης ανά μονάδα μήκους αντίστασης) ενώ στην δεύτερη περίπτωση ο έλεγχος της αξιοπιστίας τους έγινε με μονωτήρα μεγαλύτερου μήκους με μεγάλη ποσότητα ρύπανσης (μικρής ανά μονάδα μήκους αντίστασης).

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να παρουσιάσουμε το διάγραμμα 6.1 στο οποίο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συμπεριφορές των μοντέλων για την περίπτωση του πειράματος του Wilkins



Διάγραμμα 6.1 Συνολική σύγκριση συμπεριφοράς μοντέλων για το πείραμα του Wilkins

Στο διάγραμμα 6.2 όμοια με πριν παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η συμπεριφορά των μοντέλων για το πείραμα του Alston.



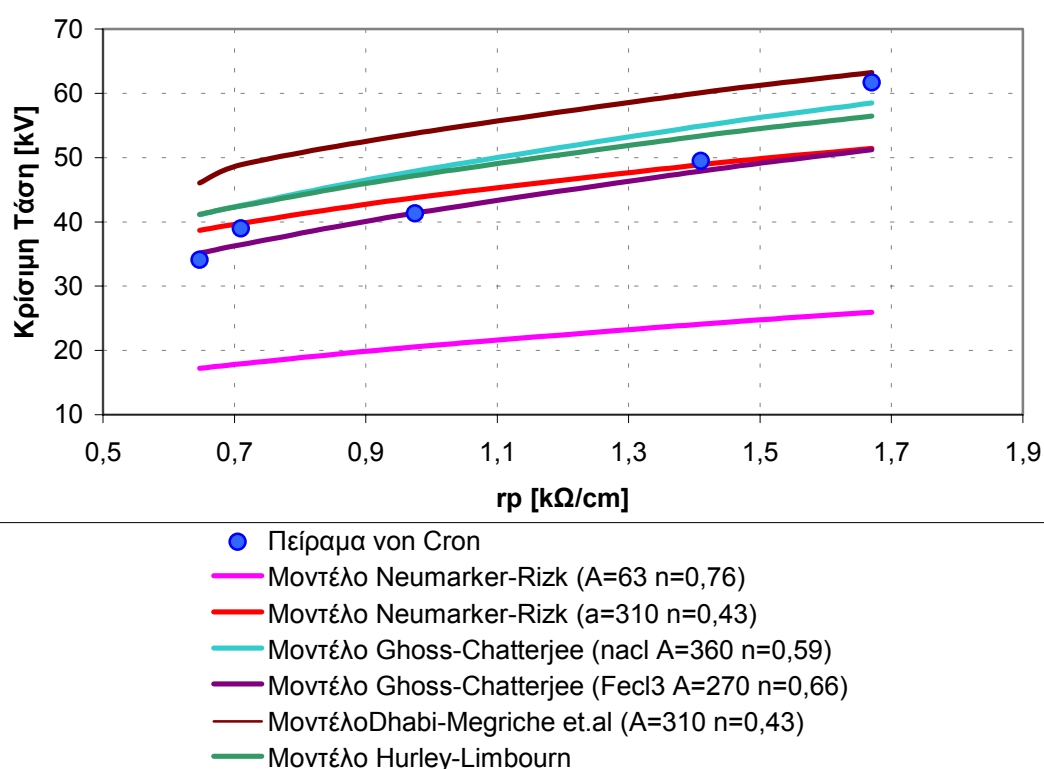
Διάγραμμα 6.2 Συνολική σύγκριση συμπεριφοράς μοντέλων για το πείραμα Alston

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι την καλύτερη συμπεριφορά παρουσίασε το μοντέλο των Dhabi και Megrache με εφαρμογή σε αυτό των σταθερών διάδοσης  $A$ ,  $n$  που προτάθηκαν από τον G.Shicheng [15] ( $A=140$ ,  $n=0,67$ ). Η συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων ήταν τέλεια για όλες τις τιμές της επιφανειακής αντίστασης του μονωτήρα.

Εξίσου καλή συμπεριφορά πέτυχε και το μοντέλο των Hurley και Limbourn που έδωσε τιμές σε όλο το εύρος της αντίστασης με σφάλμα μικρότερο από 10%. Το πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η ανεξαρτησία της αναλυτικής μορφής του από τις σταθερές διάδοσης του τόξου γεγονός που το κάνει ιδιαίτερα εύχρηστο. Ακολουθεί το μοντέλο των Ghoss και Chatterjee το οποίο πέτυχε πολύ καλή συμφωνία στις περιπτώσεις όπου η ρύπανση ήταν της μορφής NaCl, FeCl<sub>3</sub>, CuSO<sub>4</sub> ή CaCl<sub>2</sub> περιπτώσεις όπου οι σταθερές του τόξου έχουν προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια. Να σημειωθεί εδώ όμως ότι στην περίπτωση των πειραμάτων του Alston η χρησιμοποίηση των σταθερών  $A$ ,  $n$  που έχουν προταθεί από τον G.Shicheng βελτίωσαν αισθητά την συμπεριφορά του μοντέλου.

Τελικά ακολουθεί το μοντέλο των Neumarker και Rizk που δίνει υποεκτιμημένα αποτελέσματα της τάξης του 15% εφαρμόζοντας σε αυτό τις σταθερές διάδοσης του G.Shicheng. Αυτό που επίσης προέκυψε από τα παραπάνω και πρέπει να τονιστεί είναι ότι στην περίπτωση μονωτήρων μικρού μήκους ερπυσμού που έχουν υποστεί την επίδραση ήπιας ρύπανσης την καλύτερη πρόβλεψη έδωσε η χρησιμοποίηση των μοντέλων με βάση τις σταθερές διάδοσης που προτάθηκαν από τον G.Shicheng.

Στο επόμενο διάγραμμα 6.3 γίνεται συνολική παρουσίαση των μαθηματικών μοντέλων για την περίπτωση των πειραμάτων του von-Cron.



Διάγραμμα 6.3 Συνολική σύγκριση συμπεριφοράς μοντέλων για το πείραμα von Cron

Στην περίπτωση αυτή την καλύτερη πρόβλεψη σ' όλο το εύρος της επιφανειακής αντίστασης πετυχαίνει το μοντέλο των Neumarker και Rizk χρησιμοποιώντας όμως στην περίπτωση αυτή τις σταθερές διάδοσης που έχει προτείνει ο R.P.Sign [15] (A=310, n=0,43).

Ακολουθεί το μοντέλο των Hurley και Limbourn που και σε αυτή την περίπτωση επιδεικνύει πολύ καλή συμπεριφορά καθιστώντας το, το πιο αξιόπιστο μοντέλο και στις δύο αυτές διαφορετικές περιπτώσεις μονωτήρων.

Πολύ καλή και σε αυτήν την περίπτωση είναι η συμπεριφορά του μοντέλου των Ghoss και Chatterjee με προσεκτική όμως πάντα επιλογή των σταθερών A, η με βάση τον τύπο ρύπανσης.

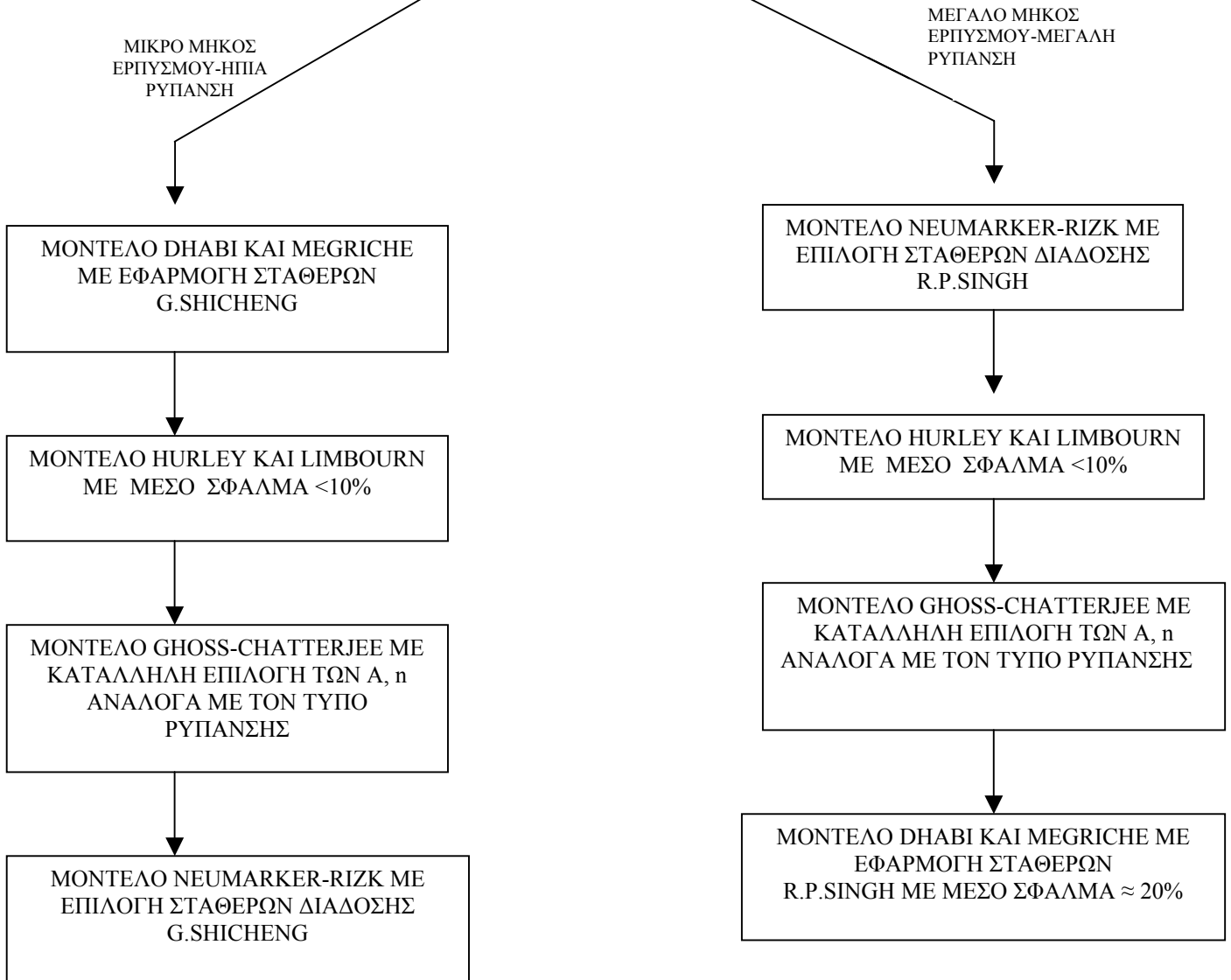
Τελευταίο ακολουθεί το μοντέλο των Dhabí και Megriche που παρουσιάζει υπερεκτίμηση αποτελεσμάτων έναντι των πειραματικών κατά 20% με χρησιμοποίηση των σταθερών διάδοσης του R.P.Sign, που αποτελούν όμως για το μοντέλο τους τις βέλτιστες από τις σταθερές που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία.

Ανάλογα με την πρώτη περίπτωση προκύπτει και πρέπει να τονιστεί ότι τα μαθηματικά μοντέλα, στην περίπτωση μονωτήρων μεγάλου μήκους ερπυσμού, επιβαρημένα με μεγάλες ποσότητες ρύπανσης, έδωσαν πολύ αξιόπιστες προβλέψεις με χρήση αυτή την φορά των σταθερών του R.P.Sign [15].

Τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στο διάγραμμα 6.4.



ΙΕΡΑΡΧΙΑ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ



Διάγραμμα 6.4: Προκύπτουσα ιεραρχική αξιολόγηση μαθηματικών μοντέλων που ελέχθησαν στην παρούσα εργασία.

## ***Βιβλιογραφία***

- [1] J.S.T. Looms, “Insulators for high voltages”, Peter Peregrinus Ltd., London, Unighted Kingdom, 1990.
- [2] 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.
- [3] IEC 507, “Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems”, 1991.
- [4] IEC TS 62073, “Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces”, 2003
- [5] <http://www.idc-online.com/assets/files/highvoltafe.pdf>
- [6] <http://www.ngk-locke.com>
- [7] IEC 1109, “Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V – Definitions, test methods and acceptance criteria”, 1992.
- [8] I.A. Σταθόπουλος, “Υψηλές Τάσεις I”, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα.
- [9] IEC 815, “Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions”, 1986.
- [10] Tsen-Tsung-Tseng “Mechanisms of flashover of contaminated insulators” Phd Thesis M.I.T University Press 1974
- [11] Βασιλική Κονταργύρη, “Ρύπανση μονωτήρων”, Ενδιάμεση Κρίση, ΕΜΠ, 2005.
- [12] F.A.M. Rizk, “Mathematical models for pollution flashover”, *Electra*, No. 78, October 1981, pp. 71-103.
- [13] 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.
- [14] I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos, I.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.

- [15] D.C.Chaurasia, "Scintillation modelling for insulator strings under polluted conditions", XIth International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, 23-27 August 1999.
- [16] L.L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of discharges on polluted insulation", Proc. IEE, Vol. 110, No. 7, July 1963, pp. 1260-1266.
- [17] R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films", Proc. IEE, Vol. 116, No. 3, March 1969, pp. 457-465.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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..
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] F.A.M. Rizk, A.Q. Rezazada, "Modeling of altitude effects on AC flashover of polluted high voltage insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997, pp. 810-822
- [24] 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..

- [25] 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.
- [26] Suflis S. A., Gonos I. F., Topalis F. V., Stathopoulos I.A. “Dielectric behaviour of non-uniform polluted insulators”, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2003), O.16-Outdoor Insulation and Composite Insulators IV, Delft, The Netherlands, August 25-29, 2003, (O.16.05)*
- [27] 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.
- [28] G. Atsonios, G. Katsibokis, G. Panos, and I. Stathopoulos, :“Salt fog tests on pin type insulators in the PPC research centre”. *Proceedings of international symposium on High technology in the power industry, Lugano, 1987, pp. 72-76*
- [29] K. Ikonomou, G. Katsibokis, G. Kravaritis and I. Stathopoulos, : “Cool fog tests on artificially polluted insulators”. Presented at 5th international symposium on High voltage engineering, Braunschweig, 1987, Paper 52.13, Vol. II.
- [30] 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.