



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

**Υπολογισμός παρασίτων χωρητικοτήτων και παραμέτρων  
τόξου υπερπήδησης αλυσοειδών μονωτήρων μέσω γενετικού  
αλγορίθμου**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δρακωτός Γ. Αθανάσιος

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Οκτώβριος 2007





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

139

**Υπολογισμός παρασίτων χωρητικοτήτων και παραμέτρων  
τόξου υπερπήδησης αλυσοειδών μονωτήρων μέσω γενετικού  
αλγορίθμου**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Δρακωτός Γ. Αθανάσιος**

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26η.10.2007.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

Δρακωτός Γ. Αθανάσιος

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
Πρόλογος	v
<b>Κεφάλαιο 1: Γενικά περί αλυσοειδών μονωτήρων</b>	<b>1</b>
1.1 Γενικά	1
1.2 Ιστορική αναφορά περί μονωτήρων	2
1.3 Γενικά περί μονωτικών υλικών	5
1.4 Βασικοί ορισμοί περί μονωτήρων	7
1.5 Είδη μονωτήρων	9
1.6 Ιδιότητες των μονωτήρων	18
1.7 Ρύπανση των μονωτήρων	21
1.8 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες	24
<b>Κεφάλαιο 2: Κατανομή τάσης επί αλυσοειδών μονωτήρων</b>	<b>34</b>
2.1 Κατανομή της τάσης επί αλυσοειδών μονωτήρων	34
2.2 Μέθοδοι εξίσωσης του δυναμικού	39
2.3 Αποδοτικότητα του μονωτήρα	43
<b>Κεφάλαιο 3: Μαθηματικά μοντέλα μονωτήρων και πειράματα</b>	<b>45</b>
3.1 Γενικά	45
3.2 Εύρεση των τιμών $A$ και $n$ του στατικού τόξου	45
3.3 Πειράματα και μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα του γενετικού αλγορίθμου	49
3.3.1 Πειράματα Alston και Wilkins	49
3.3.2 Πειράματα von Cron	50
3.3.3 Μοντέλο Neumarker-Rizk	50
3.3.4 Μοντέλο Dhab-Megrache και Beroual	52
3.3.5 Μοντέλο Hurley-Limbourn	55

<b>Κεφάλαιο 4: Γενετικός αλγόριθμος</b>	<b>58</b>
4.1 Γενικά	58
4.2 Περιγραφή γενετικών αλγορίθμων	58
4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων	60
4.4 Εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων	62
4.5 Ορολογία των γενετικών αλγορίθμων	63
4.6 Τελεστές των γενετικών αλγορίθμων	64
4.7 Λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου	66
<b>Κεφάλαιο 5: Υπολογισμός χωρητικότητας επί αλυσοειδών μονωτήρων</b>	<b>71</b>
5.1 Αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τους αλυσοειδείς μονωτήρες	71
5.2 Γενικά συμπεράσματα για τον υπολογισμό των χωρητικότητας επί αλυσοειδών μονωτήρων	98
<b>Κεφάλαιο 6: Υπολογισμός σταθερών του στατικού τόξου</b>	<b>100</b>
6.1 Γενικά	100
6.2 Εύρεση των τιμών $A$ και $n$ του στατικού τόξου με χρήση του γενετικού αλγορίθμου	101
6.3 Γενικά συμπεράσματα για τον υπολογισμό των τιμών $A$ και $n$ του στατικού τόξου	133
<b>Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα</b>	<b>136</b>
7.1 Αποτελέσματα από τον υπολογισμό των χωρητικότητας επί αλυσοειδών μονωτήρων	136
7.2 Αποτελέσματα από τον υπολογισμό των τιμών $A$ και $n$ του στατικού τόξου	137
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>139</b>

## *Περίληψη*

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν αφενός η μελέτη των σταθερών  $A$  και  $n$  που χαρακτηρίζουν την εμφάνιση στατικού τόξου γύρω από έναν αλυσοειδή μονωτήρα, αφετέρου ο υπολογισμός των τιμών των παράσιτων χωρητικότητων που εμφανίζονται σε διάφορους τύπους μονωτήρων.

Με βάση διάφορα πειραματικά μοντέλα που αναζητήθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία, σε συνδυασμό με τα πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών, με χρήση του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πόλυτεχνείου, προσδιορίσαμε τις βέλτιστες τιμές των σταθερών του τόξου  $A$  και  $n$  για κάθε μοντέλο σε συνδυασμό με τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα. Για τις τιμές αυτές κριτήριο επιλογής ήταν η ελαχιστοποίηση του σφάλματος των αποτελεσμάτων. Επιπροσθέτως, με χρήση του συγκεκριμένου γενετικού αλγορίθμου, και τα πειραματικά στοιχεία που προκύπτουν για διαφορετικούς τύπους μονωτήρων, υπολογίστηκαν οι τιμές των παράσιτων χωρητικότητων, των χωρητικότητων ως προς γή και των χωρητικότητων ως προς τις γραμμές υψηλής τάσης που προκύπτουν για διάφορους τύπους μονωτήρων, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τύπου μονωτήρων.

## *Λέξεις Κλειδιά*

Μονωτήρας, Υπερπήδηση, Ρύπανση, Ηλεκτρικό τόξο, Μερικές εκκενώσεις, Παράσιτες χωρητικότητες,



## ***Abstract***

The scope of this thesis was the study of the constants A and n which determine the appearance of static arc upon insulator string. Another important goal of this study was the calculation of the stray capacitances which appear in different types of insulators.

Based upon a variety of mathematical models retrieved from the international bibliography, in conjunction with the experimental results of different research groups, after having used the genetic algorithm developed by the High Voltage Lab of N.T.U.A, we determined the most appropriate values for the constants A and n for each model in conjunction with every series of experimental results. In order to determine these values, the choice was made based upon the criterion of minimising the errors of the final results. Moreover, by using the above mentioned genetic algorithm in conjunction with the experimental results retrieved for each type of insulator, an effort was made to calculate the values of the capacitances which appear upon an insulator, the stray capacitances measured towards earth and the stray capacitances towards the high voltage line which appear upon different types of string insulators, according to the particular characteristics and usage of every one of them.

## ***Key Words***

Insulator, Flashover, Contamination, Electric Arc, Partial Discharges, stray capacitances.

## *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 εύρεση των τιμών των σταθερών  $A$  και  $n$  που χαρακτηρίζουν τα στατικά τόξα καθώς και των τιμών των παράσιτων χωρητικοτήτων που εμφανίζονται επί αλυσοειδών μονωτήρων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα, τα οποία αναζητήθηκαν στην βιβλιογραφία καθώς και ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε από τον Δρ. Ιωάννη Φ. Γκόνο.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη των μονωτήρων, αναφέρονται διάφορα στοιχεία περί μονωτικών υλικών, παρατίθενται μια σειρά ορισμών που χαρακτηρίζουν τους μονωτήρες, περιγράφονται τα διάφορα είδη μονωτήρων και οι ιδιότητές τους και αναφέρονται κάποια στοιχεία περί ρυπάνσεως και απώλειας της μονωτικής ικανότητας των μονωτήρων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η κατανομή της τάσης επί των αλυσοειδών μονωτήρων, αναφέρονται διάφορες μέθοδοι ισοκατανομής, κατά το δυνατόν, της επιβαλλόμενης τάσης επ' αυτών και γίνεται μια αναφορά στην αποδοτικότητα των μονωτήρων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παράθεση των τιμών των σταθερών  $A$  και  $n$  με βάση τα μέχρι τώρα πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων εργαστηριακών ομάδων και γίνεται μια γενική περιγραφή του φαινομένου εμφάνισης του τόξου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται γενική αναφορά περί γενετικών αλγορίθμων, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, εξηγούνται οι σύγχρονες εφαρμογές που έχουν και τέλος επεξηγείται η ορολογία και η λειτουργία τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον γενετικό αλγόριθμο που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό των παράσιτων χωρητικοτήτων επί των αλυσοειδών μονωτήρων, των παράσιτων χωρητικοτήτων που εμφανίζονται ως προς γη και των παράσιτων χωρητικοτήτων που εμφανίζονται ως προς την πλευρά της υψηλής τάσης. Οι τιμές που έχουν επιλεγεί πληρούν το κριτήριο ελαχιστοποίησης του σφάλματος που υπεισέρχεται στα αποτελέσματα. Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα των εκτελέσεων του γενετικού αλγορίθμου και τα σχετικά γραφήματα που απεικονίζουν τις τιμές αυτές.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό των τιμών των σταθερών  $A$  και  $n$  χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού και ξεχωριστά πειραματικά αποτελέσματα. Πάλι η επιλογή των τιμών για κάθε περίπτωση έγινε με βάση την ελαχιστοποίηση του σφάλματος των αποτελεσμάτων. Επίσης οι πίνακες τιμών που παρατίθενται συνοδεύονται και από τα αντίστοιχα γραφήματα για καλύτερη απεικόνιση.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο της εργασιάς παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που εξάγονται από την συνολική εργασία, και συγκεκριμένα, καταλήξαμε σε συγκεκριμένες τιμές για τις παράσιτες χωρητικότητες επί των μονωτήρων ανάλογα με τον τύπο και τη χρήση του, ενώ επίσης προτείναμε συγκεκριμένες τιμές για τα μεγέθη  $A$  και  $n$ , ανάλογα με τα διάφορα μοντέλα και πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

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

Τον κ. Ιωάννη Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την αμέριστη συμπαράσταση που προσέφερε και την άψογη συνενόηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Την κυρία. 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, καθώς και τις ώρες που δαπάνησε για την περάτωση της εργασίας αυτής. Επίσης, χρήζει ιδιαίτερων ευχαριστιών για την βοήθεια στην εύρεση του απαραίτητου επιστημονικού υλικού, καθώς και την στωική υπομονή της που επέδειξε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την υποστήριξη που μου παρείχε στην εργασία αυτή, την άψογη συνεργασία που είχαμε, καθώς και την πολύτιμη επιστημονική γνώμη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Γενικά περί αλυσοειδών μονωτήρων

**1.1 Γενικά**

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [1]. Χρησιμοποιούνται σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς υψηλής τάσης [2]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια εναέρια γραμμή μεταφοράς διανομής ενέργειας:



*Σχήμα 1.1: Εναέρια γραμμή μεταφοράς.*

Η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς καθορίζεται από τις ελάχιστες αποστάσεις μέσα στον αέρα μεταξύ στοιχείων υπό δυναμικό γης και φάσεων, καθώς και μεταξύ φάσεων. Αυτές οι ελάχιστες αποστάσεις εξασφαλίζονται μέσω της αναρτήσεως ή στηρίξεως των αγωγών των φάσεων με μονωτήρες.

Χαρακτηριστικά της μόνωσης μιας γραμμής μεταφοράς είναι ότι αυτή είναι εξωτερική και αυτοεπανερχόμενη: υπόκειται σε εξωγενείς επιδράσεις (π.χ. ρύπανση) και μετά από μία διάσπαση (αν δεν έχουν υπάρξει καταστροφικές συνέπειες) η μόνωση επανακτά τις αρχικές ιδιότητές της. Συνέπεια αυτού είναι ότι ένα σφάλμα, που εμφανίζεται πάνω στη γραμμή μετά από μία υπέρταση, δεν έχει κάποια σοβαρή συνέπεια στη μόνωση της γραμμής, η οποία αποκαθίσταται μετά τη σβέση του τόξου.

Οι καταπονήσεις που δέχεται η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς κατατάσσονται σε εξωτερικές και εσωτερικές: οι εξωτερικές καταπονήσεις, προέρχονται από κεραυνοπληξίες της ηλεκτρικής γραμμής και διαδίδονται μέσω αυτής. Οι συγκεκριμένες καταπονούν τον εξοπλισμό με σοβαρές, συχνά, συνέπειες. Οι εσωτερικές καταπονήσεις προέρχονται από την ίδια τη λειτουργία της ηλεκτρικής γραμμής και υποδιαιρούνται:

- ✓ στην τάση βιομηχανικής συχνότητας, με την οποία λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες η ηλεκτρική γραμμή,
- ✓ στις παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας, με διάρκεια της τάξεως του δευτερολέπτου και
- ✓ στις υπερτάσεις χειρισμών, με διάρκεια εκατοντάδων έως χιλιάδων μς [3]

## **1.2 Ιστορική αναφορά περί μονωτήρων**

Οι πρώτοι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στα πρώτα δίκτυα τηλεγράφων το 1835. Μέχρι το 1878 η εξέλιξη τους είχε φτάσει σε ικανοποιητικό επίπεδο εξέλιξης, ενώ η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία το 1882 [2, 4]. Η σύντομη γραμμή τάσης 1343V D.C συνέδεσε το Miesbach με το Μόναχο και σχεδιάστηκε από τους Miller και Dyrpez προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός τεχνητού καταρράχτη στην ηλεκτρική έκθεση του Μονάχου. Οι ηλεκτρικές και μηχανικές τάσεις στις οποίες έπρεπε να ανθίστανται οι τηλεγραφικοί μονωτήρες ήταν προφανώς αμελητέες σε σύγκριση με εκείνες που χρειάζονται σε μια εναέρια γραμμή μεταφοράς. Οι νέες απαιτήσεις αποκάλυψαν σοβαρές ελλείψεις στα υλικά αλλά και στο σχεδιασμό των 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, επέβαλλαν την εξέλιξη των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών κανόνων. Μερικοί από τους μονωτήρες των αρχών του 19<sup>ου</sup> αιώνα αναγνωρίζονται σαν εξελιγμένες κατασκευές των μονωτήρων τηλεγραφικών γραμμών. Όμως το μεγάλο μέγεθος και βάρος των αρχικών μονωτήρων στήριξης αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα στην κατασκευή, το χειρισμό και την εγκατάστασή τους. Οι αμερικανικοί μονωτήρες στήριξης αποτελούνταν από λεπτά

περιβλήματα πορσελάνης και συνηθισμένο γυαλί που είχε υποστεί ειδική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες. Μερικά τμήματα πορσελάνης συνδέονταν μεταξύ τους με γυαλί το οποίο ήταν συνήθως στερεωμένο σε τσιμέντο. Η ευρωπαϊκή τεχνολογία πορσελάνης όμως προηγούνταν της αμερικανικής καθώς επέτρεπε την κατασκευή μεγάλων μονωτήρων ανάρτησης οι οποίοι αποτελούνταν από ένα ή δυο τμήματα πορσελάνης αποφεύγοντας τις πολλαπλές εσωτερικές μεταλλικές ενθέσεις. Σε όλους αυτούς τους μονωτήρες το κεραμικό υλικό ή το γυαλί συμπίεζονταν μηχανικά. Για τους μονωτήρες που είχαν υποστεί διαδικασία μηχανικής προέντασης κατά την κατασκευή η τακτική που ακολουθήθηκε προερχόταν κυρίως από τις εμπειρίες που είχαν αποκτηθεί από τις τηλεγραφικές γραμμές. Ο βασικός μονωτήρας ωοειδούς σχήματος (ο οποίος χρησιμοποιείται έως και σήμερα ως ισχυρός διαχωριστής εναέριων γραμμών) οδήγησε το 1907 στην κατασκευή ενός δισκοειδούς μονωτήρα, του «Hewlett». Ο μονωτήρας αυτός χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο μήκος ερπυσμού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, ασφαλή καταστροφική συμπεριφορά σε περίπτωση θραύσης από μηχανική κρούση κατά τη λειτουργία και απουσία συνδετικού τσιμέντου εσωτερικά. Υπήρχε βεβαία μεγάλη δυσκολία στην κατασκευή. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι ενώ μονωτήρες του τύπου αυτού είναι πρακτικά αδύνατο να στηρίζουν μεγάλα φορτία, ο μονωτήρας αυτός χρησιμοποιήθηκε πολύ και για μεγάλο χρονικό διάστημα και βρίσκεται σε λειτουργία ακόμη και σήμερα σε περιοχές όπου η διάβρωση έχει υπερνικήσει πιο σύγχρονες σχεδιάσεις μονωτήρων ανάρτησης.

Οι μεταλλικές ενθέσεις σε κεραμικούς μονωτήρες, πρωτοπαρουσιάστηκαν στις Η.Π.Α. το 1903, και επέτρεψαν στους μονωτήρες στήριξης να τίθενται σε σταθερούς στύλους και να ανθίστανται σε σημαντικά φορτία κάμψης. Αυτό ήταν ένα καθοριστικό βήμα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των μονωτήρων κελύφους-πύρου και στους μονωτήρες τύπου αναρτήσεως. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του σχεδίου αυτού είναι ότι μετατρέπει την υφισταμένη καταπόνηση από το εφαρμοσμένο φορτίο σε μια ακτινική τάση θλίψεως στο κεραμικό διηλεκτρικό. Ο Brent Mills παρουσιάζει έναν πολυτμηματικό μονωτήρα τμηματικής καταπόνησης, που χρονολογείται από το 1904. Αυτό είναι αδιαμφισβήτητα ένα σχέδιο κελύφους-πείρου χωρίς όμως να προβλέπεται το σύστημα της ακτινικής συμπίεσης. Πρώτος Austin εφάρμοσε τη γεωμετρική κατασκευή ακτινικής συμπίεσης σε δίσκους πορσελάνης το 1907. Και ενώ η ουσία αυτής της καινοτομίας ήταν θεωρητικά απλή, εντούτοις αποδείχθηκε

δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη ένας κατάλληλος συνδυασμός μεταξύ των μεταλλικών συνδέσεων του τσιμέντου και του κεραμικού. Το τσιμέντο αντιμετωπιζόταν ως η αιτία του κακού-ακόμα και σήμερα-και όλες οι εναλλακτικές σχεδιαστικές προτάσεις για την αποφυγή της χρήσης του διερευνήθηκαν ανεπιτυχώς .

Η ευρωπαϊκή πρακτική, όπως παρουσιάστηκε αρχικά στον μονωτήρα Motor, και αργότερα η εισαγωγή μονωτήρων τύπου ράβδου, χρησιμοποίησε δυο εξωτερικά περιβλήματα δισκοειδούς μορφής συγκρατημένα με τσιμέντο ή χυτό μέταλλο προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη λειτουργία το εφελκυστικό φορτίο στο κεντρικό μέρος της πορσελάνης. Αυτή η σχεδίαση εξουδετέρωνε τις βλάβες λόγω διάβρωσης αφού η μοναδική επίπτωση της χρησιμοποίησης τσιμέντου για τη σύνδεση με το μεταλλικό τμήμα ήταν να τοποθετηθεί η πορσελάνη με αυξημένη μηχανική πίεση ακτινικά. Δυστυχώς όμως δεν διατηρούσε το σημαντικό πλεονέκτημα όλων των μονωτήρων κελύφους –πείρου δηλαδή την ικανότητα τους να διατηρούν τη μηχανική τους ακεραιότητα ακόμα και όταν συντριβούν.

Με το σταδιακό πέρασμα σε όλο και υψηλότερες τάσεις και με την εμφάνιση της πυρηνικής ενεργείας η ανάγκη για αξιοπιστία αυξήθηκε. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη των δισκοειδών μονωτήρων με μεγάλο μήκος ερπυσμού θέτοντας τις βάσεις για την κατασκευή μεγάλων μονωτήρων στους υποσταθμούς.

Λίγο πριν το 1962 πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με βάση τις οποίες πίστευαν ότι θα μπορούσε να προβλεφθεί επιστημονικά η γεωμετρία και ο όγκος των μονωτήρων. Η σημαντικότερη δοκιμή έγινε σε περιβάλλον ομίχλης και αλάτων βάσει της οποίας απορριφθήκαν πολλά παράδοξα σχήματα μονωτικών (π.χ στύλοι και δίσκοι με ελικοειδείς ραβδώσεις, που είχαν σχεδιαστεί σύμφωνα με λανθασμένες φυσικές υποθέσεις και ερμηνείες μη έγκυρων δοκιμών, όπως η διαδικασία τεχνίτης βροχής). Ο ανθεκτικός ύαλος ή σταθεροποιημένος μονωτήρας που εμφανίστηκαν αυτή την περίοδο είχαν άριστη απόδοση κατά τη λειτουργία σε τεχνητή και πραγματική ρύπανση, τα προβλήματα διάβρωσης όμως περιόρισαν την πρακτική εφαρμογή τους.

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.

Τα προβλήματα αξιοπιστίας αποδείχθηκαν, και συνεχίζουν να αποδεικνύονται, δύσκολα να επιλυθούν στην πράξη. Για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες να αντιμετωπιστούν επιτυχώς οι απαιτήσεις μεταφοράς υψηλής ή υπερυψηλής τάσης καθώς και συνεχούς τάσης. Στο ελληνικό δίκτυο και κατόπιν τριετούς ενθαρρυντικής δοκιμασίας τους σε λίγες θέσεις αναρτήσεως (κατά μήκος 2 ανοιγμάτων της γραμμής μεταφοράς) χρησιμοποιούνται, εδώ και ένα περίπου χρόνο, μονωτήρες αναρτήσεως των οποίων ο πυρήνας αποτελείται από εποξεικές ρητίνες και ύαλου ενώ οι κυματώδεις είναι οργανικής συστάσεως.

### **1.3 Γενικά περί μονωτικών υλικών**

Ως μονωτικά σώματα ή μονωτές χαρακτηρίζονται τα υλικά που, πρακτικά, δεν εμφανίζουν καθόλου ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν εκτίθενται σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος (συνήθως θεωρούνται ως χαμηλές οι τάσεις που δεν ξεπερνούν τα 1000V) [6]. Η μη δυνατότητα εκδήλωσης ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα παραπάνω σώματα έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτά δεν υπάρχουν σε κάποια επαρκή ποσότητα ευκίνητοι φορείς ηλεκτρικού φορτίου, τέτοιοι που να επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από το εσωτερικό τους (σε αντίθεση π.χ. με τα μέταλλα). Πραγματικά, στη χημική τους σύσταση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής και, σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές, τα σωματίδια από τα οποία αποτελούνται δε μπορούν να διασπασθούν εύκολα σε φορτισμένα ιόντα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερα ιόντα από τα οποία αποτελούνται είναι κατά κανόνα δυσκίνητα, είτε στο ότι η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους είναι μεγάλη, είτε, ακόμα, στο ότι τα μόρια τους παρουσιάζουν ιδιαίτερη σταθερότητα [7].

Στην πραγματικότητα, βέβαια, είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη σε κάθε μονωτικό σώμα ενός κάποιου πλήθους προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων ή διασπάσεων που δημιουργούν ένα μικρό αριθμό φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος



στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, ο γενικός κανόνας είναι πως, χάρη στην έλλειψη αξιόλογης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίζουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων διαμέσου της μάζας τους και για να διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων .

Τα τρία βασικά μέρη ενός μονωτήρα είναι το διηλεκτρικό, οι ακροδέκτες, που συνδέουν το διηλεκτρικό με την υπόλοιπη μηχανολογική δομή και τα ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα, όπως τσιμέντο, λιπαντικά ή βαφές.

Τα διηλεκτρικά είναι κυρίως κεραμικά (πορσελάνη, γυαλί) ή πολυμερή. Τα υλικά αυτά απαιτείται να ανθίστανται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπών του δικτύου χωρίς να διασπώνται. Επειδή οι επιφάνειες των διηλεκτρικών είναι στην πράξη σχεδόν πάντα ηλεκτρικά αγωγίμες εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθίσεων, είναι απαραίτητη μία διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση.

Στην περίπτωση των κεραμικών διηλεκτρικών, το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο είναι το πυρίτιο, ενώ στην περίπτωση των πολυμερών ο άνθρακας. Η βασική χημική δομή των διηλεκτρικών διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό τόσο των ηλεκτρικών, όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων των μονωτήρων. Τόσο τα κεραμικά, όσο και τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από τετρασθενή άτομα, τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών.

Η 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 γυαλί, στην ιδανική περίπτωση, είναι ένα μίγμα πυριτικών αλάτων υαλώδους μορφής χωρίς προσμίξεις και ακαθαρσίες. Στην πράξη όμως πάντα περιέχονται παγιδευμένες φυσαλίδες αερίων και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό τα οποία εισάγουν ατέλειες στη δομή του υλικού. Οι μονωτήρες πορσελάνης είναι πάντα άμορφα υλικά (υαλώδης κατάσταση).

Τα καθαρά πολυμερή αποτελούνται από ένα επαναλαμβανόμενο 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 παραγόμενων προϊόντων [2].

#### 1.4 Βασικοί ορισμοί περί μονωτήρων

- ✓ **Τάση Δοκιμή:** Η ενεργός τιμή της τάσης, με την οποία ο μονωτήρας είναι συνεχώς ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
- ✓ **Ρεύμα βραχυκυκλώματος ( $I_{SC}$ ) της ελεγχόμενης εγκατάστασης:** Η ενεργός τιμή του ρεύματος που προέρχεται από την ελεγχόμενη εγκατάσταση, όταν το δοκιμαζόμενο αντικείμενο βραχυκυκλώνεται στην τάση δοκιμής
- ✓ **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 [8].

- ✓ **Ειδικό μήκος ερπυσμού ( $L_s$ ) ενός μονωτήρα:** Το συνολικό μήκος ερπυσμού  $L$  ενός μονωτήρα, διαιρημένο με το γινόμενο της τάσης δοκιμής με το  $\sqrt{3}$  γενικά εκφράζεται σε mm/kV[8].

- ✓ **Συντελεστής μορφής ενός μονωτήρα ( $F$ ):** Ο συντελεστής μορφής καθορίζεται από τις διαστάσεις του μονωτήρα. Για γραφικό υπολογισμό του συντελεστή μορφής, σχεδιάζεται η αντίστροφη τιμή της περιφέρειας του μονωτήρα ( $l/p$ ), προς το μερικό μερικό μήκος ερπυσμού ( $l$ ), μετρούμενο από το πέρας του μονωτήρα μέχρι το σημείο μέτρησης. Ο συντελεστής μορφής δίνεται από την περιοχή κάτω απ' αυτήν την καμπύλη και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$F = \frac{d(l)}{p(l)} \quad \text{ή εναλλακτικά από τη σχέση:}$$

$$F = \int_0^L \frac{dl}{p(l)}. \quad \text{Αν } D(l) \text{ είναι η διάμετρος του μονωτήρα, τότε η παραπάνω σχέση}$$

$$\text{τροποποιείται ως εξής: } F = \int_0^L \frac{dl}{\pi \cdot D(l)} \quad [9].$$

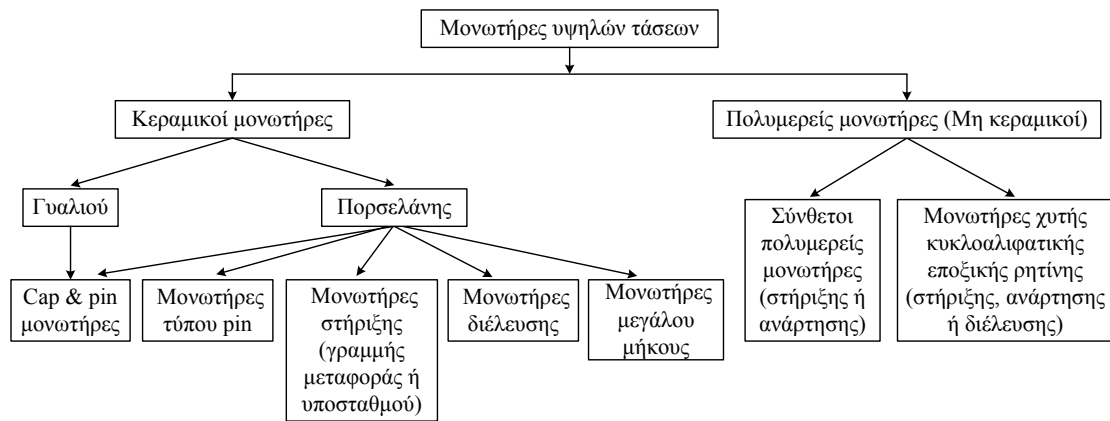
- ✓ **Αλατότητα:** Η συγκέντρωση του διαλύματος άλατος στο νερό, εκφρασμένη από την ποσότητα άλατος, διαιρεμένη με τον όγκο του διαλύματος. Εκφράζεται σε  $\text{kg/m}^3$  [8].

- ✓ **Στρώμα ρύπανσης:** Ένα αγώγιμο ηλεκτρολυτικό στρώμα στην επιφάνεια του μονωτήρα αποτελούμενο από άλατα και αδρανή υλικά [8].
- ✓ **Ειδική Αγωγιμότητα στρώματος (K):** Η αγωγιμότητα του στρώματος των ρύπων πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή μορφής, γενικά εκφράζεται με  $\mu\text{S}$  [8].
- ✓ **Πυκνότητα απόθεσης άλατος (SDD):** Το ποσό του άλατος που κατακάθεται σε μια δεδομένη επιφάνεια του μονωτήρα (μεταλλικά τμήματα δεν συμπεριλαμβάνονται), διαιρεμένο με το εμβαδόν αυτής της επιφάνειας γενικά δίνεται σε  $\text{mg}/\text{cm}^2$  [8].
- ✓ **Βαθμός ρύπανσης:** Η τιμή της ποσότητας (αλατότητα, ειδική αγωγιμότητα στρώματος, πυκνότητα απόθεσης άλατος) που χαρακτηρίζει την τεχνητή ρύπανση, που υπέστη ο δοκιμαζόμενος μονωτήρας [8].
- ✓ **Αλατότητα αναφοράς:** Η τιμή της αλμυρότητας που χρησιμοποιήθηκε και χαρακτηρίζει μια δοκιμή [8].
- ✓ **Ειδική αγωγιμότητα αναφοράς του στρώματος:** Η τιμή της ειδικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκε και χαρακτηρίζει μια δοκιμή: ορίζεται ως μέγιστη τιμή της αγωγιμότητας του υγρού στρώματος ενός μονωτήρα [8].
- ✓ **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 [10].
- ✓ **Καθορισμένος βαθμός ρύπανσης αντοχής:** Ο βαθμός ρύπανσης, στον οποίο ένας μονωτήρας θ' αντέξει την προδιαγεγραμμένη τάση δοκιμής, σε τρία τουλάχιστον από τα τέσσερα τεστ.
- ✓ **Μέγιστος βαθμός ρύπανσης αντοχής:** Ο υψηλότερος βαθμός ρύπανσης, στον οποίο μπορούν να επιτευχθούν τουλάχιστον τρεις στις τέσσερις δοκιμές αντοχής στην καθορισμένη τάση δοκιμής.
- ✓ **Καθορισμένη τάση αντοχής:** Η τάση δοκιμής την οποία θ' αντέξει ένας μονωτήρας υπό καθορισμένο βαθμό ρύπανσης, τουλάχιστον σε τρία από τα τέσσερα τεστ.
- ✓ **Μέγιστη τάση αντοχής:** Η υψηλότερη τάση δοκιμής, με την οποία μπορούν να επιτευχθούν τουλάχιστον τρεις στις τέσσερις δοκιμές υπό τον καθορισμένο βαθμό ρύπανσης

- ✓ **Διαβρεξιμότητα (wettability):** Είναι η ικανότητα μίας επιφάνειας να υγρανθεί από ένα υγρό (π.χ. νερό) [11].
- ✓ **Υδροφοβικότητα:** Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με χαμηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδρόφοβη επιφάνεια έχει χαμηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να απωθεί το νερό [11].
- ✓ **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 [11].
- ✓ **Tracking:** Είναι μια μη-αναστρέψιμη επιδείνωση του μονωτικού υλικού, λόγω του σχηματισμού αγωγίμων δρόμων που ξεκινούν και αναπτύσσονται στην επιφάνεια του υλικού αυτού. Αυτοί οι δρόμοι είναι αγωγίμοι ακόμα και σε ξηρές συνθήκες. Αυτή η διεργασία μπορεί να συμβεί στην επιφάνεια του μονωτικού υλικού που έρχεται σε επαφή με τον αέρα, αλλά και σε διεπιφάνειες μεταξύ δύο διαφορετικών μονωτικών υλικών.
- ✓ **Διάβρωση (Erosion):** Η διάβρωση είναι μια ανέκκλητη και μη-αγώγιμη επιδείνωση της επιφάνειας του μονωτήρα που συμβαίνει μελω της απώλειας μέρους του υλικού. Η απώλεια αυτή μπορεί να είναι ομοιόμορφη ή τοπική.
- ✓ **Θραύση (Cracking):** Είναι οποιοδήποτε είδος θραύσης στην επιφάνεια με βάθος μεγαλύτερο από 0.1 mm.
- ✓ **Υδρόλυση:** Είναι μια χημική διαδικασία που περιλαμβάνει την αντίδραση του υλικού με νερό σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτρικό ή μηχανικό υποβιβασμό των ιδιοτήτων του υλικού.

## 1.5 Είδη μονωτήρων

Είναι γνωστό ότι τόσο το υλικό, όσο και το γεωμετρικό σχέδιο των μονωτήρων παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο για τις μονωτικές τους επιδόσεις, καθώς επηρεάζει τον αυτοκαθαρισμό τους (από τη βροχή), τα μονοπάτια διαρροής, αλλά και την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου [12]. Μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων σύμφωνα με το υλικό και το σχήμα τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, ενώ στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές κατηγορίες μονωτήρων.



Σχήμα 1.2: Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης.[5]

Εικόνες από τους δύο προαναφερθέντες τύπους μονωτήρων φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



Σχήμα 1.3: Κεραμικοί μονωτήρες σε εναέρια γραμμή.



Σχήμα 1.4: Μη-κεραμικός μονωτήρας σε εναέρια γραμμή.

## Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το υλικό κατασκευής

### ✓ Πορσελάνη

Είναι σύνθετη ύλη από αργύλιο, πυρίτιο και μαγνήσιο. Για να επιτευχθεί μείωση της επίδρασης του περιβάλλοντος, αύξηση της επιφανειακής αντίστασης και ομογενές ηλεκτρικό πεδίο στους μονωτήρες η πορώδεις επιφάνεια τους καλύπτεται με διηλεκτρικά υλικά κρυσταλλικής μορφής ελαττώνοντας, έτσι, τις απώλειες. Οι μονωτήρες από πορσελάνη είναι κατάλληλοι για χρήση σε σχετικά υψηλές τάσεις, αλλά σε χαμηλές συχνότητες.

### ✓ Γυαλί

Το γυαλί έχει χαρακτηριστικά μονωτικού υλικού (σχετικά μεγάλη διηλεκτρική σταθερά και ειδική αντίσταση, όπως και μικρό θερμικό συντελεστή). Είναι μίγμα διαφόρων πυριτικών αλάτων (κυρίως του Na ή του K και του Ca), παρουσιάζεται με τη μέθοδο της σύντηξης λεπτής άμμου χαλαζία και  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ή  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Η οριακή του θερμοκρασία είναι άνω των  $200^\circ\text{C}$ . Κατασκευάζεται σε λεπτά φύλλα πάχους μέχρι 10μm. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή μονωτήρων.

### ✓ Εποξιδική ρητίνη

Χρησιμοποιείται γιατί είναι φθηνότερη από την πορσελάνη και δεν παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα στην κατασκευή μονωτήρων. Το μειονέκτημα της είναι ότι όταν υπόκειται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο και υπο την επίρεια των ατμοσφαιρικών συνθηκών δημιουργείται μία αποσύνθεση και απελευθέρωση άνθρακα ιδιαίτερα κοντά στους σπλισμούς του μονωτήρα.

### ✓ Κεραμικά υψηλής συχνότητας

Ανάλογα με την περίπτωση χρήση τους διακρίνονται σε α) μονωτήρες για υψηλής συχνότητας κεραίες β) εξαρτήματα στηρίξεως γ) κεραμικά πυκνωτών δ) πορώδη κεραμικά. Σαν κεραμικό υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται ο στεατίτης [13].

## **Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους**

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους οι μονωτήρες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες [1]:

- ✓ **Μονωτήρες αναρτήσεων**, που χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς Υ.Τ. και αποτελούνται από μια ή δυο σειρές δισκοειδών μονωτήρων, διατεταγμένων σε μορφή αλύσου. Το πλήθος των δισκοειδών μονωτήρων σε μια διάταξη αλύσου εξαρτάται προφανώς από την τάση λειτουργίας της γραμμής και από τη διηλεκτρική αντοχή έκαστου δισκοειδούς μονωτήρα.
- ✓ **Μονωτήρες στηρίξεως**, που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών υψηλής τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες μεταφοράς και μονωτήρες σταθμών.
- ✓ **Μονωτήρες γραμμής**, που χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 70kV.
- ✓ **Μονωτήρες διελεύσεως**, που χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές.

## **Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης**

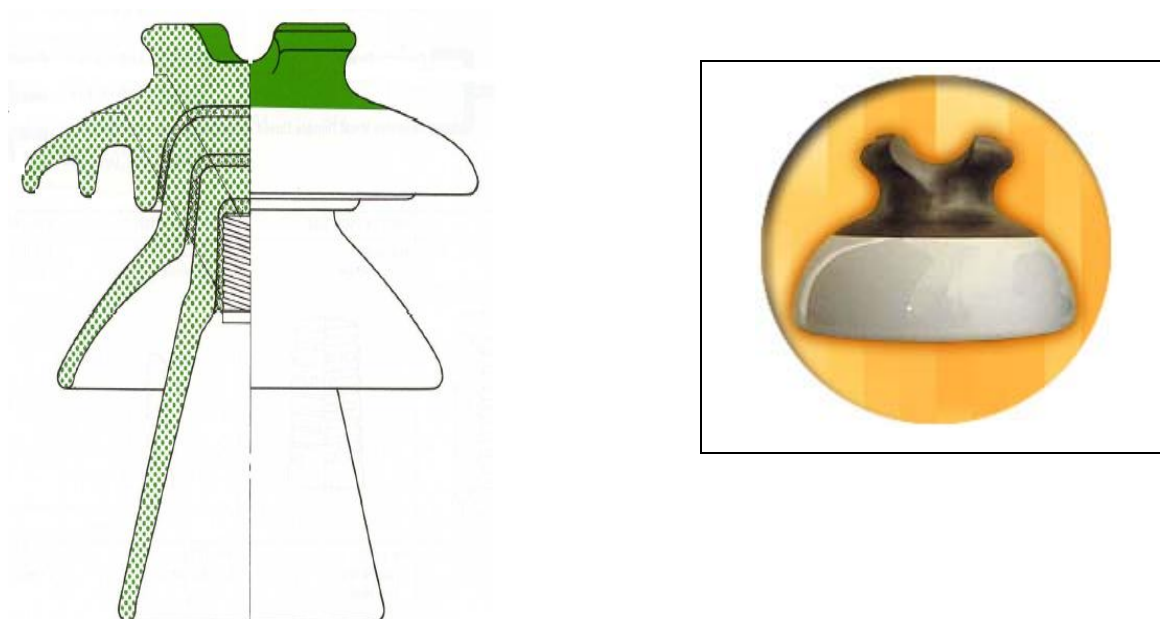
Ανάλογα με τους χώρους χρήσης τους και, κατ' επέκταση, τον ειδικό τρόπο σχεδιάσής τους, έχουμε τους εξής τύπους μονωτήρων [1]:

- ✓ **Τύπου ομίχλης** Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες έντονης ρύπανσης (συνήθως, κοντά σε βιομηχανικές ή παραθαλάσσιες περιοχές). Οι μονωτήρες αυτοί έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού και τέτοια διαμόρφωση της εξωτερικής επιφάνειας, ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή προστασία έναντι επικάλυψης ακαθαρσιών.
- ✓ **Κανονικού τύπου** Αυτοί χρησιμοποιούνται σε σύνηθες περιβάλλον και έχουν μικρότερο μήκος ερπυσμού.
- ✓ **Εσωτερικού τύπου** Οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους – κυρίως σε κλειστούς υποσταθμούς.

## Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το σχήμα και τη χρήση τους στις γραμμές μεταφοράς [5]

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

Αυτός ο τύπος μονωτήρων χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις τηλεφωνικές γραμμές και τα αλεξικέραυνα, ενώ στη συνέχεια τροποποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές παραλλαγές του είναι ακόμα σε χρήση στα συστήματα μέσης τάσης. Ο μονωτήρας αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.



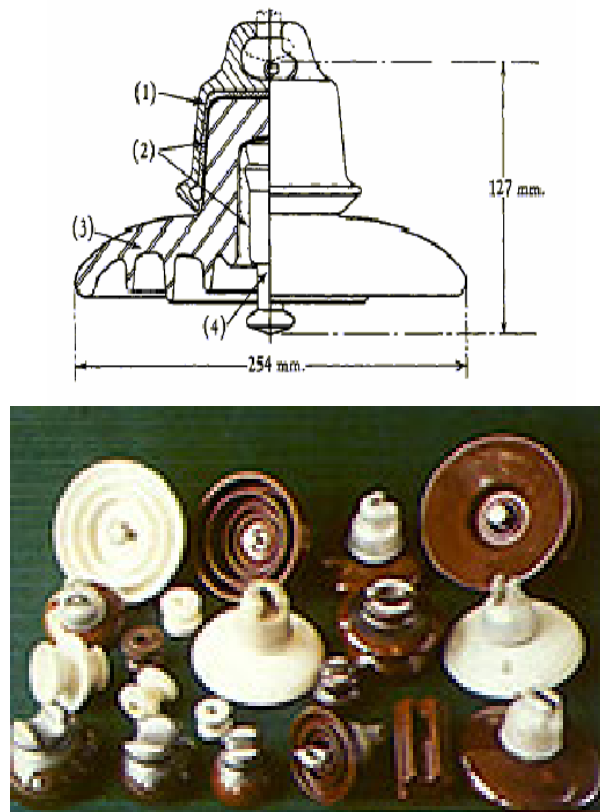
Σχήμα 1.5: Μονωτήρας τύπου pin.

### ✓ Μονωτήρες τύπου cap & pin (cap and pin insulators)

Αυτοί κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί και είναι βασισμένοι στις ίδιες κατασκευαστικές αρχές με τους μονωτήρες τύπου pin. Ένας αριθμός τέτοιων μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων κελυφών (caps) και πείρων (pins) σχηματίζοντας μια αλυσίδα μονωτήρων. Αυτές οι αλυσίδες χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Τα καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο. Οι κωνικές μορφές των συναρμολογήσεων εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή κατά την άσκηση δυνάμεων εφελκυσμού. Στους μονωτήρες τύπου pin και τύπου cap & pin η συντομότερη απόσταση μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων μέσω της πορσελάνης ή του γυαλιού είναι λιγότερη από το 50% της συντομότερης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσω του αέρα. Συνεπώς η πορσελάνη ή το γυαλί μπορεί να διατηρηθεί



κατόπιν μεγάλης ηλεκτρικής καταπόνησης. Η διαδικασία κατασκευής των μονωτήρων υάλου περιλαμβάνει τη θερμική ψύξη, που εξασφαλίζει ότι οι γυάλινοι δίσκοι θρυμματίζονται σε περίπτωση διάτρησης, οπότε ο ελαττωματικός δίσκος είναι εμφανής.



Σχήμα 1.6: Τυπικός cap and pin μονωτήρας (1): Γαλβανισμένη μεταλλική θήκη(cap), (2): Τσιμέντο, (3): Πορσελάνη, (4): μεταλλικός πείρος (pin)

#### ✓ Μονωτήρες στήριξης (post type insulators)

Αυτοί οι μονωτήρες αποτελούνται από ένα συμπαγή κύλινδρο πορσελάνης με κυματοειδείς πτυχές, για να αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, και από μεταλλικά ηλεκτρόδια σε κάθε άκρη. Οι μονωτήρες στήριξης έχουν μεγάλο μήκος. Χρησιμοποιούνται οριζόντια ή κάθετα για να στηρίξουν τον αγωγό υψηλής τάσης και τοποθετούνται στις βάσεις ή στους εγκάρσιους βραχίονες των γραμμών μεταφοράς (line post insulators). Στους μονωτήρες αυτούς η συντομότερη απόσταση μέσω της πορσελάνης υπερβαίνει το 50% της συντομότερης απόστασης μέσω του αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων, οπότε δεν διαρρηγνύονται εύκολα.



Σχήμα 1.7: Μονωτήρες τύπου station post.



Σχήμα 1.8: Μονωτήρες τύπου line post.



Σχήμα 1.9: Μονωτήρας τύπου station post σε υποσταθμό.



Σχήμα 1.10: Μονωτήρας τύπου line post σε γραμμή Υ.Τ.

✓ **Μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους (longrod insulators)**

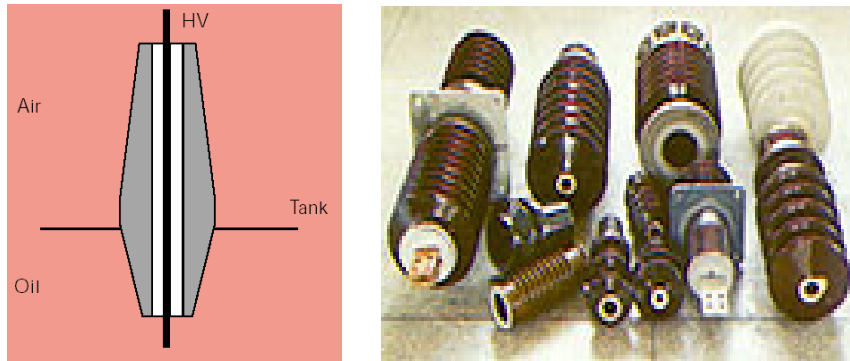
Οι μονωτήρες μεγάλου μήκους είναι παρόμοιοι με τους μονωτήρες στήριξης, αλλά είναι ελαφρύτεροι, λεπτότεροι και χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης.



Σχήμα 1.11: Μονωτήρες τύπου longrod (από πορσελάνη).

### ✓ Μονωτήρες διέλευσης (bushings)

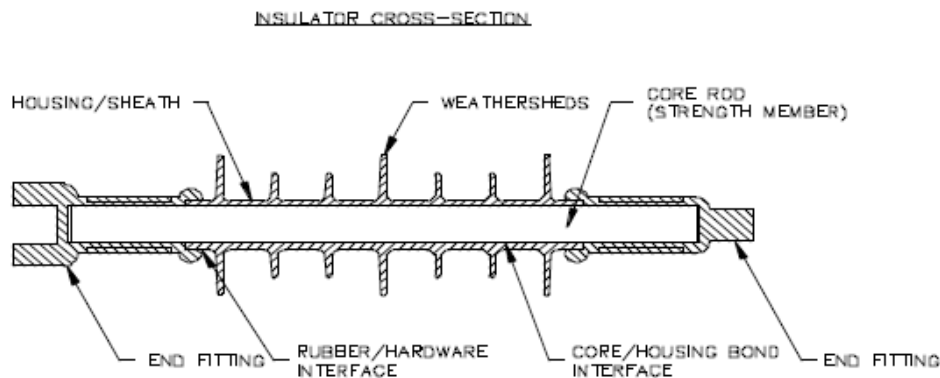
Οι μονωτήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να μονώσουν τους αγωγούς των ακροδεκτών υψηλής τάσης κυρίως μετασχηματιστών ή άλλων διατάξεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.12. Συνήθως οι μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται από πορσελάνη.



Σχήμα 1.12: Μονωτήρες διέλευσης .

### ✓ 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 φαίνονται και στο Σχήμα 1.13 είναι τα εξής:



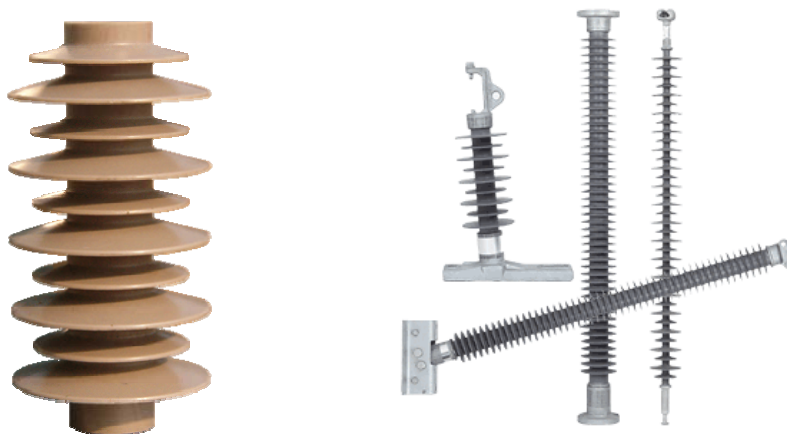
Σχήμα 1.13: Δομή πολυμερούς μονωτήρα.[16]

- ✓ Πυρήνας (core) που είναι το εσωτερικό μονωτικό μέρος του πολυμερούς μονωτήρα. Μεταφέρει το μηχανικό φορτίο. Αποτελείται κυρίως από ίνες γυαλιού που βρίσκονται σε μάζα ρητίνης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη δύναμη εφελκυσμού.
- ✓ Ένα ελαστομερές περίβλημα (housing) για να προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες.

- ✓ Ελαστομερείς δίσκοι (weathersheds), που αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ώστε να ανθίσταται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα. Ακόμα, παρέχουν μια διακοπτόμενη διαδρομή για την αποστράγγιση του μονωτήρα από το νερό. Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και το αιθυλένιο-προπυλένιο-διένιο μονομερές καουτσούκ (ethylene propylene diene monomer – EDPM).
- ✓ Μεταλλικά μέρη (end fitting) που μεταδίδουν το μηχανικό φορτίο στον πυρήνα.
- ✓ Η ζώνη σύνδεσης (coupling zone), που αποτελεί μέρος των end fitting, μεταφέρει το φορτίο στη γραμμή, στον πύργο ή σε έναν άλλο μονωτήρα. Δεν περιλαμβάνει τη διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και των μεταλλικών μερών.
- ✓ Διεπιφάνειες (interfaces), δηλαδή οι επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών υλικών, όπως είναι η διεπιφάνεια μεταξύ του περιβλήματος και των ελαστομερών δισκών ή η διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος [16].

Οι μεταλλικοί ακροδέκτες αυτών των μονωτήρων είναι συνήθως στερεωμένοι πάνω στην εξωτερική πλευρά της ράβδου του πυρήνα και τα συγκεκριμένα σημεία επαφής μεταξύ του ελαστομερούς και των ακροδεκτών είναι πολύ σημαντικά. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90% σε σύγκριση με τους αντίστοιχους κεραμικούς.

Οι πολυμερείς μονωτήρες λέγονται και σύνθετοι (composite), που σημαίνει ότι αποτελούνται από τουλάχιστον δύο μονωτικά μέρη-έναν πυρήνα και το περίβλημα, εξοπλισμένα με τα μεταλλικά μέρη [16].



*Σχήμα 1.14: Πολυμερείς μονωτήρες.*

✓ **Μονωτήρες κυκλοαλιφατικής εποξικής ρητίνης (Cyclo-alifatic epoxy resin insulators)**

Η κυκλοαλιφατική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χυτευτούν μονωτήρες παρόμοιοι με τους πορσελάνης και τύπου line post για διανομή των τάσεων. Σε περιβάλλον με κακές καιρικές συνθήκες οι επιφάνειες των μονωτήρων αυτών γίνονται τραχιές, γεγονός που μπορεί να έχει επιπτώσεις στην αξιοπιστία του μονωτήρα, αν δεν ληφθεί υπόψη.

## **1.6 Ιδιότητες των μονωτήρων**

Όλοι οι μονωτήρες πρέπει να καλύπτουν ηλεκτρικές και μηχανικές λειτουργικές ανάγκες, οι οποίες συνήθως εμφανίζουν αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις.

Η αξιοπιστία είναι η σημαντικότερη ιδιότητα ενός μονωτήρα. Η μεγαλύτερη αστοχία σε έναν μονωτήρα γραμμής συμβαίνει όταν αυτός σπάσει μηχανικά και «κοπεί» η γραμμή. Ωστόσο, ακόμα κι αν αυτό συμβεί, οι μονωτήρες στους γειτονικούς πυλώνες θα πρέπει να μπορούν όχι μόνο να αναλάβουν το επιπλέον φορτίο, αλλά και να αντέξουν τη μηχανική καταπόνηση που σχετίζεται με ένα τέτοιο γεγονός, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα αποκατάστασης και το κόστος.

Η 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 υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα [2].

Οι μονωτήρες είναι δυνατόν να αστοχήσουν στον προορισμό τους για τους εξής λόγους :

- α) Διάτρηση, δηλαδή υπερνίκηση της διηλεκτρικής αντοχής τους.
- β) Υπερπήδηση, δηλαδή δημιουργία ηλεκτρικού τόξου που έρπει στην επιφάνεια του μονωτήρα.
- γ) Διάσπαση του αέρα γύρω από το μονωτήρα.
- δ) Πτώση κεραυνού μικρού χρόνου μετώπου.

Επειδή, όμως, η διηλεκτρική αντοχή του υλικού των μονωτήρων είναι μεγαλύτερη από αυτή του αέρα, η αστοχία οφείλεται βασικά στους δύο τελευταίους λόγους, ενώ ο

πρώτος λόγος είναι σπάνιος, αφού συμβαίνει μόνο σε περιπτώσεις εσωτερικών ατελειών του υλικού. Στην αστοχία συντελεί και η επικάθιση σκόνης ή αλμύρας (σε παραθαλάσσιες περιοχές) επειδή μειώνει σημαντικά τη διηλεκτρική αντοχή στην επιφάνεια του μονωτήρα σε συνδυασμό με την ατμοσφαιρική υγρασία. Για τη μείωση των αστοχιών, αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, δηλαδή το μήκος της ημιπεριμέτρου της εγκάρσιας διατομής, με τη δημιουργία πτυχώσεων στην επιφάνεια του μονωτήρα [1].

Η ύπαρξη ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια των κεραμικών μονωτήρων συμβάλλει στην αύξηση της ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη συνάφεια ή τη δύναμη συνάφειας των επιφανειακών προσμίξεων, 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 [2].

Ως βασικότερο μειονέκτημα της πορσελάνης θα μπορούσε να καταγραφεί η δυσκολία και το υψηλό κόστος βιομηχανικής παρασκευής της σε συμπαγή τεμάχια με πάχος μεγαλύτερο από 2cm. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μονωτήρες πορσελάνης μέσης και υψηλής τάσης κατασκευάζονται συνήθως από περισσότερα τεμάχια που συγκολλούνται με τσιμέντο [9]. Τέλος, ένα ακόμα σοβαρό μειονέκτημα της πορσελάνης, είναι το ότι η πορσελάνη μπορεί να υποστεί διάτρηση εσωτερικά χωρίς καμία εξωτερική ένδειξη και, έτσι, ο βαθμός της ενδεχόμενης βλάβης δεν είναι γνωστός μέχρι να επέλθει ολική συντριβή του δοκιμίου [4].

Η βελτιωμένη μηχανική αντοχή του σκληρυμένου γυαλιού συγκριτικά με την πορσελάνη επιτρέπει τη χρησιμοποίηση λεπτότερων δακτυλίων στις διατάξεις των δισκοειδών μονωτήρων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται σημαντικά το μήκος του ερπυσμού, ενώ, η ονομαστική τάση λειτουργίας του μονωτήρα μπορεί να αυξηθεί σε ποσοστό μέχρι και 40%.

Αξίζει να τονισθεί πως το εύρος της βιομηχανικής εφαρμογής του μονωτήρα από γυαλί είναι περισσότερο περιορισμένο από εκείνο του μονωτήρα πορσελάνης. Στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές η χρήση του γυαλιού, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση, περιορίζεται στους μονωτήρες τύπου “cap and pin” (ανάρτησης) ή σε εκείνους τους τύπους, όπως είναι οι μονωτικοί στύλοι στήριξης των σιδηροδρομικών δικτύων και οι

στύλοι πολλαπλών κώνων που αποτελούνται από διακριτές διατάξεις δισκοειδούς μορφής [4].

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυμερών είναι οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές της ελεύθερης επιφανειακής τους ενέργειας. Θερμοδυναμικά, το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στα πολυμερή να ανθίστανται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση περισσότερο απ' ό,τι τα κεραμικά υλικά. Όταν λοιπόν λαμβάνεται υπόψη και η αντοχή στις διασπάσεις λόγω ρύπανσης, οι μονωτήρες με ελαστομερή προστατευτικά καλύμματα σιλικόνης (silicon rubber housing) αποδεικνύεται ότι υπερτερούν έναντι των παραδοσιακών μονωτήρων από πορσελάνη και γυαλί. Με άλλα λόγια, τα πολυμερή υλικά φαίνεται να είναι ιδανικά για εξωτερικούς μονωτήρες. Όμως, οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι συχνά τέτοιες που οδηγούν στη διάβρωση της επιφάνειας του πολυμερούς. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην απώλεια των άριστων επιφανειακών ιδιοτήτων. Οι διαβρωτικές διαδικασίες συμβάλλουν σε μια μη αναστρέψιμη και χρονικά εξαρτώμενη φθορά.

Όλα τα πολυμερή αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, ενώ επίσης υπόκεινται σε φωτόλυση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών τους δεσμών από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πιθανό 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 έναν καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή προσβολή της επιφάνειας, ιδιαίτερα από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγωγίμες επιφανειακές οδούς που είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας [2].

Η αντίσταση στην περιβαλλοντική φθορά μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση υλικών που προστατεύουν από τη θερμοκρασία (thermal protective fillers), όπως είναι το ATH (aluminum tri hydrate) ή αντιοξειδωτικών. Στους μονωτήρες υψηλών τάσεων ο κυριότερος λόγος που χρησιμοποιούμε ATH είναι η ιδιότητά του να μειώνει την επιφανειακή θερμοκρασία στις περιπτώσεις εμφάνισης τόξου, μέσω της διάσπασής του σε οξείδιο του αλουμινίου και νερό που ακολουθείται από εξάτμιση του νερού.

Όσον αφορά στους κεραμεικούς μονωτήρες, είναι αναγκαίο να γίνει εκμετάλλευση των καλών ιδιοτήτων τους, αλλά με ταυτόχρονη μείωση της επιφανειακής υγροσκοπικότητάς τους και της ανεπιθύμητης έλξης ρύπων.

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

Ιδιότητα	Υαλώδης πορσελάνη	Σκληρυμένο 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 [4].

## 1.7 Ρύπανση μονωτήρων

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. Για τα ελληνικά δεδομένα, η ρύπανση στην επιφάνεια ενός μονωτικού υλικού μπορεί να είναι είτε θαλάσσια, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι ο μονωτικό βρίσκεται σε παραθαλάσσια περιοχή και οι άνεμοι μεταφέρουν θαλασσινό νερό με 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 [1].

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

Στους τρόπους μείωσης των αστοχιών των μονωτήρων περιλαμβάνονται η αύξηση του μήκους ερπυσμού (leakage length) στις πιο «ευάλωτες» τοποθεσίες, η επικάλυψη των επιφανειών των μονωτήρων με υδροφοβικά υλικά και ο περιοδικός καθαρισμός των μονωτήρων ή η αντικατάσταση των πορσελάνινων μονωτήρων από πολυμερείς. Όλες αυτές οι τεχνικές παρουσιάζουν όμως μειονεκτήματα. Οι μη κεραμικές επιφάνειες χάνουν την υδροφοβικότητά τους και υφίστανται φθορά της επιφάνειάς τους έπειτα από παρατεταμένη έκθεση σε ρύπανση και ηλεκτρικές εκκενώσεις. Η καθιέρωση ενός αξιόπιστου προγράμματος καθαρισμού και συντήρησης φαίνεται σε πρώτο επίπεδο να είναι μια ευρέως αποδεκτή πρακτική για τη βελτίωση της κατάστασης. Όμως, το υψηλό κόστος και η ανάγκη για εκπαιδευμένο εργατικό προσωπικό κάνουν το πλύσιμο των μονωτήρων ιδιαίτερος δαπανηρό και έτσι αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται πως γίνεται το πλύσιμο των μονωτήρων σε μια γραμμή μεταφοράς.



Σχήμα 1.15: Πλύσιμο μονωτήρων σε γραμμές μεταφοράς.

Στο πρότυπο IEC 815/1986 [17], προκειμένου να υπάρχει μία κατηγοριοποίηση των περιοχών ανάλογα με το ποσοστό ρύπανσης, έχουν καθοριστεί ποιοτικά τέσσερα επίπεδα ρύπανσης. Τα επίπεδα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 1.2.

Για κάθε επίπεδο ρύπανσης που περιγράφεται στον Πίνακα 1.2, το αντίστοιχο ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού (minimal nominal specific creepage distance), μετρούμενο σε mm/kV (πολική τάση) της υψηλότερης εφαρμοζόμενης τάσης στο μονωτήρα δίνεται στον Πίνακα 1.3 [17].

Επίπεδο ρύπανσης	Παραδείγματα τυπικού περιβάλλοντος
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 ισχυρούς 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>
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 σε ακτή (τουλάχιστον σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων ανάλογα με τη μορφολογία της παράκτιας περιοχής και τις συνθήκες ανέμου).</li> </ul>
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</li> </ul>

	σχετικά ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα
Πολύ βαριά	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Περιοχές περιορισμένης έκτασης, εκτεθειμένες σε αγωγίμη σκόνη και βιομηχανικό καπνό που προκαλεί αγωγίμες εναποθέσεις σημαντικού πάχους</li> <li>▪ Περιοχές περιορισμένης έκτασης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε ακτή και εκτίθενται σε ψεκάσμο 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 1.2: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815 [17]

Επίπεδο ρύπανσης	Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού (mm/kV)
I. Ελαφριά	16
II. Μεσαία	20
III. Βαριά	25
IV. Πολύ βαριά	31

Πίνακας 1.3: Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού συναρτήσει του επιπέδου ρύπανσης[17]

Η ρύπανση μπορεί να μειώσει την κρίσιμη τάση υπερπήδησης του μονωτήρα, οδηγώντας έτσι σε μη προγραμματισμένες βλάβες και μειωμένη αξιοπιστία. Η υπερπήδηση σε ένα μονωτήρα εξαιτίας της ρύπανσης είναι μια περίπλοκη διαδικασία που περνά από διάφορα στάδια. Αυτά ονομαστικά είναι τα εξής:

- ✓ Η δημιουργία στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα
- ✓ Ο σχηματισμός ξηρών ζωνών
- ✓ Οι μερικές εκκενώσεις και τέλος, αν οι συνθήκες το ευνοούν
- ✓ Η υπερπήδηση

## 1.8 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες

Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης των στερεων μονωτικών που βρίσκονται σε αέριο περιβάλλον και κυρίως στον ατμοσφαιρικό αέρα χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Τέτοιες διατάξεις είναι και οι μονωτήρες, στους οποίους η απώλεια της μόνωσης μπορεί να επέλθει με τρεις διαφορετικούς τρόπους (Σχήμα 1.16):



Σχήμα 1.16: Η απώλεια της μονωτικής δράσης ενός στερεού μονωτικού μπορεί να γίνει με ηλεκτρική διάσπαση του υλικού ή με υπερπήδηση που εκδηλώνεται με ρεύμα ερπυσμού και με διάσπαση στον αέρα [6].

✓ **Μέσω διάσπασης ή διάτρησης του μονωτικού (breakdown)**

Ο πρώτος είναι η κανονική ηλεκτρική διάσπαση του μονωτήρα (διάτρηση) και η εκκένωση ρεύματος δια μέσου της μάζας του, φαινόμενο που, όπως είδαμε και πιο πάνω, εκδηλώνεται όταν η διαφορά δυναμικού ξεπεράσει την τάση διάσπασης του υλικού [7]. Η διάτρηση του σώματος, δηλαδή, η μεγάλη θερμοκρασία που δημιουργεί η διέλευση του πολύ έντονου ρεύματος της διάσπασης προκαλεί τοπικά την τήξη, καύση ή εξαέρωση του υλικού και έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας λεπτής τρύπας στο σώμα κατά μήκος του πεδίου. Προκαλείται, επομένως, καταστροφή του υλικού και μόνιμη απώλεια της μονωτικής του ικανότητας. Αντίθετα, στα αέρια και υγρά μονωτικά η διάσπαση δεν προκαλεί σοβαρή μόνιμη βλάβη αφού αν στη συνέχεια μειωθεί η τάση κάτω από την κρίσιμη τιμή έχουμε αποκατάσταση των μονωτικών συνθηκών. Η διάσπαση ή αλλιώς διάτρηση του μονωτήρα μπορεί να επιτευχθεί υπό πολύ υψηλότερη τάση μόνον όταν ο μονωτήρας βυθιστεί μέσα σε λουτρό μονωτικού λαδιού (τούτο απαιτείται για να αποφευχθεί διάσπαση στον αέρα και για να διατηρηθεί υποχρεωτικά το υλικό κατασκευής του μονωτήρα). Διάτρηση, βέβαια, μπορεί να επιτευχθεί και μέσα σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, εφόσον, όμως, η επιβαλλόμενη τάση είναι κρουστική, μεγάλης τιμής και μεγάλης κλίσεως μετώπου (π.χ. κεραυνοπληξία) [1].

✓ **Μέσω του ρεύματος ερπυσμού**

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να επέλθει απώλεια της μόνωσης σε μια διάταξη μονωτήρα είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού **ρεύματος ερπυσμού** πάνω στην

επιφάνεια του υλικού. Το ρεύμα ερπυσμού μπορεί να εκτείνεται σε όλο το μήκος της επιφάνειας του μονωτικού ή, συνήθως, σε διάφορα μέρη της που συνδέονται με μικρά ηλεκτρικά τόξα. Μάλιστα, τα δημιουργούμενα κατά την υπερπήδηση ηλεκτρικά τόξα έρχονται σε επαφή με το στερεό μονωτικό καθορίζοντας, ταυτόχρονα, (κατά ένα ποσοστό τουλάχιστο 50%) την “οδό διέλευσης” νέου ηλεκτρικού τόξου που, ενδεχόμενα, θα λάβει χώρα στο μέλλον. Για αυτό το λόγο, συνήθως, εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή κερατίδια με τα οποία “υποδεικνύεται” στο ηλεκτρικό τόξο η οδός διέλευσής του, μακριά από το στερεό μονωτικό [18].

✓ **Μέσω υπερπήδησης του μονωτήρα ή διάτρησης του περιβάλλοντος μονωτικού**

Το φαινόμενο της υπερπήδησης μονωτήρων λόγω ρύπανσης αναφέρεται στο γεγονός ότι δημιουργείται γεφύρωση με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του γειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα (Σχήμα 1.17). Το φαινομενικό παράδοξο στην υπερπήδηση μονωτήρων λόγω ρύπανσης είναι ότι παράγονται καταστροφικές ηλεκτρικές εκκενώσεις, που επεκτείνονται σε μέτρα αέρα, από ηλεκτρικά δυναμικά τα οποία, σε κανονικές συνθήκες, θα μπορούσαν να αναχαιτιστούν από διάκενα αέρα μήκους λίγων εκατοστών. Με κάποιον τρόπο, η παρουσία δυσδιάκριτων αγώγιμων σωματιδίων, τα οποία επικάθονται σε μια επιφάνεια που αλλιώς θα ήταν ισχυρά μονωτική, μειώνει την πραγματική ηλεκτρική αντοχή της κατά έναν παράγοντα όχι πολύ μικρότερο του 100. Τα αίτια γι’ αυτό είναι δύο: α) η εντοπισμένη αφυδάτωση ενός στρώματος ηλεκτρολύτη αυξάνει τις ασυνέχειες στο αγώγιμο στρώμα – οι γνωστές και ως ξηρές ζώνες – κατά μήκος των οποίων παράγονται ηλεκτρικές τάσεις (stresses) που επαρκούν για να ιονιστεί ο αέρας και β) τα τόξα σε ένα αέριο, που από τη στιγμή που δημιουργούνται μπορούν εύκολα να επεκταθούν χωρίς εξασθένιση με σχετικά αργό διαχωρισμό των ηλεκτροδίων μεταξύ των οποίων εμφανίζονται.

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 παρεμβολών και 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 αυτο-διατηρείται και να διαδίδεται: τότε προκαλείται διάσπαση. Το τεχνικό πρόβλημα είναι ότι η επιφανειακή αγωγιμότητα που προκαλεί τη διάσπαση παραμένει, ακόμα κι όταν το τόξο έχει εξαλειφθεί από τη λειτουργία της προστασίας, γεγονός που επιτρέπει να ακολουθήσουν κι άλλες υπερπηδήσεις. [4].



*Σχήμα 1.17 : Εικόνα από University of Stellenbosch, South Africa*

#### **Στάδια της υπερπήδησης σε ένα μονωτήρα εξαιτίας της ρύπανσης**

Η ρύπανση, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, μπορεί να προκληθεί από διάφορες πηγές, όπως είναι η αιωρούμενη τέφρα, το αλάτι της θάλασσας, η σκόνη από τις βιομηχανίες κ.ά. Η εναπόθεση των ρύπων ελέγχεται από την αλληλεπίδραση διαφόρων δυνάμεων που επιδρούν ταυτόχρονα στα σωματίδια που τους αποτελούν (π.χ. της βαρύτητας, του ανέμου και των ηλεκτροστατικών δυνάμεων). Τα αγωγίμα συστατικά των ρύπων επηρεάζουν την τάση διάσπασης του μονωτήρα παρέχοντας, όταν αυτός βραχεί, ένα αγωγίμο στρώμα στην επιφάνειά του. Τα αδρανή συστατικά απ' την άλλη είναι το ποσοστό του στερεού υλικού που δεν διαλύεται, αλλά σχηματίζει ένα μηχανικό περίβλημα στο οποίο ενσωματώνεται το αγωγίμο στρώμα [14].

Υγρασία μπορεί να παραχθεί υπό συνθήκες ομίχλης ή πάχνης κατά τις πρωινές ώρες. Επίσης το ψιχάλισμα και η βροχή μπορεί να έχουν το ίδιο αποτέλεσμα. Έτσι, καταστάσεις που προειδοποιούν για πιθανή διάσπαση του μονωτήρα είναι οι εξής:

- ✓ Η πτώση σχεδόν καθαρού νερού, όπως σταγόνες, βροχή ή ομίχλη, σε ένα μονωτήρα, πάνω στον οποίο βρίσκεται ποσότητα ρύπανσης που περιλαμβάνει διαλυτά ιοντικά στοιχεία, όπως το κοινό αλάτι.

- ✓ Η εναπόθεση σταγονιδίων θαλάσσιας ή βιομηχανικής ομίχλης, ή άλλου συνδυασμού νερού και ηλεκτρολύτη.
- ✓ Η συγκέντρωση παγετού, παγετώδους ομίχλης ή πάγου στη βρώμικη επιφάνεια ενός μονωτήρα. Τότε, τα ιοντικά συστατικά των ρύπων ενεργούν, ώστε να μειώσουν το σημείο ψύξης του νερού κι έτσι επιτρέπουν την ύπαρξη υγρού διαλύματος στο σημείο επαφής των δύο επιφανειών.
- ✓ Η ένταξη ενός κυκλώματος που περιέχει υγρούς και βρώμικους μονωτήρες.
- ✓ Η έλευση μιας προσωρινής υπέρτασης, ή μιας μεταβατικής αιχμής, σε ένα μονωτήρα υγρό, βρώμικο και πιθανόν ήδη ενεργοποιημένο.

Από αυτές τις περιπτώσεις, η πρώτη είναι η πιο συνηθισμένη. Κυρίως σε ερημικές περιοχές, τα περιστατικά διασπάσεων σχετίζονται με περιόδους υγρασίας και πρωινής πάχνης, ενώ στις θαλάσσιες περιοχές οι επικίνδυνες ώρες είναι αυτές της ομίχλης με άπνοια. Ταυτόχρονη εναπόθεση νερού και διαλυμένων ουσιών συμβαίνει συνήθως σε καταιγίδες στην ξηρά.

Η περίπτωση της παγετώδους ομίχλης έχει προκαλέσει μερικά απ' τα πιο σοβαρά περιστατικά, όπως ήταν το 1962 τα πολλαπλά προβλήματα και η προσωρινή διακοπή στο δίκτυο μεταφοράς της Αγγλίας. Το στρώμα ηλεκτρολύτη που προκαλεί το πρόβλημα είναι κολλημένο πάνω στο μονωτήρα και απαιτείται η αφαίρεσή του με καθαρισμό. Η τέταρτη και η πέμπτη περίπτωση είναι λιγότερο συνηθισμένες [4].

### **Σχηματισμός ξηρών ζωνών**

Το στρώμα ηλεκτρολύτη που σχηματίζεται κατά μήκος του μονωτήρα μειώνει την επιφανειακή αντίσταση και ένα υπολογίσιμο ρεύμα διαρροής μπορεί πλέον να κυκλοφορήσει. Το επιφανειακό αυτό ρεύμα έχει σαν αποτέλεσμα την ωμική θέρμανση της επιφάνειας. Η αγωγιμότητα αρχικά αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά όταν φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή, η εξάτμιση του νερού γίνεται υπολογίσιμη και το διάλυμα γίνεται υπερκορεσμένο σε αλάτι. Η επιφάνεια αρχίζει να ξηραίνεται στις ζώνες με τη μεγαλύτερη διαφεύγουσα ισχύ και η αγωγιμότητα σ' αυτές τις ζώνες πέφτει γρήγορα, έως ότου μηδενιστεί. Η κατανομή της ροής του ρεύματος μεταβάλλεται, εντείνοντας την πλευρική ξήρανση και δημιουργώντας ξηρές ζώνες [14]. Καθώς οι ξηρές ζώνες είναι απομονωμένες, η επιφανειακή δραστηριότητα συνεχίζεται μέσα στην περιοχή της ζώνης.

## Μερικές εκκενώσεις και υπερπήδηση

Μετά τη δημιουργία μια ξηρής ζώνης, το μεγαλύτερο μέρος της τάσης που εφαρμόζεται στο μονωτήρα επιβάλλεται στην ξηρή ζώνη, λόγω της υψηλότερης αντίστασης που αυτή έχει. Υπερπήδηση λαμβάνει χώρα εάν μια εκκένωση ξηρής ζώνης επεκταθεί στην εναπομένουσα υγρή επιφάνεια του μονωτήρα. Οι μερικές εκκενώσεις εξαλείφονται λίγο πριν το μηδενισμό της τάσης. Εάν παρ' όλ' αυτά η τιμή της τάσης και του ρεύματος διαρροής είναι αρκετά υψηλή, οι εκκενώσεις μπορεί να επεκταθούν σε ολόκληρο το μήκος του μονωτικού και να αρχίσει το φαινόμενο της υπερπήδησης. Η ορατή δραστηριότητα στην επιφάνεια δεν σημαίνει πάντα ότι θα συμβεί υπερπήδηση, καθώς το ρεύμα διαρροής μπορεί να εξαλειφθεί εάν υπάρχει ανεπαρκής διαφεύγουσα ισχύς. Αν όμως το τόξο επεκταθεί και καταφέρει να καλύψει ένα κρίσιμο μήκος, τότε η διάσπαση είναι πρακτικά αναπόφευκτη.

Τα παραπάνω ισχύουν για τους μονωτήρες πορσελάνης. Στους πολυμερείς μονωτήρες υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις στη διαδικασία της διάσπασης. Τα στάδια αυτής είναι [13]:

- ✓ Εναπόθεση ρύπανσης: Πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο, όπως και στους μονωτήρες πορσελάνης.
- ✓ Υγρανση: Επειδή οι πολυμερείς μονωτήρες έχουν υδρόφοβες επιφάνειες, η υγρασία σχηματίζει σταγονίδια πάνω σ' αυτές, τα οποία κυλούν εξαιτίας της βαρύτητας. Όταν η βαρύτητα δεν είναι ικανή να ενισχύσει την κίνηση των σταγονιδίων, αυτά παραμένουν διαχωρισμένα στις θέσεις τους. Άλατα και/ή αγωγή ρύπανση διαλύονται στις σταγόνες νερού αυξάνοντας την αγωγιμότητα του υγρού.
- ✓ Σχηματισμός αγωγίμου στρώματος: Η παραμένουσα ξηρή επιφάνεια ρύπανσης σταδιακά υγραίνεται μέσω της μετακίνησης των σταγονιδίων. Αυτό σχηματίζει ένα αγωγίμο στρώμα ισχυρά ωμικής συμπεριφοράς με αποτέλεσμα το ρεύμα διαρροής να μεταβάλλεται από χωρητικό σε ωμικό.
- ✓ Θερμότητα (ωμική): Πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο, όπως και στους μονωτήρες πορσελάνης.



- ✓ Επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου σε υδροφοβική επιφάνεια: Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί την ένωση των σταγονιδίων, που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, σε μια μεγάλη σταγόνα νηματοειδούς μορφής. Ο μηχανισμός της υπερπήδησης διαρκεί περισσότερο σε μια υδροφοβική επιφάνεια εξαιτίας του χρόνου που απαιτείται για να σχηματιστεί μια αγώγιμη διαδρομή με νηματοειδείς σταγόνες.
- ✓ Μερικές εκκενώσεις σε υδροφοβικές επιφάνειες: Οι νηματοειδείς σταγόνες μειώνουν την απόσταση μεταξύ των άκρων του μονωτικού, αυξάνοντας το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των γειτονικών νηματοειδών σταγόνων. Όταν η τάση αποκτήσει κατάλληλη τιμή, τότε μπορεί να συμβούν επιφανειακές εκκενώσεις.
- ✓ Εξασθένιση της υδροφοβικότητας: Οι εκκενώσεις καταστρέφουν ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς γύρω από τα σταγονίδια και μειώνουν την υδροφοβικότητα, περιστρέφοντας ή σπάζοντας τις πολυμερείς αλυσίδες. Η απώλεια ή η εξασθένιση της επιφανειακής υδροφοβικότητας έχει ως αποτέλεσμα την εξάπλωση των σταγόνων και το σχηματισμό ενός συνεχούς αγώγιμου στρώματος, επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος διαρροής.
- ✓ Σχηματισμός ξηρής ζώνης: Οι ξηρές ζώνες σχηματίζονται όπως και στους μονωτήρες πορσελάνης. Η προκύπτουσα δραστηριότητα προκαλεί επιφανειακή διάβρωση, της οποίας ο ρυθμός εξαρτάται από τον τρόπο σχηματισμού του συγκεκριμένου υλικού και συμβάλλει στη γήρανση.
- ✓ Αποκατάσταση της υδροφοβικότητας: Η ολική ή μερική αποκατάσταση της υδροφοβικότητας είναι δυνατή μόνο αν το υλικό εκφορτιστεί ελεύθερα για ικανό χρονικό διάστημα. Η διαδικασία αποκατάστασης εξαρτάται από το υλικό, τον τρόπο σχηματισμού του, το σχεδιασμό του μονωτήρα και το περιβάλλον.
- ✓ Επανάληψη του κύκλου γήρανσης: Η επανάληψη του κύκλου γήρανσης προκαλεί επιπλέον ύγρανση και πιθανόν διάβρωση της επιφάνειας, φαινόμενα τα οποία ενισχύονται από χημικές αντιδράσεις και τοπική άνοδο της

θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια εκκένωσης η θερμοκρασία σε κάποια σημεία μπορεί να φτάσει τους 400°C.

- ✓ Υπερπήδηση: Η υπερπήδηση μπορεί να συμβεί, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως σε μονωτήρες πορσελάνης, εάν η επιφάνεια γίνει υδρόφιλη.

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

### **Τρόποι μετριασμού του φαινομένου της υπερπήδησης**

Για τους μονωτήρες πορσελάνης τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για να μειωθεί η συχνότητα των διασπάσεων είναι τα εξής:

- ✓ Επέκταση του μήκους: Πολυμερείς δίσκοι εγκαθίστανται ακριβώς πάνω από τους δίσκους του πορσελάνινου μονωτήρα, προκειμένου να αυξηθεί το μήκος ερπυσμού και να προστεθεί η ιδιότητα της υδροφοβικότητας.
- ✓ Πλύσιμο: Οι μονωτήρες είναι δυνατό να πλυθούν, είτε εντός λειτουργίας, είτε εκτός λειτουργίας, με τη χρήση νερού υπό υψηλή πίεση. Επειδή, όμως, το πλύσιμο των μονωτήρων αποτελεί μια δαπανηρή διαδικασία πρέπει να πραγματοποιείται κατόπιν σωστού προγραμματισμού.
- ✓ Πολύπλοκο σχήμα του μονωτικού υλικού: Είναι διαθέσιμοι μονωτήρες, με υψηλότερο κόστος, οι οποίοι, λόγω του σχήματός τους αντιστέκονται στην εναπόθεση ρύπανσης.
- ✓ Επιφανειακές επιστρώσεις: Γράσο ή πολυμερής επίστρωση εφαρμόζεται στην πορσελάνη προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητές της υπό συνθήκες ρύπανσης. Η βελτίωση των ιδιοτήτων της και η διάρκεια μέχρι να απαιτηθεί επανάληψη της επίστρωσης εξαρτώνται από την ποιότητα του επιστρώματος, την εφαρμογή του και τις τοπικές συνθήκες ρύπανσης.

- ✓ Υάλωση: Μία μη αγώγιμη ή ημιαγώγιμη υάλωση διατηρεί μια μεγάλη περιοχή της επιφάνειας ξηρή κατά τη διάρκεια της φυσικής ύγρανσης. Σε αυτού τους μονωτήρες, όμως, διαρκή ρεύματα διαρροής οδηγούν σε μεγάλες απώλειες ισχύος. Η φθορά της υάλωσης και η έκλυση θερμότητας είναι, επίσης, μεγάλα προβλήματα αυτών των μονωτήρων.

Στα πολυμερή υλικά σπάνια χρησιμοποιούνται πρόσθετα μέτρα για την αποφυγή διασπάσεων. Απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή κατά τη δημιουργία του υλικού και το σχεδιασμό του μονωτήρα. Τα πολυμερή μονωτικά υλικά είναι απαραίτητα να έχουν δύο αμυντικούς μηχανισμούς κατά της ρύπανσης και κατ' επέκταση της δημιουργίας διασπάσεων. Αυτοί είναι:

- ✓ 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.
- ✓ 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, τα υλικά που έχουν την τάση να ανακτούν την υδροφοβικότητά τους, πρέπει να αντέχουν περιόδους επιφανειακής δραστηριότητας χωρίς να υφίστανται σημαντική διάβρωση. Ένα πολυμερές υλικό, το οποίο δεν έχει καλή αντοχή στη διάβρωση, δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε περιοχή με έντονη ρύπανση, γιατί θα οδηγήσει 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.

### **Παρακολούθηση του ρεύματος διαρροής**

Το επίπεδο της ρύπανσης συνήθως καθορίζεται από τη μέτρηση της αγωγιμότητας ενός διαλύματος ρύπων, που αφαιρούνται από την επιφάνεια του μονωτήρα, σε αποσταγμένο νερό. Ένας τρόπος να ελεγχθεί το επίπεδο της ρύπανσης είναι μέσω του

καθορισμού του ESDD (Equivalent Salt Deposit Density – Ισοδύναμη Πυκνότητα Επικάθισης Αλατιού) σε  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Το μέγεθος αυτό εκφράζει την ισοδύναμη ποσότητα NaCl που πρέπει να διαλυθεί στην ίδια ποσότητα νερού, ώστε να επιτευχθεί η ίδια αγωγιμότητα με το διάλυμα ρύπων. Το ESDD ερμηνεύει μόνο το διαλυτό μέρος της ρύπανσης. Η μέτρηση του ESDD είναι μια έμμεση και στατική μέθοδος για τον προσδιορισμό της “κατάστασης” του μονωτήρα και παρέχει μόνο ένα στιγμιότυπο γι’ αυτήν.

Μια καλύτερη επιλογή είναι να ελέγχεται το ρεύμα διαρροής στους μονωτήρες, μέγεθος που μπορεί να σχετιστεί άμεσα με το πόσο κοντά είναι ο εκάστοτε μονωτήρας στη διάσπαση. Γενικά, το στρώμα ρύπανσης στους μονωτήρες σχηματίζεται κατά τη διάρκεια μηνών ή ετών, με ενδιάμεσες περιόδους μεγάλης υγρασίας. Ο έλεγχος του ρεύματος διαρροής κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων παρέχει έναν πιο άμεσο και αξιόπιστο τρόπο για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του μονωτήρα με ρύπανση. Μετά από αυτό θα είναι εφικτό να δούμε πώς η ρύπανση αυξάνει με το χρόνο, αλλά και την επίδραση της βροχής (φυσικός καθαρισμός) και να αποφασίσουμε για τον τεχνητό καθαρισμό ή πλύσιμο των μονωτήρων. Ο Πίνακα 1.3 δείχνει πώς το ρεύμα διαρροής αποτελεί ένδειξη για την κατάσταση του μονωτήρα [14].

Ρεύμα διαρροής	Συμπτώματα
0-2 mA	Δεν υπάρχουν ορατά ή ακουστικά αποτελέσματα
3-5 mA	Ελαφρύς θόρυβος
5-10 mA	Σπινθήρες ορατοί τη νύχτα
10-15 mA	Κάψιμο των ξύλινων βραχιόνων στήριξης
15-100 mA	Έντονος σπινθηρισμός
Πάνω από 100 mA	Ακαριαία υπερπήδηση

*Πίνακας 1.4 : Το ρεύμα διαρροής ως ένδειξη κατάστασης του μονωτήρα*

Σε κάποιες περιπτώσεις που η ρύπανση συσσωρεύεται στην επιφάνεια του μονωτήρα και αμέσως μετά ακολουθεί βρέξιμο αυτής, δεν μεσολαβεί αρκετό χρονικό διάστημα για να γίνει καθαρισμός. Σ’ αυτήν την περίπτωση ο real-time έλεγχος του ρεύματος διαρροής θα μπορούσε να προειδοποιεί για την έλευση της κρίσιμης αυτής κατάστασης και το φορτίο θα μπορούσε να μοιράζεται σε άλλες γραμμές, αν βεβαίως υπάρχει τέτοια εναλλακτική περίπτωση [14].

Κατανομή τάσης επί αλυσοειδών μονωτήρων

**2.1 Κατανομή της τάσης επί αλυσοειδών μονωτήρων**

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους πυλώνες χρησιμοποιούνται οι αλυσοειδείς μονωτήρες (insulator string). Ο αριθμός των μεμονωμένων μονωτήρων που χρησιμοποιείται σε κάθε αλυσίδα εξαρτάται από το επίπεδο της τάσης, στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός. Όσο πιο μεγάλη είναι η τάση, τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι ο αριθμός των σε σειρά μονωτήρων που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία του αλυσοειδούς μονωτήρα. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, ανάμεσα στους δύο οπλισμούς του μονωτήρα (cap and pin) υπάρχει το μονωτικό, με αποτέλεσμα ο μονωτήρας να μπορεί να θεωρηθεί και ως ένας στοιχειώδης πυκνωτής. Έτσι, λοιπόν, γίνεται αντιληπτό πως ένας αλυσοειδής μονωτήρας μπορεί να εκληφθεί και ως μια εν σειρά συνδεσμολογία χωρητικοτήτων, όπου κάθε απλός μονωτήρας λειτουργεί ως ένας μεμονωμένος πυκνωτής. Λογικό θα ήταν η τάση  $V$  ανάμεσα στη γραμμή μεταφοράς και στη γη να ισομοιράζεται με ένα λόγο  $\Delta V = \frac{V}{n}$ , όπου  $n$  ο αριθμός των απλών αναρτημένων μονωτήρων. Με αυτόν τον τρόπο η κατανομή της τάσης θα ήταν η πλέον συμφέρουσα, καθώς θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε πλήρως την διηλεκτρική αντοχή μεταξύ των όμοιων δίσκων. Στην πράξη η κατανομή της τάσης κατά μήκος της αλυσού διαφέρει από την ομοιόμορφη ιδανική, και το φαινόμενο αποδίδεται στις παράσιτες χωρητικότητες που εμφανίζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα ως προς γη και ως προς τον αγωγό της υψηλής τάσης [1]. Στην περίπτωση που θεωρήσουμε τον αλυσοειδή μονωτήρα χωρίς ρύπανση υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, με τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανομή της τάσης επ' αυτού.

### ✓ Μέθοδος Πρώτη

Ονοματοθέτοντας όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, με C τη χωρητικότητα ενός απλού δίσκου και C<sub>e</sub>, C<sub>h</sub> τις παράσιτες χωρητικότητες της άρθρωσης μεταξύ δύο γειτονικών δίσκων προς το γειωμένο πυλώνα και προς τον αγωγό υψηλής τάσης αντίστοιχα, τότε η τάση ΔV<sub>i</sub> που παρουσιάζεται στον i-στό μονωτήρα της αλυσού (αρχίζοντας η αρίθμηση από τον πλησιέστερο προς τον πυλώνα μονωτήρα) ανηγμένη σε ολική τάση της αλυσού V δίδεται από τη σχέση που είναι γνωστή ως τύπος Schwaiger-Sitorinski [1]

$$\frac{\Delta V_i}{V} \cdot 100\% = \frac{100}{(C_e + C_h)} \cdot \frac{1}{\sinh(n \cdot \gamma)} \cdot F_i \quad (2.1)$$

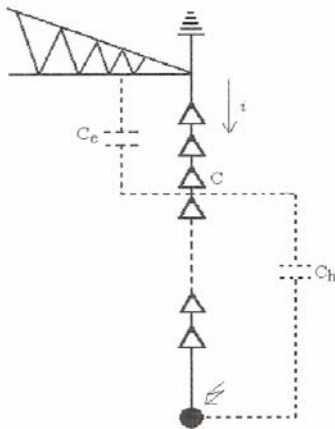
$$\text{όπου } \gamma = \sqrt{\frac{C_e + C_h}{C}} \quad (2.2)$$

$$\text{και } F_i = C_e \{ \sinh(i\gamma) - \sinh[(i-1)\gamma] \} - C_h \{ \sinh[(n-i)\gamma] - \sinh[(n-i+1)\gamma] \} \quad (2.3)$$

Το δυναμικό V<sub>i</sub> έναντι γης της i-οστής άρθρωσης (η άρθρωση ανάμεσα στον i-οστό και στον (i+1) απλό δισκοειδή μονωτήρα) δίδεται από την παρακάτω σχέση ως συνέπεια της σχέσης (2.1) :

$$\frac{V_i}{V} \cdot 100\% = \frac{100}{1+m} \cdot \left\{ 1 + m \cdot \frac{\sinh(i\gamma)}{\sinh(n\gamma)} - \frac{\sinh[(n-i)\gamma]}{\sinh(n\gamma)} \right\} \quad (2.4)$$

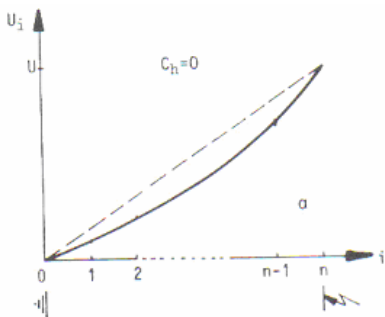
$$\text{όπου } m = \frac{C_e}{C_h} \quad (2.5)$$



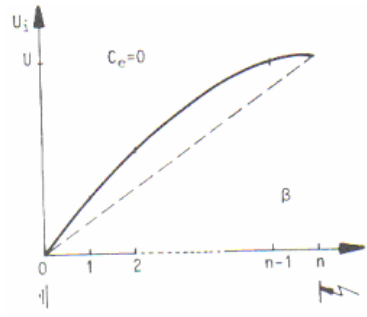
Σχήμα 2.1 : Αλυσοειδής μονωτήρας [1]

Από τη σχέση μεταξύ των τιμών των χωρητικοτήτων  $C$ ,  $C_e$ ,  $C_h$  εξαρτάται κατά πόσο αυξάνει η ανά δισκοειδή μονωτήρα καταπόνηση όταν πλησιάζουμε στον αγωγό υψηλής τάσης ή στο γειωμένο πυλώνα. Εάν για παράδειγμα η χωρητικότητα  $C_h$  (δηλαδή αυτή προς υψηλή τάση) είχε μηδενική τιμή, τότε η καταπόνηση αυξάνεται καθώς πλησιάζουμε προς την πλευρά υψηλής τάσης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2 [1], η καμπύλη  $V_i=f(i)$  απομακρύνεται περισσότερο από την ιδανική καμπύλη που είναι γραμμική, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος  $(C_e/C)$ .

Αντίθετα εάν είχαμε την παράσιτη χωρητικότητα  $C_e=0$ , τότε η καταπόνηση του πρώτου δίσκου (δηλαδή του πλησιέστερου προς τη γη) θα ήταν μέγιστη και θα ελαχιστοποιούνταν η καταπόνηση του πλησιέστερου προς τον αγωγό υψηλής τάσης μονωτήρα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3, η απόκλιση από την ιδανική γραμμική μεταβολή μεγαλώνει, καθώς αυξάνει ο λόγος χωρητικοτήτων  $(C_h/C)$ .



Σχήμα 2.2: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης όταν  $C_h=0$ .



Σχήμα 2.3: Κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης όταν  $C_e=0$ .

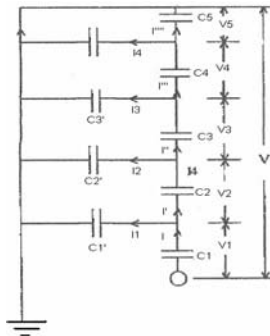
Στην περίπτωση που εμφανίζονται και οι δύο χωρητικότητες,  $C_e$  και  $C_h$ , η καμπύλη  $V_i=f(i)$  μπορεί να προκύψει από υπέρθεση δύο αναλόγων προς τα παραπάνω σχήματα καμπύλων. Οι καμπύλες που θα χρησιμοποιηθούν για την περίπτωση αυτή εξάγονται από την σχέση 2.1 ή τη σχέση 2.4, θέτοντας στην πρώτη  $C_h=0$ , ενώ στη δεύτερη θέτοντας  $C_e=0$ .

Συνήθεις περιοχές τιμών για τις παράσιτες χωρητικότητες είναι  $C=20\dots70\text{pF}$ ,  $C_e=4\dots5\text{pF}$  και  $C_h=0.5\dots1\text{pF}$ . Από το παραπάνω κατανοούμε πως η παράσιτη χωρητικότητα προς γη είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν προς την υψηλή τάση, και για το λόγο αυτό η

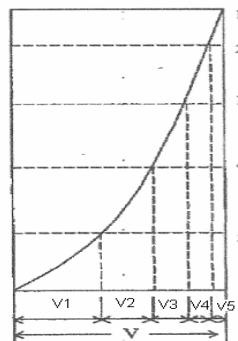
ανά δισκοειδή μονωτήρα επιβαλλόμενη τάση είναι αυξανόμενη, όσο πλησιάζουμε προς τον αγωγό υψηλής τάσης. [1]

### ✓ Μέθοδος Δεύτερη

Έστω, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, θεωρούμε τις χωρητικότητες των σε σειρά δισκοειδών μονωτήρων  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  και τις παράσιτες χωρητικότητες ως προς γη  $C_1', C_2', C_3', C_4'$ . Τότε εάν υποθέσουμε, πως ένα αρχικό ρεύμα  $I$  ρέει μέσω του μονωτήρα 1, ήτοι διαρέει την χωρητικότητα  $C_1$ , τότε αυτό το ρεύμα διαμοιράζεται σε ένα ρεύμα  $I_1$  προς την παράσιτη χωρητικότητα ως προς γη και σε ένα άλλο ρεύμα  $I'$  που ρέει προς το υπόλοιπο κομμάτι του αλυσοειδούς. Το κομμάτι ρεύματος  $I'$  διαρέει με τη σειρά του την παράσιτη χωρητικότητα προς γην  $C_2'$  και ένα άλλο κομμάτι  $I''$  ρέει προς τον υπόλοιπο μονωτήρα. Με τον τρόπο αυτό όλο και μικρότερο κομμάτι ρεύματος άπο το αρχικό ρεύμα  $I$  που ρέει προς το μονωτήρα διαμοιράζεται προς τους μονωτήρες πιο κοντά προς τον πυλώνα που είναι γειωμένος και αυτό έχει ως συνέπεια η τάση επί μονωτήρων να είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4 : Ισοδύναμο κύκλωμα αλυσοειδούς μονωτήρα [19].



Σχήμα 2.5 : Κατανομή τάσης επί του αλυσοειδούς μονωτήρος του σχήματος 2.4 [19].



Η μέθοδος μπορεί φυσικά να εφαρμοστεί και για  $n$  αριθμό μονωτήρων μεγαλύτερο του 5, όπως επιλέξαμε στο παρόν παράδειγμα. Εάν θεωρήσουμε την τάση στον πιο κοντινό προς τον αγωγό μονωτήρα ως  $V_1$  και αντίστοιχα οι υπόλοιποι  $n$  μονωτήρες έχουν τάσεις  $V_2, V_3, \dots, V_n$  τότε έχουμε [19] :

$$V_i = V \frac{2 \sinh(1/2\sqrt{k}) \cdot \cosh[(n-i + (1/2)) \cdot \sqrt{k}]}{\sinh(n\sqrt{k})} \quad (2.6)$$

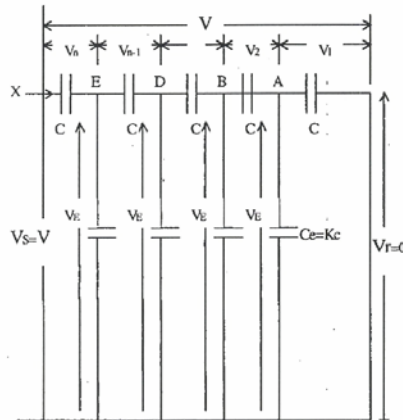
Η μεγαλύτερη τάση είναι :

$$V_1 = V \frac{2 \sinh(1/2\sqrt{k}) \cdot \cosh[(n - (1/2)) \cdot \sqrt{k}]}{\sinh(n\sqrt{k})} \quad (2.7)$$

Και η αποδοτικότητα του αλυσοειδούς (string efficiency) είναι

$$E = \frac{V}{nV_1} = \frac{\sinh(n\sqrt{k})}{2n \sinh(1/2\sqrt{k}) \cdot \cosh[(n - 1/2)\sqrt{k}]} \quad (2.8)$$

### ✓ Μέθοδος Τρίτη



Σχήμα 2.6: Αλυσοειδής μονωτήρας [19]

Αυτή είναι μια γενική μέθοδος για τον υπολογισμό της κατανομής της τάσης στην περίπτωση που ο αριθμός των μεμονωμένων μονωτήρων είναι αρκετά μεγάλος. Στη συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται η παραδοχή  $C_e$  ως αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.6. Εάν  $x$  ο αριθμός των μονωτήρων μετρούμενος από την άκρη της γραμμής από την υψηλή τάση τότε έχουμε [19]:

$$V_x = V_r \cosh x\gamma + I_r Z_c \sinh x\gamma \quad (2.9)$$

$$\text{με } V_r = 0 \text{ έχουμε : } V_x = I_r Z_c \sinh x\gamma \quad (2.10)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z/Y}, \quad \gamma = \sqrt{ZY}, \quad Z = 1/j\omega C, \quad Y = j\omega C_e = j\omega kC \quad (2.11)$$

Οπότε  $\gamma = \sqrt{1/j\omega C * j\omega kC} = \sqrt{k}$  και η παραπάνω εξίσωση γίνεται :

$$V_x = I_r Z_0 \sinh \gamma x. \quad (2.12)$$

Εαν ο αριθμός των μονωτήρων επί του αλυσοειδούς είναι  $n$  έχουμε :

$$V = V_s = I_r Z_c \sinh n \sqrt{k} \quad (2.13)$$

$$\frac{V_x}{V} = \frac{\sinh x\sqrt{k}}{\sinh n\sqrt{k}} \quad \text{και} \quad V_A = V \frac{\sinh \sqrt{k}}{\sinh n\sqrt{k}}, \quad V_B = V \frac{\sinh 2\sqrt{k}}{\sinh n\sqrt{k}} \quad (2.14)$$

$$V_1 = V_A - V_r = V_A, \quad \text{άρα} \quad V_1 = V \frac{\sinh \sqrt{k}}{\sinh n\sqrt{k}} \quad (2.15)$$

$$V_2 = V_B - V_A \quad (2.16)$$

$$V_n = V \frac{\sinh n\sqrt{k} - \sinh(n-1)\sqrt{k}}{\sinh(n\sqrt{k})} \quad (2.17)$$

Στην περίπτωση αυτή η αποδοτικότητα του αλυσοειδούς μονωτήρα είναι :

$$E = V/nV_n = \frac{\sinh n\sqrt{k}}{n(\sinh(n\sqrt{k}) - \sinh[(n-1)\sqrt{k}])} \quad (2.18)$$

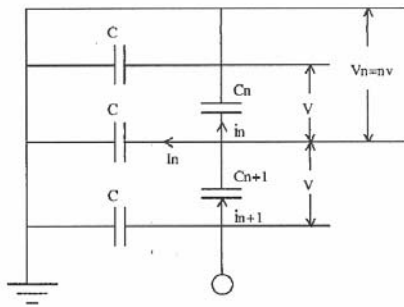
## 2.2 Μέθοδοι ισοκατανομής της επιβαλλόμενης τάσης μονωτήρα

Ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μονωτήρα θεωρείται πολύ σημαντικός στις γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων. Η δύναμη που ασκεί ένα ισχυρό πεδίο γύρω από ένα μονωτήρα μπορεί να προκαλέσει πλειάδα προβλημάτων, όπως πρόωμη γήρανση του μονωτήρα, μείωση της υδροφοβικότητας του, φαινόμενα τριγμών και άλλων ειδών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, φυσική διάβρωση του μονωτικού και

ενδεχομένως να οδηγήσει σε καταστροφή του υλικού. Ένας από τους τρόπους διατήρησης του πεδίου σε χαμηλά επίπεδα είναι μεσώ της διατήρησης μια σχετικής ομοιομορφίας στην κατανομή της τάσης επί του μονωτήρα. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι.

✓ **Μέθοδος Πρώτη: Διαβάθμιση των μονάδων**

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως εαν η χωρητικότητα του μονωτήρα πιο κοντά προς τη γραμμή μεταφοράς μειωθεί ή αυξηθούν σταδιακά οι χωρητικότητες των μονωτήρων που είναι πιο κοντά στον πυλώνα, αυτό θα επιφέρει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της τάσης επί του αλυσοειδούς. Η συγκεκριμένη τεχνική φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 : Ισοκατανομή τάσης με διαβάθμιση των μονάδων[19]

Με σωστή διαβάθμιση των χωρητικοτήτων είναι δυνατό να επέλθει πλήρης ισοκατανομή της τάσης επί του μονωτήρα. Θεωρώντας ίσες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7, τάσεις επί κάθε ξεχωριστού μονωτήρα, αμελώντας τις παράσιτες χωρητικότητες ανάμεσα στα μεταλλικά μέρη των μονωτήρων και τον αγωγό υψηλής τάσης και λαμβάνοντας τη χωρητικότητα του n-οστού μονωτήρα ίση με  $C_n$  έχουμε:

$$i_{n+1} = I_n + i_n \tag{2.19}$$

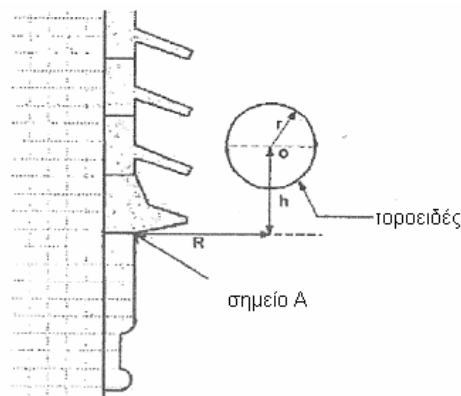
$$Vj\omega C_{n+1} = nVj\omega C + Vj\omega C_n \tag{2.20}$$

$$C_{n+1} = nC + C_n \tag{2.21}$$

Όπως καταδεικνύεται από τη μέθοδο για την εφαρμογή ισοκατανομής της τάσης επί του μονωτήρα, απαιτείται σειρά μονωτήρων με διαφορετικές χωρητικότητες. Κάτι τέτοιο

είναι πρακτικά ανεφάρμοστο, καθώς απαιτεί πολύ μεγάλη ποικιλία διαφορετικών μονωτήρων για τη σύνθεση κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα και στην πραγματικότητα έχει εφαρμογή μόνο στην περίπτωση γραμμών μεταφοράς πολύ υψηλής τάσης.

✓ **Μέθοδος Δεύτερη: Εφαρμογή τοροειδούς γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα**



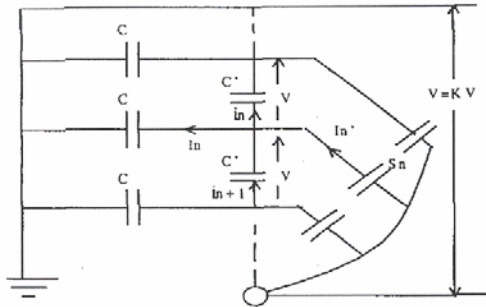
Σχήμα 2.8: Γεωμετρία μη κεραμικού μονωτήρα με εφαρμογή τοροειδούς[20].

Στη μέθοδο αυτή η κατανομή της τάσης ελέγχεται από την εφαρμογή ενός τοροειδούς (grading ring, corona ring ή guard ring) το οποίο είναι συνήθως ένας κυκλικός μεταλλικός δακτύλιος που εφαρμόζεται στη βάση του αλυσοειδούς μονωτήρα και συνδέεται με τη γραμμή. Η εφαρμογή του δακτυλίου αυτού έχει ως επακόλουθο την αύξηση των χωρητικότητων ανάμεσα στα μεταλλικά μέρη των μονωτήρων και της γραμμής μεταφοράς. Οι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το μονωτήρα και σχετίζονται με το τοροειδές, είναι η διάμετρος του δακτυλίου, η διάμετρος του μεταλλικού στελέχους του τοροειδούς και, τέλος, η θέση τοποθέτησης του. Τροποποιώντας τις παραμέτρους αυτές μπορούμε να επιτυγχάνουμε διάφορες τιμές χωρητικότητας για κάθε μονωτήρα της αλυσού. Ανάλογα το μέγεθος και τη λειτουργία του μονωτήρα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά του τοροειδοδούς, ώστε να παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά ο μονωτήρας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9, θεωρώντας τις χωρητικότητες ανάμεσα σε κάθε μονωτήρα ίδιες, τις χωρητικότητες ανάμεσα στην ακίδα (pin) κάθε μονωτήρα και τη γραμμή ως  $S_n$  και την τάση σε κάθε μονωτήρα σταθερή και ίση με  $V$  έχουμε :

$$I_n = i_{n+1}, I_n = I'_n \quad (2.22)$$

$$\text{και } nVj\omega C = (K-n)Vj\omega S_n \quad (2.23)$$

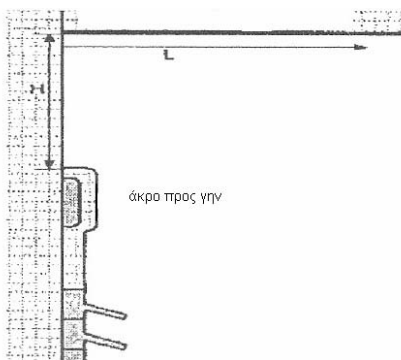
$$\text{όπου } S_n = \frac{n}{K-n} C \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.9: Παράσιτες χωρητικότητες με εφαρμογή τοροειδούς[19].

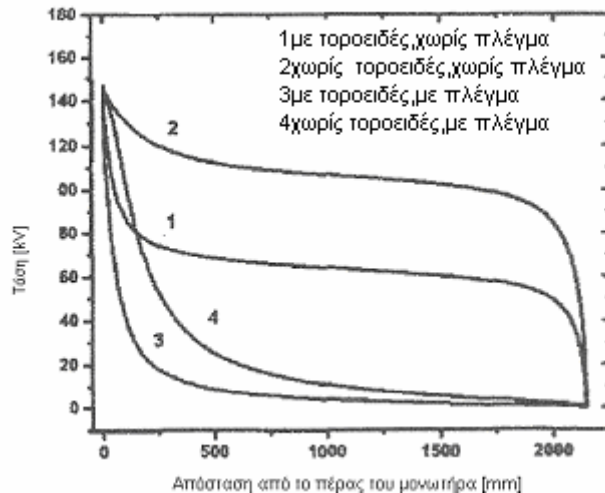
Με τη μέθοδο αυτή είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να έχουμε ισοκατανομή της τάσης επί του αλυσοειδούς μονωτήρα εξαιτίας του προβλήματος της προσαρμογής του σχήματος του τοροειδούς, ώστε να λαμβάνουμε την κατάλληλη τιμή του  $S$ , όμως είναι μια πολύ ευρέως εφαρμόσιμη μέθοδος εξαιτίας της απλότητας που τη χαρακτηρίζει και των σημαντικών βελτιώσεων που αυτή επιφέρει.

✓ **Μέθοδος Τρίτη: Επίπεδος πυλώνας προσομοίωσης (plane simulation tower)**



Σχήμα 2.10 : Μοντέλο μη κεραμικού μονωτήρα στο άκρο γραμμής.[20]

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούμε να επιτύχουμε τα ίδια αποτελέσματα με την εφαρμογή τοροειδούς. Έτσι, μπορούμε να ομαλοποιήσουμε το πεδίο καθώς και την κατανομή της τάσης επί του αλυσοειδούς.



Σχήμα 2.11: Κατανομή της τάσης με εφαρμογή τοροειδούς-πλέγματος[20].

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή της τάσης και την ομαλοποίηση του πεδίου γύρω από τον αλυσοειδή, εν σχέσει με την εφαρμογή του πλέγματος είναι οι διαστάσεις του πλέγματος και η απόσταση από το άκρο του μονωτήρα. Φυσικά, όπως φαίνεται και παραπάνω ένας συνδυασμός των δύο μεθόδων μας επιτρέπει, μέσω κατάλληλης ρύθμισης των παραμέτρων για τις δύο αυτές εφαρμογές, τη βέλτιστη λειτουργία του μονωτήρα.

### 2.3 Αποδοτικότητα του μονωτήρα (String Efficiency)

Οι μονωτήρες κοντά στη γραμμή, όπως αναφέραμε παραπάνω, καταπονούνται περισσότερο από αυτούς πιο κοντά στον πυλώνα. Έτσι, το υλικό των πρώτων μονωτήρων καταπονείται στο μέγιστο της επιτρεπόμενης αντοχής τους, οδηγώντας σε μια 'σπατάλη' μονωτικού υλικού στην άκρη προς τον πυλώνα. Ένα μέσο υπολογισμού του βαθμού χρησιμοποίησης του μονωτικού υλικού είναι η αποδοτικότητα του μονωτήρα (string efficiency) και ορίζεται ως η συνολική τάση επί του αλυσοειδούς δια της εφαρμοζόμενης τάσης επί του πλησιέστερου προς τη γραμμή μονωτήρα.

Ο συντελεστής αποδοτικότητας  $k$  του αλυσοειδούς δε μπορεί ποτέ πρακτικά να γίνει ίσος με 100% γιατί δεν είναι εύκολο να έχουμε πλήρη ομοιομορφία επί του μονωτήρα. Με τη βελτίωση του συντελεστή αποδοτικότητας μειώνουμε το βαθμό μη-χρησιμοποίησης μονωτικού υλικού. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές.

- ✓ Μείωση των παράσιτων χωρητικοτήτων κάθε μονάδας του αλυσοειδούς.

Για το σκοπό αυτό αυξάνεται το συνολικό μήκος του μονωτήρα. Λόγω περιορισμών που αφείλονται στη μηχανική αντοχή των μονωτήρων, αλλά και στο κόστος κατασκευής του εξοπλισμού ( πυλώνες και μονωτήρες ), ο συντελεστής  $k$  δεν δύναται να πέσει κάτω από την τιμή 0,1 [19].

- ✓ Διαβάθμιση των χωρητικοτήτων των μονωτήρων.

Αυτό συνεπάγεται αύξηση των χωρητικοτήτων, οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα προς τον πυλώνα και φθίνουν αναλογικά, καθώς κινούμαστε προς τον αγωγό υψηλής τάσης. Θεωρητικά η τάση επί κάθε μονωτήρα ξεχωριστά μπορεί να εξισωθεί πλήρως με σωστή διαβάθμιση, παρόλα αυτά σε πρακτικό επίπεδο κάτι τέτοιο μπορεί να θεωρηθεί ανέφικτο εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας διαθέσιμων μονωτήρων που απαιτείται, πράγμα το οποίο δε συμβαδίζει με τα δεδομένα της αγοράς, όπου υπάρχουν συγκεκριμένοι τύποι μονωτήρων [19].

- ✓ Εφαρμογή τοροειδούς και πλέγματος γύρω από το μονωτήρα [19].

Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον αποτελεσματική, καθώς συνδυάζει την χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων για την εξίσωση του δυναμικού και αυξάνει την αποδοτικότητα του μονωτήρα. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το οικονομικό της κόστος.

Μαθηματικά μοντέλα μονωτήρων και πειράματα

**3.1 Γενικά**

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, την ανάπτυξη μερικών εκκενώσεων και τη διάδοση των τόξων κατά μήκος της επιφάνειας των μονωτήρων, τα οποία μπορεί τελικά να επεκταθούν σε ολόκληρο τον μονωτήρα.

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

**3.2 Εύρεση των τιμών  $A$  και  $n$  του στατικού τοξού**

Τα φαινόμενα σχηματισμού τόξου, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε ρυπασμένες επιφάνειες, είναι αρκετά σύνθετα. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να καταστεί δυνατή η μαθηματική επίλυσή τους είναι απαραίτητη η απλοποίησή τους με βάση ορισμένες υποθέσεις και προσεγγίσεις. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος, η οποία δεν επιτρέπει κάποια ακριβή μοντελοποίηση του φαινομένου, πηγάζει από την ανομοιομορφία στη μορφή των μονωτήρων, από τις διαφορές που παρουσιάζει κάθε είδος ρύπανσης, τη μεταβολή της επιφανειακής ειδικής αντίστασης λόγω των θερμικών διαδικασιών και της ανομοιομορφίας ύγρανσης, την ανομοιομορφία των τόξων που σχηματίζονται στην περιοχή της επιφάνειας των μονωτήρων, του πολλαπλασιασμού των τόξων, της επίδρασης των παραμέτρων του κυκλώματος τροφοδοσίας στη συμπεριφορά των μονωτήρων κ.α. Η τάση λοιπόν υπερπήδησης ενός ρυπασμένου μονωτήρα είναι μια στατιστική μεταβλητή, η οποία χαρακτηρίζεται



από σημαντική διασπορά, ακόμη και υπό ελεγχόμενες συνθήκες [5].

Στη βιβλιογραφία έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες, ώστε να εξομοιωθεί το φυσικό φαινόμενο της υπερπήδησης σε ένα μονωτήρα με κάποιο, ικανό να το περιγράψει, μοντέλο, το οποίο στηρίζεται σε μαθηματικές σχέσεις. Λόγω της προαναφερθείσας πολυπλοκότητας του φαινομένου, τα διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί εμπεριέχουν 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 και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και στην ερμηνεία και παρουσίαση τους, αλλά δεν μπορεί να αντικαταστήσει την πειραματική μέτρηση.

Υπάρχουν δύο βασικά σημεία στη μοντελοποίηση του φαινομένου σχηματισμού τόξου σε ρυπασμένες επιφάνειες: Από τη μία πλευρά είναι η εύρεση της ελάχιστης τάσης που είναι απαραίτητη για να στηρίξει μία μερική εκκένωση που δημιουργείται εν σειρά με την αγεφύρωτη ρυπασμένη επιφάνεια μεταβλητού μήκους, και το δεύτερο βασικό στοιχείο είναι η ανάπτυξη ενός κριτηρίου ικανού να περιγράψει τη διάδοση τόξων κατά μήκος της υγρής επιφάνειας των μονωτήρων. Είναι προφανές ότι εάν το τόξο επεκταθεί σε τέτοιο μήκος, ώστε η εφαρμοζόμενη τάση να μην είναι πλέον επαρκής να το στηρίξει, τότε το τόξο αποσβένει και η υπερπήδηση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη συγκεκριμένου μηχανισμού επιτρέπει την επιμήκυνση του τόξου, 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, μειώνοντας, με αυτό τον τρόπο, τον κίνδυνο υπερπήδησης. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει γίνει ιδιαίτερη προσπάθεια με κατεύθυνση τη διατύπωση μιας γενικής έκφρασης για την εύρεση της ελάχιστης τάσης, η οποία είναι απαραίτητη να στηρίξει μία μερική εκκένωση, αλλά πολύ λίγα βήματα έχουν γίνει προς την κατεύθυνση της ποσοτικοποίησης του μηχανισμού διάδοσης τόξων. Αυτό απορρέει από την έλλειψη λεπτομερούς γνώσης των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη μετακίνηση τόξων [21].

Βασικές σταθερές οι οποίες περιγράφουν τα χαρακτηριστικά ενός τόξου είναι οι αριθμοί  $n$  και  $A$ . Ο ακριβής ποσοτικός τους προσδιορισμός δεν είναι εύκολος, αν και

σημαντική έρευνα από διάφορα ερευνητικά κέντρα έχει γίνει επί του θέματος, με συνέπεια τη χρήση προσεγγιστικών τιμών στα διάφορα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη των τόξων. Για τόξα που λαμβάνουν χώρα στον αέρα οι παραπάνω σταθερές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών  $0,2 \leq n \leq 1$  και  $20 \leq A \leq 300$ . Στην πορεία των ερευνών, οι σταθερές αυτές προσδιορίστηκαν με διάφορους τρόπους και τα όρια τροποποιήθηκαν σε  $0,3 \leq n \leq 1$  και  $50 \leq A \leq 400$ .

Εντούτοις πολλές φορές ένα μαθηματικό μοντέλο λαμβάνει υπόψιν του τη ρύπανση επί του μονωτήρα, η οποία έχει κάθε φορά διαφορετική χημική σύσταση λόγω διαφορετικής προέλευσης ρύπανσης. Έτσι η βέλτιστη επιλογή των χαρακτηριστικών σταθερών  $A$ ,  $n$  του τόξου θα εξαρτάται από την χημική σύσταση της ρύπανσης. Στην παρούσα μελέτη διεξοδική πειραματική έρευνα έγινε για τέσσερις τύπους ηλεκτρολυτών:  $NaCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $FeCl_3$  και  $CuSO_4$  [22]. 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 3.1.

<b>Ρύπανση</b>	<b><math>A</math></b>	<b><math>n</math></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 3.1: Σταθερές  $A$  και  $n$  για διάφορους τύπους ηλεκτρολυτών [22]*

Ο πίνακας 3.2 καταδυκνείει τις μελέτες από διάφορους ερευνητές έως σήμερα με σκοπό την εύρεση των δύο αυτών σταθερών.

<b>a/a</b>	<b>Ερευνητές</b>	<b>A</b>	<b>n</b>	<b>Τάση τροφοδοσίας</b>	<b>Μέσο διάδοσης</b>
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	Claveri P. 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	R. Sunder Rajan et al. (1993)	60 63	0,80 0,50	DC	Αέρας
18	R.P. Sign et al. (1993)	31 έως 100	0,43 έως 0,98	AC	Αέρας
19	H.G.Gopal et al. (1995)	60 100	0,25 1,20	NS	Αέρας
20	Chaurasia D.C. et al. (1996)	50 100	0,25 έως 1,10	AC	Αέρας
21	Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π	131,5 124,8	0,374 0,409	AC	Αέρας

Πίνακας 3.2: Προτεινόμενες τιμές των A, n από διάφορους ερευνητές [22].

### 3.3 Πειράματα και μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα του γενετικού αλγορίθμου.

#### 3.3.1 Πειράματα Alston και Wilkins

Ο Wilkins [23] 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 [24] έλεγξε την ηλεκτρική συμπεριφορά μονωτήρα γυαλιού μήκους 12cm ο οποίος είχε ρυπανθεί με υγρή βιομηχανική ρύπανση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στους πίνακες 3.3 και 3.4, 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 3.3: Αποτελέσματα πειράματος Wilkins [25].

$a/a$	$r_p$ (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 3.4: Αποτελέσματα πειράματος Alston [26].

### 3.3.2 Πειράματα von Cron

Ο von Cron [24] 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 3.5.

<b>a/a</b>	<b>r<sub>p</sub> (kΩ/cm)</b>	<b>Κρίσιμη Τάση V<sub>c</sub> (kV)</b>
<b>1</b>	0,647	34,1
<b>2</b>	0,710	39
<b>3</b>	0,975	41,3
<b>4</b>	1,12	49,5
<b>5</b>	1,67	61,7

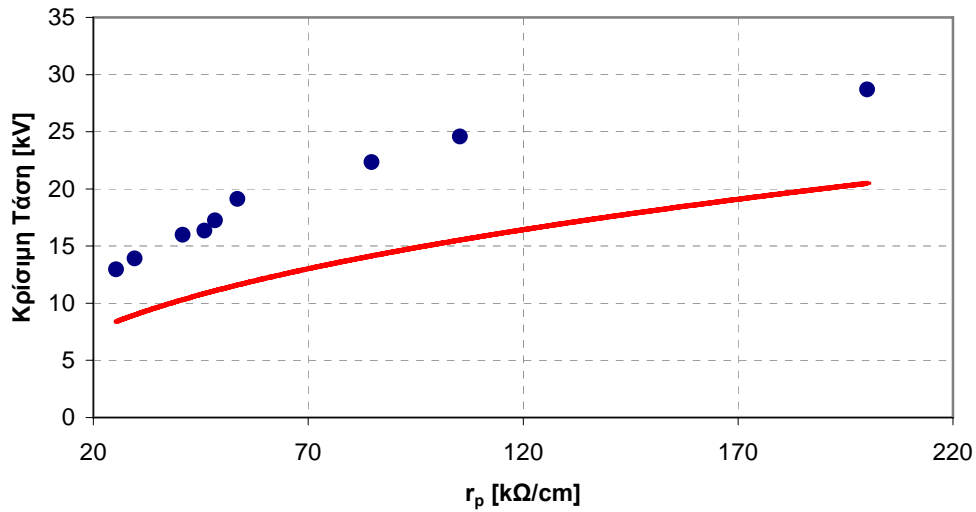
Πίνακας 3.5: Πειραματικά αποτελέσματα von Cron

### 3.3.3 Μοντέλο Neumarker-Rizk

Σύμφωνα με το μοντέλο που πρότειναν οι Neumarker και Rizk [21] η τάση υπερπήδησης ενός μονωτήρα μήκους  $L$  θα δίνεται

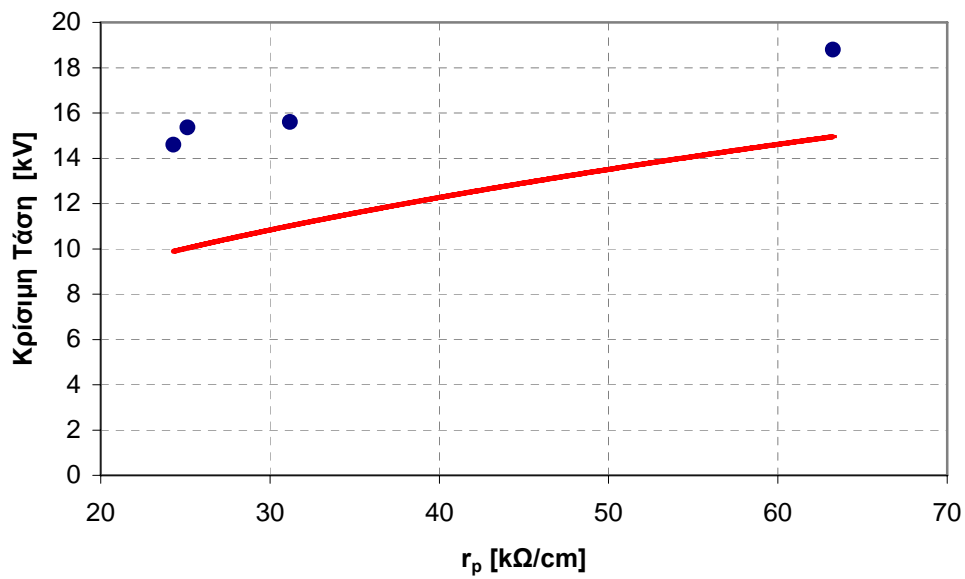
$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \cdot L \quad (3.1)$$

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 3.1 ενώ στο διάγραμμα 3.2 γίνεται σύγκριση με το πείραμα του Alston.



Διάγραμμα 3.1: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων Wilkins για  $A=63$  και  $n=0,76$

- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Neumarker-Rizk

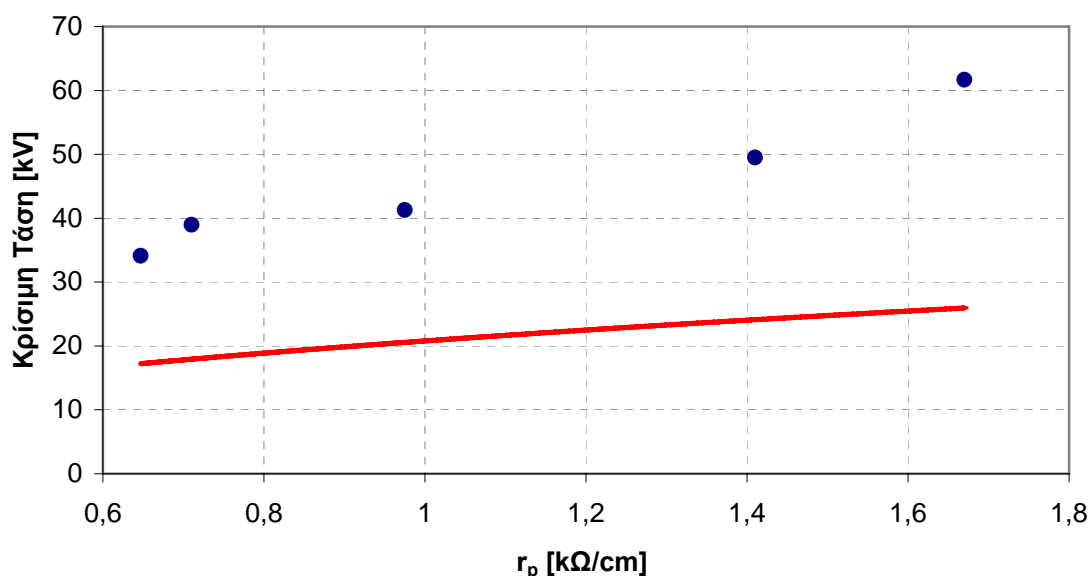


Διάγραμμα 3.2: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων Alston για  $A=63$  και  $n=0,76$

- 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.

Εφαρμόζοντας το μοντέλο των Neumarker και Rizk [21] (σχέση 3.1) για τις σταθερές  $A$  και  $n$  που είχαν προτείνει ( $A=63$ ,  $n=0,76$ ) και συγκρίνοντας το με τα πειραματικά αποτελέσματα του von Cron, προκύπτει το διάγραμμα 3.3.



Διάγραμμα 3.3: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Neumarker-Rizk και πειραμάτων von Cron για  $A=63$  και  $n=0,76$

- Πείραμα von Cron
- Μοντέλο Neumarker-Rizk

Από το διάγραμμα 3.3 επιβεβαιώνεται ότι οι σταθερές που είχαν προτείνει οι Neumarker και Rizk δίνουν πολύ κακά αποτελέσματα.

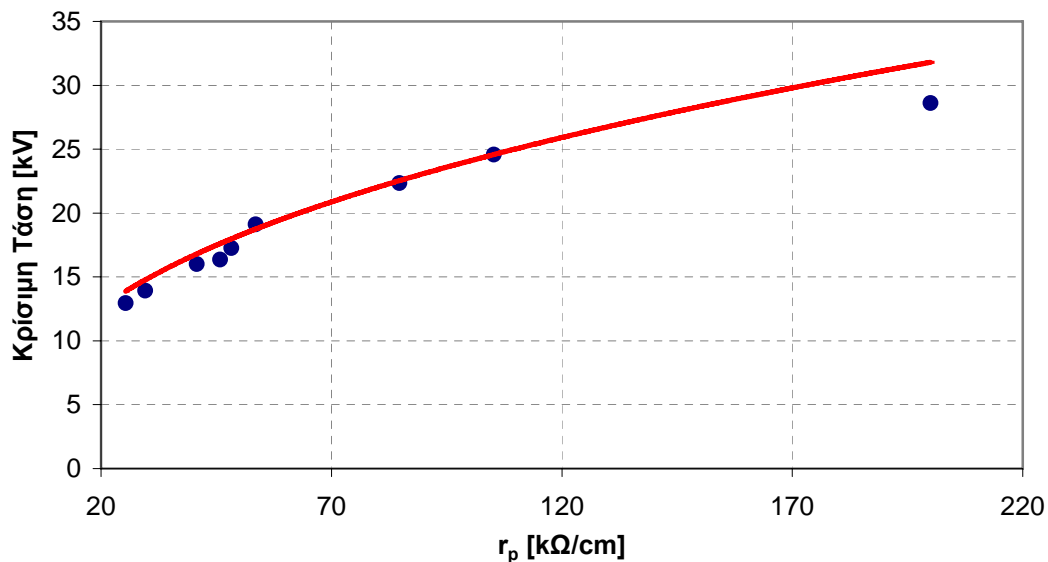
### 3.3.4 Μοντέλο Dhabi-Megrache και Beroual

Οι Dhabi-Megrache και Beroual [27] 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:

$$U_c = n^{1/n+1} \cdot \left\{ \frac{1}{(n+1)^{(n+1)}} + n^{(n-1)} \right\} \cdot A^{1/n+1} \cdot r_p^{n/n+1} \cdot L \quad (3.2)$$

Οι Dhabi-Megrache και Beroual δεν πρότειναν συγκεκριμένες τιμές για τις σταθερές  $A$  και  $n$ , 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 στην περίπτωση τις σταθερές που πρότεινε ο G.Zhicheng [28]. Στα παρακάτω διάγραμμα 3.4 και 3.5 φαίνεται η σύγκριση του μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα.

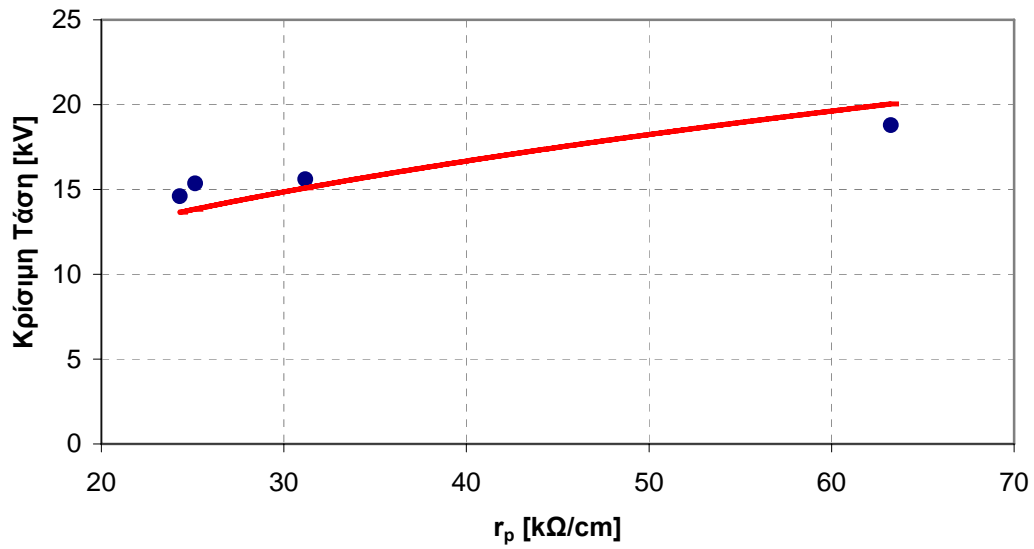
Για την εφαρμογή του μοντέλου των Dhabi-Megrache και Beroual [27] πρέπει να γίνει εκτίμηση των σταθερών  $A$  και  $n$  του τόξου. Εφαρμόζοντας σταθερές που έχει προτείνει ο R.P.Singh [21], και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά του von Cron, παίρνουμε το διάγραμμα 3.6.



Διάγραμμα 3.4: Σύσχεση μεταξύ μοντέλου Dhabi-Megrache και πειραμάτων Wilkins για  $A=140$  και  $n=0,67$

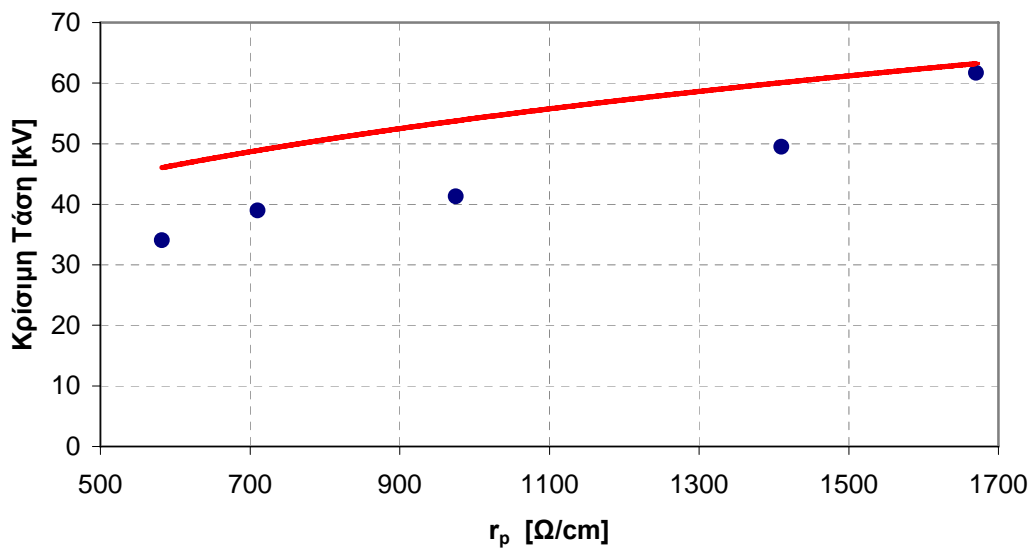
- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Dhabi-Megrache και Beroual





Διάγραμμα 3.5: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Dhabi-Megrache και πειραμάτων Alston για  $A=140$  και  $n=0,67$

- Πείραμα Alston
- Μοντέλο Dhabi-Megrache και Beroual



Διάγραμμα 3.6: 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

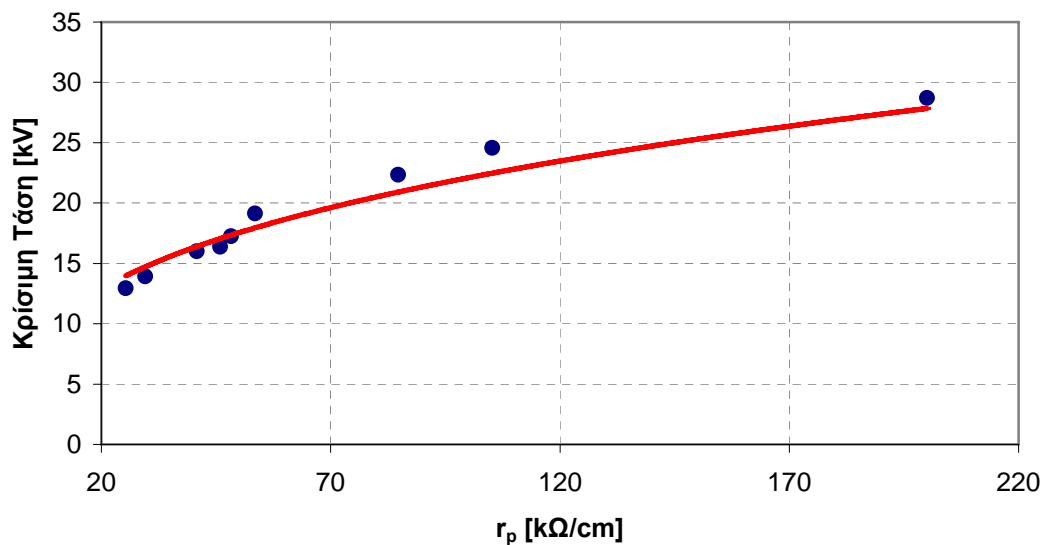
Στην περίπτωση αυτή πετυχαίνουμε πρόβλεψη με μέσο όρο σφάλματος 20% με τάση καλύτερης συμφωνίας στις χαμηλότερες ποσότητες ρύπανσης. Παρατηρείται ότι οι σταθερές αυτές σε σχέση με το μοντέλο των Neumarker και Rizk αδυνατούν να δώσουν πολύ καλή συμφωνία αλλά παρόλα αυτά εξακολουθούν να είναι ο βέλτιστος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

### 3.3.4 Μοντέλο Hurley-Limbourn

Οι Hurley και Limbourn [21] βασιζόμενοι σε εμπειρικές σχέσεις και στο μοντέλο του Obenaus κατέληξαν στην εξής έκφραση για την κρίσιμη τάση:

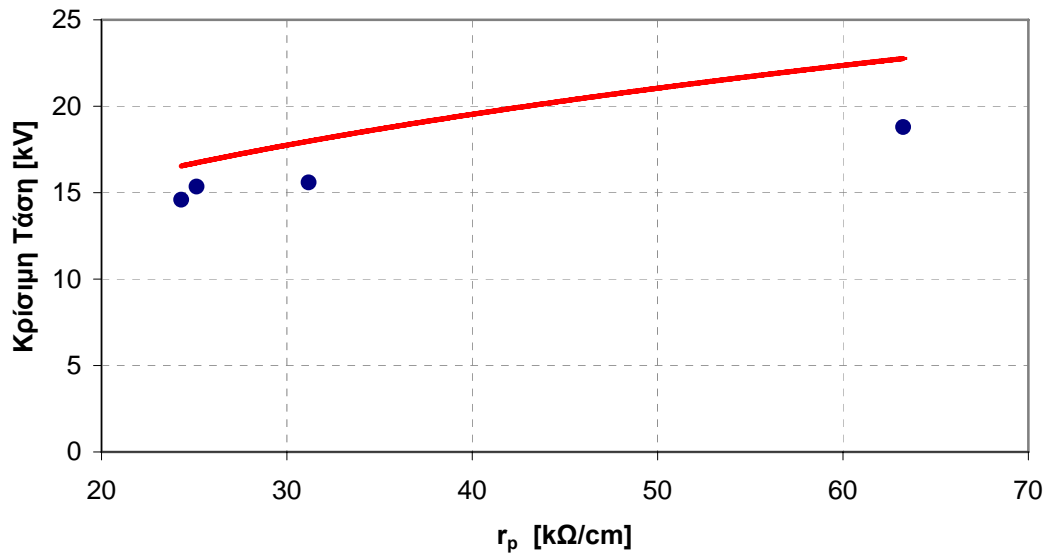
$$U_c = 47,6 \cdot r_p^{-1/3} \cdot L \quad (3.3)$$

Στο διαγράμματα 3.7 και 3.8 φαίνεται η συσχέτιση των μοντέλων με τα δεδομένα των πειραμάτων των Wilkins και Alston.



Διάγραμμα 3.7: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Hurley-Limbourn και πειραμάτων Wilkins

- Πείραμα Wilkins
- Μοντέλο Hurley-Limbourn



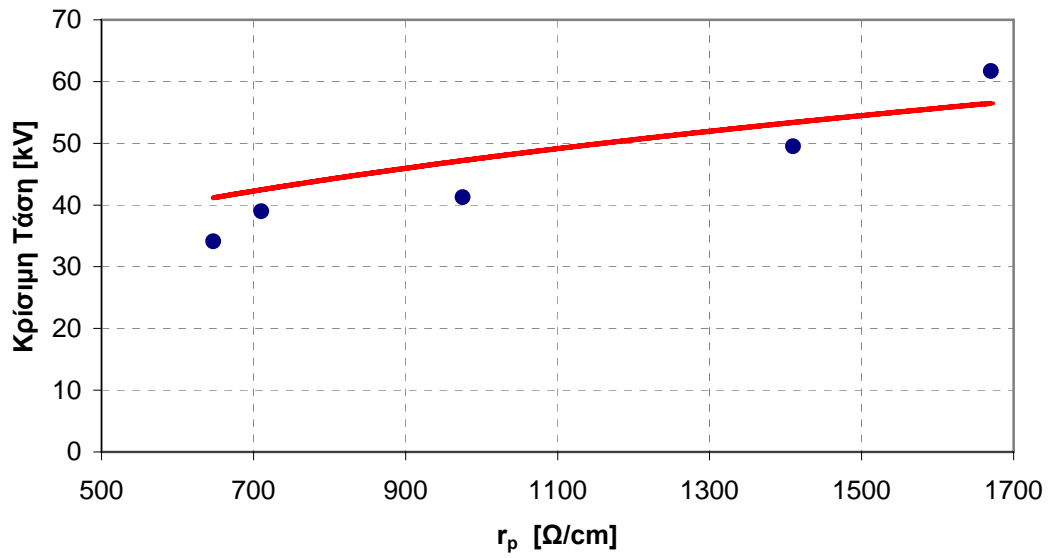
Διάγραμμα 3.8: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Hurley-Limbourn και πειραμάτων Alston

• 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 είναι ότι δεν χρησιμοποιώ διαφορετικές σταθερές διάδοσης του τόξου σε κάθε περίπτωση, αλλά έχουν τιμές 47,6 και 1/3 γεγονός που κάνει το μοντέλο ιδιαίτερα εύχρηστο.

Τελευταίο σειρά αποτελεσμάτων στο μοντέλο των Hurley και Limbourn είναι αυτά του πειράματος του von Cron. Τα πειραματικά αποτελέσματα μαζί με τις προβλέψεις του μοντέλου φαίνονται στο διάγραμμα 3.9.



Διάγραμμα 3.9: Συσχέτιση μεταξύ μοντέλου Hurley-Limbourn και πειραμάτων von Cron

- Πείραμα von Cron
- Μοντέλο Hurley-Limbourn

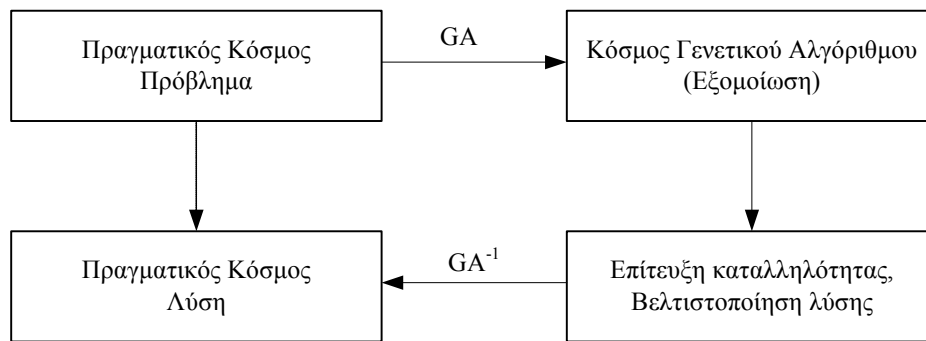
Τέλος, πρέπει να τονίσουμε ότι το μοντέλο των Hurley και Limbourn παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα της ιδιαίτερα απλής αναλυτικής μορφής του, πράγμα που το καθιστά ιδιαίτερα εύχρηστο.

#### **4.1 Γενικά**

Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms - GA) ονομάζονται σειρές αλγορίθμων, βασισμένοι στη μέθοδο της επανάληψης που σκοπό έχουν τη βελτίωση της ποιότητας και ακρίβειας των λύσεων κάποιων διαδικασιών με τελικό στόχο την εύρεση των βέλτιστων τους λύσεων. Η ίδια η θεωρία της εξέλιξης (evolution) που απαντάται πολύ συχνά στη φύση αποτέλεσε την κύρια πηγή έμπνευσης για την ανάπτυξη παρόμοιων διαδικασιών. Η εισαγωγή στον τομέα των αλγορίθμων έγινε το 1958 από τον Freidberg, ο οποίος συνδύασε μικρά προγράμματα FORTRAN, τα οποία όμως δεν αποδείχθηκαν όλα εκτελέσιμα. Ο Holland το 1975 συνέχισε την έρευνα, με χρήση σειρών bits για να αναπαραστήσει λειτουργίες, με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε συνδυασμός bits να είναι μια έγκυρη λειτουργία. Δημιούργησε ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο μπορούσε να λύνει προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτό το μοντέλο είναι αυτό που αποκαλούμε γενετικό. Η ερευνητική ομάδα του Holland ασχολήθηκε με τεχνικές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης εμπνευσμένες από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής. Η έρευνα στους γενετικούς αλγόριθμους κορυφώθηκε τη δεκαετία του '80 και μετά, και ευνοήθηκε πάρα πολύ από την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι οποίοι κατέστησαν υλοποιήσιμες και αποδοτικές τις βασικές αρχές τους.

#### **4.2 Περιγραφή Γενετικών Αλγορίθμων**

Ο μετασχηματισμός, ενός προβλήματος από την περιοχή του πραγματικού κόσμου σε αυτή του γενετικού, όπως γίνεται με πληθώρα άλλων μετασχηματισμών στη σύγχρονη επιστήμη, μας δίνει τη δυνατότητα απλοποίησης της διαδικασίας εύρεσης της λύσης [29].



Σχήμα 4.1: Μετασχηματισμός του γενετικού αλγόριθμου.

Ο τρόπος λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων είναι ο εξής: Αρχικά δημιουργείται με τυχαίο τρόπο ένα σύνολο  $P$  από υποψήφιες λύσεις του προβλήματος. Το αρχικό αυτό σύνολο απαρτίζεται από λύσεις οι οποίες είναι ως επί το πλείστον μη αποδεκτές (π.χ. δεν είναι έγκυρες, δεν είναι βέλτιστες, κλπ). Έστω  $N$  το πλήθος των στοιχείων του συνόλου  $P$ . Οι λύσεις αυτές βαθμολογούνται από μια *συνάρτηση καταλληλότητας* (*fitness function*). Η βαθμολόγησή τους συνίσταται στην αντιστοίχιση σε κάθε υποψήφια λύση ενός αριθμού, ο οποίος δηλώνει την εγγύτητα της υποψήφιας μη αποδεκτής λύσης ως προς κάποια αποδεκτή. Στη συνέχεια, από τον αρχικό πληθυσμό σχηματίζονται  $N/2$  ζευγάρια όχι απαραίτητα μοναδικών γονέων, δίνοντας μεγαλύτερη προτεραιότητα στις πιο κατάλληλες λύσεις. Κάθε ζευγάρι *ζευγαρώνει* (*mates*), δίνοντας δύο νέες λύσεις, τους *απογόνους* (*offsprings*). Ο νέος πληθυσμός  $P'$  αποτελείται από το σύνολο των απογόνων και συνήθως αποτελεί βελτίωση του προηγούμενου πληθυσμού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το νέο πληθυσμό  $P'$ , ενώ οι πιο συνηθισμένες συνθήκες τερματισμού της είναι η εύρεση μιας τέλειας λύσης με βάση τη συνάρτηση καταλληλότητας και η σύγκλιση όλων των λύσεων σε μία.

Ο γενετικός αλγόριθμος εκτελεί μία αναζήτηση στο χώρο των υποψήφιων λύσεων, με στόχο την εύρεση κάποιας λύσης που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση καταλληλότητας. Η αναζήτηση αυτή είναι παράλληλη, καθώς σε κάθε υποψήφια λύση μπορεί να εκτελεστεί ξεχωριστή αναζήτηση. Η μέθοδος της αναζήτησης μπορεί να θεωρηθεί σαν *αναρρίχηση λόφου* (*hill climbing*), καθώς γίνονται μικρές αλλαγές στις υποψήφιες λύσεις του πληθυσμού και επιλέγονται πάντα οι καλύτερες, βάσει της συνάρτησης καταλληλότητας. Η αναζήτηση επικεντρώνεται στις πιο κατάλληλες λύσεις, χωρίς όμως να αγνοούνται οι υπόλοιπες, καθώς υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να παγιδευτεί η διαδικασία σε *τοπικό μέγιστο* (*local maximum*)[30].

### 4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Οι λόγοι που μας “συμφέρει” η χρησιμοποίηση γενετικών αλγορίθμων είναι ότι είναι υπολογιστικά απλοί και ισχυροί στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης (αναζήτηση ελαχίστου ή μεγίστου) και πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των υπόλοιπων υπολογιστικών μεθόδων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διαφέρουν με τις παραδοσιακές μεθόδους ανίχνευσης και βελτιστοποίησης ως προς τα εξής:

- ✓ Μετατρέπουν το φυσικό πρόβλημα σε κωδικοποιημένη μορφή και επεξεργάζονται τις κωδικοποιημένες αυτές παραμέτρους και όχι τις φυσικές παραμέτρους. Εφαρμόζεται συνήθως δυαδική κωδικοποίηση του συνόλου των πραγματικών παραμέτρων του προβλήματος βελτιστοποίησης σε μια πεπερασμένου μεγέθους συμβολοσειρά
- ✓ Αναζητούν τη λύση μέσα από ένα σύνολο σημείων και όχι από ένα μοναδικό σημείο. Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης μετακινούμαστε προσεκτικά από ένα σημείο του χώρου ανίχνευσης στο επόμενο, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους κανόνες μετάβασης. Οι μέθοδοι αυτές είναι ακατάλληλες για εφαρμογή σε πολύπλοκους χώρους ανίχνευσης με ασυνέχειες και μη-γραμμικότητες. Η θεώρηση συνόλου σημείων από τον γενετικό αλγόριθμο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πιθανότητας εύρεσης λανθασμένου γενικού βέλτιστου.
- ✓ Οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν απαιτούν προηγούμενη γνώση του χώρου ανίχνευσης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης απαιτούν βοηθητικές πληροφορίες για την ορθή λειτουργία τους. Οι μέθοδοι αυτές είτε αναζητούν κάποιο τοπικό (όχι ολικό) ακρότατο, είτε βασίζουν την λειτουργία τους στον υπολογισμό των παραγώγων μιας συνάρτησης προυποθέτοντας ύπαρξη και συνέχεια παραγώγων όπως οι τεχνικές κλίσης (gradient techniques). Οι μέθοδοι, αυτές όμως δεν είναι αρκετά επαρκείς ώστε να ανταπεξέλθουν με ακρίβεια στις απαιτήσεις συνθετότερων προβλημάτων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν στο ότι δεν χρειάζονται αυτή τη βοηθητική πληροφορία ενώ χρησιμοποιούν ταυτόχρονα ένα ευρύ πλήθος σημείων ψάχνοντας πολλά μέγιστα με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα σφάλματος. Η μόνη πληροφορία που

χρησιμοποιούν οι γενετικοί αλγόριθμοι παρέχεται από μία συνάρτηση ποιότητας (fitness) και όχι από παραγώγους ή από κάποια άλλη πηγή.

- ✓ Σημαντικό θεωρείται το γεγονός ότι δεν παγιδεύονται όταν βρεθούν ανάμεσα σε τοπικά ακρότατα όπως άλλες επαναληπτικές μέθοδοι [31,32].
- ✓ Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους, που χρησιμοποιούν αιτιοκρατικούς κανόνες μετάβασης, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης για την καθοδήγηση της αναζήτησης [33].

Τέλος μπορούν να δώσουν ένα πλήθος λύσεων στο πρόβλημα και όχι μόνο μία. Η επιλογή της καλύτερης λύσης είναι στην αρμοδιότητα του ανθρώπου. Αυτό είναι εξαιρετικά χρήσιμο όταν υπάρχουν πολλαπλές λύσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμένων [34].

Οι παραπάνω διαφορές είναι αυτές που καθιστούν το γενετικό αλγόριθμο πιο ευχρήστο και δυνατό εργαλείο υπολογισμού βέλτιστης λύσης έναντι των υπολοίπων χρησιμοποιούμενων τεχνικών.

Φυσικά πρέπει να αναφέρουμε ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν επίσης μειονεκτήματά. Το βασικότερο μειονέκτημά αποτελεί ο χρόνος εκτέλεσης, ο οποίος είναι σημαντικά μεγαλύτερος εν σχέσει με τις υπόλοιπες μεθόδους λόγω του μεγάλου αριθμού υπολογισμών της συνάρτησης καταλληλότητας που απαιτούν.

Επίσης σε αρκετές περιπτώσεις οι γενετικοί αλγόριθμοι εντοπίζουν εύκολα την περιοχή του ολικού βέλτιστου, έχουν όμως πρόβλημα στον ακριβή προσδιορισμό του. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αποδοτικά με συνδυασμένη χρήση γενετικών αλγορίθμων και κάποιας άλλης μεθόδου βελτιστοποίησης, ώστε με το γενετικό αλγόριθμο να εντοπιστεί η άγνωστη περιοχή του ολικού βέλτιστου και εν συνεχεία ο άλλος αλγόριθμος, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου σαν αρχική εκτίμηση, να προσεγγίσει πολύ κοντά το πραγματικό σημείο βέλτιστου. Αυτή η συνδυασμένη τεχνική μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα στην επίλυση ενός σύνθετου και πολύπλοκου προβλήματος. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος είναι οι δοκιμαστικές προσπάθειες και εκτελέσεις ώστε να βρεθεί η πιο κατάλληλη και αποδοτική διαμόρφωση για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα [25].



#### 4.4 Εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα της τεχνητής νοημοσύνης και ιδιαίτερα σε προβλήματα βελτιστοποίησης[30]. Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζουμε μερικές από τις εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων:

- ✓ *Εύρεση ακροτάτου αριθμητικών συναρτήσεων.* Πρόκειται για την πιο καλά μελετημένη εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων. Η εύρεση ενός ακροτάτου μίας συνάρτησης δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, οι οποίες εμφανίζουν ασυνέχειες, θόρυβο, κλπ. Το πλεονέκτημα που εμφανίζει η εφαρμογή τους σε αυτά τα προβλήματα είναι ότι είναι δεδομένη η συνάρτηση καταλληλότητας.
- ✓ *Επεξεργασία εικόνων.* Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση προτύπων, όπως ακμές, επιφάνειες, ακόμη και αντικείμενα, σε ψηφιοποιημένες εικόνες. Το αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη ψηφιακή όραση.
- ✓ *Συνδυαστική βελτιστοποίηση.* Πρόκειται για το κλασικό πρόβλημα κατανομής πόρων σε δραστηριότητες, με σκοπό τη βελτιστοποίηση του οφέλους ή την ελάττωση του κόστους. Τα προβλήματα αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν συνδυαστική έκρηξη του χώρου αναζήτησης, ως προς το μέγεθος του προβλήματος, με αποτέλεσμα ο έλεγχος όλων των υποψήφιων λύσεων να είναι αδύνατος. Το πιο γνωστό πρόβλημα αυτής της κατηγορίας είναι αυτό του *πλανόδιου πωλητή (Traveling sales person)*, όπου ο στόχος είναι η εύρεση της συντομότερης διαδρομής για την επίσκεψη ενός συνόλου πόλεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να δώσουν σε αυτό το πρόβλημα αρκετές λύσεις κοντά στο βέλτιστο. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η *αποθήκευση κιβωτίων (bin packing)* και αφορά την εύρεση του βέλτιστου τρόπου αποθήκευσης ενός αριθμού κιβωτίων σε περιορισμένο χώρο και έχει πολύ μεγάλη πρακτική σημασία στη βιομηχανία. Ανάλογα προβλήματα εμφανίζονται και στη σχεδίαση VLSI κυκλωμάτων. Τέλος στην κατηγορία αυτών των εφαρμογών εντάσσονται και τα προβλήματα *καταμερισμού των εργασιών (job-shop scheduling)* και *κατασκευής ωρολογίων προγραμμάτων (time tabling)*.
- ✓ *Σχεδίαση.* Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σχεδίαση κατασκευών και εξαρτημάτων, όπως για παράδειγμα γέφυρες,

μηχανολογικά εξαρτήματα, όπου ζητούμενο μπορεί να είναι τόσο η εύρεση μιας λύσης, όσο και η βελτιστοποίηση της. Οι αλγόριθμοι μπορούν να δοκιμάσουν συνδυασμούς και ιδέες που ο ανθρώπινος νους δεν θα δοκίμαζε ποτέ, δίνοντας ενίοτε πρωτότυπα αποτελέσματα.

- ✓ *Μηχανική εκμάθηση.* Στα συστήματα μηχανικής μάθησης οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακάλυψη κανόνων if...then.... Η πιο γνωστή εφαρμογή είναι αυτή των *συστημάτων κατηγοριοποίησης (classifier systems)*, ωστόσο οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί και σε παιχνίδια, επίλυση λαβυρίθων, καθώς και για πολιτικές και οικονομικές αναλύσεις.
- ✓ *Κοινωνικά Μοντέλα.* Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση των εξελικτικών θεμάτων σε κοινωνίες πληθυσμών
- ✓ *Οικονομική Επιστήμη.* Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση καινοτομιών, την ανάπτυξη πολιτικών προσφορών και την μελέτη οικονομικών αγορών.

#### **4.5 Ορολογία Γενετικών Αλγορίθμων**

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν όρους δανεισμένους από τη φυσική γενετική αλλά και την γενετική μηχανική. Μια περιγραφή των όρων ακολουθεί παρακάτω. Οι παράμετροι του φυσικού προβλήματος κωδικοποιούνται αρχικά με μία σειρά από bits. Αυτή η κωδικοποιημένη σειρά από bits αποτελεί μια συμβολοσειρά (string) η οποία αντιστοιχεί στα χρωμοσώματα των βιολογικών συστημάτων. Στα βιολογικά συστήματα ένα ή περισσότερα χρωμοσώματα (chromosomes) συνδυάζονται για να αποτελέσουν τη γενετική περιγραφή ενός οργανισμού, τον λεγόμενο γονότυπο (genotype). Στους γενετικούς αλγόριθμους ο γονότυπος αντιστοιχεί στο συνολικό πακέτο των συμβολοσειρών (χρωμοσωμάτων) και καλείται δομή (structure). Στα φυσικά συστήματα ο οργανισμός ο οποίος δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του συνολικού γενετικού πακέτου με το περιβάλλον καλείται φαινότυπος (phenotype). Στους γενετικούς αλγόριθμους αυτό αντιστοιχεί στην αποκωδικοποίηση των δομών με σκοπό την δημιουργία ενός συνόλου εναλλακτικών λύσεων στο χώρο ανίχνευσης. Δηλαδή, κάθε συμβολοσειρά αποκωδικοποιείται στην πραγματική τιμή της παραμέτρου του φυσικού προβλήματος. Στα φυσικά συστήματα τα

χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes). Κάθε γονίδιο ελέγχει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Ένα γονίδιο μπορεί να βρεθεί σε διάφορες καταστάσεις οι οποίες καλούνται αλληλόμορφα (alleles). Στους κλασικούς γενετικούς αλγόριθμους το γονίδιο αντιστοιχεί σε ένα δυαδικό ψηφίο (bit) στη συμβολοσειρά και αλληλόμορφα είναι οι πιθανές καταστάσεις στις οποίες το δυαδικό ψηφίο μπορεί να βρεθεί, δηλαδή 0 ή 1. Η θέση ενός γονιδίου σε ένα χρωμόσωμα καλείται τόπος (locus), στους γενετικούς αλγόριθμους τόπος είναι η θέση (position) στη συμβολοσειρά. Η παραπάνω αντιστοίχιση μεταξύ φυσικής και αλγοριθμικής ορολογίας παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1.

<b>ΦΥΣΗ</b>	<b>ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ</b>
Χρωμόσωμα	Συμβολοσειρά
Γονίδιο	Δυαδικό ψηφίο
Αλληλόμορφο	Τιμή δυαδικού ψηφίου
Τόπος	Θέση στη συμβολοσειρά
Γονότυπος	Δομή(σύνολο συμβολοσειρών)
Φαινότυπος	Αποκωδικοποιημένη Δομή
Οργανισμός	Λύση

*Πίνακας 4.1: Τα κύρια χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων.*

## 4.6 Τελεστές γενετικών αλγορίθμων

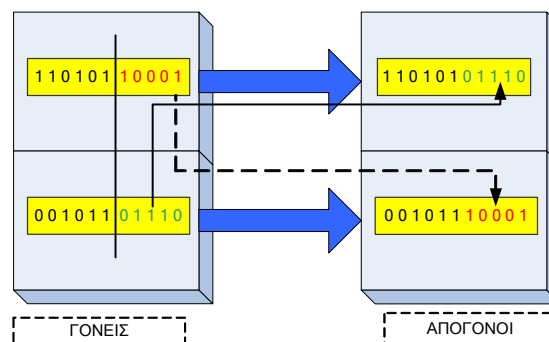
Όπως αναφέραμε και παραπάνω, στόχος του γενετικού αλγορίθμου είναι η προσομοίωση διαφόρων φυσικών διαδικασιών με σκοπό την βελτιστοποίηση μίας ποσότητας. Είναι επίσης γνωστό, ότι οι πιο συνηθισμένες διαδικασίες στις οποίες υπόκεινται οι βιολογικοί οργανισμοί στη φύση είναι η αναπαραγωγή (reproduction), η διασταύρωση (crossover), καθώς και η διαδικασία της γενετικής μετάλλαξης (mutation). Οι παραπάνω διαδικασίες, οι οποίες ονομάζονται και γενετικοί τελεστές, είναι βασικές και πρέπει να συνθέτουν το κυρίως σώμα ενός γενετικού αλγορίθμου.

Στη συνέχεια θα δώσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των τελεστών. Ο τελεστής της αναπαραγωγής είναι το στοιχείο του γενετικού αλγορίθμου μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η διαδικασία της επιβίωσης της καλύτερης λύσης. Η αναπαραγωγή συνίσταται στη μεταβίβαση (αντιγραφή) ενός χρωμοσώματος από τη μία γενιά στην

άλλη με βάση την τιμή που παρέχεται, όπως αναφέραμε, από μία συνάρτηση ποιότητας. Χρωμοσώματα με μεγαλύτερη τιμή ποιότητας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα συνεισφοράς ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών στις επόμενες γενιές. Ο τελεστής της διασταύρωσης συνίσταται στο συνδυασμό χαρακτηριστικών από ικανά χρωμοσώματα με σκοπό την παραγωγή ακόμη ικανότερων ατόμων. Η διασταύρωση ακολουθεί τη διαδικασία της αναπαραγωγής και πραγματοποιείται σε τρία βήματα:

- ✓ Συμβολοσειρές (strings) που πρόσφατα αναπαρήχθησαν κατανέμονται σε ζευγάρια με έναν τυχαίο τρόπο.
- ✓ Ένας ακέραιος αριθμός που αναπαριστά θέση συμβολοσειράς επιλέγεται τυχαία για κάθε ζευγάρι συμβολοσειρών.
- ✓ Με βάση μια πιθανότητα διασταύρωσης, τα ζευγάρια διασταυρώνονται αλλάζοντας μεταξύ τους ομάδα από δυαδικά ψηφία γύρω από την επιλεγείσα θέση και κατά μήκος των συμβολοσειρών.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της διασταύρωσης για δύο τυχαία χρωμοσώματα και για μία τυχαία θέση διασταύρωσης. Από το σχήμα παρατηρούμε ότι ο πρώτος απόγονος δημιουργείται από τη συνένωση της κεφαλής του πρώτου γονέα και της ουράς του δεύτερου.

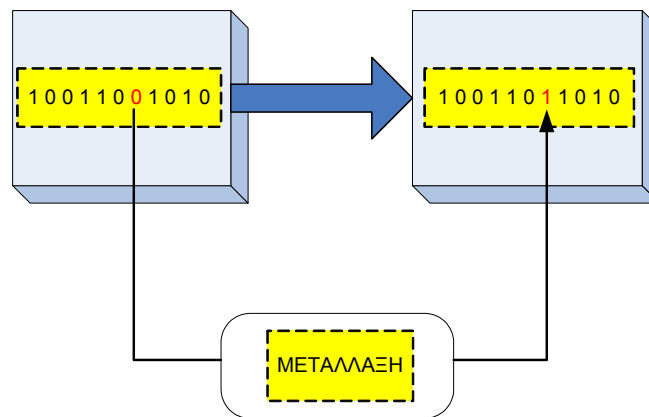


Σχήμα 4.2: Διασταύρωση δύο χρωμοσωμάτων

Ο τελεστής της μετάλλαξης μιμείται την διαδικασία της γενετικής μετάλλαξης που εμφανίζεται στη φύση και ευθύνεται για τυχαίες αλλαγές στο γενετικό κώδικα. Όπως και στη φύση, έτσι και στους γενετικούς αλγορίθμους, η μετάλλαξη παίζει ένα

ουσιαστικό αλλά σχετικά μικρό ρόλο, αφού σπάνια εμφανίζεται στην εξέλιξη των πληθυσμών.

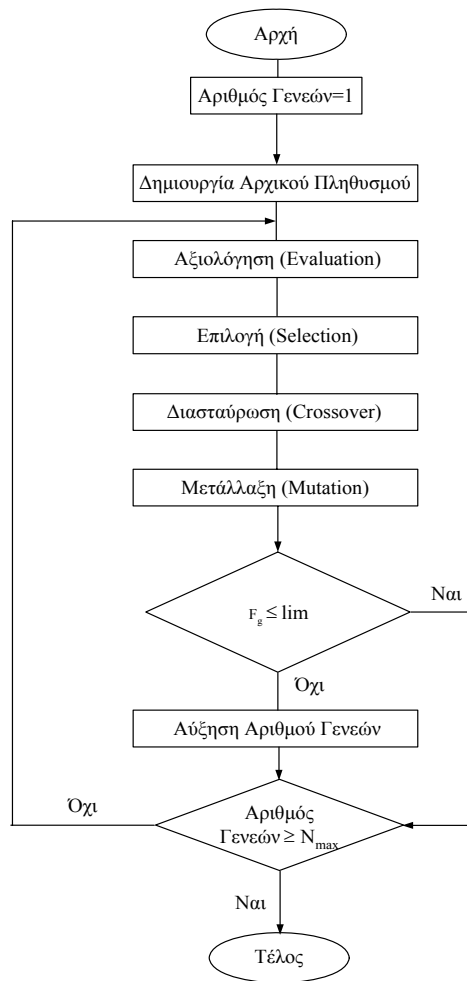
Η λειτουργία του τελεστή συνίσταται στη μετατροπή ενός ή περισσότερων δυαδικών ψηφίων μιας συμβολοσειράς από την μία κατάσταση στην άλλη, δηλαδή από 0 σε 1 και αντίστροφα, με βάση μια πιθανότητα μετάλλαξης. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της μετάλλαξης για ένα χρωμόσωμα και για μία τυχαία θέση μετάλλαξης. Ο τελεστής μετάλλαξης, σε συνδυασμό με την αναπαραγωγή και τη διασταύρωση βελτιώνει την ικανότητα του γενετικού αλγορίθμου για ανίχνευση στα πρότυπα της φύσης. Βοηθά τον αλγόριθμο ώστε να μην εκλαμβάνει λανθασμένα ένα τοπικό βέλτιστο σαν γενικό βέλτιστο, εισάγοντας νέα ανεξερευνήτα χρωμοσώματα στον πληθυσμό του γενετικού αλγορίθμου.



Σχήμα 4.3: Μετάλλαξη ενός χρωμοσώματος

#### 4.7 Λειτουργία γενετικού αλγορίθμου

Η λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4 και βασίζεται σε πέντε βασικά βήματα τα οποία αναλύονται διεξοδικότερα στη συνέχεια.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

#### Βήμα πρώτο

Η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού (αρχικοποίηση). Στο βήμα αυτό ο αρχικός πληθυσμός  $P_s$  δημιουργείται τυχαία από μία γεννήτρια αριθμών. Η αναπαράσταση του αρχικού πληθυσμού γίνεται με κωδικοποίηση.

Δηλαδή κάθε χρωμόσωμα είναι μία συμβολοσειρά που αποτελείται από δυαδικά ψηφία '0' και '1', όπου κάθε ψηφίο αναπαριστά ένα γονίδιο. Κάθε ένα από τα  $P_s$  μέλη του αρχικού πληθυσμού μετατρέπεται σε ένα χρωμόσωμα με  $m$  συμβολοσειρές  $t$  θέσεων (μονοδιάστατος πίνακας  $t$  θέσεων). Ο αριθμός  $m$  δηλώνει το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών του προβλήματος, ενώ ο αριθμός  $t$  δηλώνει τα δυαδικά ψηφία που σχηματίζουν τον αριθμό. Είναι προφανές πως η ακρίβεια του προβλήματος θα είναι ανάλογη της ποσότητας  $\frac{E}{2^t}$ , όπου  $E$  είναι το εύρος στο οποίο

κυμαίνεται η μεταβλητή του προβλήματος. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται ένα χρωμόσωμα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ενός προβλήματος με τρεις μεταβλητές ( $m=3$ ) και 256 στάθμες ( $2^t=2^8=256$ ).

$$\begin{array}{ccc} w_1 & w_2 & w_m \\ 10011010 & | & 00100111 & | & 11001010 \end{array}$$

Σχήμα 4.5: Παράδειγμα χρωμοσώματος για μέλος του πληθυσμού ( $m=3, t=8$ ).

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν είναι κρίσιμος καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών. Όμως αν υπάρχει γνώση για το σύστημα η πληροφορία αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό.

#### Βήμα δεύτερο

Είναι το κομμάτι της αξιολόγησης (evaluation), δηλαδή ο υπολογισμός της καταλληλότητας κάθε χρωμοσώματος, μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας που μας δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της κάθε λύσης. Η επιλογή της συνάρτησης καταλληλότητας είναι το πιο κρίσιμο βήμα κατά την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων σε ένα πρακτικό πρόβλημα. Η συνάρτηση καταλληλότητας δέχεται ως είσοδο ένα χρωμόσωμα και επιστρέφει έναν αριθμό που υποδηλώνει το πόσο κατάλληλο είναι. Το πεδίο τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας είναι συνήθων το διάστημα των πραγματικών αριθμών από το 0 έως το 1, αν και ανάλογα με την υλοποίηση αυτό θα μπορούσε να διαφέρει. Τιμή 1 υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο χρωμόσωμα είναι τέλειο, δηλαδή ικανοποιεί όλες τις προϋποθέσεις του προβλήματος και αποτελεί αποδεκτή λύση. Ο τρόπος υλοποίησης της συνάρτησης βέβαια εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα. Δεν θα πρέπει να συγχέεται η συνάρτηση καταλληλότητας με την αντικειμενική συνάρτηση. Η αντικειμενική συνάρτηση δίνει ένα μέτρο της απόδοσης ως προς το συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων και είναι χαρακτηριστική του προβλήματος και ανεξάρτητη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται. Η συνάρτηση καταλληλότητας είναι μια εσωτερική συνάρτηση των γενετικών αλγορίθμων και μετασχηματίζει το μέτρο της απόδοσης σε μία κατανομή ευκαιριών αναπαραγωγής. Στον γενετικό αλγόριθμο, η καταλληλότητα ορίζεται ως  $F_g = \frac{f_i}{f}$  όπου  $f_i$  είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τη λύση  $i$  και  $\bar{f}$  είναι η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των χρωμοσωμάτων.

### *Βήμα τρίτο*

Αποτελείται από το μέρος της επιλογής (selection). Στο βήμα αυτό τα χρωμοσώματα-γονείς με τον μεγαλύτερο βαθμό καταλληλότητας τοποθετούνται μία ή περισσότερες φορές σε έναν ενδιάμεσο πληθυσμό. Έτσι η πιθανότητα με την οποία οι λύσεις του τρέχοντα πληθυσμού αντιγράφονται και τοποθετούνται στον ενδιάμεσο πληθυσμό είναι ανάλογη του βαθμού καταλληλότητας τους

### *Βήμα τέταρτο*

Είναι το κομμάτι της διασταύρωσης (crossover). Στο βήμα αυτό οι λύσεις του ενδιάμεσου πληθυσμού ανασυνδιάζονται για την παραγωγή του επόμενου πληθυσμού με χρήση τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Συγκεκριμένα, από τον ενδιάμεσο πληθυσμό γίνεται τυχαία επιλογή των λύσεων ανά δύο, και έτσι δημιουργούνται οι λύσεις-γονείς. Έπειτα εφαρμόζεται στους γονείς ο τελεστής διασταύρωσης με μια πιθανότητα  $P_c$ . Η διασταύρωση ανασυνδιάζει τις συμβολοσειρές (γενετικό υλικό) των γονέων δημιουργώντας δύο απογόνους που κληρονομούν χαρακτηριστικά και των δύο γονέων δηλαδή σχηματίζει  $P_c/2$  ζευγάρια από αυτά τα μέλη του πληθυσμού, που θεωρούνται γονείς για την αναπαραγωγή, στην οποία ανταλλάσσουν  $N_p$  τμήματα του γενετικού τους υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με διασταύρωση, Σχήμα 4.6.

### *Βήμα πέμπτο*

Αποτελεί το κομμάτι της μετάλλαξης (mutation). Η διασταύρωση αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων δεν είναι ωστόσο σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Ο τελεστής της μετάλλαξης καλύπτει αυτή την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στους απογόνους. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων των απογόνων. Δηλαδή είναι (η μετάλλαξη) το φαινόμενο κατά το οποίο επιλέγεται με τυχαίο τρόπο κάποια ή κάποιες από τις  $t$  θέσεις του χρωμοσώματος και το περιεχόμενο του μεταλλάσσεται (δηλαδή αν περιέχει 0 γίνεται 1 ή το 1 γίνεται 0). Είναι απαραίτητη, καθώς, αν και η αναπαραγωγή και η διασταύρωση αναζητούν και αναμειγνύουν αποδοτικά τους υπάρχοντες απογόνους, υπάρχει περίπτωση να εγκλωβιστεί η λύση σε κάποιο τοπικό ακρότατο της συνάρτησης. Επίσης περιστασιακά μπορεί να προκαλέσει απώλεια μερικού εν δυνάμει χρήσιμου γενετικού υλικού, συνολικά όμως βοηθάει στην καλύτερη και ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση [33].



$$\begin{array}{r}
0111000011 \\
0111001110 \\
0111100011 \\
011|100|0011 \\
000|110|1110 \} \rightarrow 0111001110 \\
0001000011 \\
0001001110 \\
0001100011 \\
0001001110 \\
\text{γονείς} \quad - \quad \text{παιδιά}
\end{array}$$

Σχήμα 4.6: Οι δυνατοί συνδυασμοί παιδιών που προκύπτουν από τη διασταύρωση δύο γονιών ( $m=1$ ,  $t=10$ ,  $N_p=3$ ).

Θεωρείται ότι κάθε ζεύγος γονέων δίνει  $N_c$  παιδιά. Με την αναπαραγωγή, ο πληθυσμός των γονέων εμπλουτίζεται με τα παιδιά, αυξάνοντας τον αρχικό πληθυσμό, καθώς προστίθενται νέα μέλη. Οι γονείς πάντοτε ανήκουν στον θεωρούμενο πληθυσμό (ευγονισμός) για να μην χάνεται η προηγούμενη πληροφορία. Ο νέος πληθυσμός τώρα έχει  $P_s + N_c P_s / 2$  μέλη. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η διαδικασία της φυσικής επιλογής. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, μόνο  $P_s$  μέλη από τα  $P_s + N_c P_s / 2$  επιβιώνουν. Αυτά τα  $P_s$  μέλη επιλέγονται ως τα μέλη με τις υψηλότερες τιμές  $F_g$ , αν προσπαθούμε να επιτύχουμε μεγιστοποίηση του  $F_g$ , ή με τις χαμηλότερες τιμές  $F_g$ , αν προσπαθούμε να επιτύχουμε ελαχιστοποίηση του  $F_g$ . Με τις παραπάνω λειτουργίες δημιουργείται η επόμενη γενιά με έναν νέο πληθυσμό.

Συνεχίζοντας τις επαναλήψεις της αναπαραγωγής υπό τη διαδικασία της διασταύρωσης, της μετάλλαξης και της φυσικής επιλογής, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βρει το ελάχιστο (ή το μέγιστο) του  $F_g$ . Οι καλύτερες τιμές αυτού του πληθυσμού συγκλίνουν σε αυτό το σημείο. Το κριτήριο τερματισμού πληρείται, εάν είτε η μέση τιμή του  $F_g$  στον πληθυσμό  $P_s$  μελών δεν βελτιώνεται περαιτέρω (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση), είτε ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγαλύτερος από τον μεγαλύτερο αριθμό των επαναλήψεων  $N_{max}$  [36].

Υπολογισμός χωρητικότητας επί αλυσοειδών μονωτήρων

**5.1 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για τους αλυσοειδείς μονωτήρες**

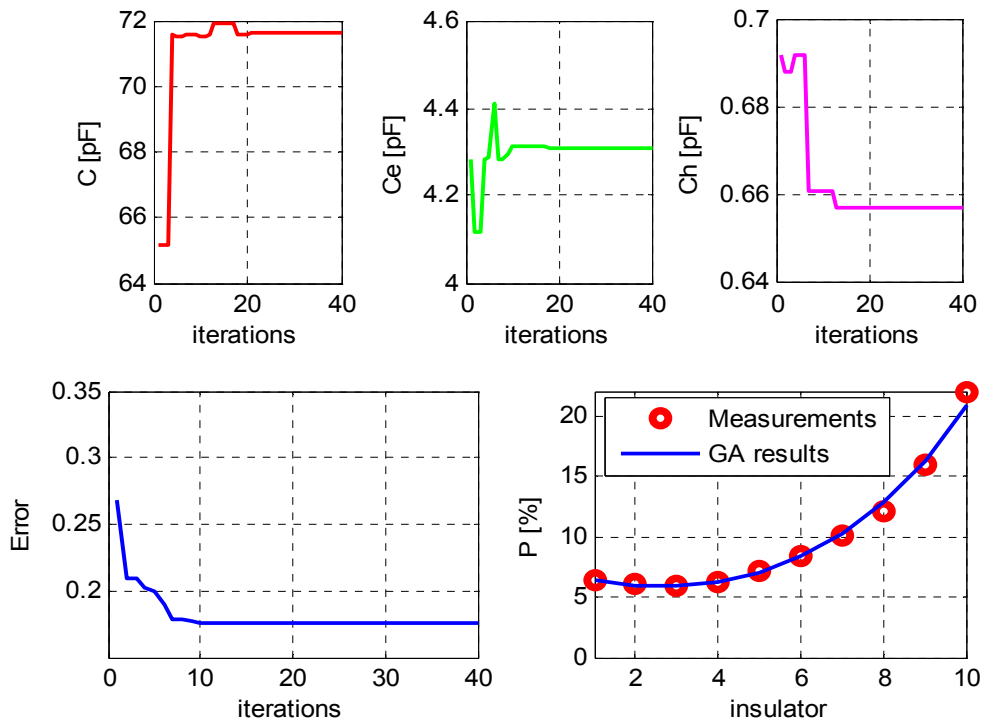
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, κάθε αλυσοειδής μονωτήρας έχει μια ισοδύναμη χωρητικότητα η οποία αντιστοιχεί στη συνολική χωρητικότητα κάθε μονωτήρα της αλύσου. Παρόλα αυτά, επί του μονωτήρα εμφανίζονται και παράσιτες χωρητικότητες ως προς γη και ως προς το άκρο, το οποίο βρίσκεται στην πλευρά της τάσης. Οι παράσιτες αυτές χωρητικότητες σε συνθήκες έντονης ρύπανσης αποτελούν το βασικό λόγο, για τον οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο της υπερπήδησης των μονωτήρων. Για τον λόγο αυτό μεγάλο ενδιαφέρον έχει εκδηλωθεί τα τελευταία χρόνια στην πλήρη κατανόηση του μηχανισμού ανάπτυξης του ηλεκτρικού τόξου και σειρά πειραματικών μελετών διεξάγεται επί τέτοιων μονωτήρων. Αν και σημαντικό πλήθος δημοσιεύσεων είναι διαθέσιμο, εντούτοις δεν υπάρχει μια γενικώς αποδεκτή εξήγηση του μηχανισμού περιγραφής της υπερπήδησης των μονωτήρων σε συνθήκες ρύπανσης, και για το λόγο αυτό δεν υπάρχει στην επιστημονική κοινότητα μια γενικώς αποδεκτή μέθοδος μοντελοποίησης του προβλήματος. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν επτά σειρές πειραματικών μετρήσεων, οι οποίες αφορούν αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς 150kV. Με βάση τα προαναφερθέντα πειραματικά αποτελέσματα και τη χρήση γενετικού αλγορίθμου, προσδιορίστηκαν οι τιμές των τιμών  $C_h$  και  $C_e$ . Συγκεκριμένα, οι αλυσοειδείς μονωτήρες που μελετήθηκαν ήταν οι εξής :

- 1) Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας εργαστηρίου, αποτελούμενος από 10 δισκοειδείς μονωτήρες. (Αλυσοειδής μονωτήρας εργαστηρίου Υ.Τ.)
- 2) Πορσελάνινος καθαρός αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου, αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. (Κωδικός ΔΕΗ: 010)
- 3) Πορσελάνινος ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου, αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. (Κωδικός ΔΕΗ: 010)

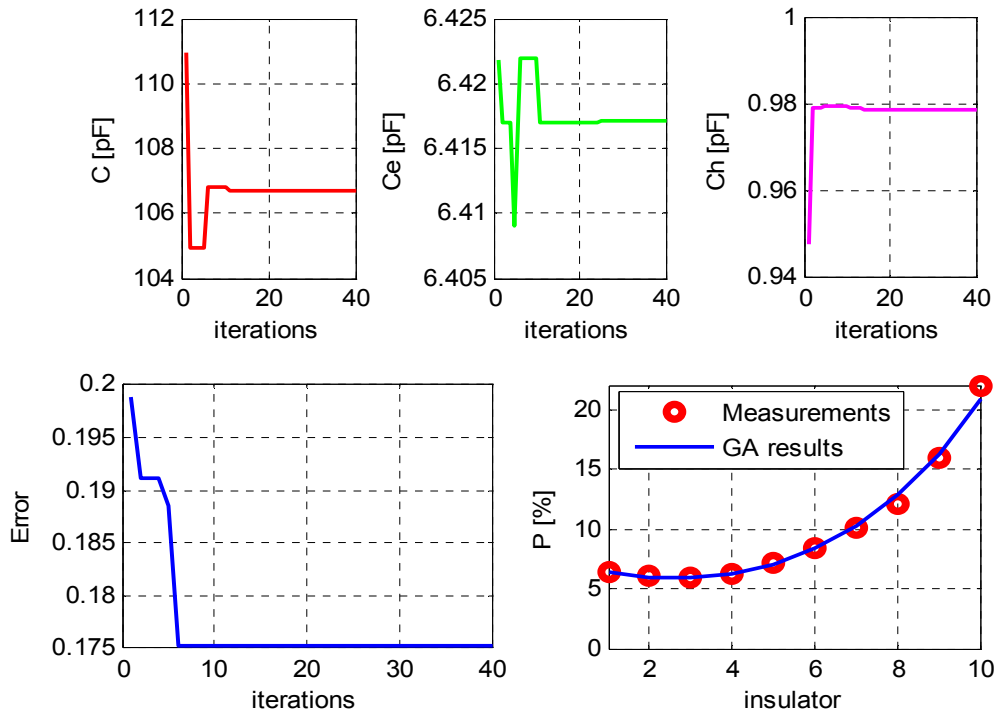
- 4) Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου, αποτελούμενος από 10 δισκοειδείς μονωτήρες. (Κωδικός ΔΕΗ: 033)
- 5) Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. (Κωδικός ΔΕΗ: 069)
- 6) Γυάλινος ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. (Κωδικός ΔΕΗ: 161)
- 7) Γυάλινος καθαρός αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. (Κωδικός ΔΕΗ: 161)

Τα πειραματικά αποτελέσματα για την κατανομή της τάσης στους παραπάνω μονωτήρες (Πίνακας 5.1) εισήχθησαν ως δεδομένα στο γενετικό αλγόριθμο που αναπτύχθηκε από τον μηχανικό του Ε.Μ.Π. Δρ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, μέλος του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρέχει βέλτιστα αποτελέσματα σε προβλήματα ελαχιστοποίησης. Για κάθε αλυσοειδή μονωτήρα διεξήχθησαν 17 επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου, τόσο με πλήθος γόνων ίσο με 20, όσο και με πλήθος γόνων 30. Στην περίπτωση που το πλήθος γόνων ήταν ίσο με είκοσι ( $g=20$ ), εφαρμόστηκε ο γενετικός αλγόριθμος 1 φορά με πλήθος επαναλήψεων ίσο με 20 ( $I=20$ ), 6 φορές με πλήθος επαναλήψεων ίσο με 30 ( $I=30$ ), 5 φορές με πλήθος επαναλήψεων ίσο με 40 ( $I=40$ ) και, τέλος, 5 φορές με πλήθος επαναλήψεων ίσο με 50 ( $I=50$ ). Το ίδιο συνέβη για κάθε μονωτήρα και στην περίπτωση που αυξήθηκε ο αριθμός των γόνων σε 30 ( $g=30$ ). Μετά την εύρεση των τιμών αυτών από το γενετικό αλγόριθμο, επιλέξαμε για κάθε μονωτήρα τις έξι βέλτιστες τιμές, τρεις για την περίπτωση που επιλέξαμε πλήθος γόνων ίσο με είκοσι και τρεις για την περίπτωση που επιλέξαμε πλήθος γόνων ίσο με τριάντα. Τα κριτήρια επιλογής των αποτελεσμάτων των χωρητικότητων ήταν η ελαχιστοποίηση του σφάλματος που υπεισέρχεται σε κάθε εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου. Όπως είναι φανερό, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο ακριβέστερος δυνατός υπολογισμός των τιμών των χωρητικότητων  $C$ ,  $C_h$  και  $C_e$ . Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο και επελέγησαν με βάση την παραπάνω διαδικασία για κάθε μονωτήρα. Τα αποτελέσματα αυτά συνοδεύονται και από τα γραφήματα που απεικονίζουν πιο αναλυτικά τις τιμές αυτές.

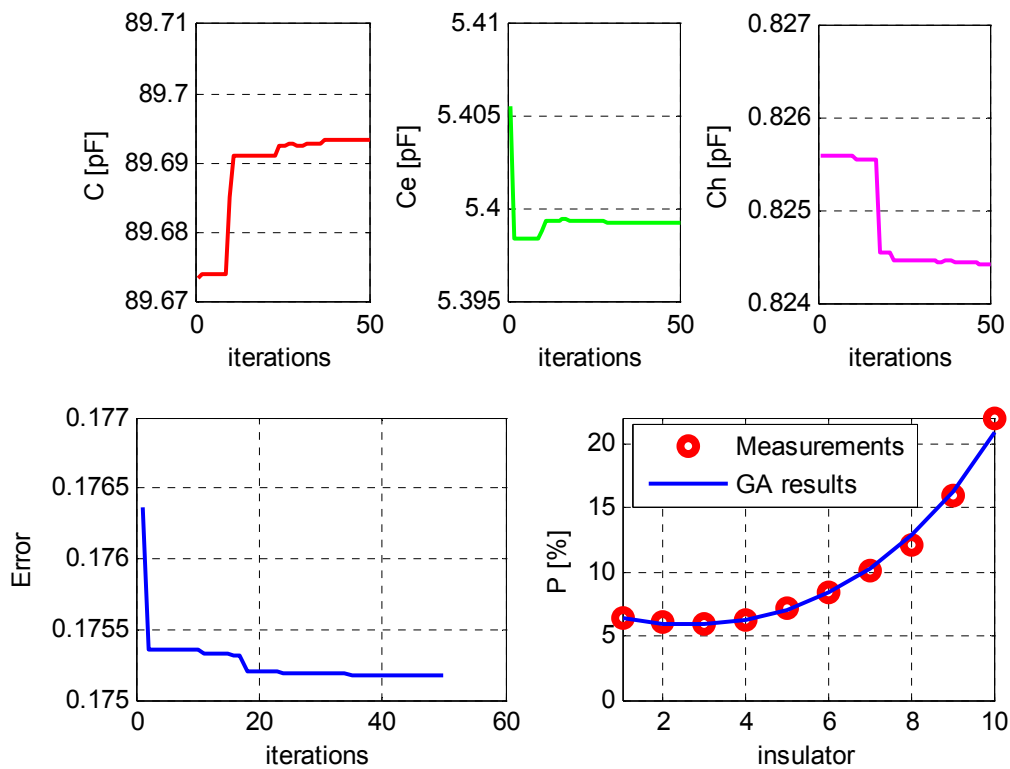




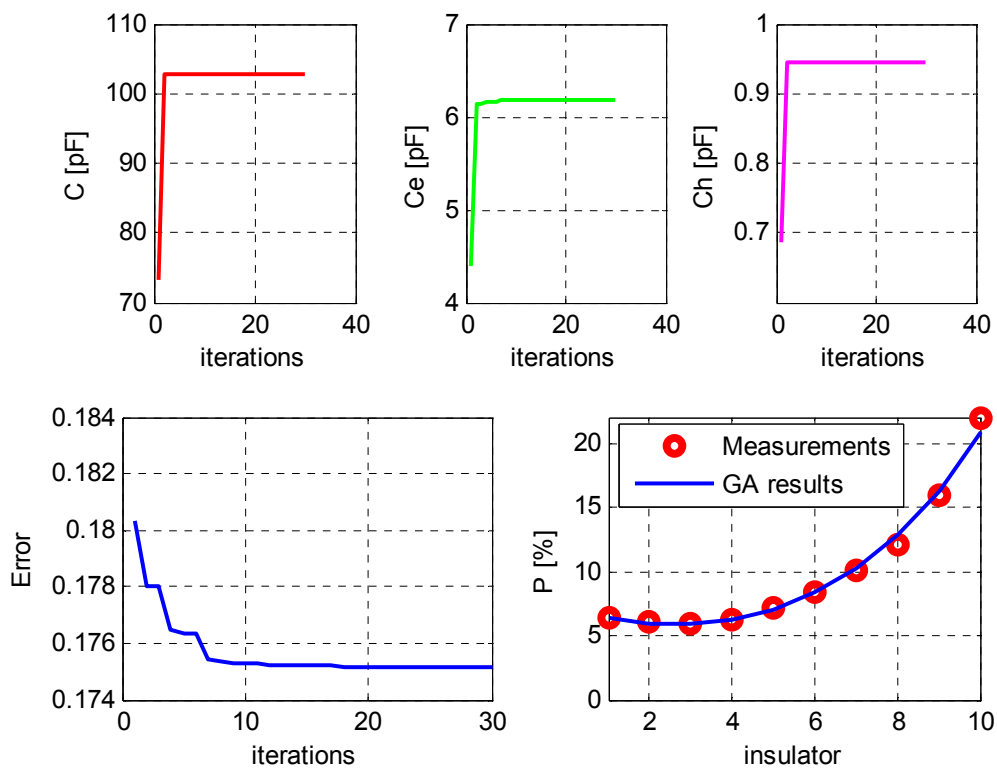
Σχήμα 5.1: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα του εργαστηρίου Υ.Τ. (1η γραμμή του πίνακα 5.2).



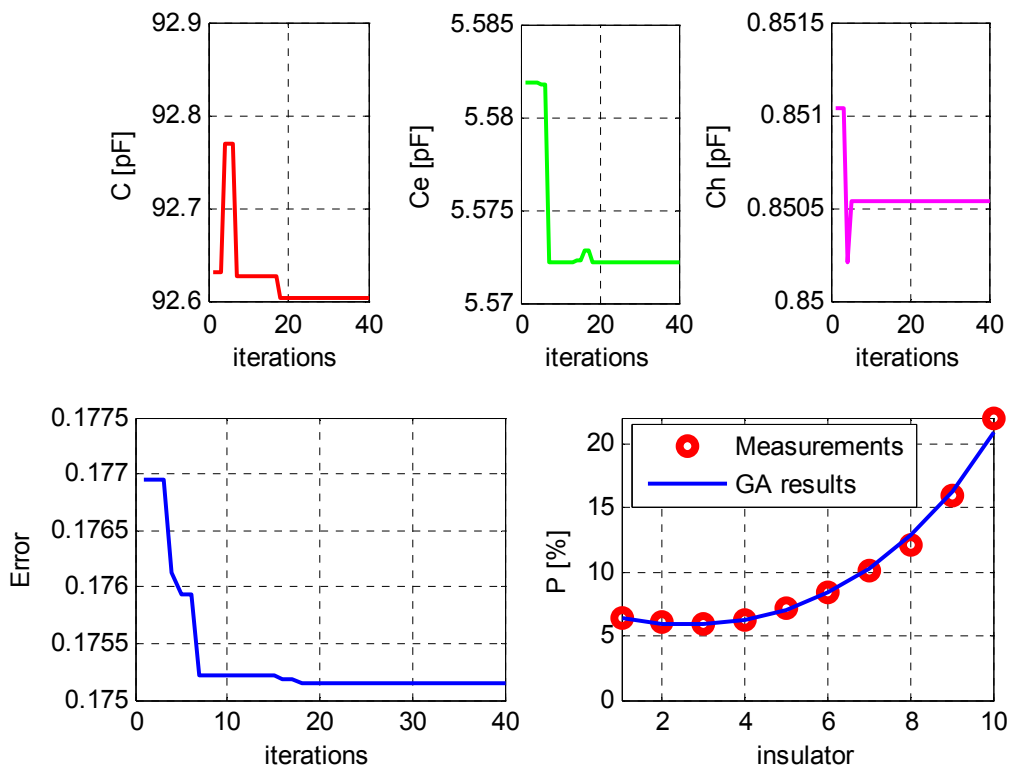
Σχήμα 5.2: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα του εργαστηρίου Υ.Τ. (2η γραμμή του πίνακα 5.2).



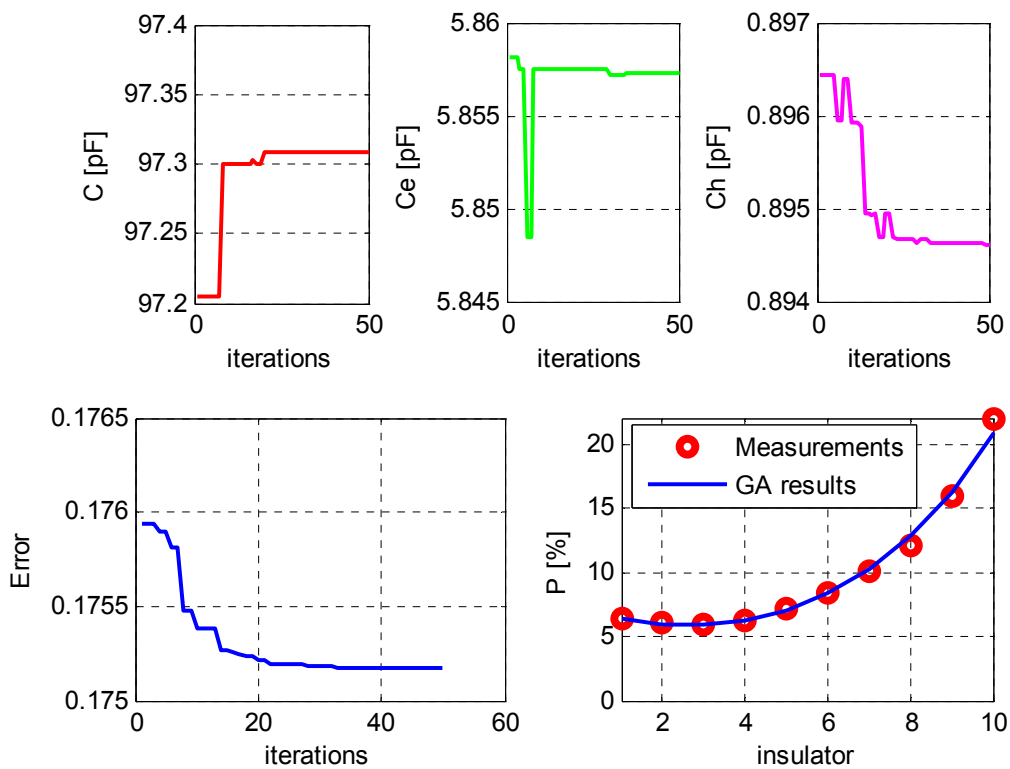
Σχήμα 5.3: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα του εργαστηρίου Y.T. (3η γραμμή του πίνακα 5.2).



Σχήμα 5.4: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα του εργαστηρίου Y.T. (4η γραμμή του πίνακα 5.2).



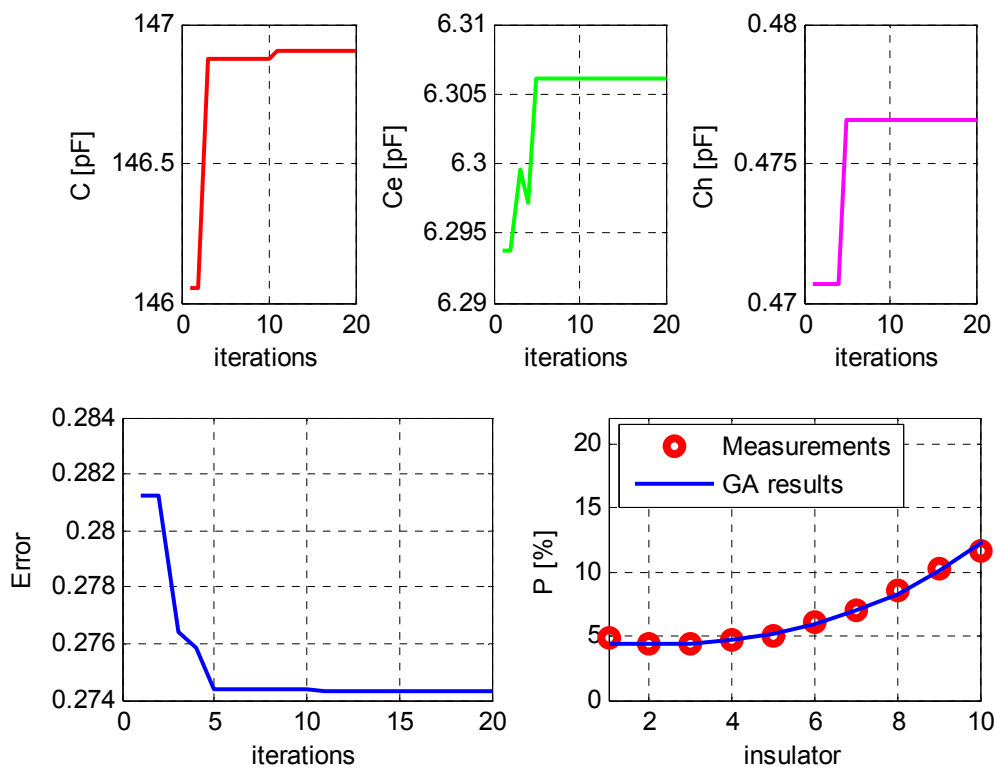
Σχήμα 5.5: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα του εργαστηρίου Υ.Τ. (5η γραμμή του πίνακα 5.2).



Σχήμα 5.6: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα του εργαστηρίου Υ.Τ. (6η γραμμή του πίνακα 5.2).

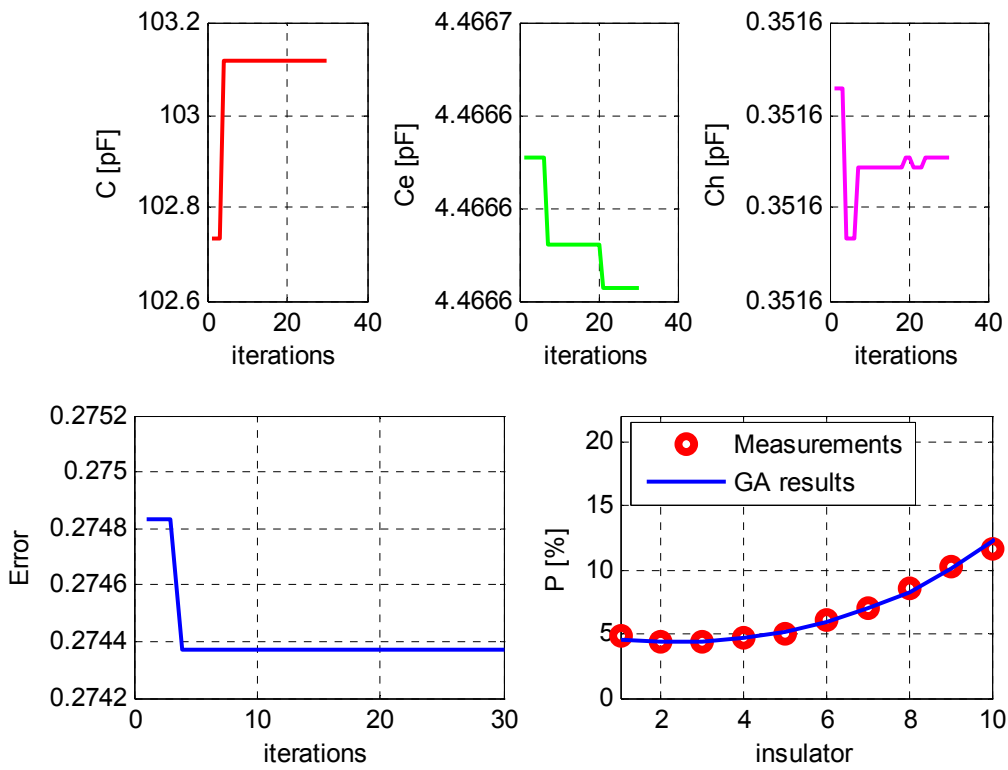
α/α	g	I	Σφάλμα	C [pF]	C <sub>e</sub> [pF]	C <sub>h</sub> [pF]
1	20	20	0.27434288	146.90335455	6.30604878	0.47654810
2	20	30	0.27437153	103.11880409	4.46660268	0.35158533
3	20	50	0.27415873	133.33764395	5.75576711	0.44562276
4	30	30	0.27420947	193.32640011	8.35239339	0.64944801
5	30	30	0.27416962	150.10625849	6.48098820	0.50238020
6	30	50	0.27410501	184.00389099	7.93645319	0.61220231

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα για τον καθαρό αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010.

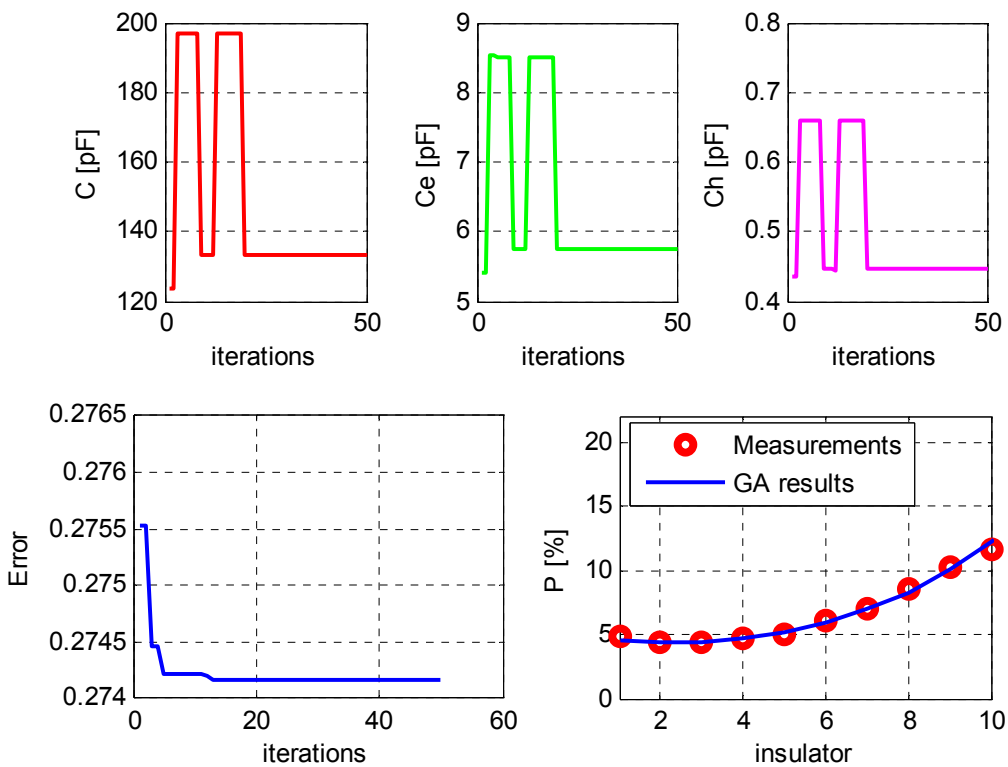


Σχήμα 5.7: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (1η γραμμή του πίνακα 5.3).

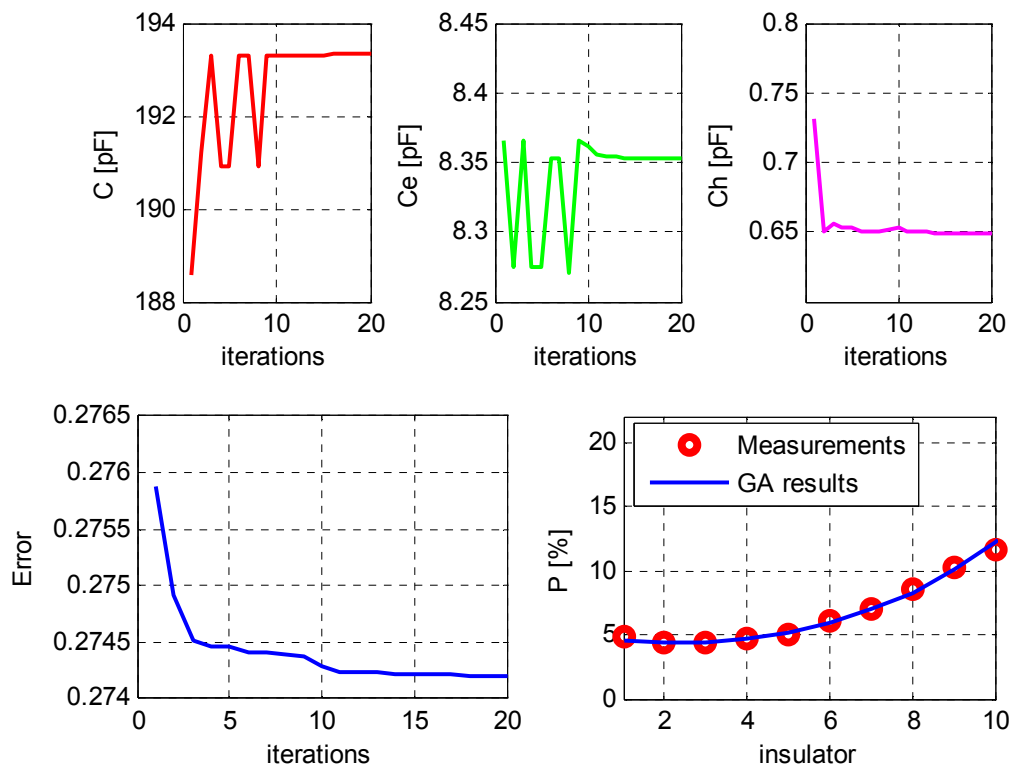




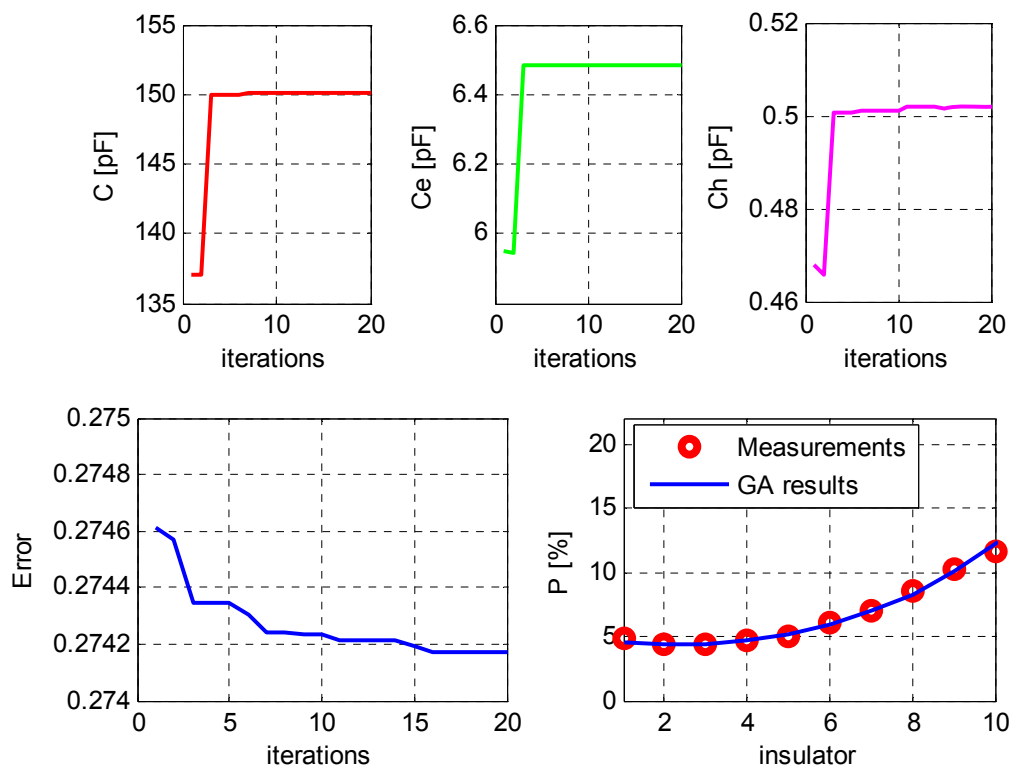
Σχήμα 5.8: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (2η γραμμή του πίνακα 5.3).



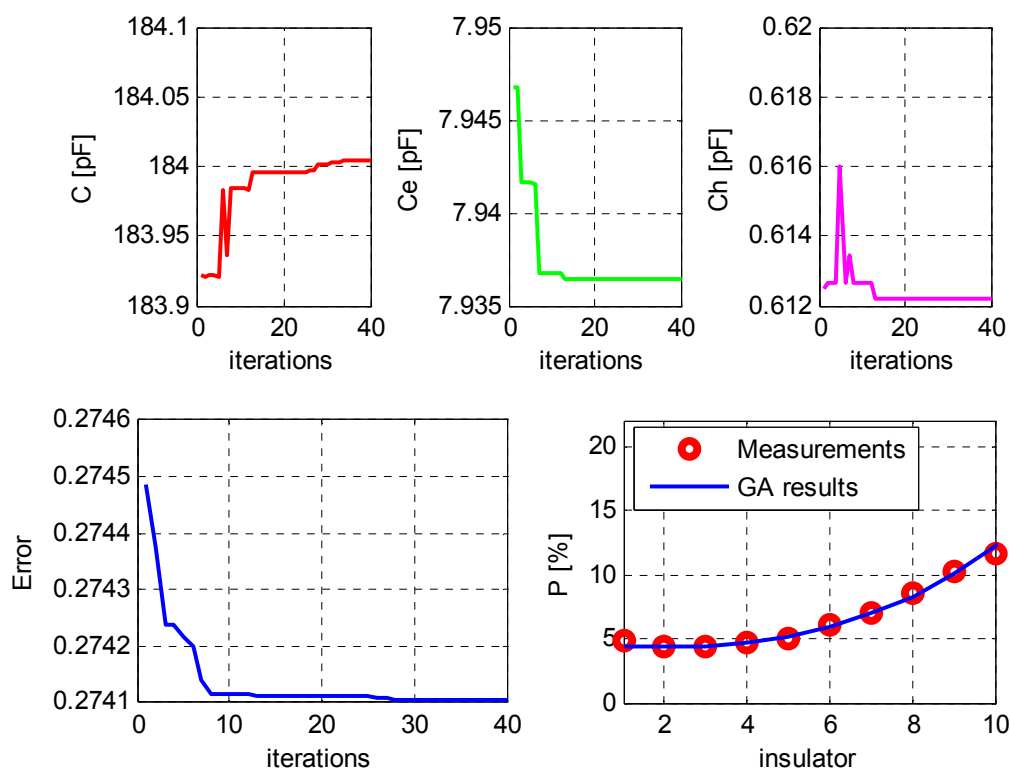
Σχήμα 5.9: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (3η γραμμή του πίνακα 5.3).



Σχήμα 5.10: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (4η γραμμή του πίνακα 5.3).



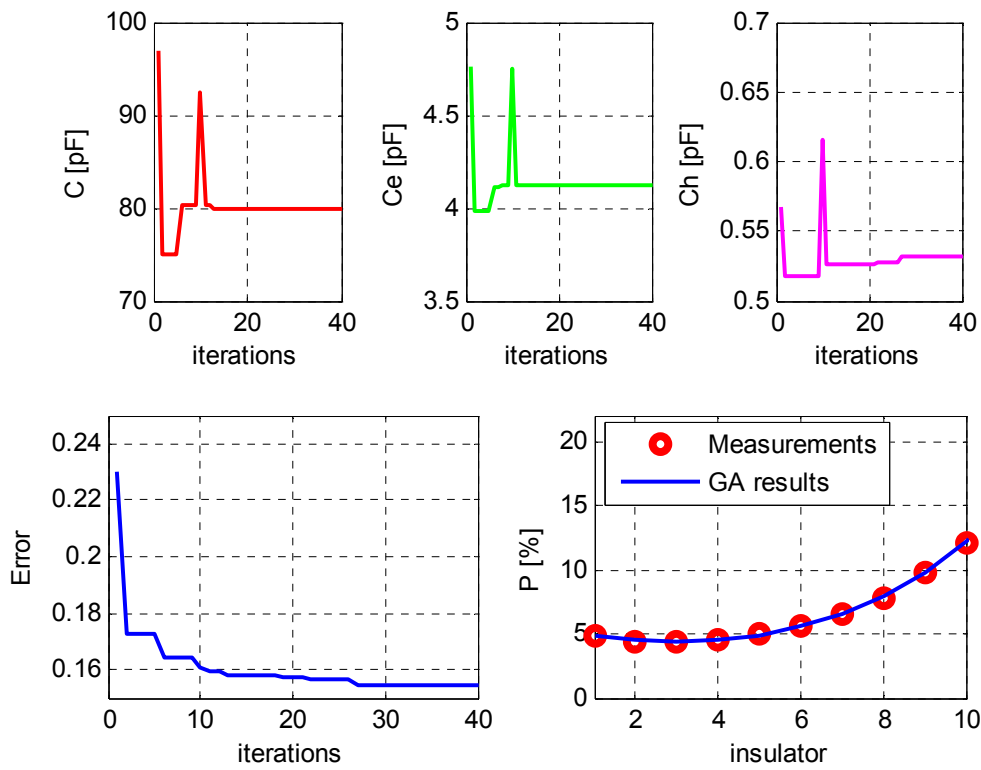
Σχήμα 5.11: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (5η γραμμή του πίνακα 5.3).



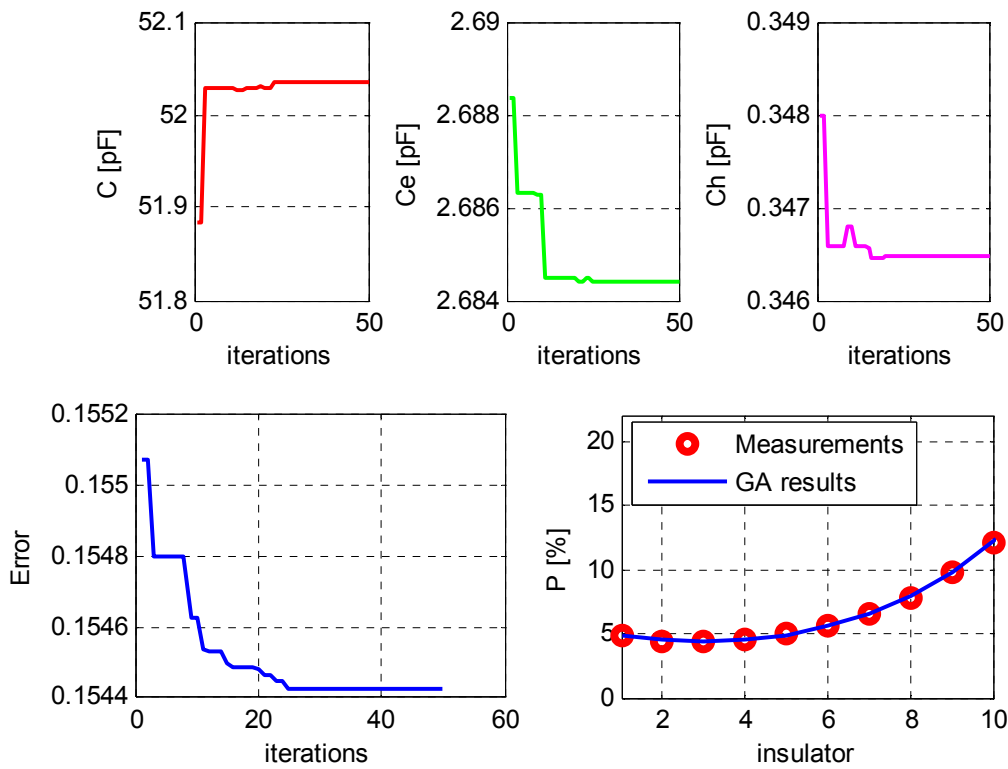
Σχήμα 5.12: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (6η γραμμή του πίνακα 5.3).

α/α	g	l	Σφάλμα	C [pF]	C <sub>e</sub> [pF]	C <sub>h</sub> [pF]
1	20	40	0.15440004	79.88617409	4.12021715	0.53169544
2	20	50	0.15442696	52.03599170	2.68441857	0.34647208
3	20	50	0.15442171	55.26902224	2.85054917	0.36781971
4	30	20	0.15444654	143.54219298	7.40262785	0.95523257
5	30	30	0.15449209	5.46314083	5.46314083	0.70491641
6	30	40	0.15440613	122.00632287	6.29312352	0.81216237

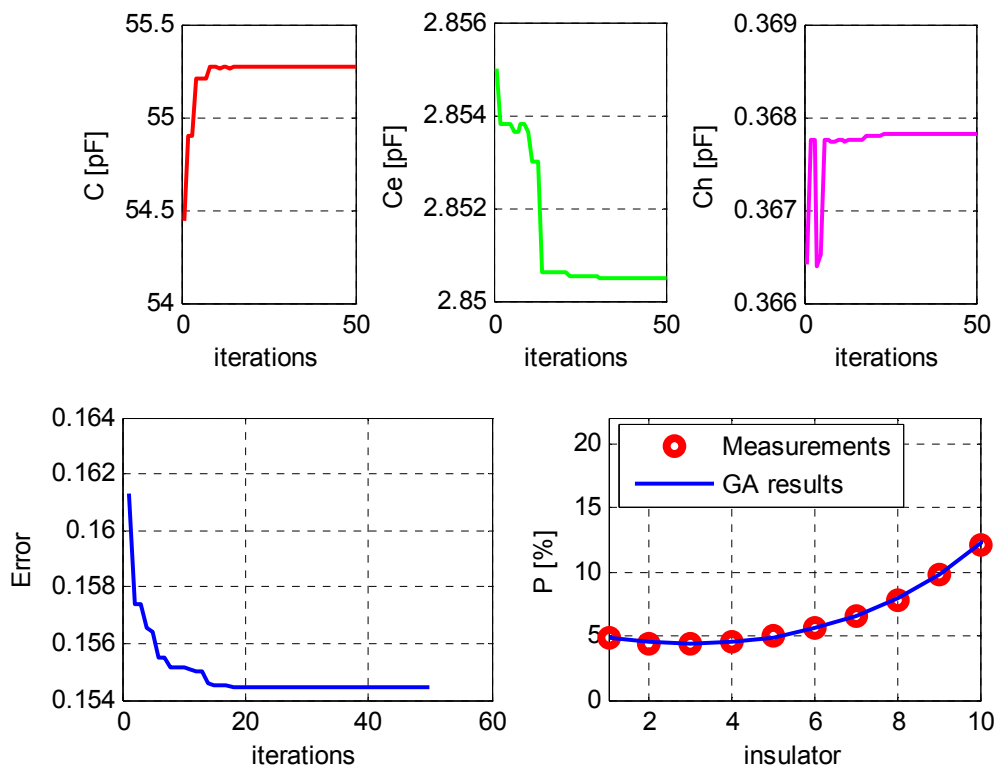
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα για τον ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010.



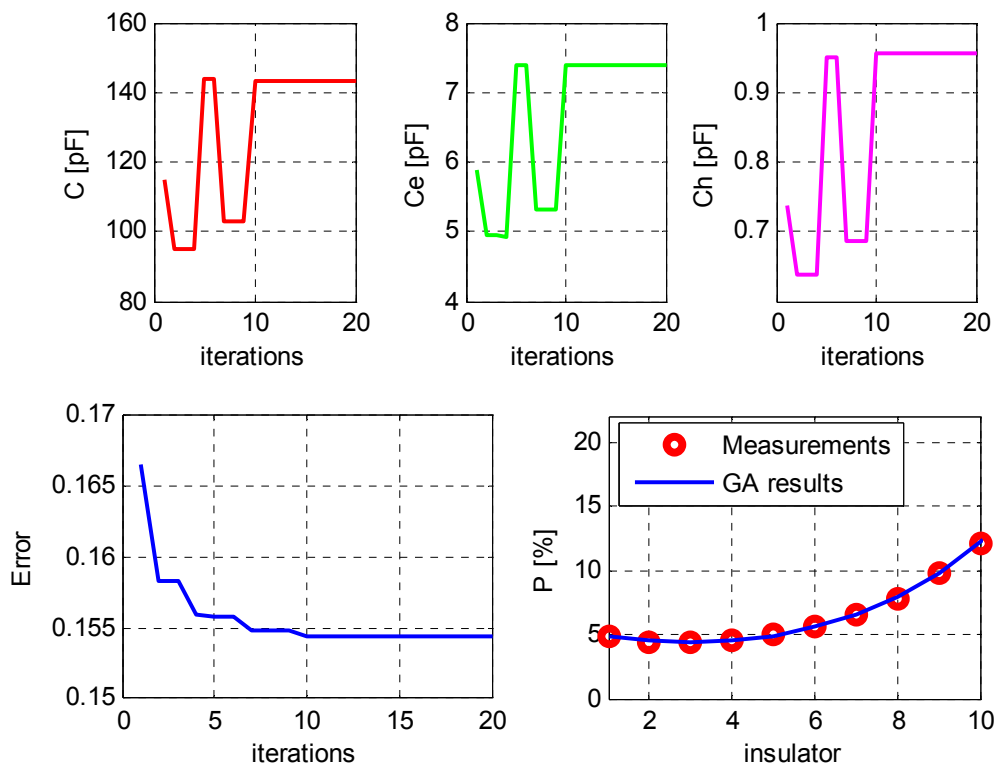
Σχήμα 5.13: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (1η γραμμή του πίνακα 5.4).



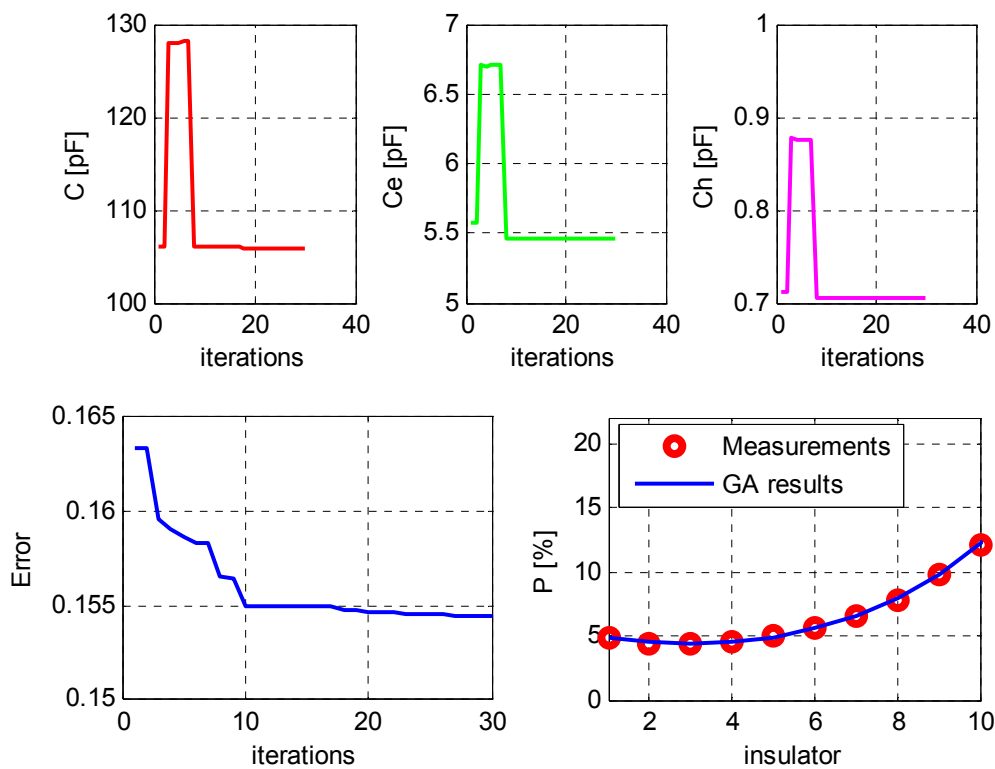
Σχήμα 5.14: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (2η γραμμή του πίνακα 5.4).



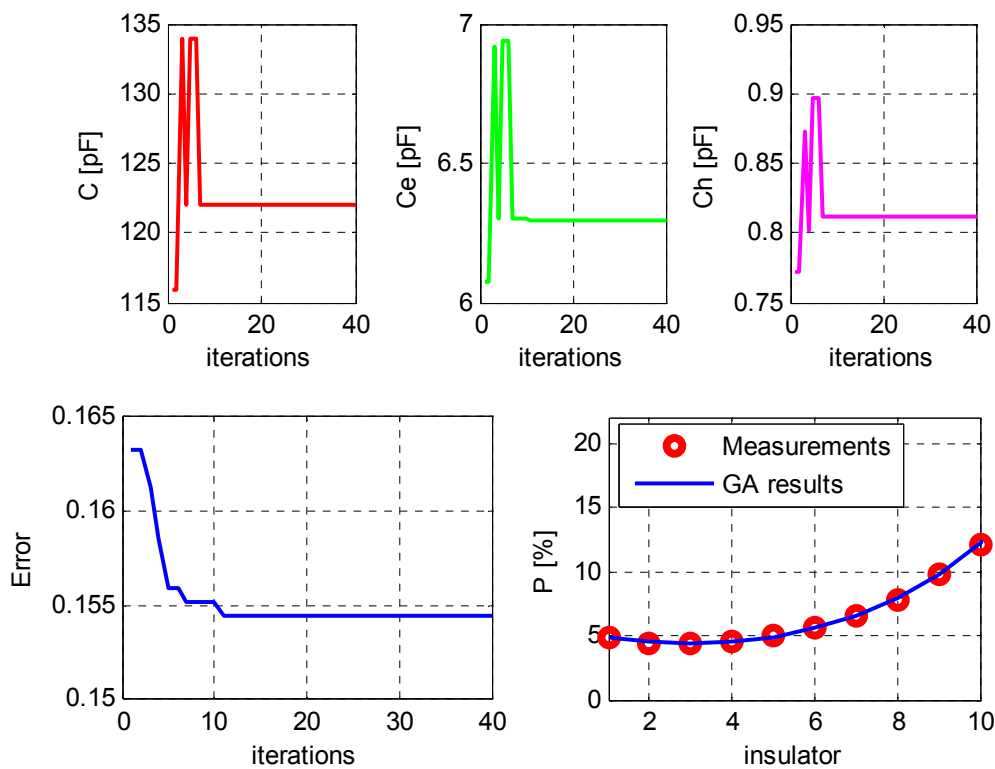
Σχήμα 5.15: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (3η γραμμή του πίνακα 5.4).



Σχήμα 5.16: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (4η γραμμή του πίνακα 5.4).



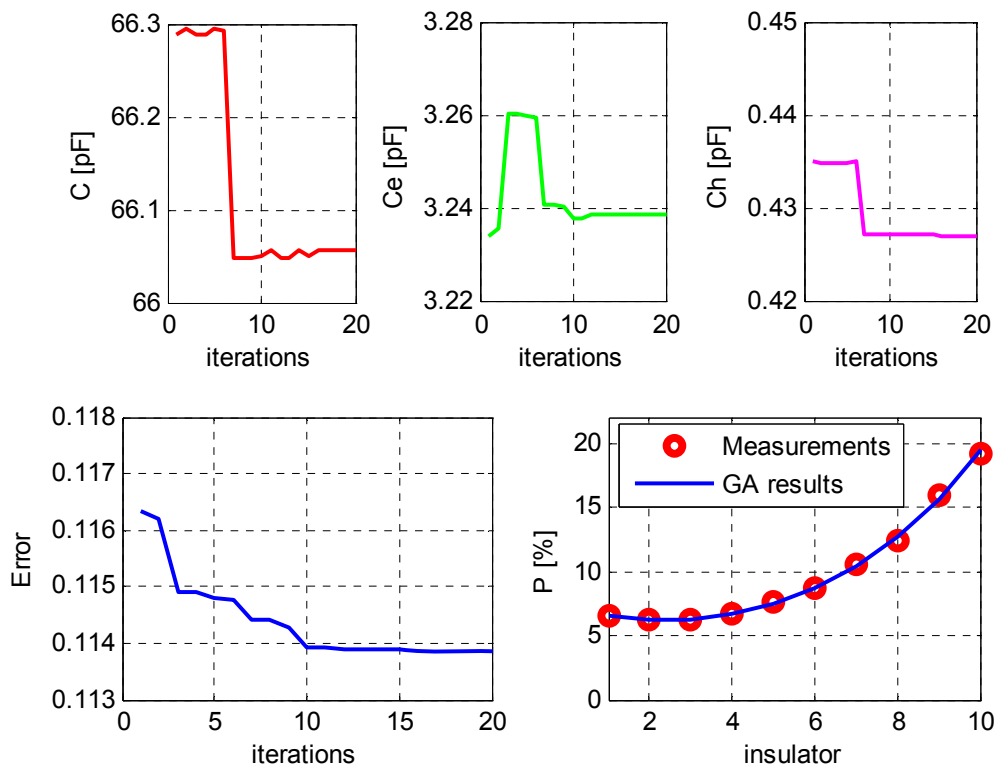
Σχήμα 5.17: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (5η γραμμή του πίνακα 5.4).



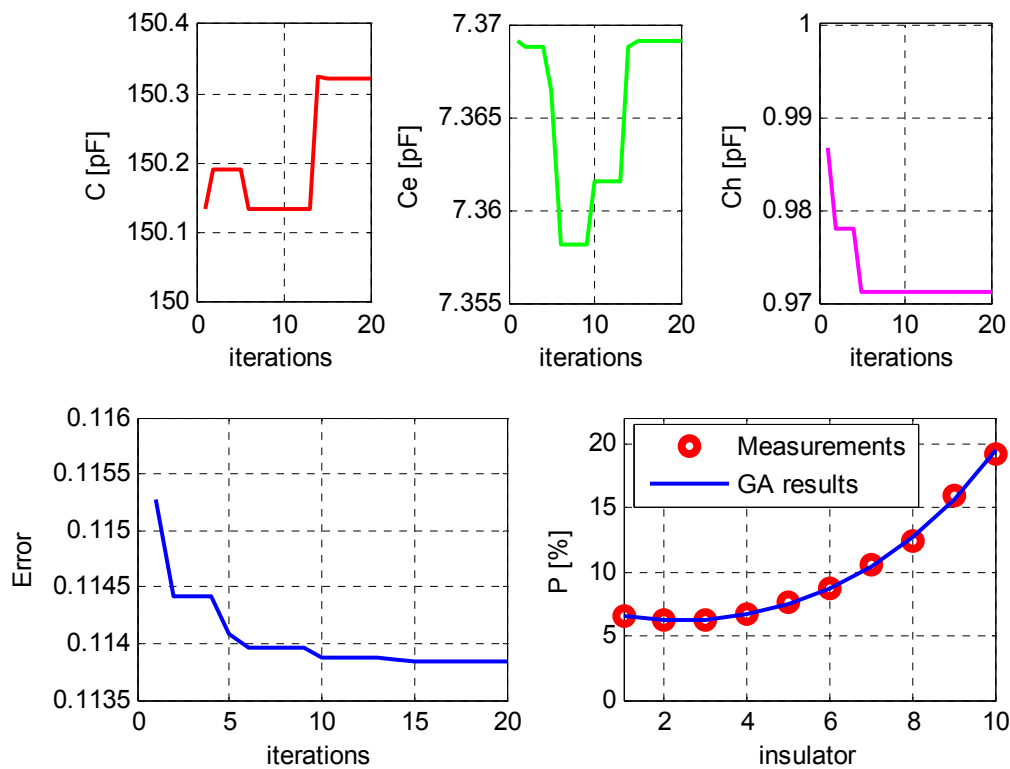
Σχήμα 5.18: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 010. (6η γραμμή του πίνακα 5.4).

$\alpha/\alpha$	g	l	Σφάλμα	C [pF]	C <sub>e</sub> [pF]	C <sub>h</sub> [pF]
1	20	20	0.11384826	66.05546098	3.23875059	0.42710090
2	20	20	0.11383306	150.32179386	7.36904485	0.97110681
3	20	30	0.11389450	113.79886989	5.57748544	0.73439838
4	30	20	0.11383349	119.14671340	5.84115500	0.77008352
5	30	30	0.11382802	111.71213790	5.47656648	0.72196251
6	30	40	0.11383621	85.64704957	4.19917545	0.55366996

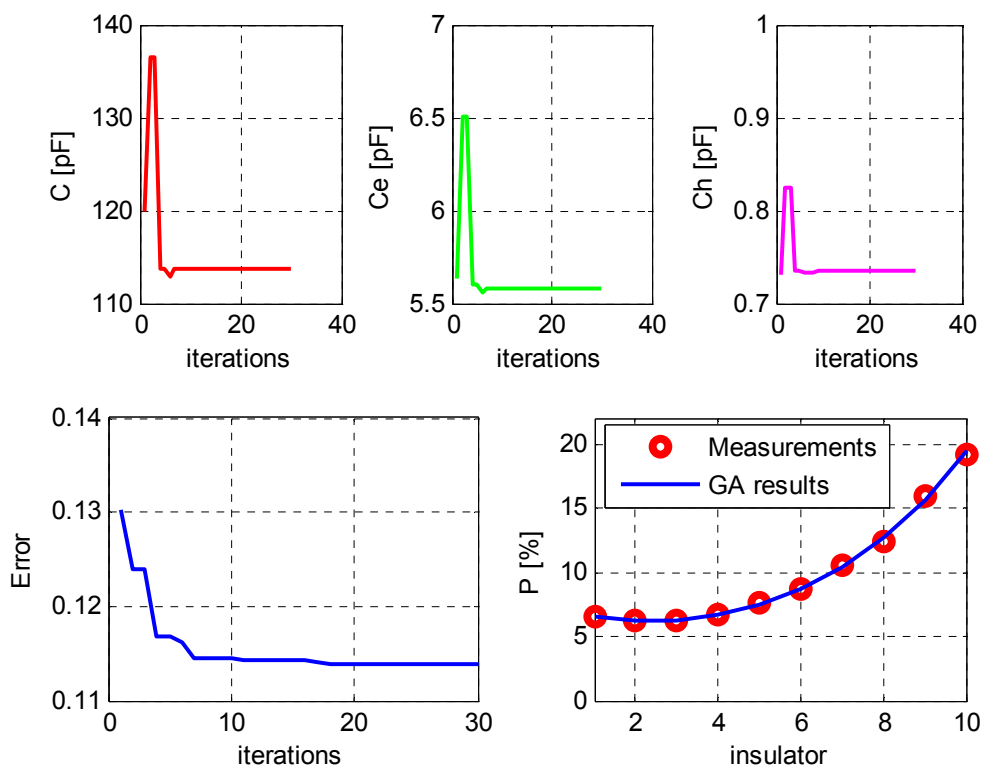
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 033.



Σχήμα 5.19: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 033. (1η γραμμή του πίνακα 5.5).

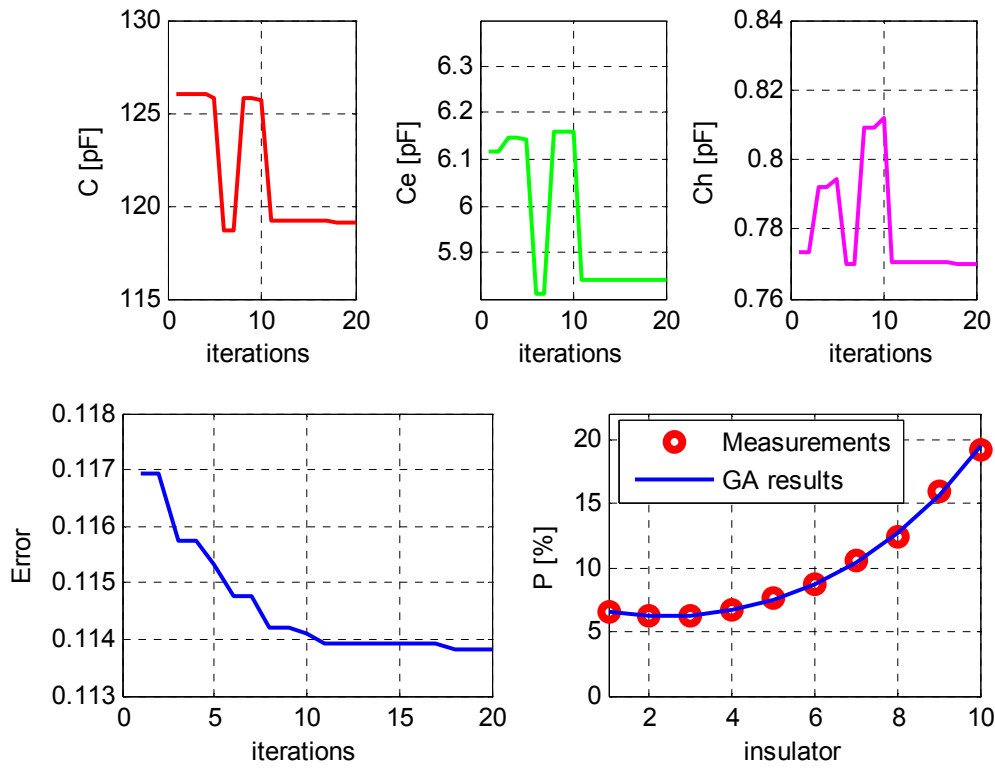


Σχήμα 5.20: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της  $\Delta EH$  με κωδικό 033. (2η γραμμή του πίνακα 5.5).

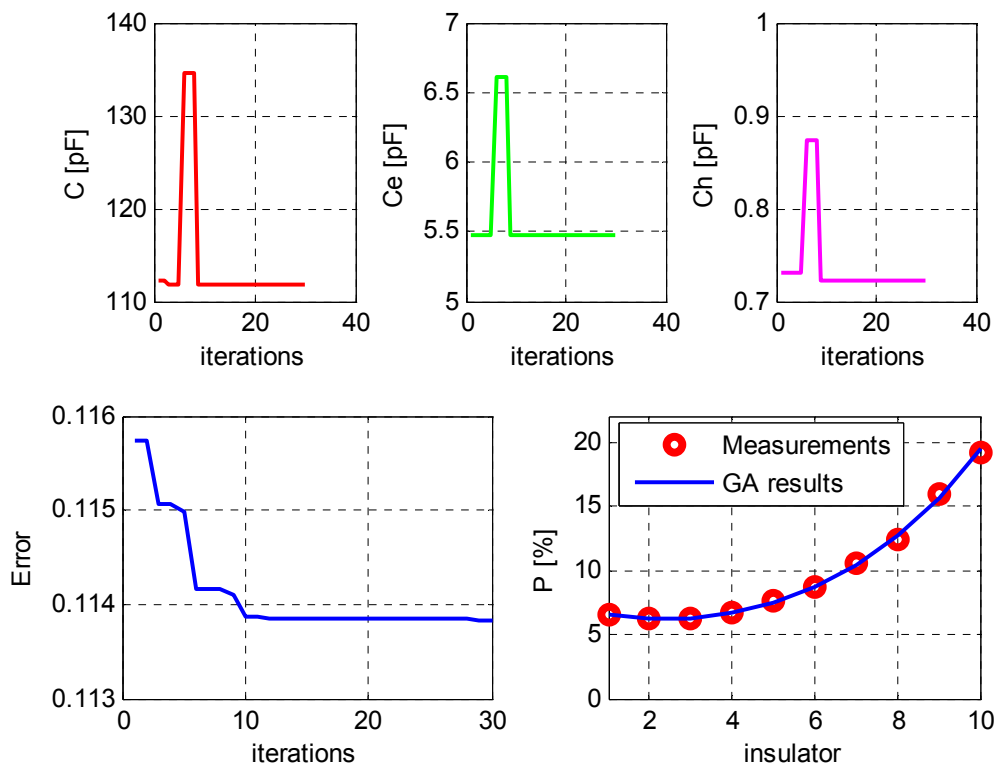


Σχήμα 5.21: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της  $\Delta EH$  με κωδικό 033. (3η γραμμή του πίνακα 5.5).

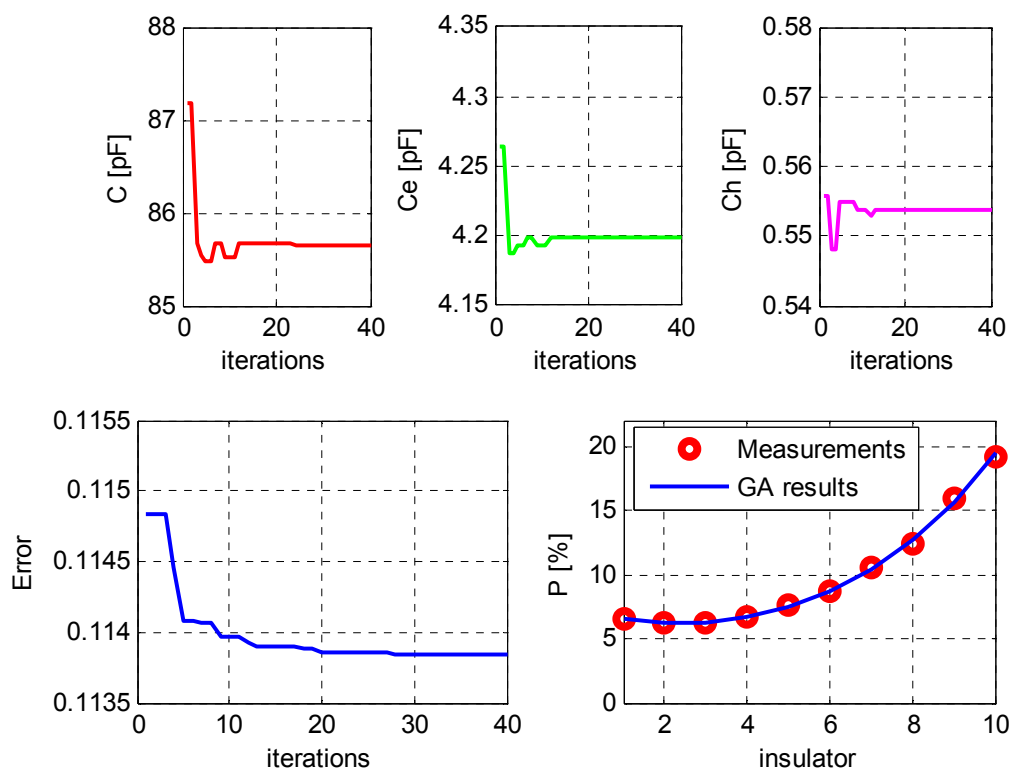




Σχήμα 5.22: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 033. (4η γραμμή του πίνακα 5.5).



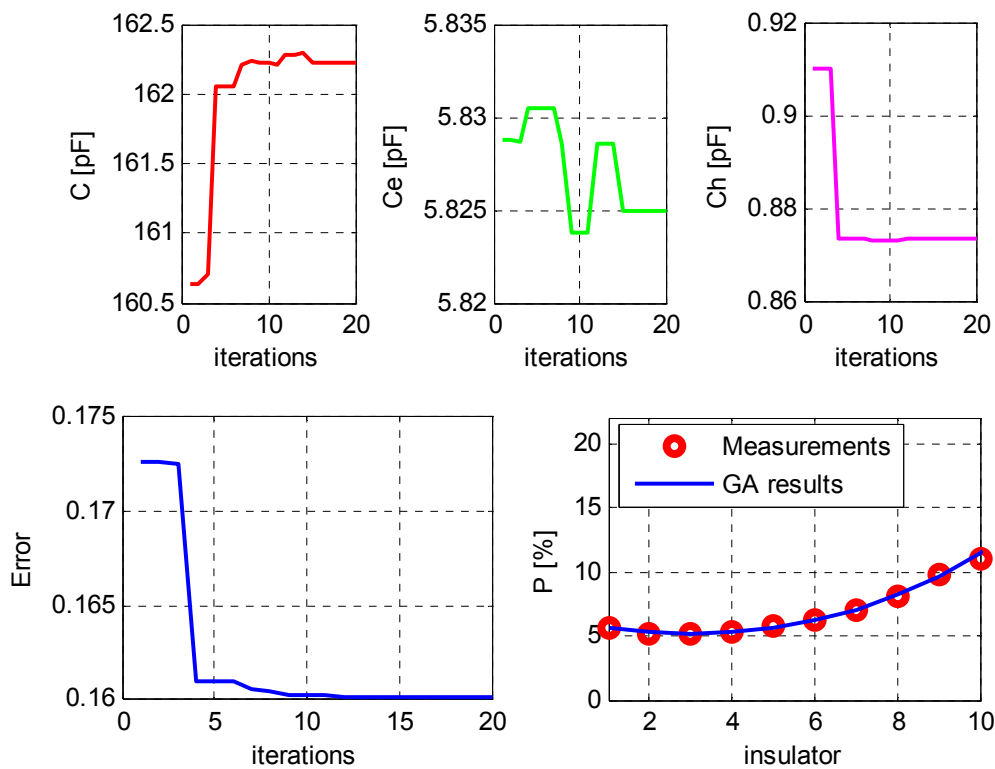
Σχήμα 5.23: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 033. (5η γραμμή του πίνακα 5.5).



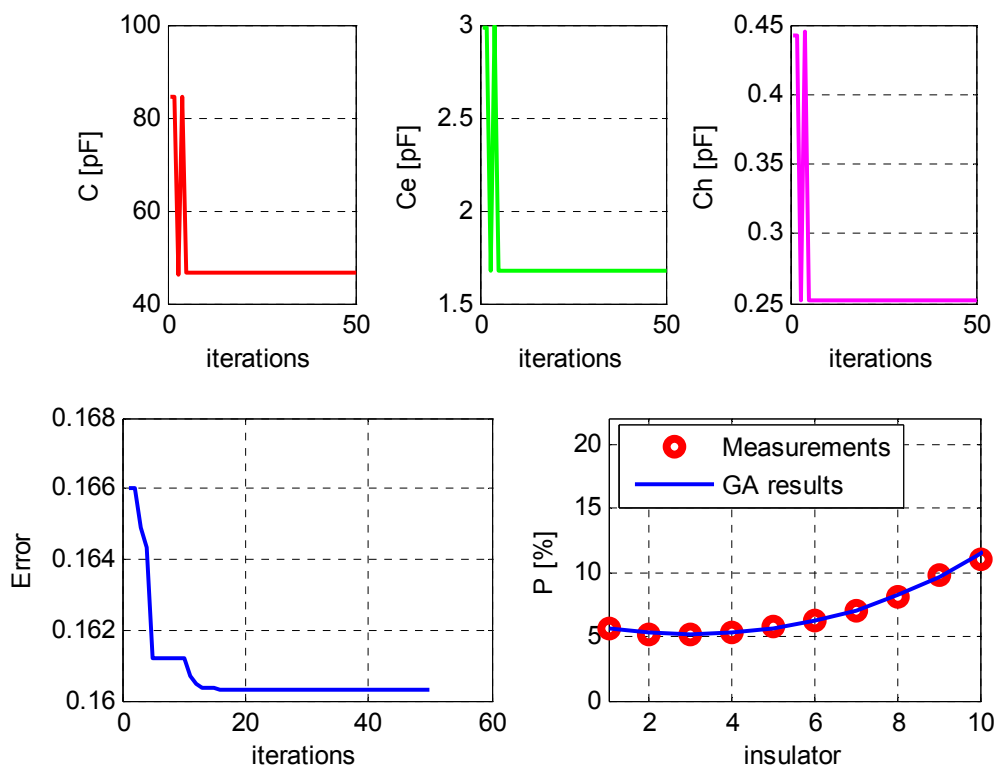
Σχήμα 5.24: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 033. (6η γραμμή του πίνακα 5.5).

α/α	g	l	Σφάλμα	C [pF]	C <sub>e</sub> [pF]	C <sub>h</sub> [pF]
1	20	20	0.16012938	162.22087118	5.82499135	0.87391397
2	20	50	0.16030126	46.70339747	1.68043116	0.25255183
3	20	50	0.16021040	58.01779558	2.08667506	0.31349934
4	30	20	0.16010881	179.81536371	6.45750747	0.96872310
5	30	20	0.16006905	177.33308061	6.37378127	0.95707989
6	30	30	0.16007418	178.50597239	6.41074430	0.96188637

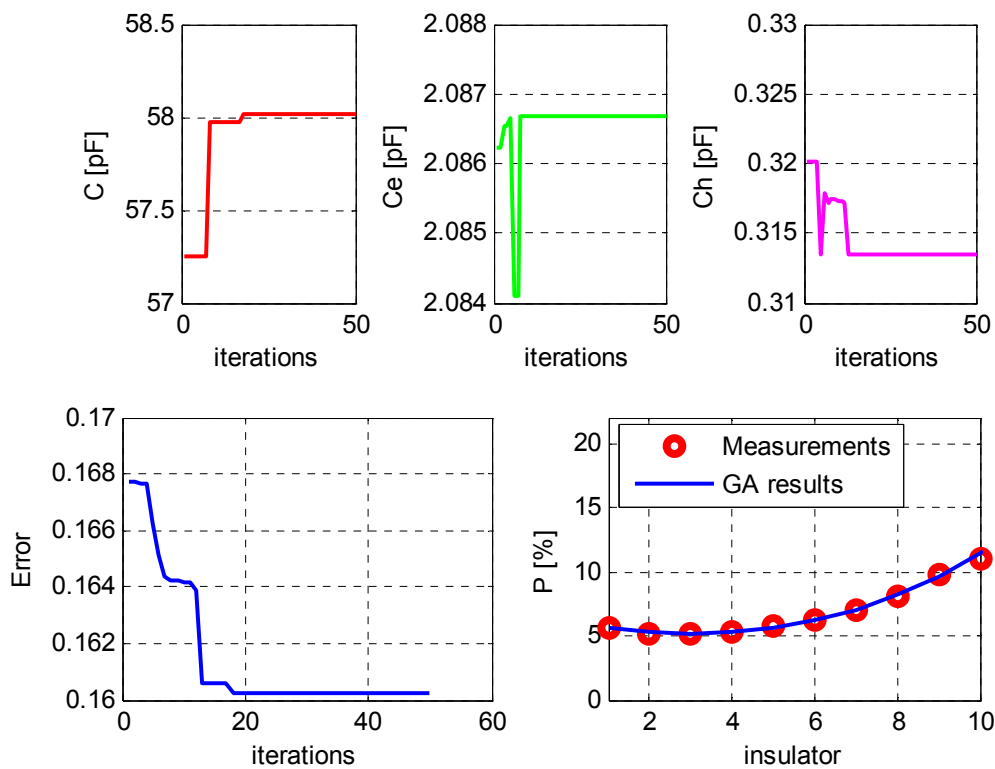
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069.



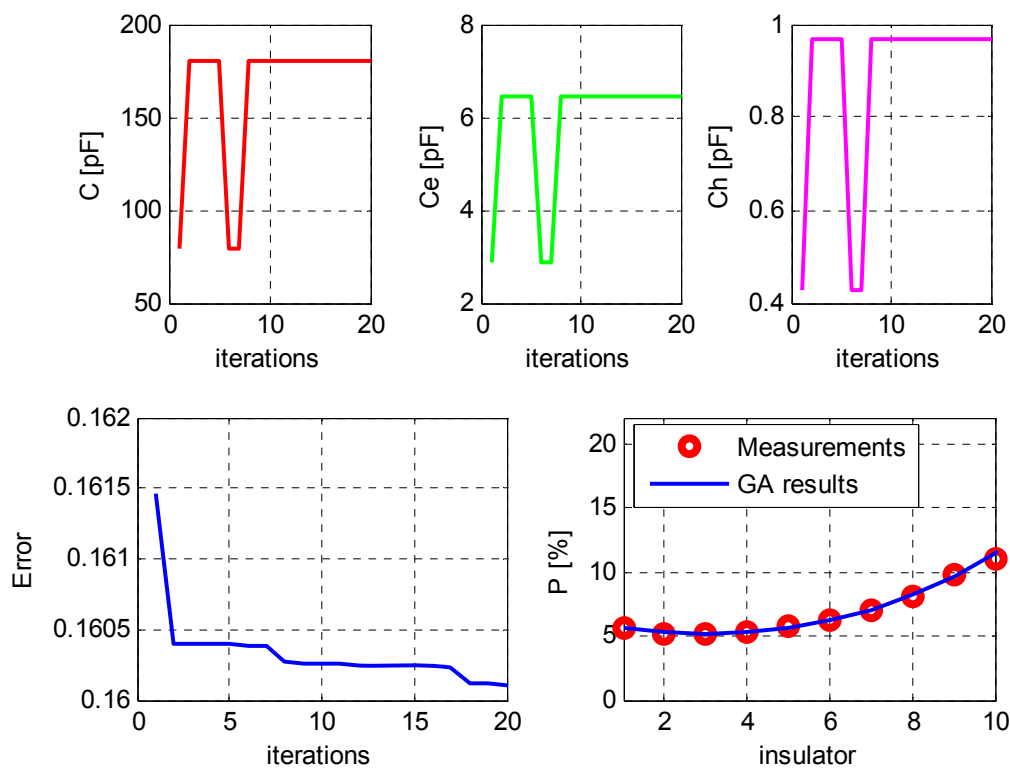
Σχήμα 5.25: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069. (1η γραμμή του πίνακα 5.6).



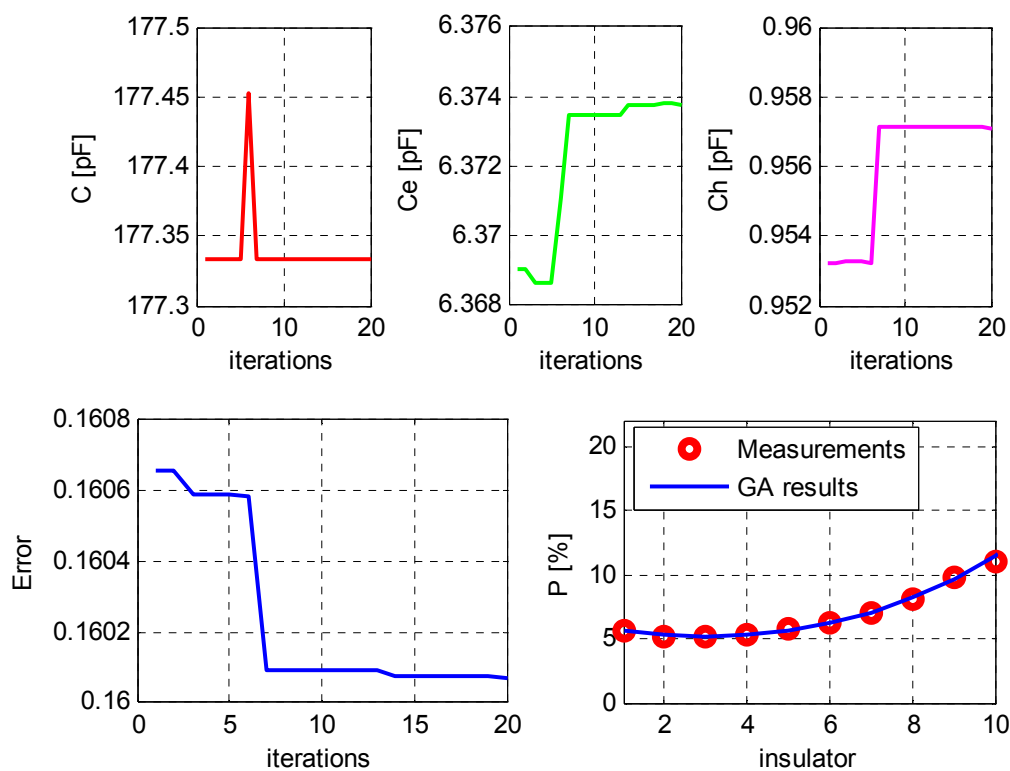
Σχήμα 5.26: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069. (2η γραμμή του πίνακα 5.6).



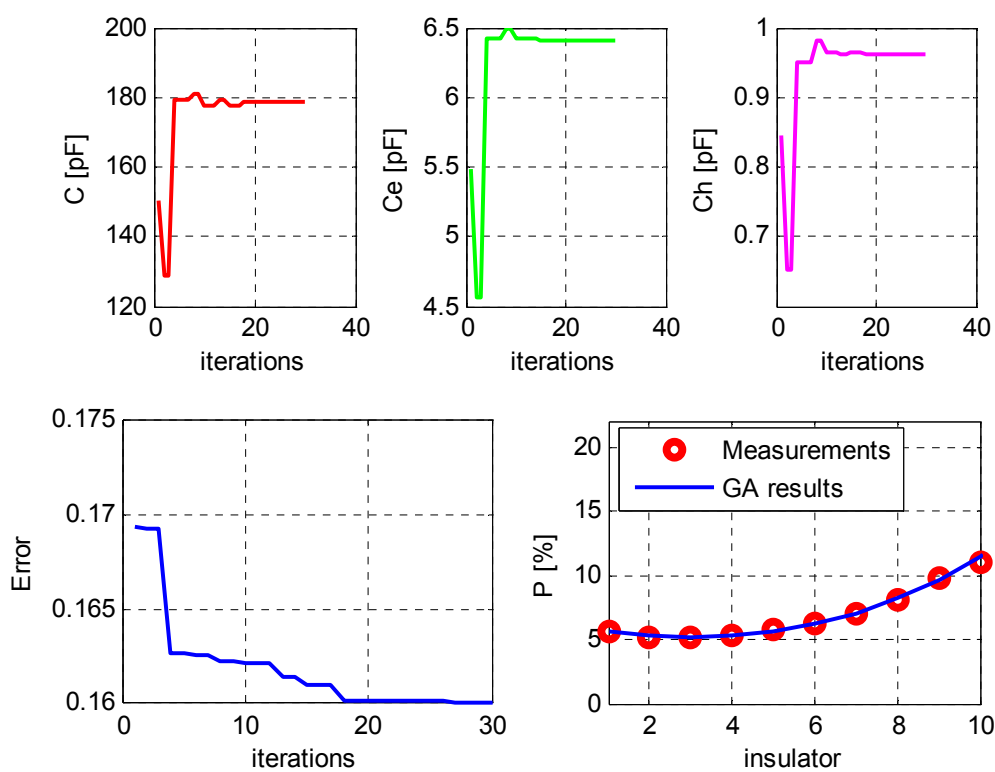
Σχήμα 5.27: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069. (3η γραμμή του πίνακα 5.6).



Σχήμα 5.28: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069. (4η γραμμή του πίνακα 5.6).



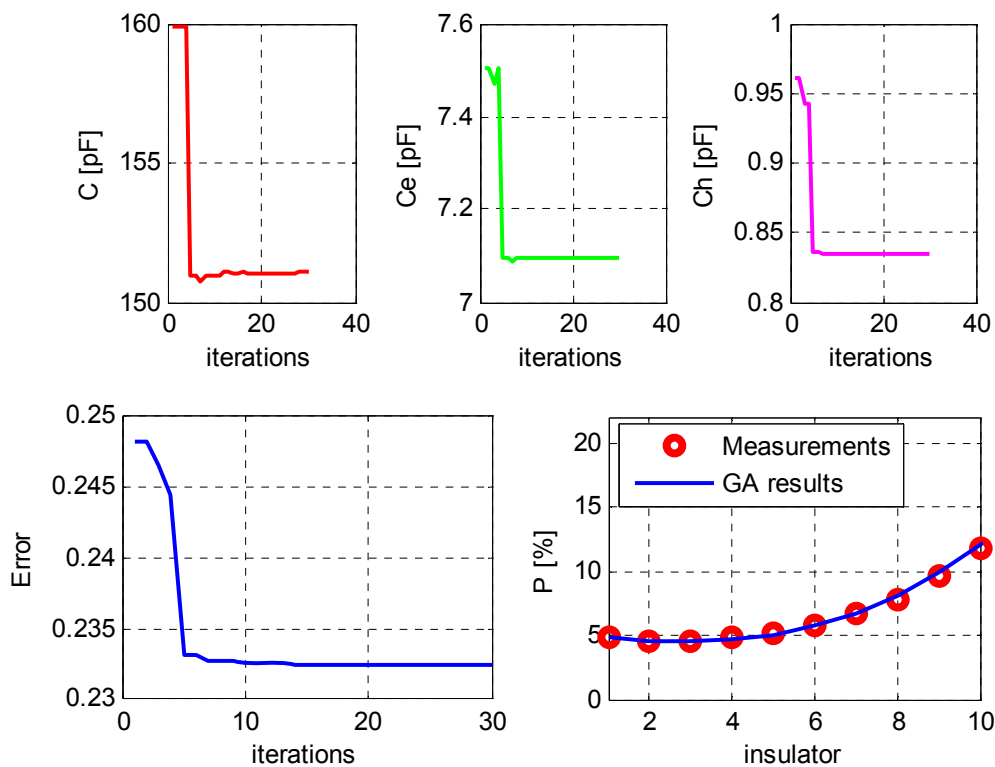
Σχήμα 5.29: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069. (5η γραμμή του πίνακα 5.6).



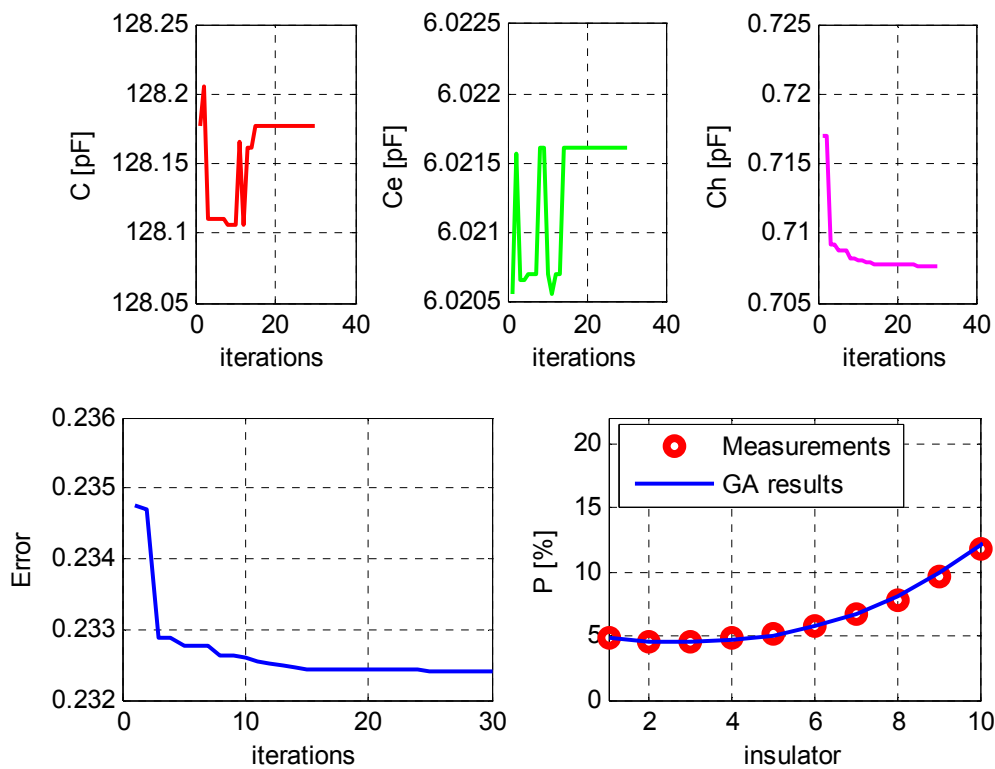
Σχήμα 5.30: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 069. (6η γραμμή του πίνακα 5.6).

$\alpha/\alpha$	g	l	Σφάλμα	C [pF]	C <sub>e</sub> [pF]	C <sub>h</sub> [pF]
1	20	20	0.23245130	151.06547457	7.09683084	0.83422836
2	20	30	<b>0.23241537</b>	128.17706888	6.02161762	0.70769074
3	20	40	0.23243498	124.46405836	5.84670653	0.68708051
4	30	30	0.23254030	144.43892425	6.78335799	0.79699790
5	30	40	0.23245592	144.67993706	6.79788828	0.79903006
6	30	40	0.23250225	95.54772906	4.48925256	0.52781786

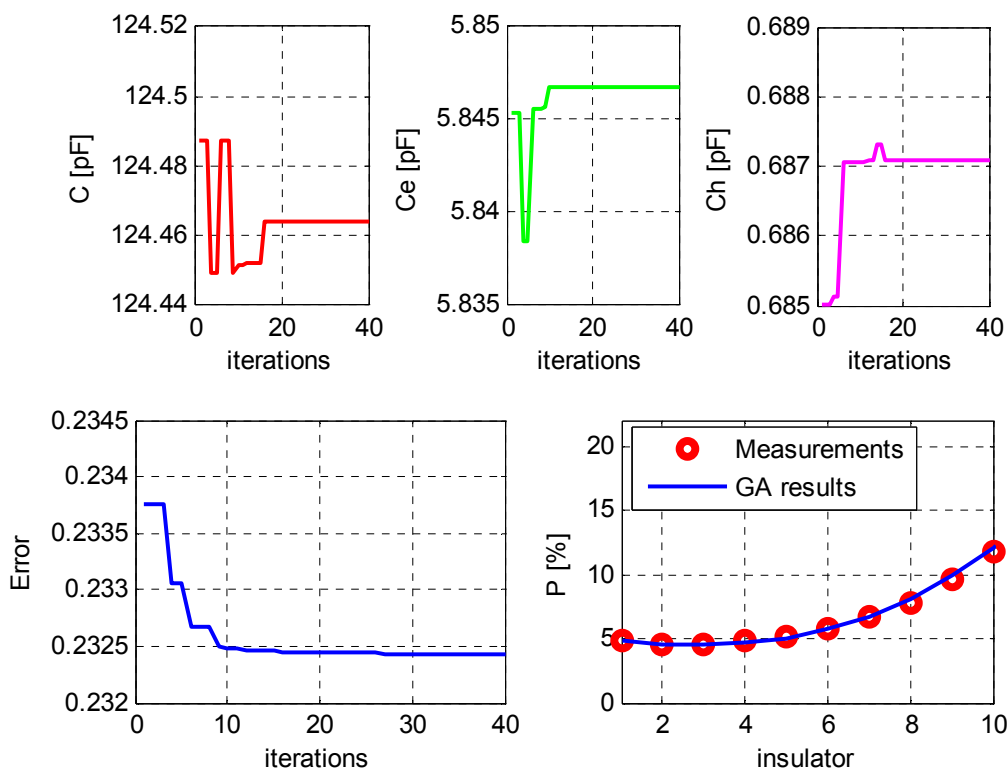
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα για τον ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161.



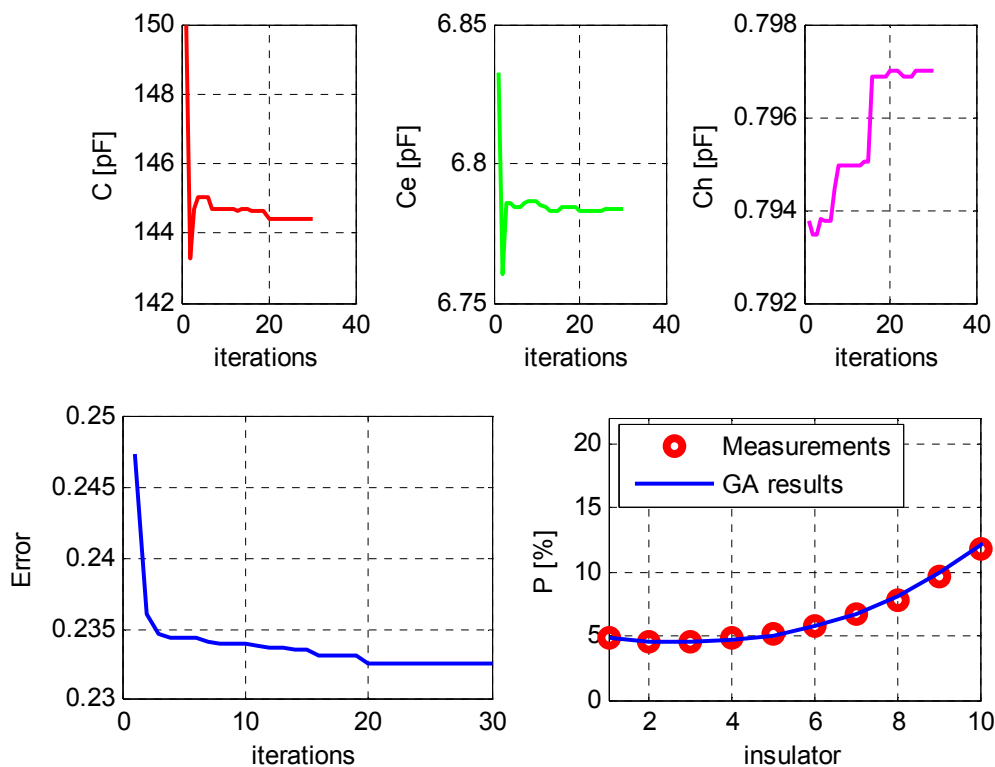
Σχήμα 5.31: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (1η γραμμή του πίνακα 5.7).



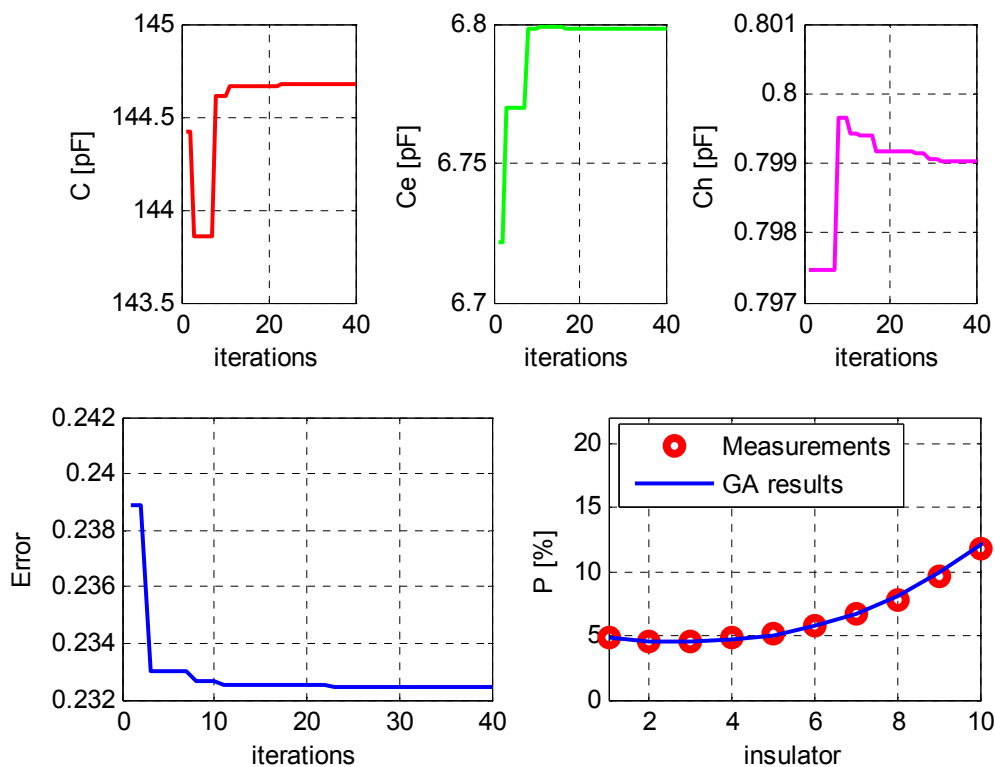
Σχήμα 5.32: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (2η γραμμή του πίνακα 5.7).



Σχήμα 5.33: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (3η γραμμή του πίνακα 5.7).

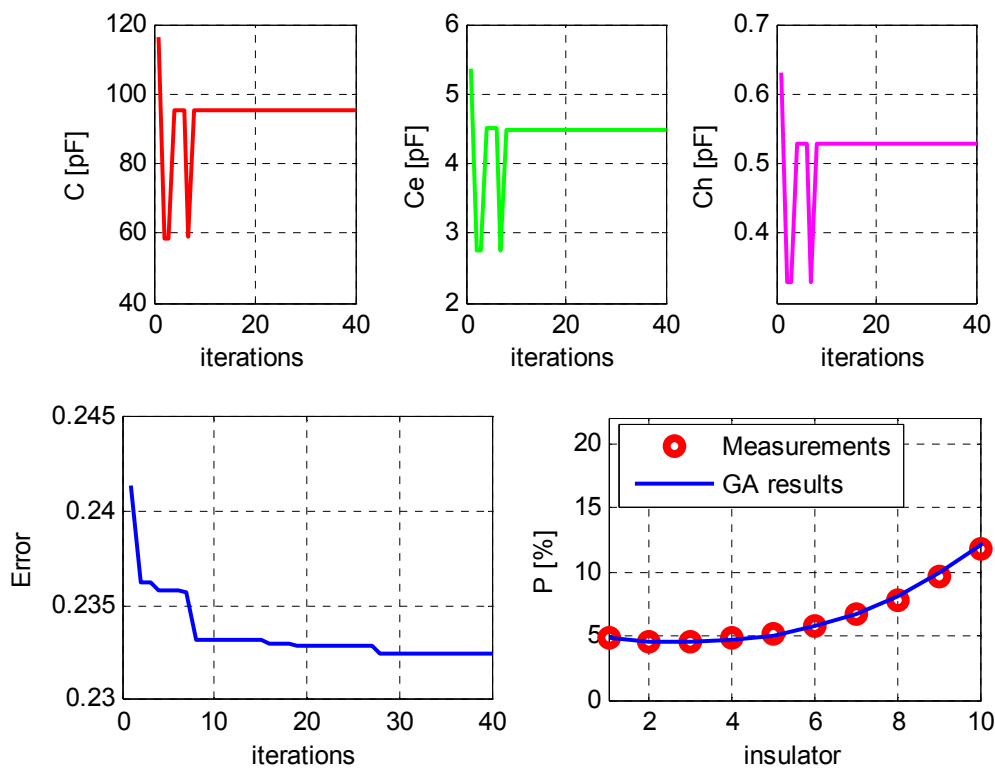


Σχήμα 5.34: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (4η γραμμή του πίνακα 5.7).



Σχήμα 5.35: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (5η γραμμή του πίνακα 5.7).

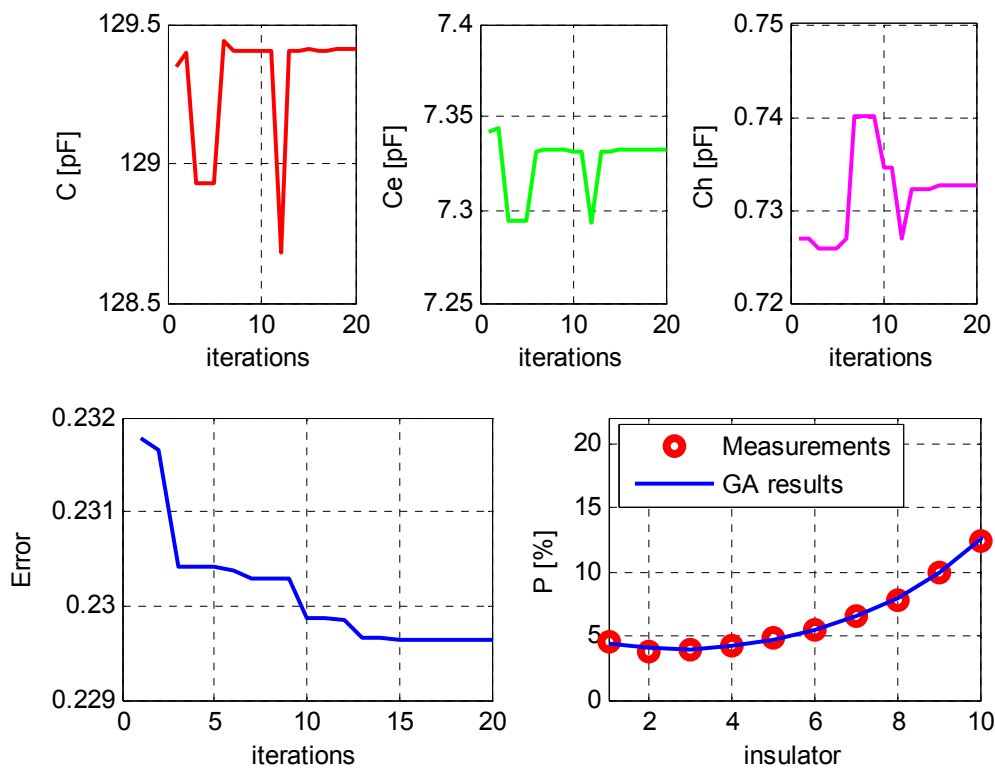




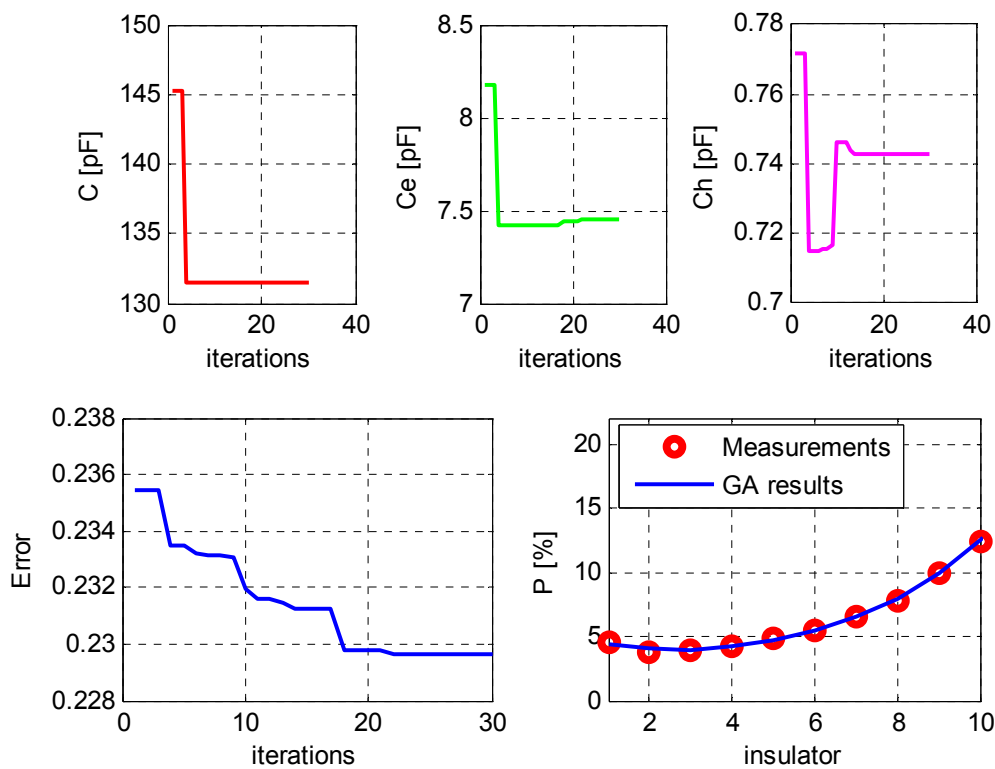
Σχήμα 5.36: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον ρυπασμένο αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (6η γραμμή του πίνακα 5.7).

α/α	g	l	Σφάλμα	C [pF]	C <sub>e</sub> [pF]	C <sub>h</sub> [pF]
1	20	20	0.22963535	129.40946999	7.33237451	0.73256058
2	20	30	0.22961964	131.45714899	7.44724784	0.74294048
3	20	50	0.22963255	34.54675631	1.95737530	0.19550668
4	30	30	0.22965316	168.68321293	9.55931393	0.95665498
5	30	30	0.22965061	135.14040484	7.65824390	0.76622119
6	30	40	0.22963271	76.66988055	4.34402518	0.43389857

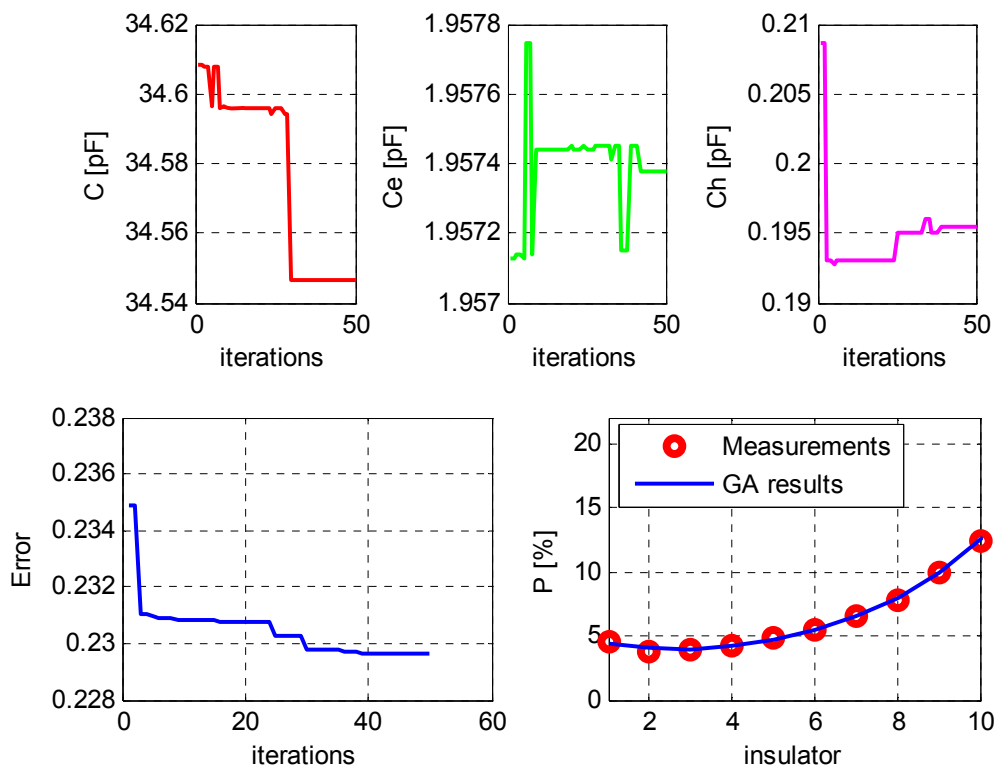
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα για τον καθαρό αλυσσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161.



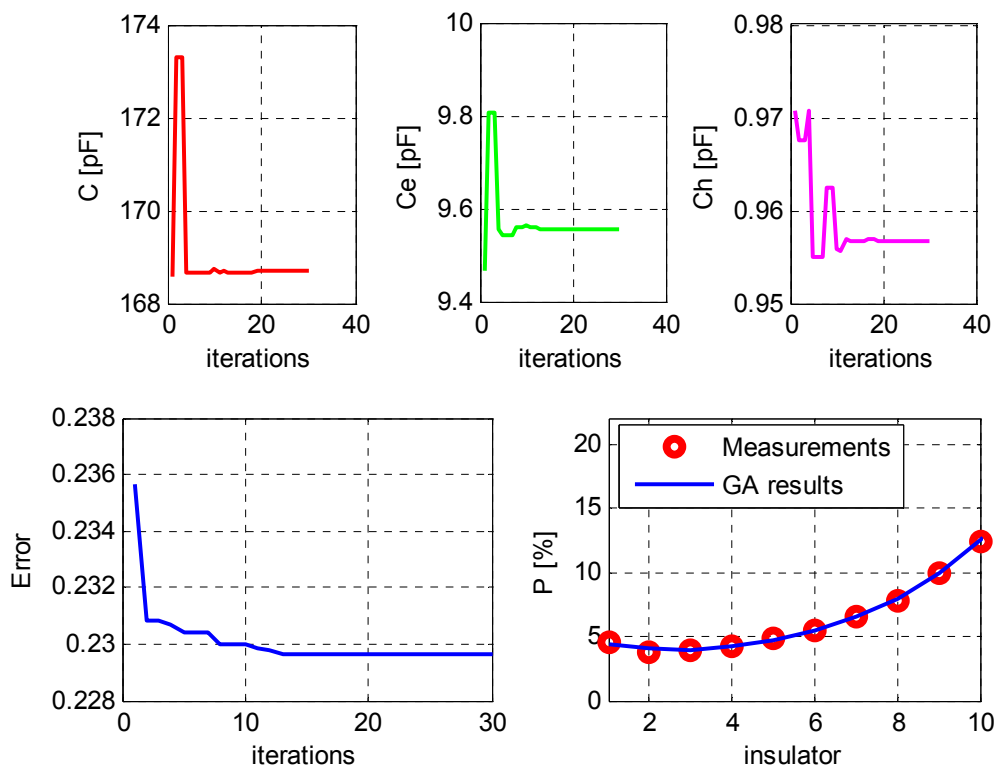
Σχήμα 5.37: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (1η γραμμή του πίνακα 5.8).



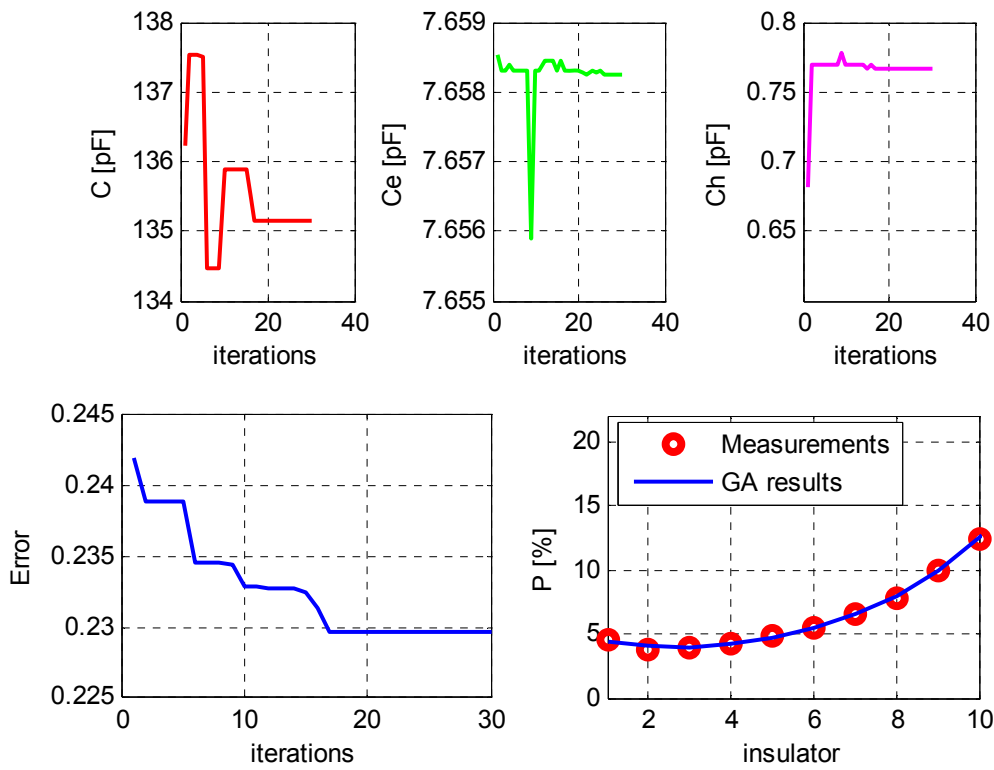
Σχήμα 5.38: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (2η γραμμή του πίνακα 5.8).



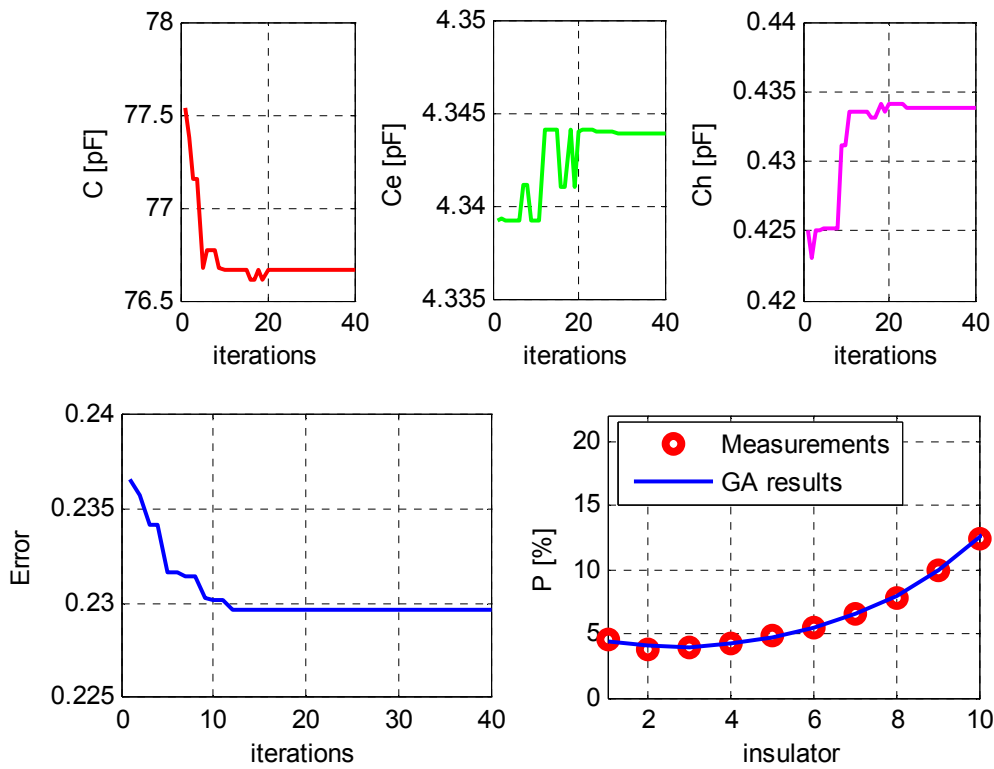
Σχήμα 5.39: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (3η γραμμή του πίνακα 5.8).



Σχήμα 5.40: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (4η γραμμή του πίνακα 5.8).



Σχήμα 5.41: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (5η γραμμή του πίνακα 5.8).



Σχήμα 5.42: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον καθαρό αλυσοειδή μονωτήρα της ΔΕΗ με κωδικό 161. (6η γραμμή του πίνακα 5.8).

## 5.2 Γενικά συμπεράσματα για τον υπολογισμό των χωρητικότητων επί αλυσοειδών μονωτήρων

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, για τον υπολογισμό της κατανομής της τάσης επί αλυσοειδούς μονωτήρος, είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός των εξής μεγεθών: της χωρητικότητας ενός απλού δίσκου του αλυσοειδούς που συμβολίζεται στην διεθνή βιβλιογραφία ως  $C$  και των παράσιτων χωρητικότητων της άρθρωσης μεταξύ δύο γειτονικών δίσκων προς το γειωμένο πυλώνα και προς τον αγωγό υψηλής τάσης αντίστοιχα που συμβολίζονται ως  $C_e$ ,  $C_h$ . Έχουν ήδη παρουσιαστεί οι μέθοδοι υπολογισμού της τάσης επί των αλυσοειδών μονωτήρων με βάση αυτά τα μεγέθη, όμως ο υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στους διάφορους τύπους μονωτήρων, καθώς και στις συνθήκες στις οποίες είναι εκτεθειμένος κάθε μονωτήρας. Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο τον ακριβέστερο υπολογισμό των μεγεθών αυτών για τους επτά αυτούς τύπους μονωτήρων που χρησιμοποιήθηκαν ως αντικείμενο μελέτης. Στην παράγραφο 5.1 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του γενετικού αλγόριθμου τα οποία ελαχιστοποιούσαν το σφάλμα κατά τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει επιλογή μόνο ενός αποτελέσματος του γενετικού αλγόριθμου, και συγκεκριμένα αυτού με το μικρότερο σφάλμα, ώστε για τους δοθέντες τύπους αλυσοειδών μονωτήρων να βρούμε την βέλτιστη τιμή για τα μεγέθη  $C$ ,  $C_e$  και  $C_h$ . Συγκεκριμένα έχουμε για κάθε αλυσοειδή μονωτήρα ξεχωριστά:

Για τον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π αποτελούμενο από 10 δισκοειδείς μονωτήρες οι βέλτιστες τιμές είναι:  $C=92.604\text{pF}$ ,  $C_e=5.572\text{pF}$  και  $C_h=0.850\text{pF}$ .

Για τον καθαρό πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα κανονικού τύπου, αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες με κωδικός ΔΕΗ 010 οι βέλτιστες τιμές είναι:  $C=184.003\text{pF}$ ,  $C_e=7.936\text{pF}$  και  $C_h=0.612\text{pF}$ .

Για τον πορσελάνινο ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα κανονικού τύπου αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες με κωδικό ΔΕΗ 010 οι βέλτιστες τιμές είναι:  $C=79.886\text{pF}$ ,  $C_e=4.120\text{pF}$  και  $C_h=0.531\text{pF}$ .

Για τον γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα κανονικού τύπου αποτελούμενο από 10 δισκοειδείς μονωτήρες με κωδικό ΔΕΗ 033 οι βέλτιστες τιμές είναι:  $C=111.712\text{pF}$ ,  $C_e=5.476\text{pF}$  και  $C_h=0.721\text{pF}$ .

Για τον γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα τύπου ομίχλης αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες με κωδικό ΔΕΗ 069 οι βέλτιστες τιμές είναι:  $C=177.333\text{pF}$ ,  $C_e=6.373\text{pF}$  και  $C_h=0.957\text{pF}$ .

Για τον γυάλινο ρυπασμένο αλυσοειδή μονωτήρα τύπου ομίχλης αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες με κωδικό ΔΕΗ 161 οι βέλτιστες τιμές είναι:  $C=128.177\text{pF}$ ,  $C_e=6.021\text{pF}$  και  $C_h=0,707\text{pF}$ .

Τέλος για τον γυάλινο καθαρό αλυσοειδής μονωτήρα τύπου ομίχλης αποτελούμενο από 12 δισκοειδείς μονωτήρες με κωδικό ΔΕΗ 161 οι βέλτιστες τιμές είναι:

$C=131.457\text{pF}$ ,  $C_e=7.447\text{pF}$  και  $C_h=0.742\text{pF}$ .

Υπολογισμός σταθερών του στατικού τόξου

**6.1 Γενικά**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, πολύ σημαντική προσπάθεια καταβάλλεται τα τελευταία χρόνια στον τομέα της πλήρους κατανόησης του μηχανισμού ανάπτυξης τόξων επί των αλυσοειδών μονωτήρων. Πολλές αναφορές έχουν γίνει στην βιβλιογραφία, ώστε να εξομοιωθεί το φυσικό φαινόμενο της υπερπήδησης με κάποιο μοντέλο, το οποίο στηρίζεται σε μαθηματικές σχέσεις. Λόγω, όμως, της πολυπλοκότητας του φαινομένου, τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν αρκετές προσεγγίσεις. Έτσι τα μαθηματικά αυτά μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ως συμπληρώματα στην πειραματική έρευνα, ως χρήσιμα εργαλεία στην επεξεργασία και οργάνωση των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς και στην ερμηνεία και παρουσίαση τους.

Όπως έχει επίσης αναφερθεί, υπάρχουν δύο βασικά στοιχεία για τη μοντελοποίηση του φαινομένου σχηματισμού τόξου σε ρυπασμένες επιφάνειες. Από τη μία πλευρά είναι η εύρεση της ελάχιστης τάσης, απαραίτητη για να στηρίξει μία μερική εκκένωση που δημιουργείται εν σειρά με την αγεφύρωτη ρυπασμένη επιφάνεια μεταβλητού μήκους, και από την άλλη είναι η ανάπτυξη ενός κριτηρίου ικανού να περιγράψει τη διάδοση τόξων κατά μήκος της υγρής επιφάνειας των μονωτήρων. Είναι προφανές ότι εάν το τόξο επεκταθεί σε τέτοιο μήκος, ώστε η εφαρμοζόμενη τάση να μην είναι πλέον επαρκής να το στηρίξει, τότε το τόξο αποσβένει. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη συγκεκριμένου μηχανισμού επιτρέπει την επιμήκυνση του τόξου, ώστε να επεκταθεί σε ένα σημαντικό μέρος του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα. Στη διεθνή βιβλιογραφία, αν και έχει γίνει ιδιαίτερη προσπάθεια για τη διατύπωση μιας γενικής έκφρασης για την εύρεση της ελάχιστης τάσης, η οποία είναι απαραίτητη να στηρίξει μία μερική εκκένωση, πολύ λίγα βήματα έχουν γίνει προς την κατεύθυνση της ποσοτικοποίησης του μηχανισμού διάδοσης τόξων. Για την περιγραφή των χαρακτηριστικών ενός τόξου βασικές σταθερές είναι οι αριθμοί  $n$  και  $A$ . Ο ακριβής ποσοτικός τους προσδιορισμός δεν είναι εύκολος, αν και προηγούμενη έρευνα έχει γίνει από διάφορους ερευνητές, με συνέπεια τη χρήση προσεγγιστικών

τιμών για τις σταθερές του τόξου στα διάφορα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τη μελέτη της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης. Για τόξα που λαμβάνουν χώρα στον αέρα οι παραπάνω σταθερές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών  $0,2 \leq n \leq 1$  και  $20 \leq A \leq 300$ .

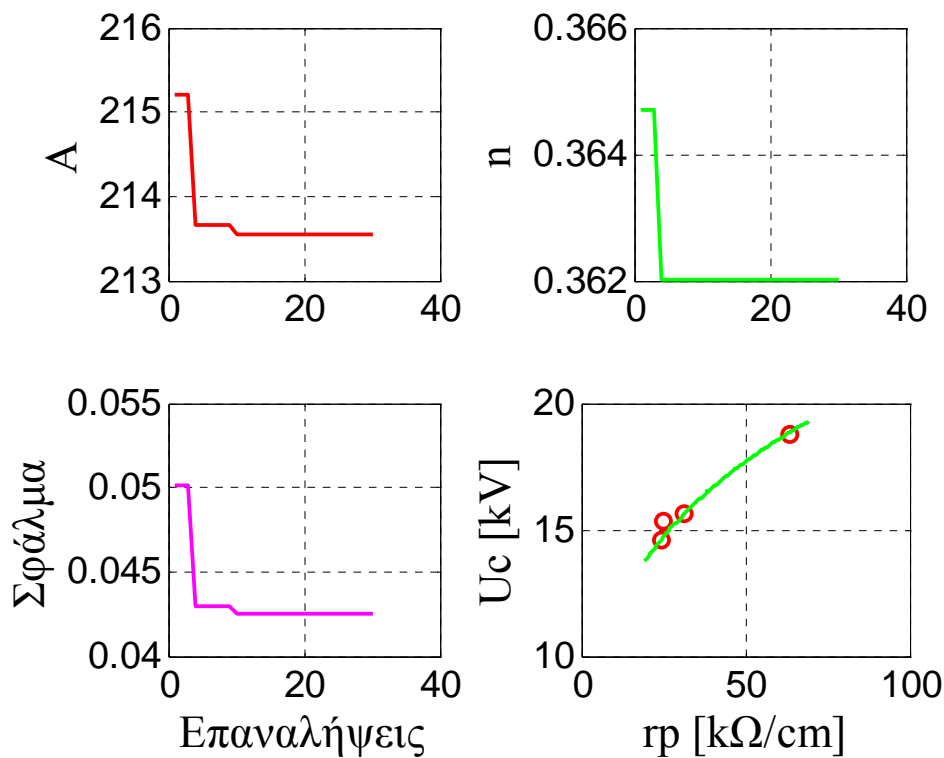
## **6.2 Εύρεση των τιμών A και n του στατικού τόξου με χρήση γενετικού αλγορίθμου**

Όπως είναι φανερό, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο ακριβέστερος δυνατός υπολογισμός των δύο αυτών μεγεθών, ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση του σφάλματος που υπεισέρχεται στα μαθηματικά μοντέλα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος γραμμένος σε κώδικα Matlab, σχεδιασμένος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π, ο οποίος παρέχει βέλτιστα αποτελέσματα σε προβλήματα ελαχιστοποίησης. Για την εύρεση των πιο ακριβών τιμών A και n χρησιμοποιήθηκαν τρεις τρόποι υπολογισμού τους. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στο μοντέλο των Dabhi-Beroual [27], ο δεύτερος βασίζεται στο μοντέλο των Neumarker-Rizk [21] και ο τρίτος βασίζεται στο μοντέλο των Hurley-Limbourn [21]. Με σκοπό την ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, σε κάθε μοντέλο από τα παραπάνω εφαρμόστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα του Alston [26], του Cron [24] και του Wilkins [25]. Για κάθε συνδυασμό μοντέλου και πειράματος έγιναν 24 επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου, δώδεκα εισάγοντας αριθμό γονέων ίσο με είκοσι ( $g=20$ ) και δώδεκα επαναλήψεις εισάγοντας αριθμό γονέων ίσο με τριάντα ( $g=30$ ). Για κάθε περίπτωση ο γενετικός αλγόριθμος έτρεξε 4 φορές με αριθμό επαναλήψεων ίσο με είκοσι ( $I=20$ ), 4 φορές με αριθμό επαναλήψεων ίσο με τριάντα ( $I=30$ ), και άλλες 4 φορές με αριθμό επαναλήψεων ίσο με 40 ( $I=40$ ). Για την εύρεση των τιμών A και n, επελέγησαν εκείνες οι τρεις σειρές τιμών από κάθε ομάδα εκτελέσεων του γενετικού αλγορίθμου που ελαχιστοποιούν το σφάλμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω συνοπτικούς πίνακες και συνοδεύονται από τις γραφικές παραστάσεις για καλύτερη κατανόηση.

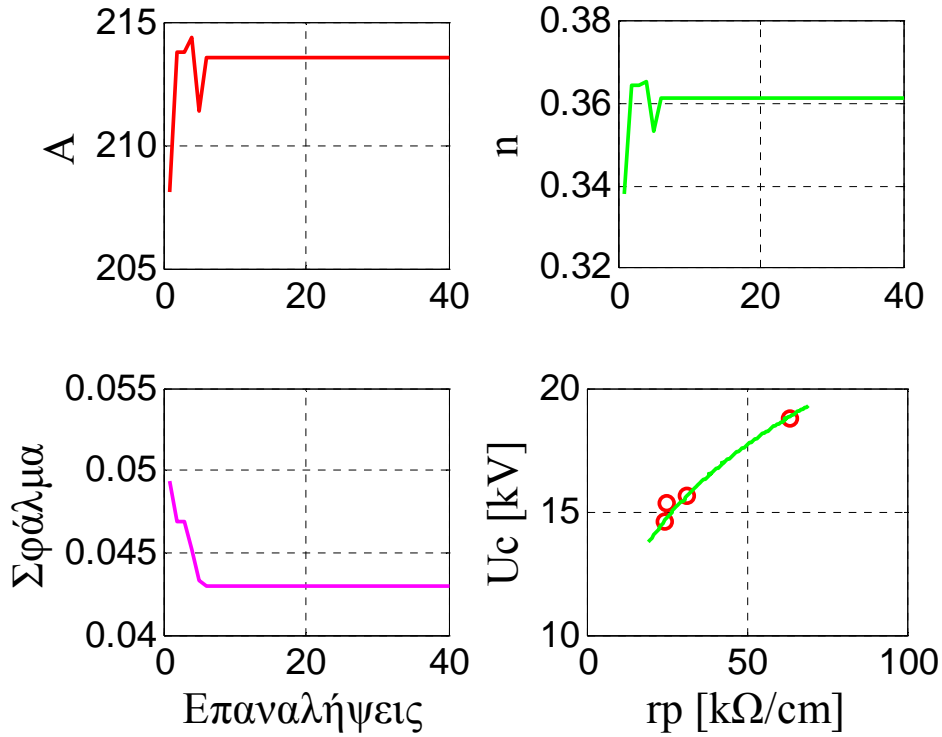


$\alpha/\alpha$	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	30	0.04251759	213.55189255	0.36202686
2	20	40	0.04294835	213.55189255	0.36153846
3	20	40	0.04328312	213.94261294	0.36324786
4	30	20	0.04251759	213.55189255	0.36202686
5	30	30	0.04202326	213.25885226	0.36080586
6	30	40	0.04155684	212.77045177	0.35860806

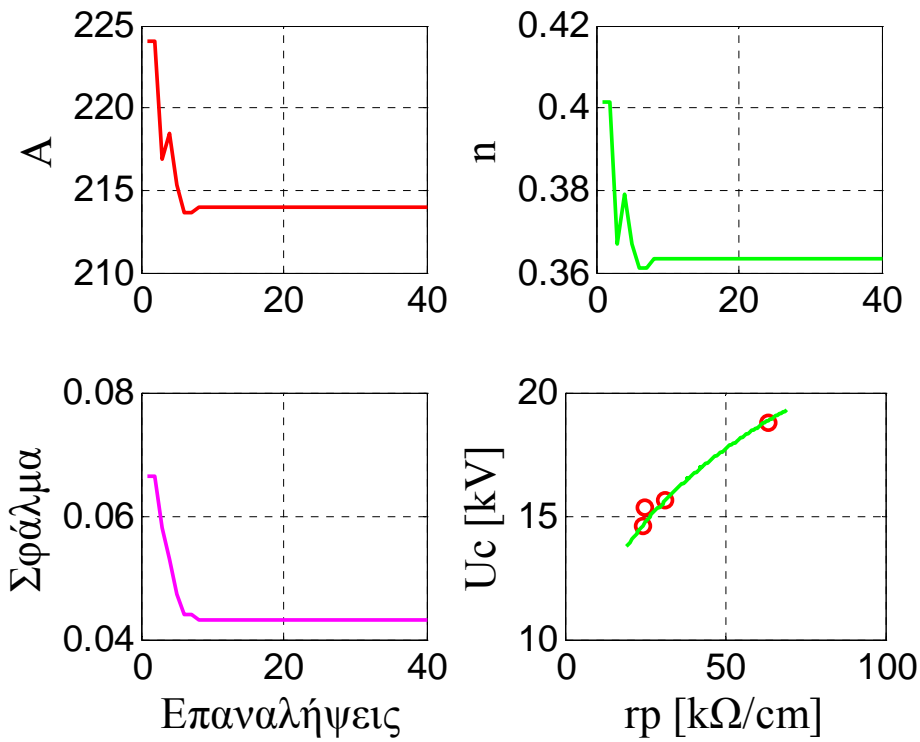
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*.



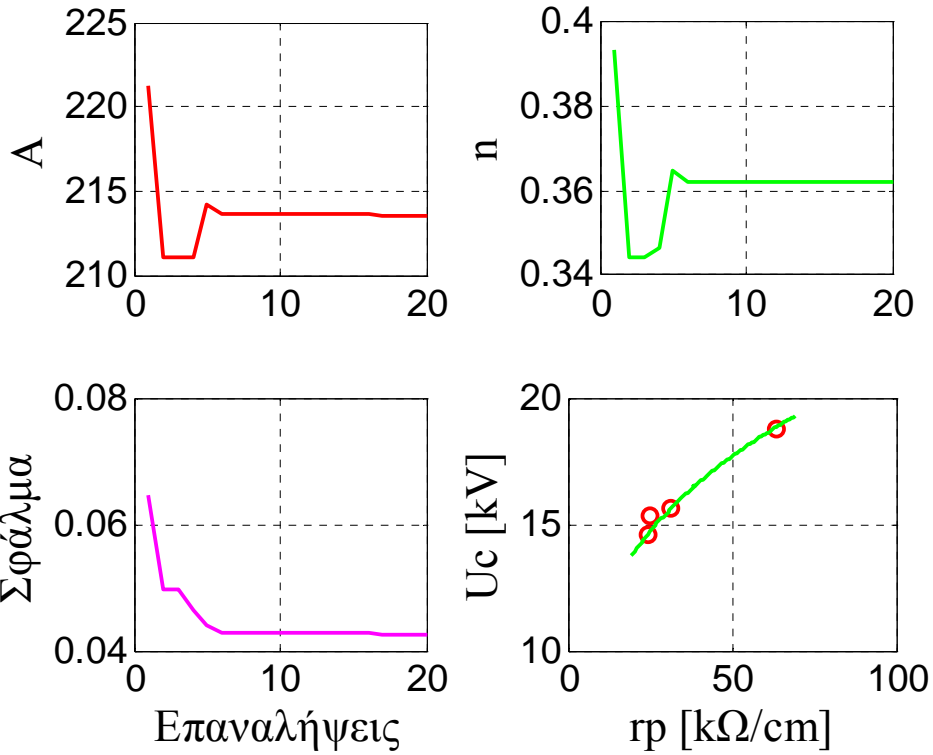
Σχήμα 6.1: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (1η γραμμή του πίνακα 6.1).



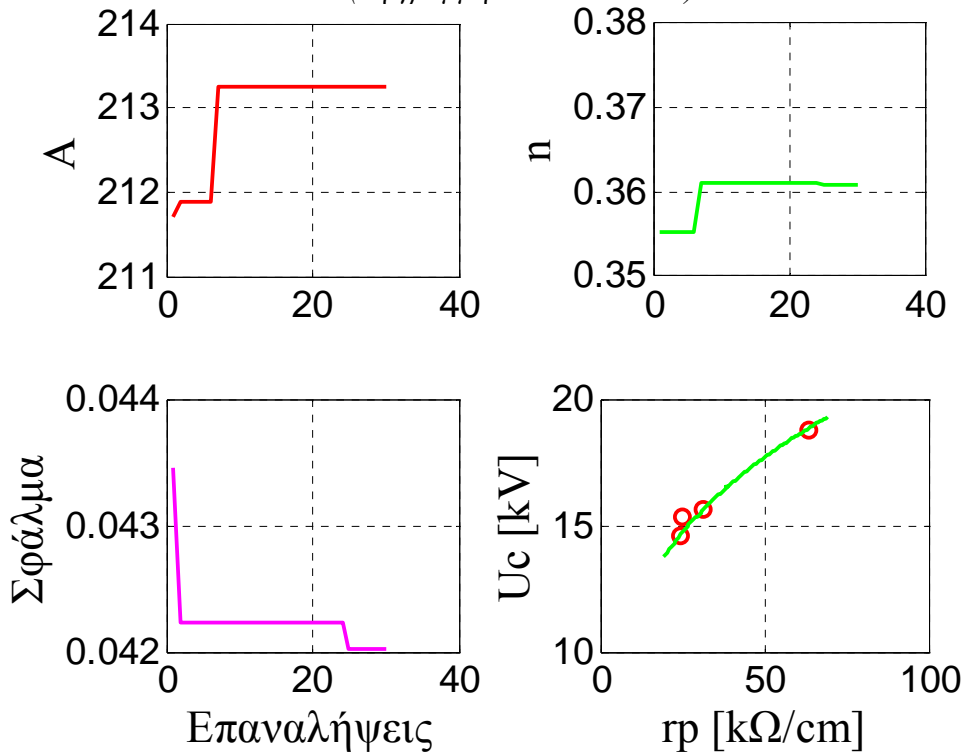
Σχήμα 6.2: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (2η γραμμή του πίνακα 6.1).



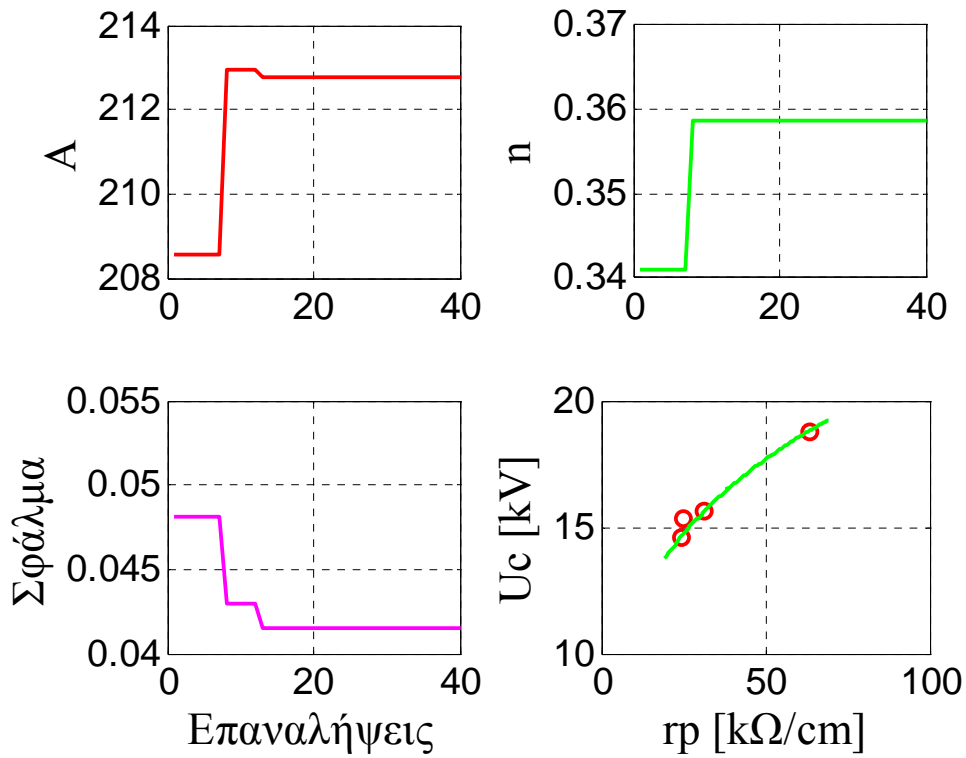
Σχήμα 6.3: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (3η γραμμή του πίνακα 6.1).



Σχήμα 6.4: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (4η γραμμή του πίνακα 6.1).



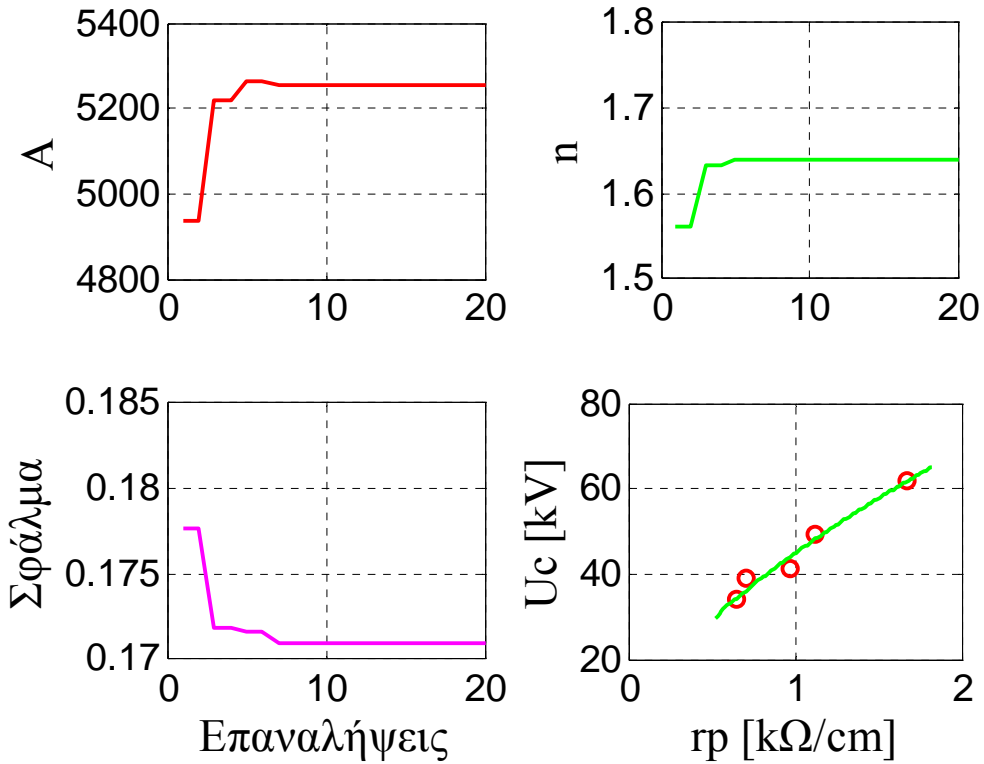
Σχήμα 6.5: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (5η γραμμή του πίνακα 6.1).



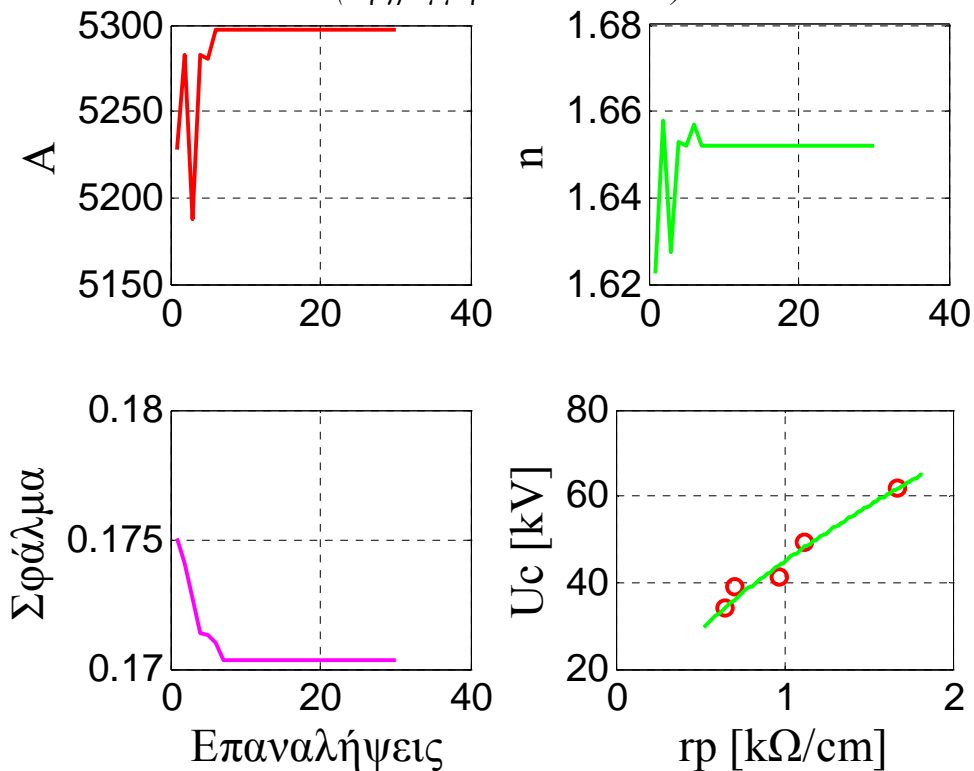
Σχήμα 6.6: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (δη γραμμή του πίνακα 6.1).

α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	20	0.17091959	5253.74725275	1.63968254
2	20	30	0.17034134	5297.70329670	1.65189255
3	20	40	0.17129516	5416.38461538	1.68119658
4	30	20	0.16956919	5357.04395604	1.67020757
5	30	20	0.16985740	5328.47252747	1.66166056
6	30	30	0.16973433	5363.63736264	1.67142857

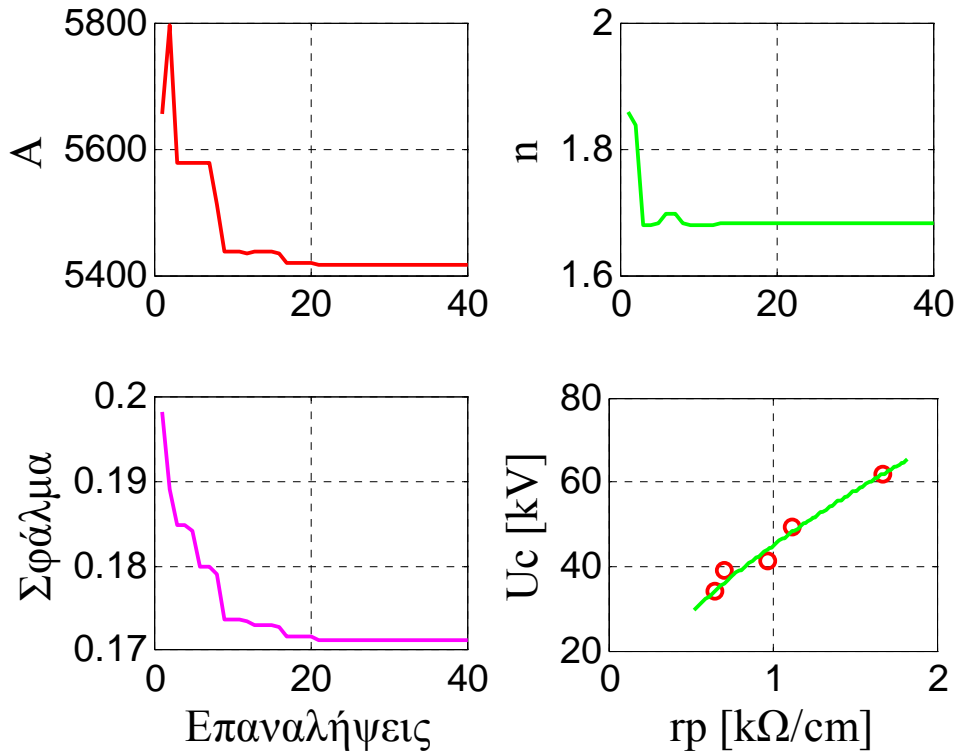
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Cron*.



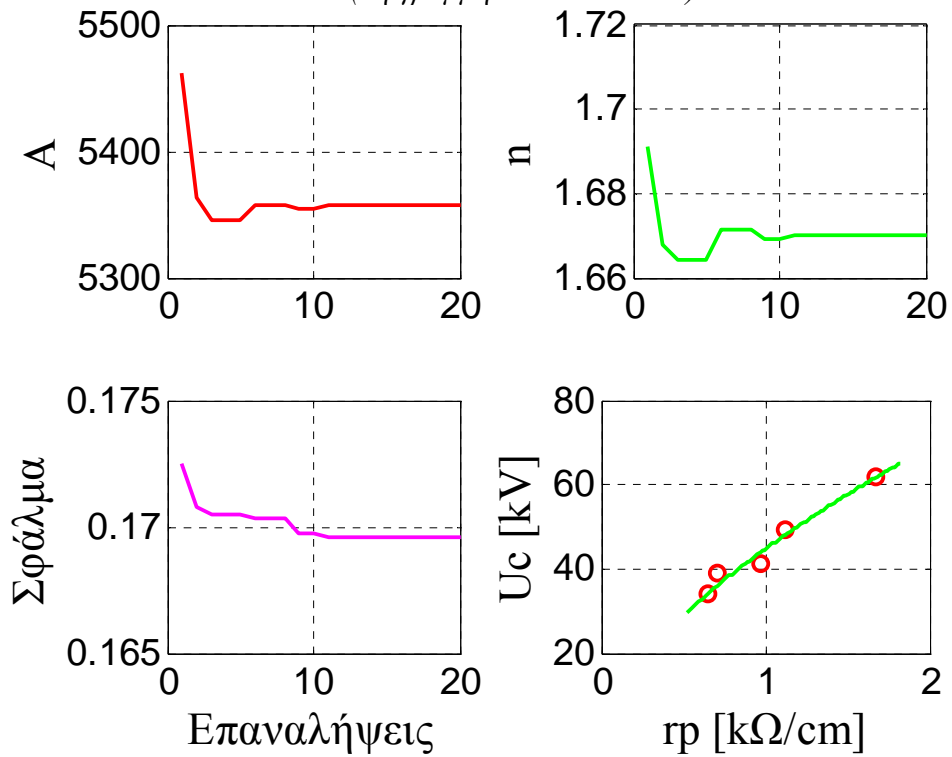
Σχήμα 6.7: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Cron*. (1η γραμμή του πίνακα 6.2).



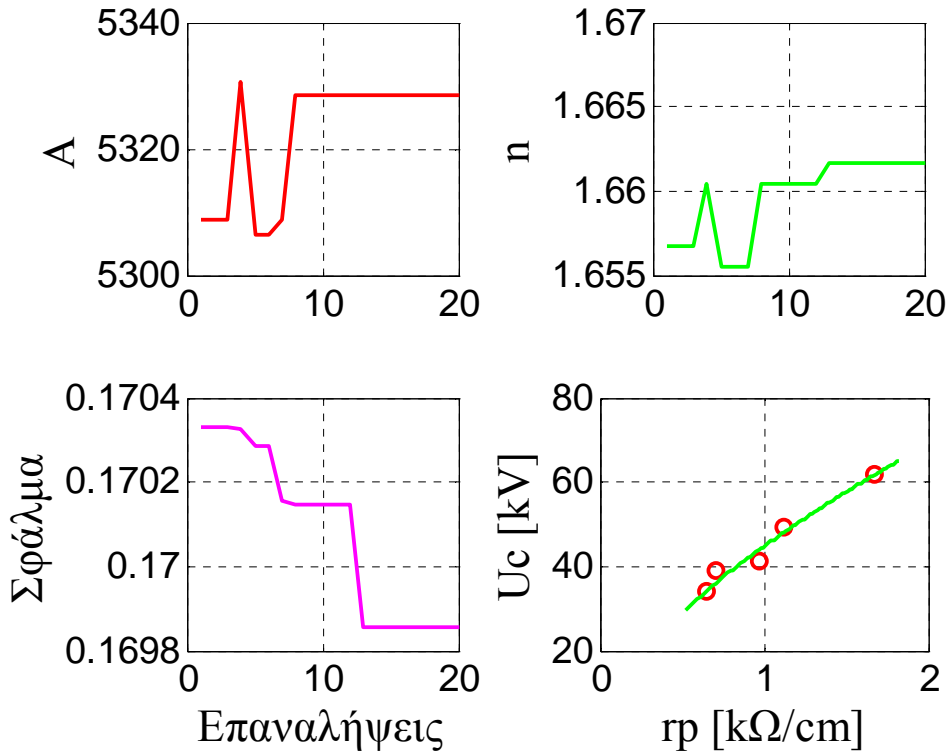
Σχήμα 6.8: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (2η γραμμή του πίνακα 6.2).



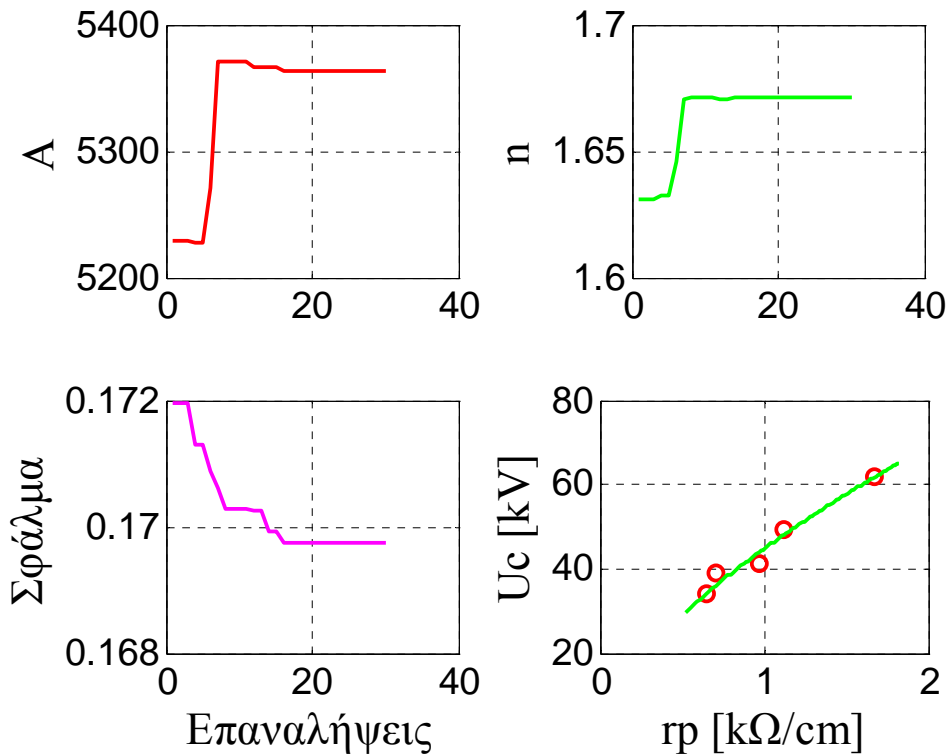
Σχήμα 6.9: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (3η γραμμή του πίνακα 6.2).



Σχήμα 6.10: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (4η γραμμή του πίνακα 6.2).



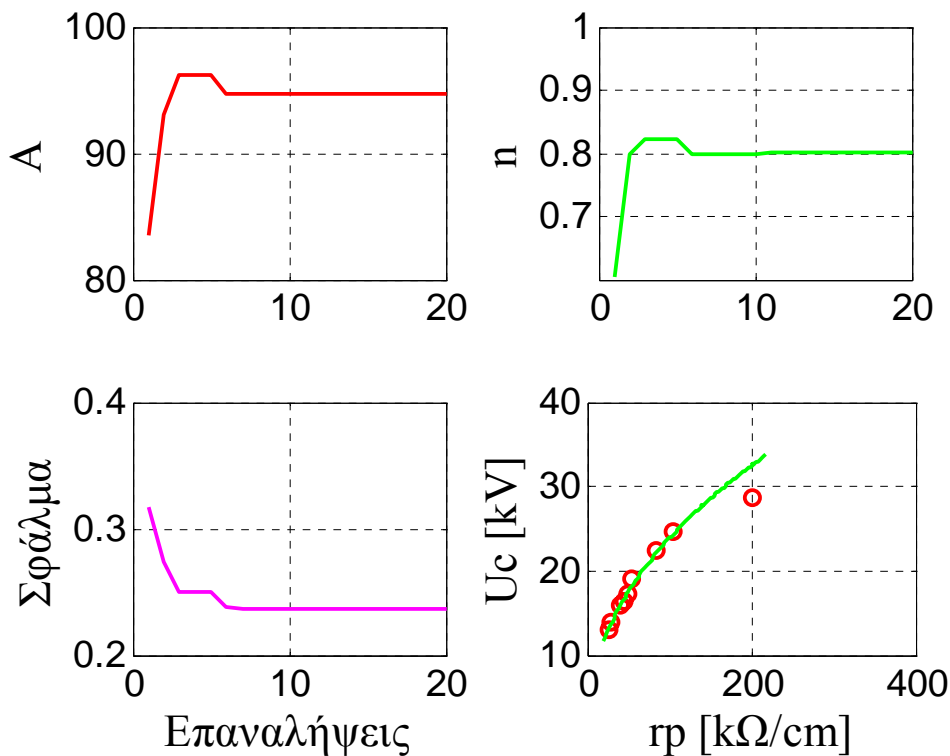
Σχήμα 6.11: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (5η γραμμή του πίνακα 6.2).



Σχήμα 6.12: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*. (6η γραμμή του πίνακα 6.2).

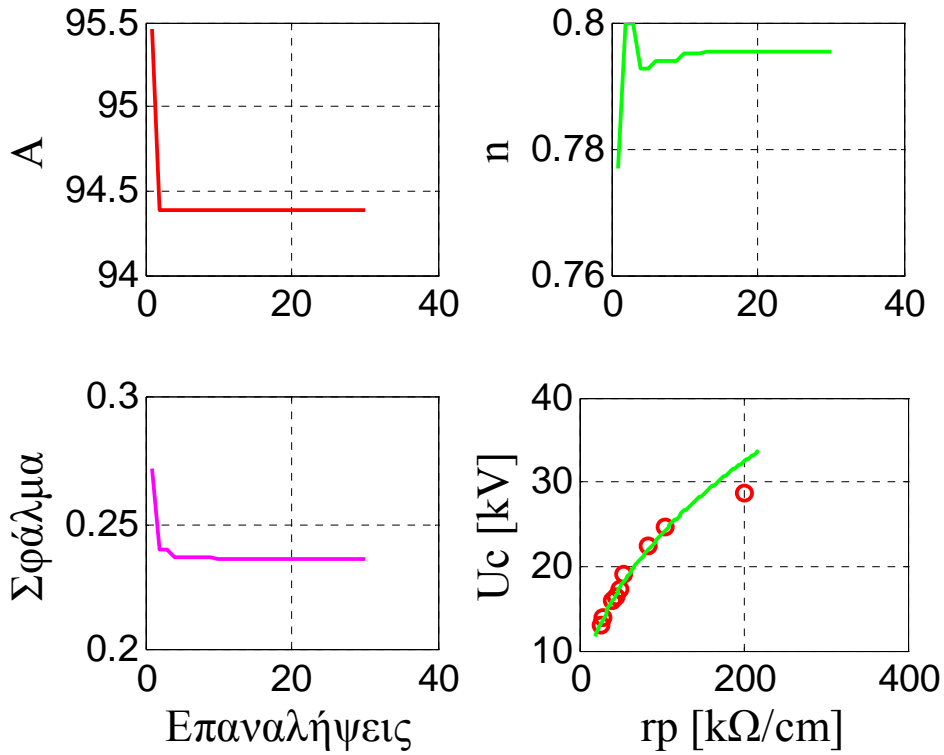
α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	20	0.23693189	94.67521368	0.80012210
2	20	30	0.23629019	94.38217338	0.79523810
3	20	40	0.23621520	94.38217338	0.79548230
4	30	30	0.23629019	94.38217338	0.79523810
5	30	40	0.23659587	94.18681319	0.78986569
6	30	40	0.23648047	94.28449328	0.79352869

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Wilkins*.

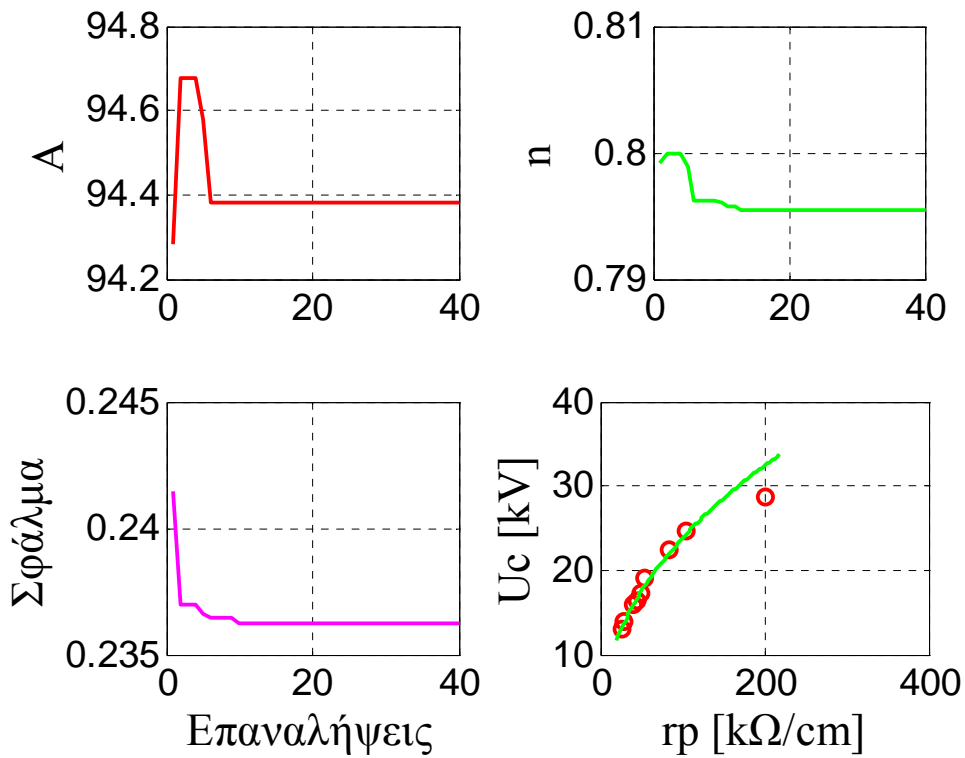


Σχήμα 6.13: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Wilkins*. (1η γραμμή του πίνακα 6.3).

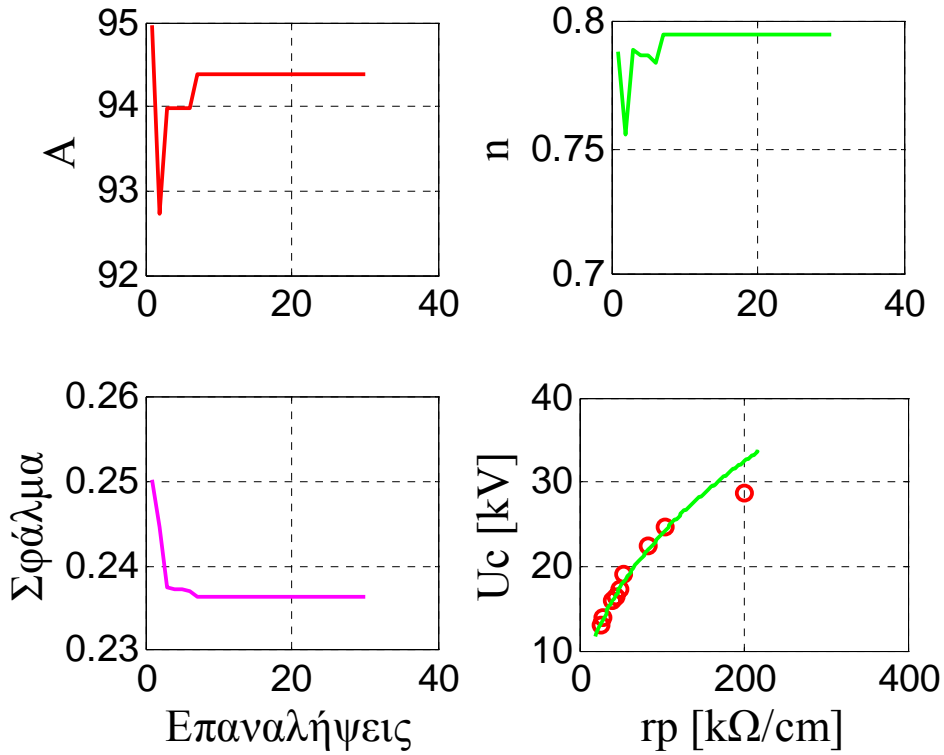




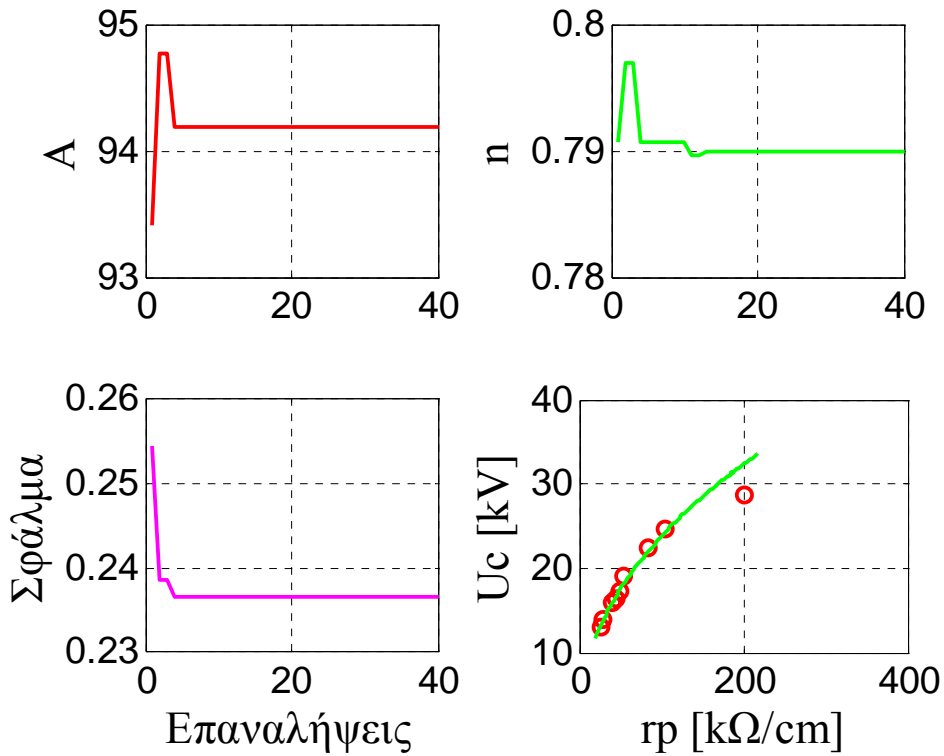
Σχήμα 6.14: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Wilkins*. (2η γραμμή του πίνακα 6.3).



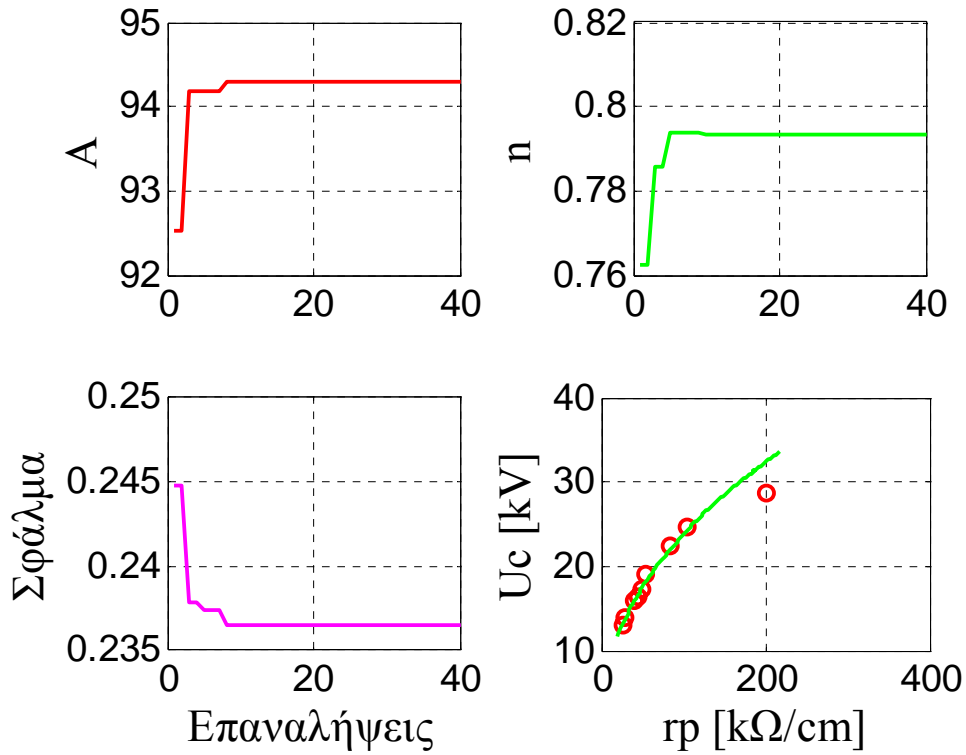
Σχήμα 6.15: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Wilkins*. (3η γραμμή του πίνακα 6.3).



Σχήμα 6.16: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Wilkins*. (4η γραμμή του πίνακα 6.3).



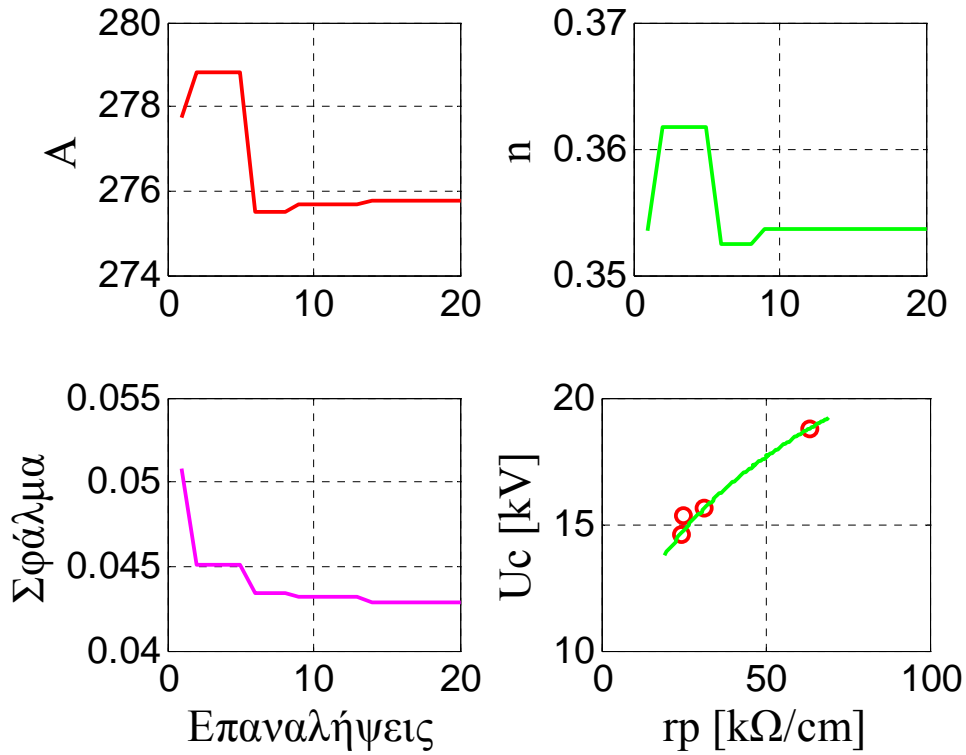
Σχήμα 6.17: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Wilkins*. (5η γραμμή του πίνακα 6.3).



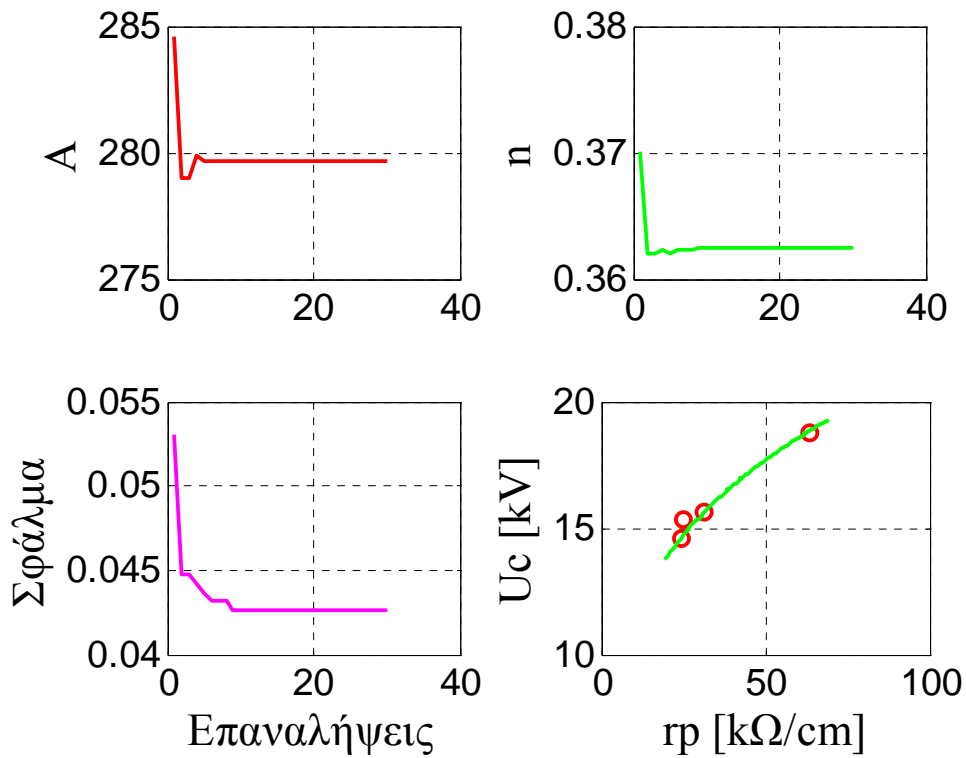
Σχήμα 6.18: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Dabhi-Beroual* και των πειραματικών δεδομένων του *Wilkins*. (6η γραμμή του πίνακα 6.3).

α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	20	0.04283316	275.77411477	0.35372405
2	20	30	0.04264006	279.68131868	0.36251526
3	20	40	0.04184028	278.60683761	0.36031746
4	30	20	0.04244030	276.26251526	0.35470085
5	30	30	0.04118780	277.82539683	0.35836386
6	30	40	0.04175373	278.50915751	0.36007326

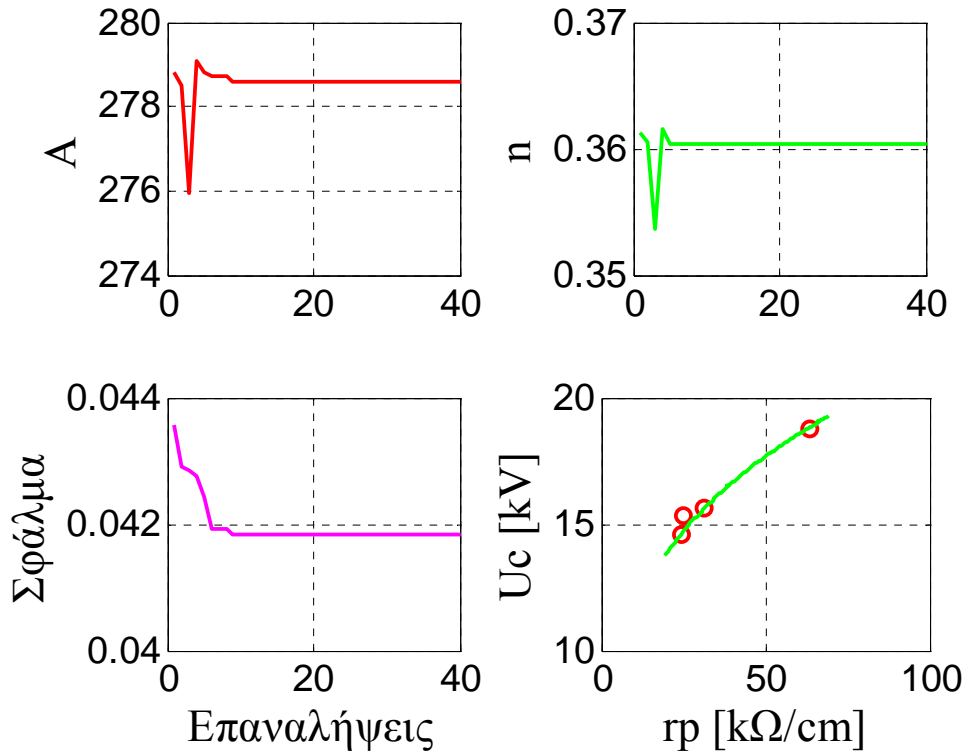
Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των *Neumarker-Rizk* και των πειραματικών δεδομένων του *Alston*.



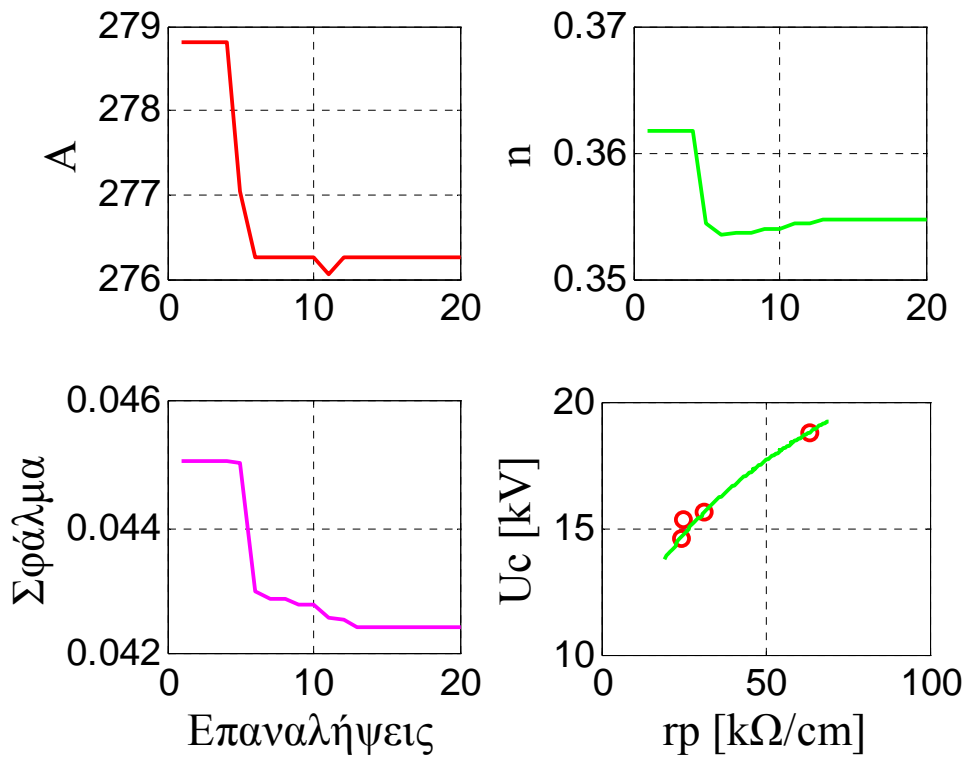
Σχήμα 6.19: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (1η γραμμή του πίνακα 6.4).



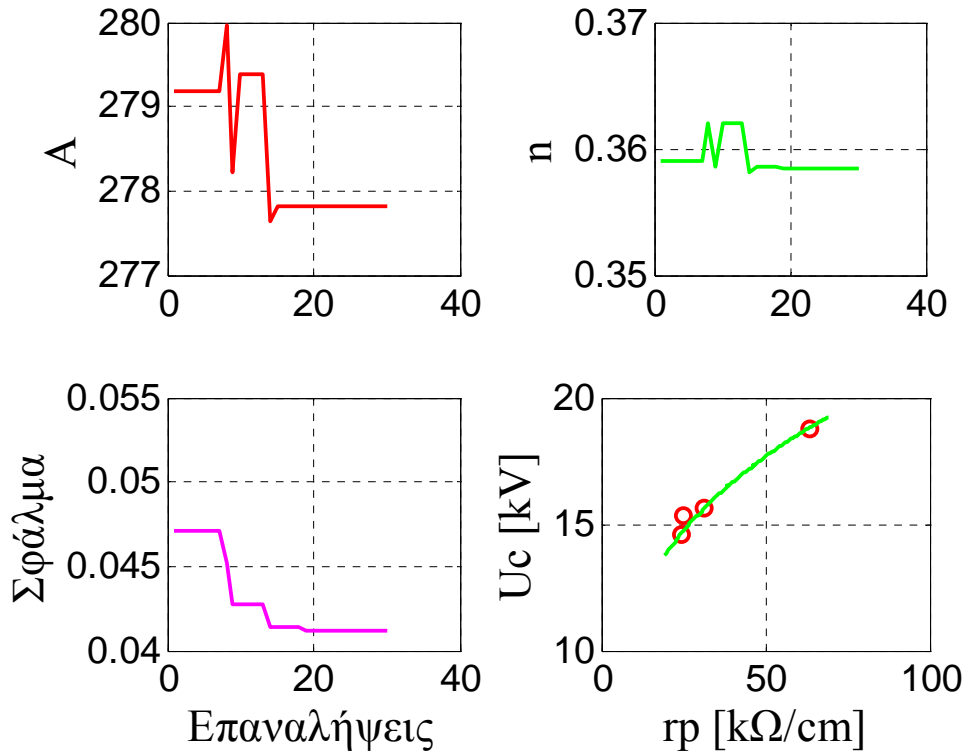
Σχήμα 6.20: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (2η γραμμή του πίνακα 6.4).



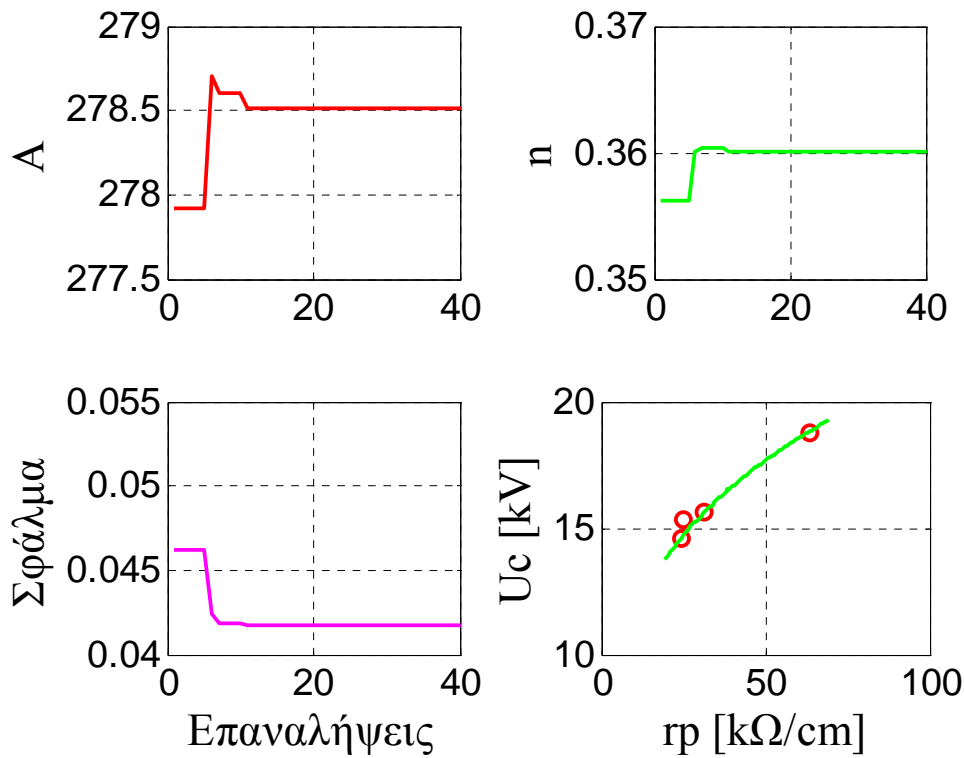
Σχήμα 6.21: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (3η γραμμή του πίνακα 6.4).



Σχήμα 6.22: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (4η γραμμή του πίνακα 6.4).



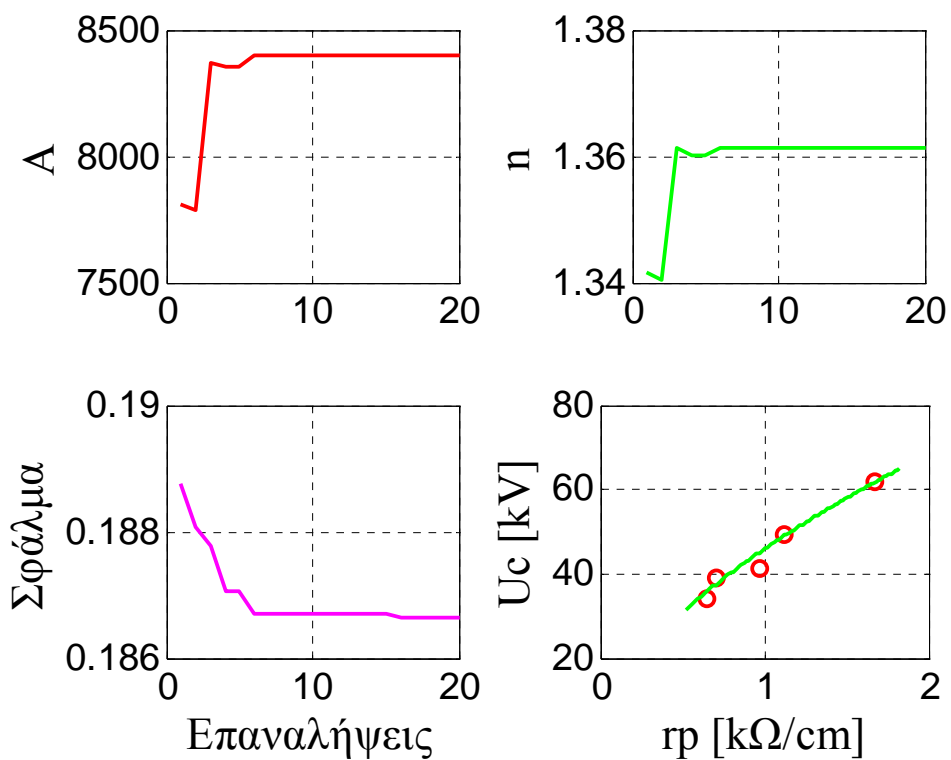
Σχήμα 6.23: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumaier-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (5η γραμμή του πίνακα 6.4).



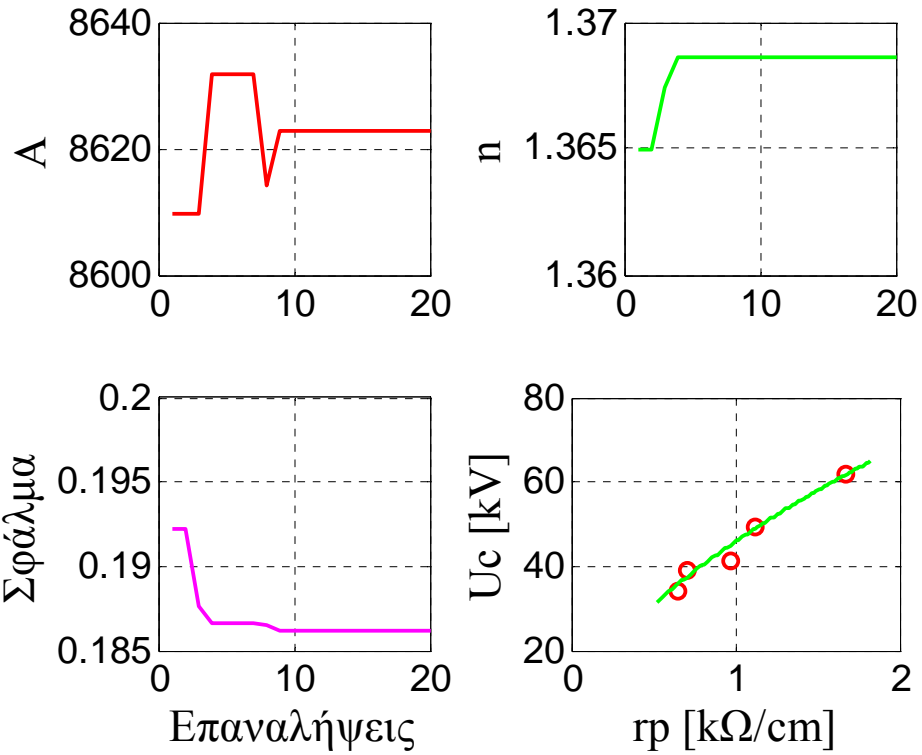
Σχήμα 6.24: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumaier-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (6η γραμμή του πίνακα 6.4).

α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	20	0.18663020	8398.80219780	1.36129426
2	20	20	0.18617353	8622.97802198	1.36862027
3	20	30	0.18584163	8776.82417582	1.37350427
4	30	20	0.18623665	8704.29670330	1.37106227
5	30	40	0.18599395	8699.90109890	1.37106227
6	30	40	0.18622972	8585.61538462	1.36739927

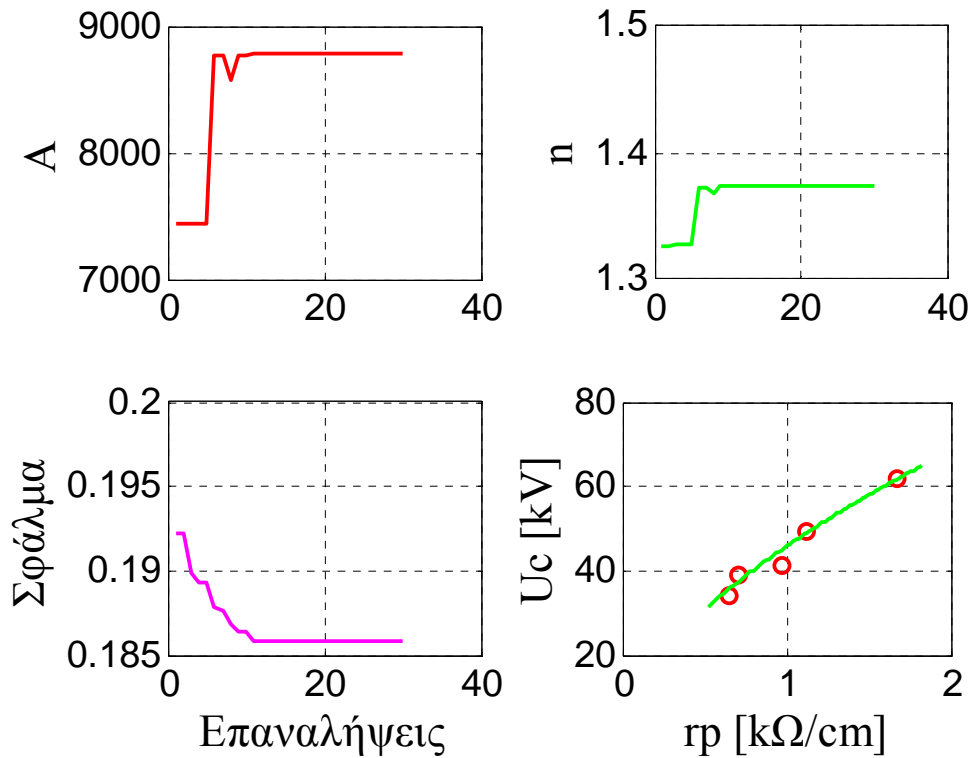
Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Cron.



Σχήμα 6.25: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (1η γραμμή του πίνακα 6.5).

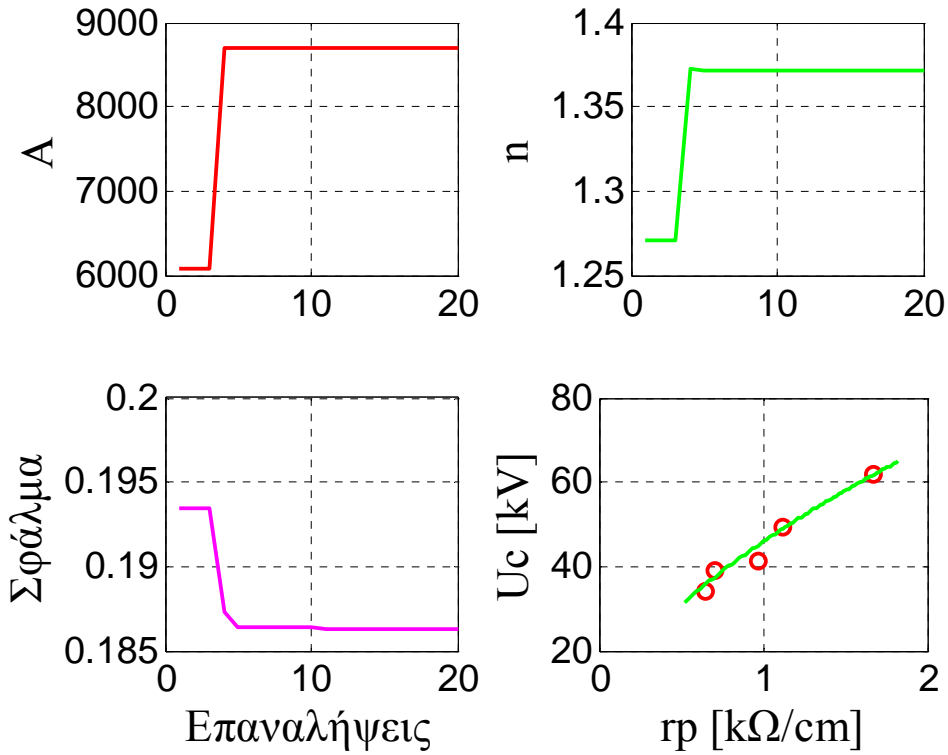


Σχήμα 6.26: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarcker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (2η γραμμή του πίνακα 6.5).

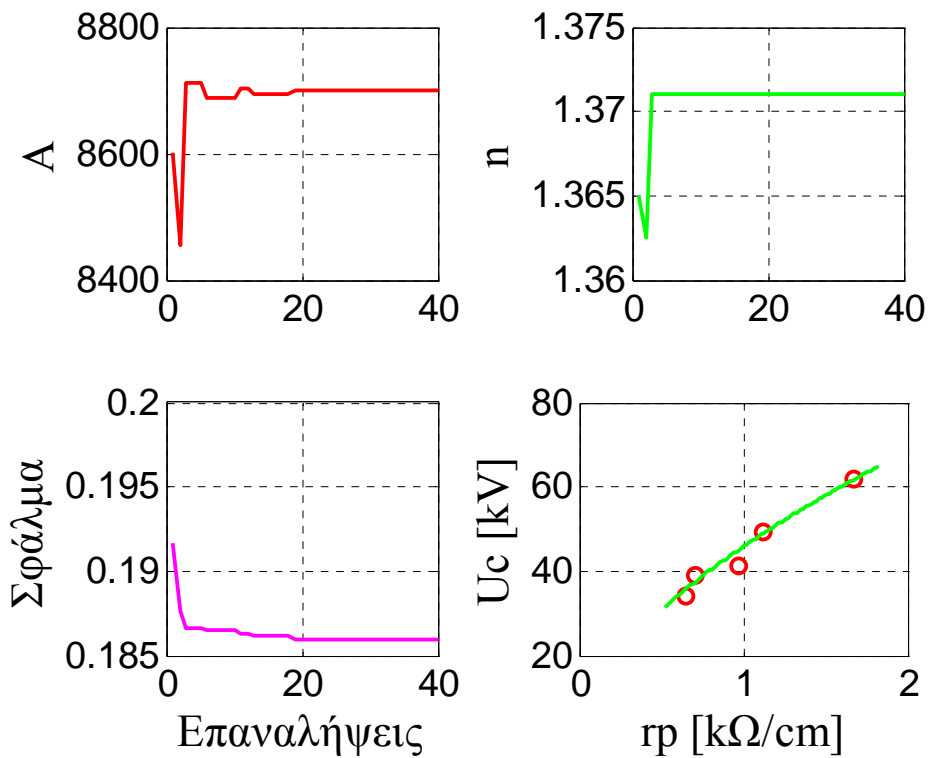


Σχήμα 6.27: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarcker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (3η γραμμή του πίνακα 6.5).

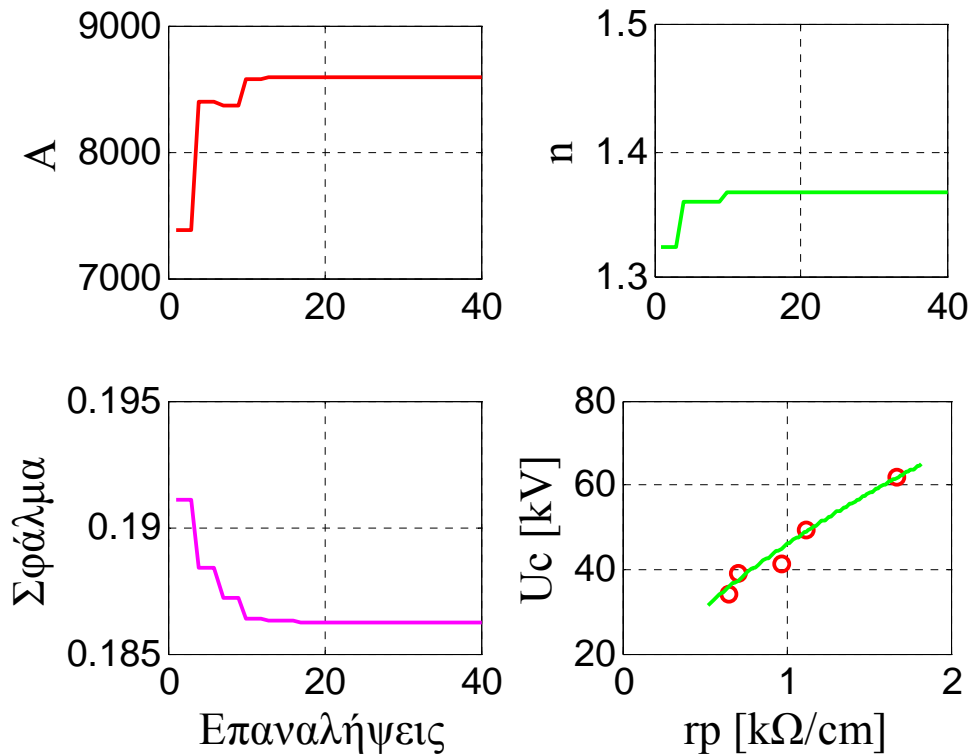




Σχήμα 6.28: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (4η γραμμή του πίνακα 6.5).



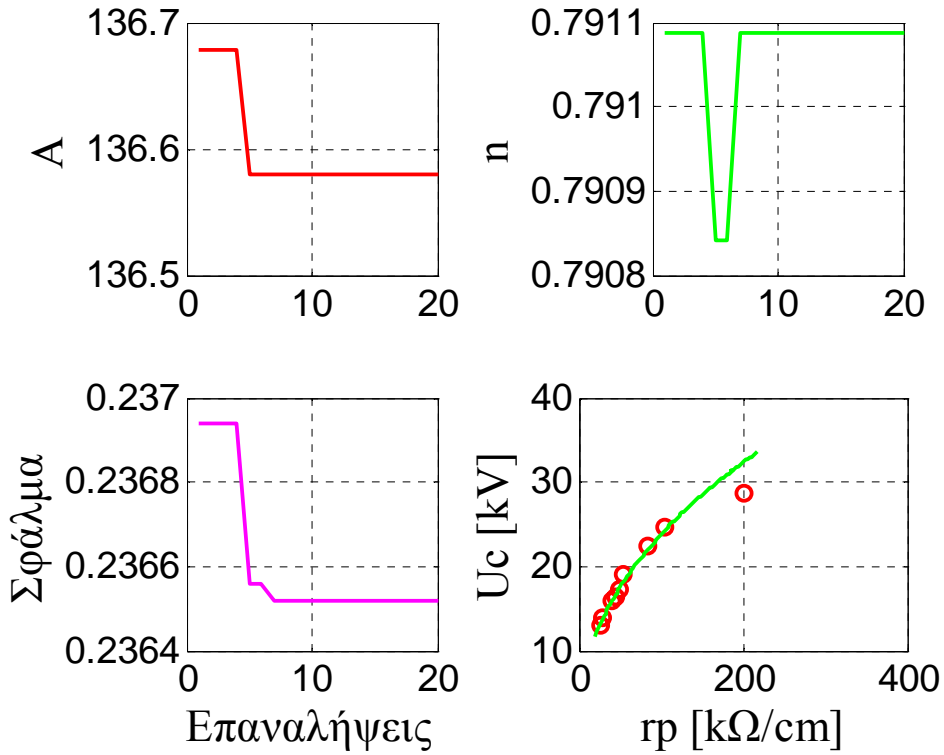
Σχήμα 6.29: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (5η γραμμή του πίνακα 6.5).



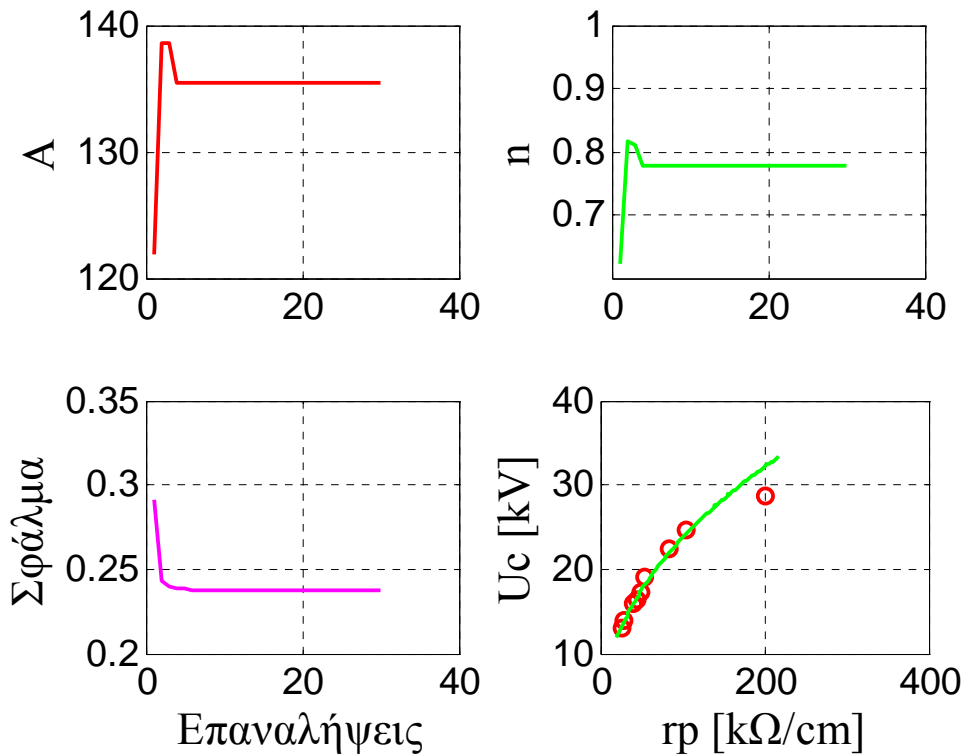
Σχήμα 6.30: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (δη γραμμή του πίνακα 6.5).

α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	20	0.23651857	136.57997558	0.79108669
2	20	30	0.23787381	135.40781441	0.77765568
3	20	40	0.23739111	137.84981685	0.80305250
4	30	20	0.23641343	136.77533578	0.79328449
5	30	40	0.23659931	136.48229548	0.78986569
6	30	40	0.23627966	136.87301587	0.79474969

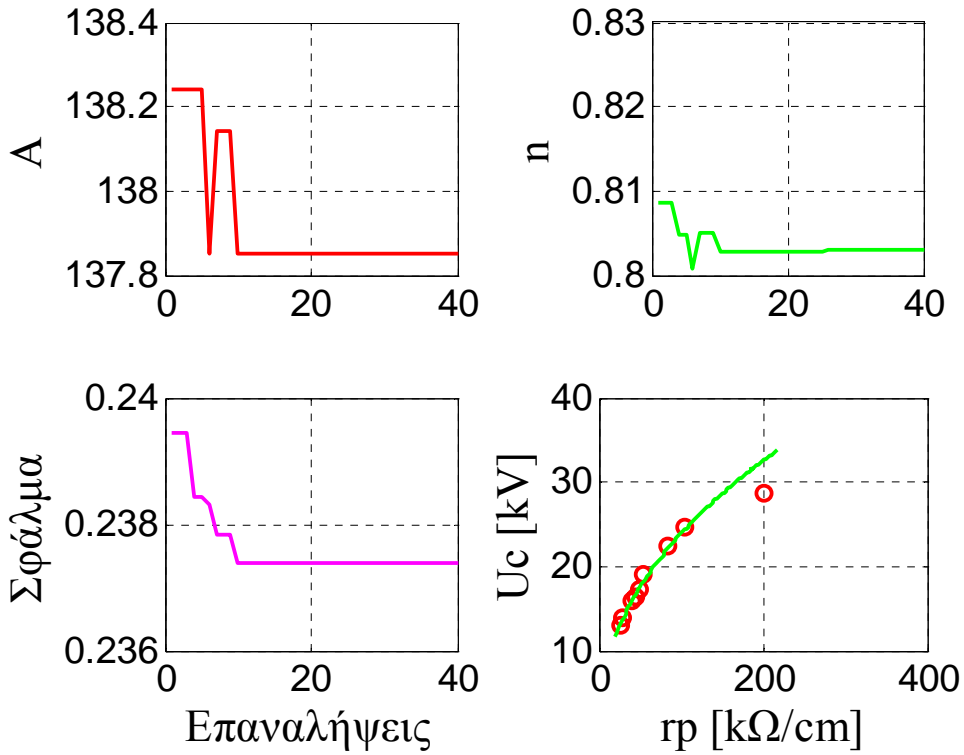
Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins.



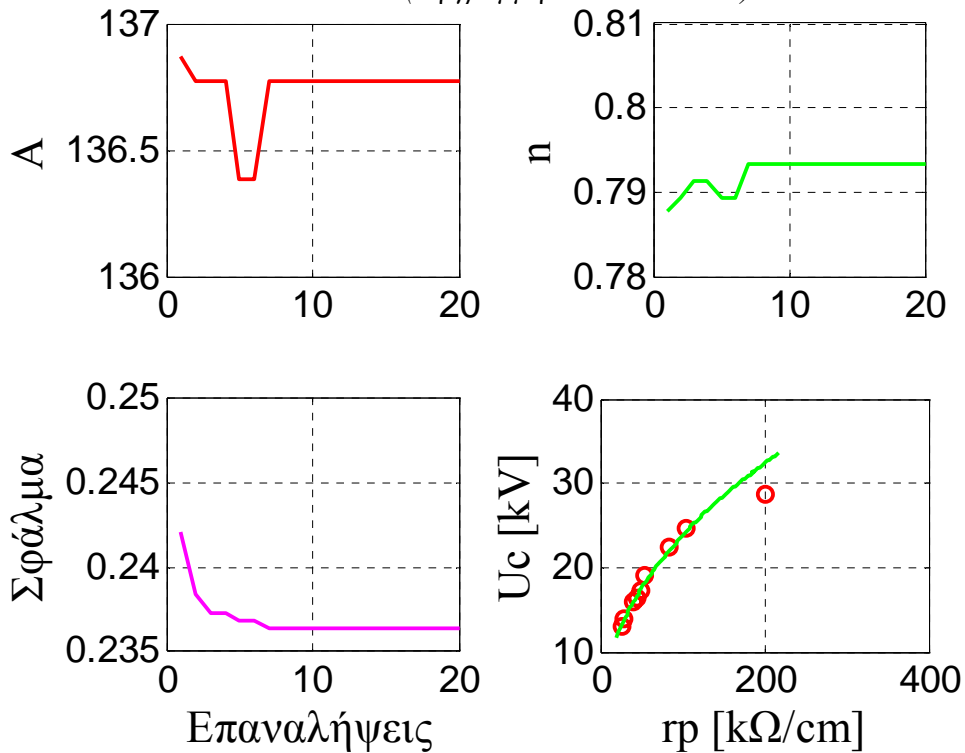
Σχήμα 6.31: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumaier-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (1η γραμμή του πίνακα 6.6).



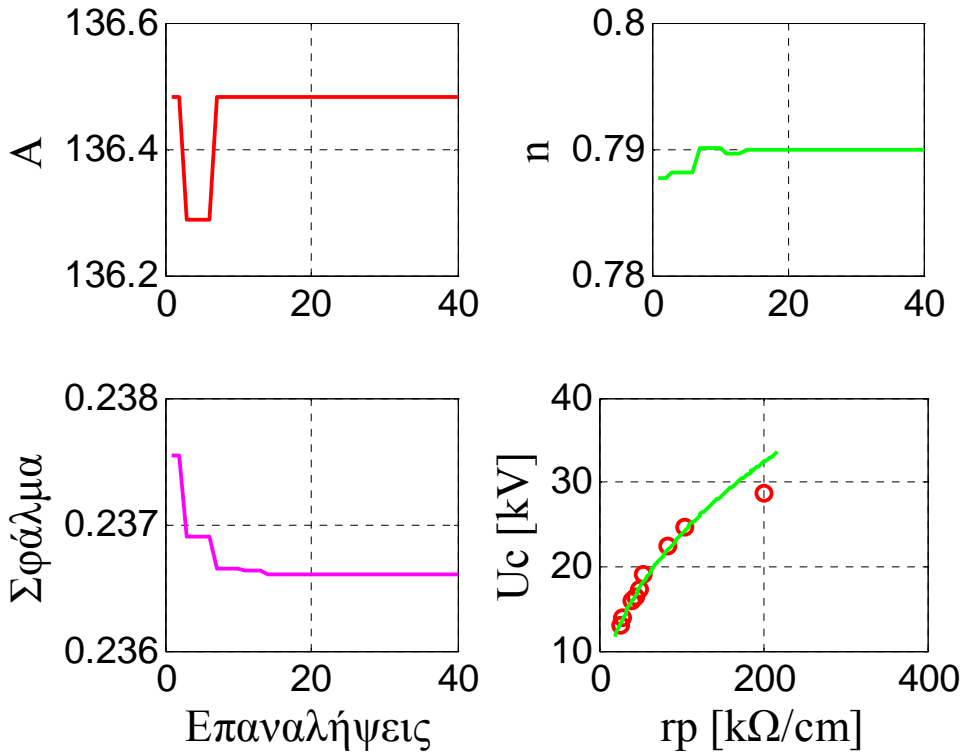
Σχήμα 6.32: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumaier-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (2η γραμμή του πίνακα 6.6).



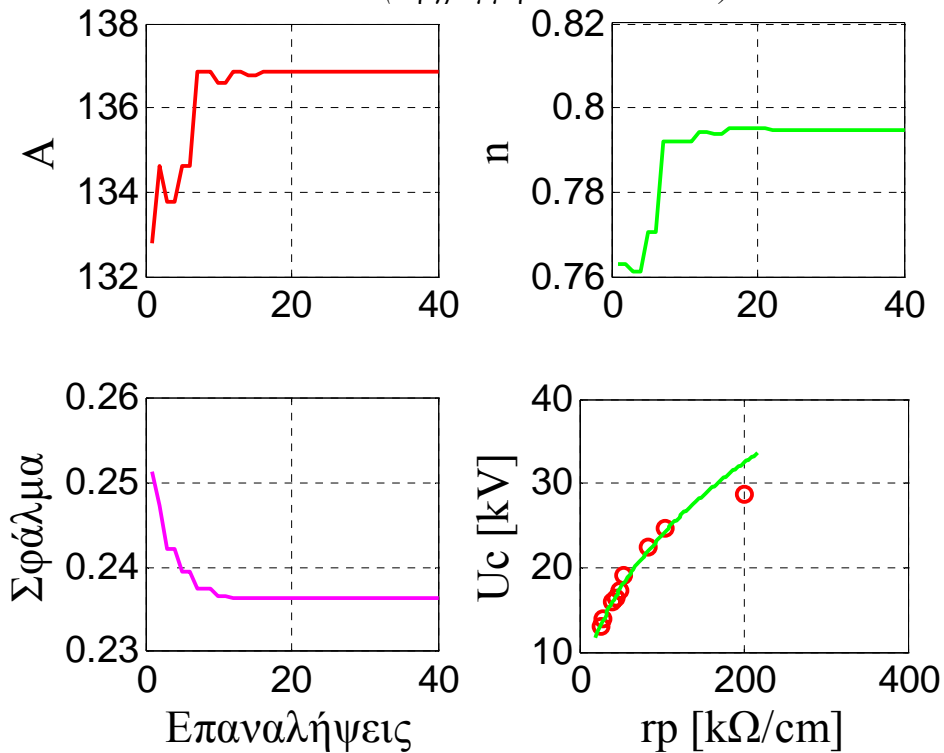
Σχήμα 6.33: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (3η γραμμή του πίνακα 6.6).



Σχήμα 6.34: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (4η γραμμή του πίνακα 6.6).



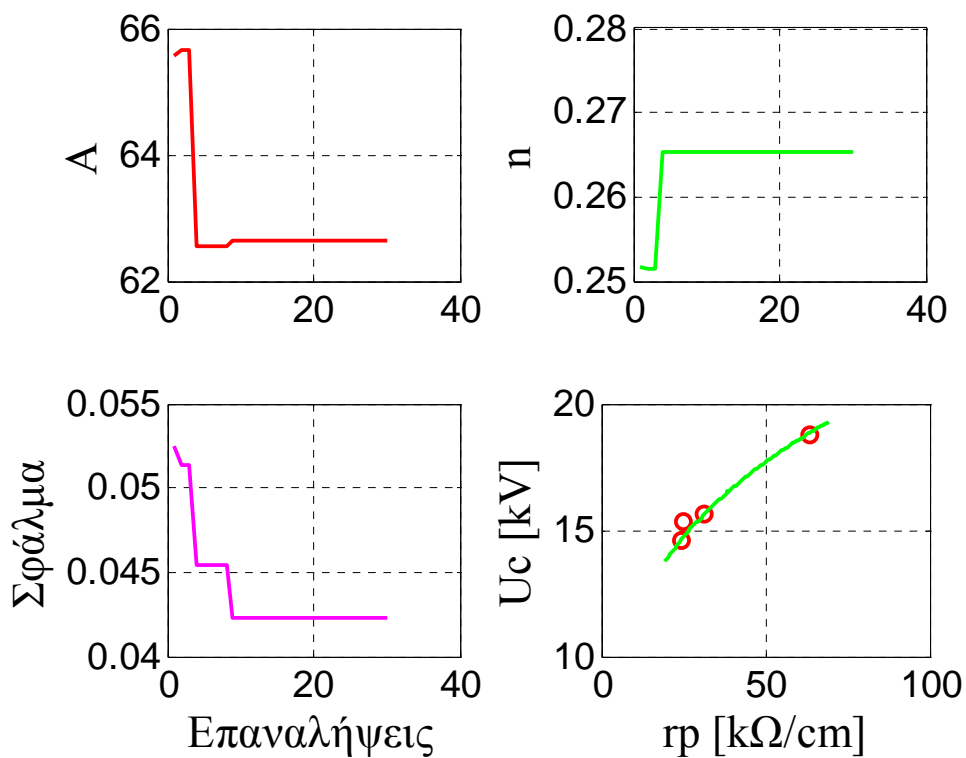
Σχήμα 6.35: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumaier-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (5η γραμμή του πίνακα 6.6).



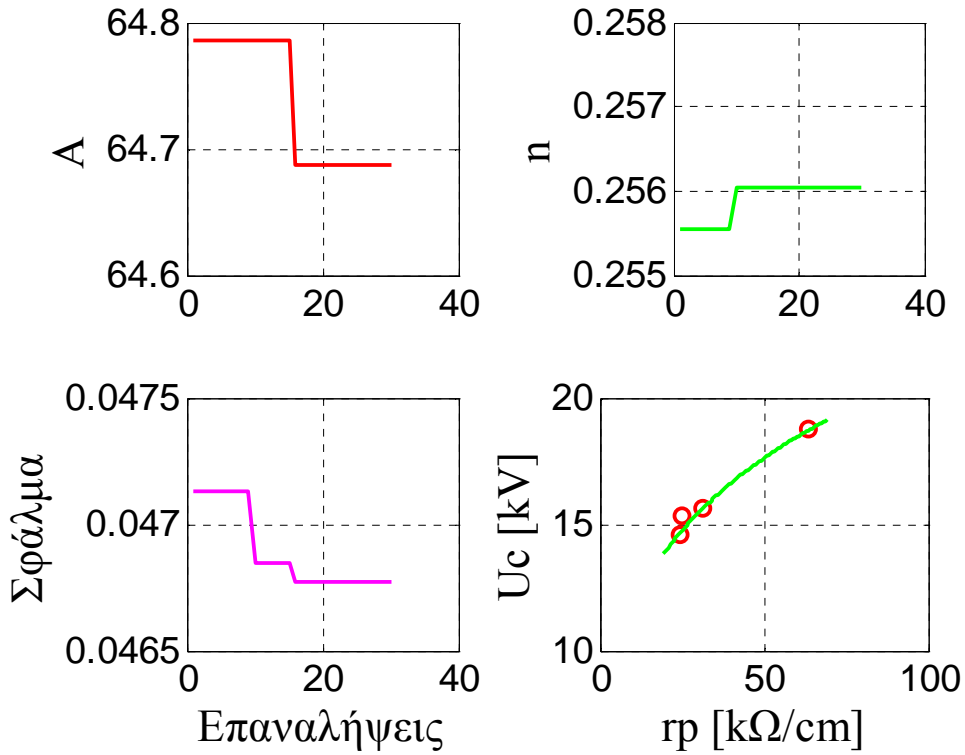
Σχήμα 6.36: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Neumaier-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (6η γραμμή του πίνακα 6.6).

α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	20	0.04225959	62.63614164	0.26532357
2	20	30	0.04677488	64.68742369	0.25604396
3	20	40	0.04510544	62.05006105	0.26800977
4	30	20	0.04240224	62.92918193	0.26410256
5	30	30	0.04181885	62.73382173	0.26483516
6	30	40	0.04384304	63.80830281	0.25995116

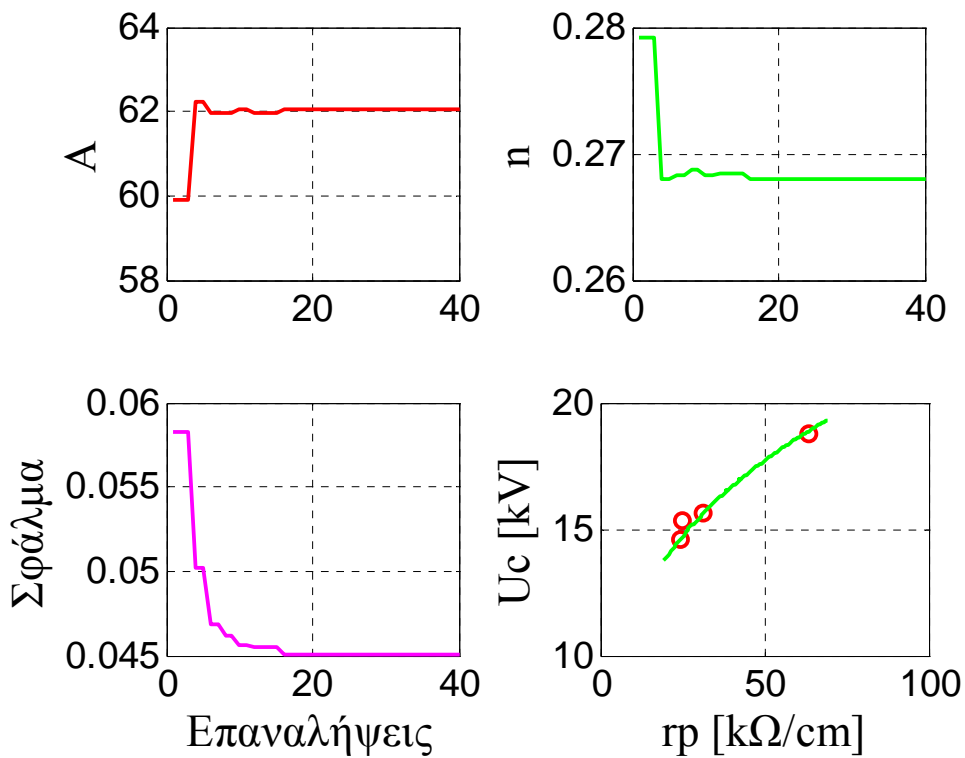
Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Alston.



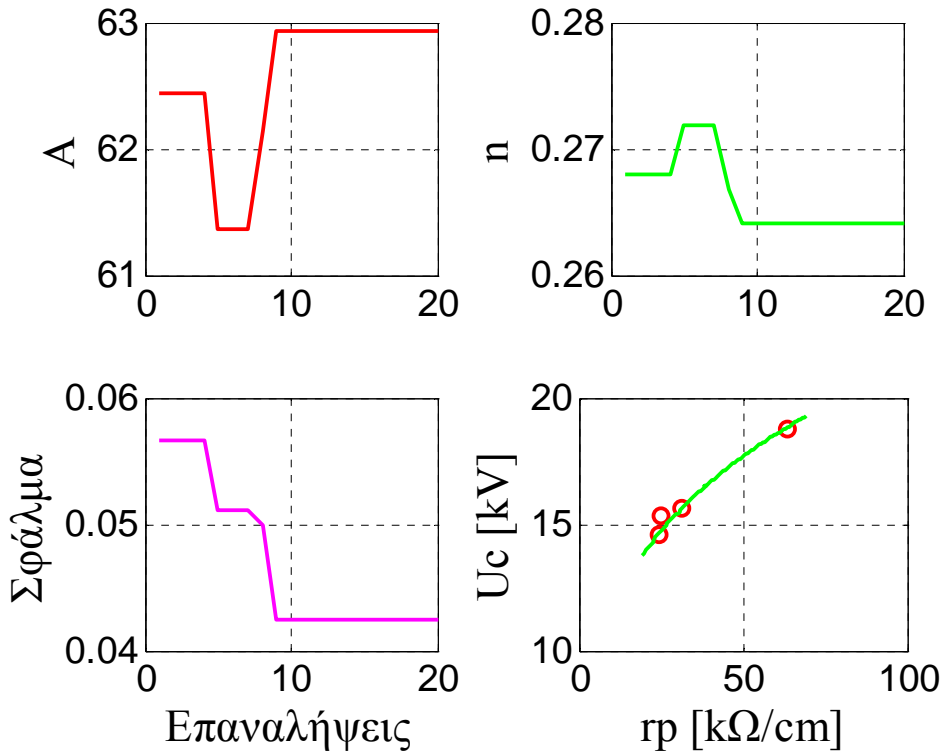
Σχήμα 6.37: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (1η γραμμή του πίνακα 6.7).



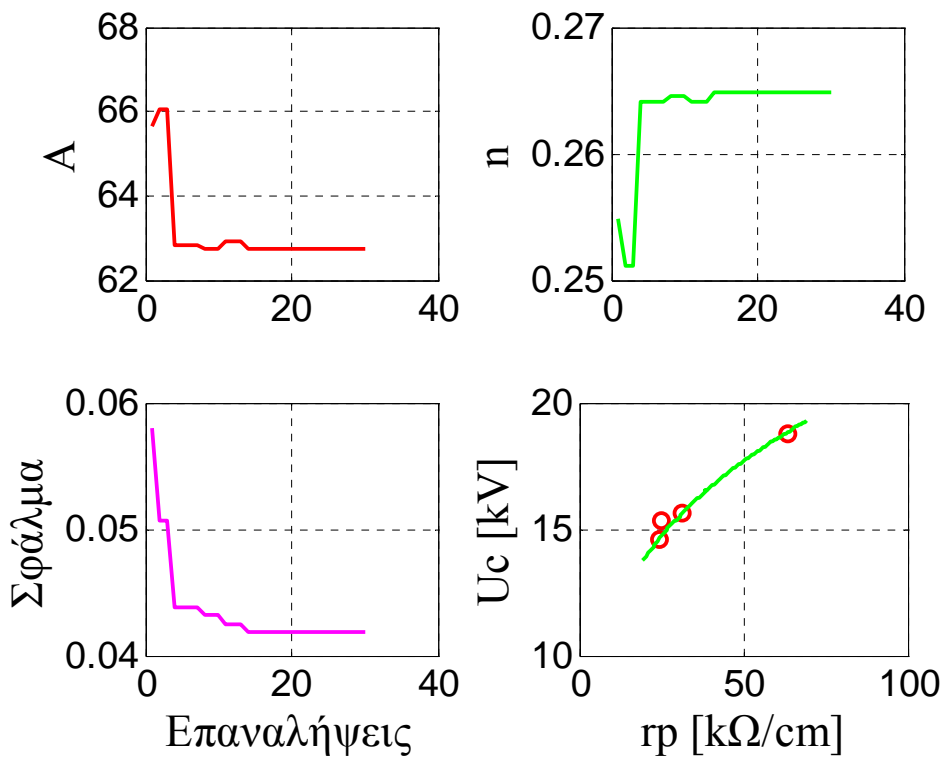
Σχήμα 6.38: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (2η γραμμή του πίνακα 6.7).



Σχήμα 6.39: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (3η γραμμή του πίνακα 6.7).

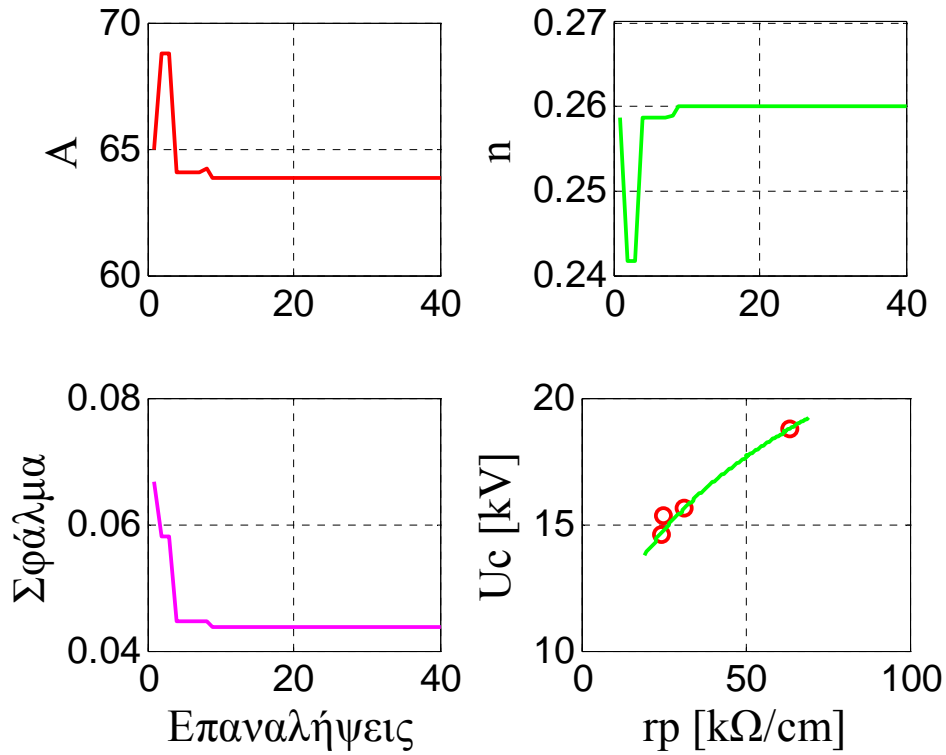


Σχήμα 6.40: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (4η γραμμή του πίνακα 6.7).



Σχήμα 6.41: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (5η γραμμή του πίνακα 6.7).

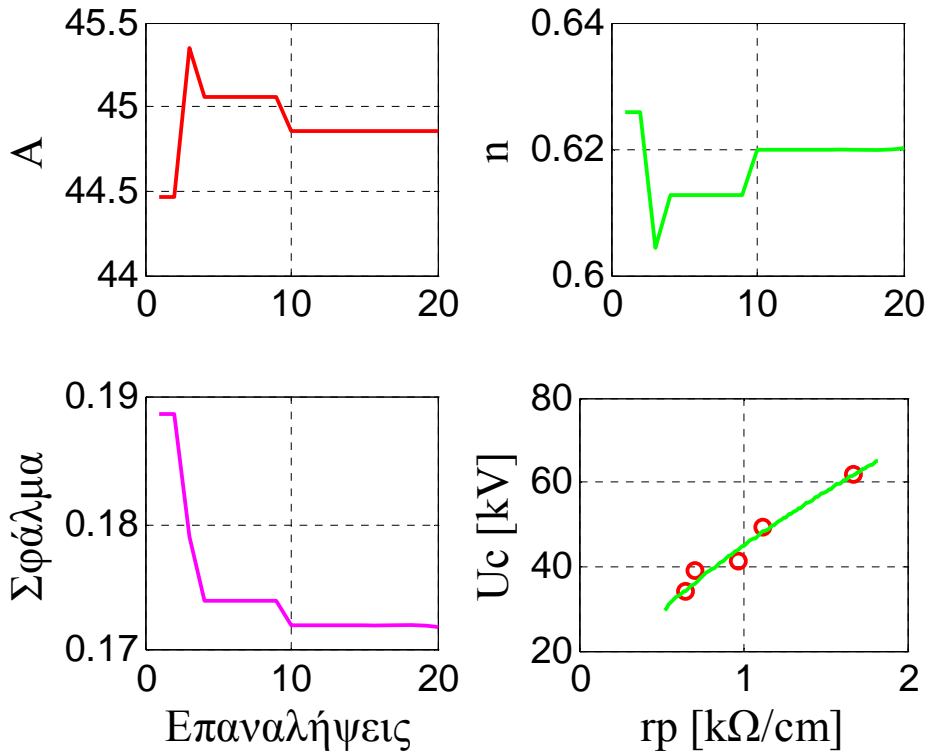




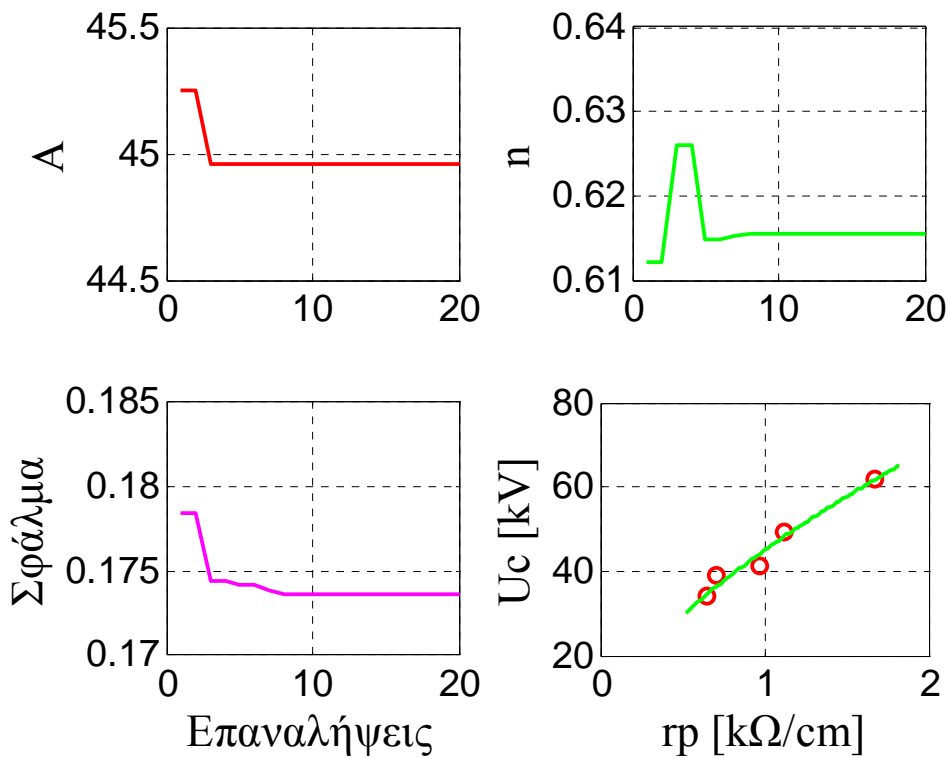
Σχήμα 6.42: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Alston. (δη γραμμή του πίνακα 6.7).

α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	20	0.17186314	44.85836386	0.62014652
2	20	20	0.17363064	44.95604396	0.61550672
3	20	30	0.17092481	44.85836386	0.62136752
4	30	20	0.17019208	44.76068376	0.62551893
5	30	30	0.17074372	44.85836386	0.62161172
6	30	40	0.17011662	44.76068376	0.62478632

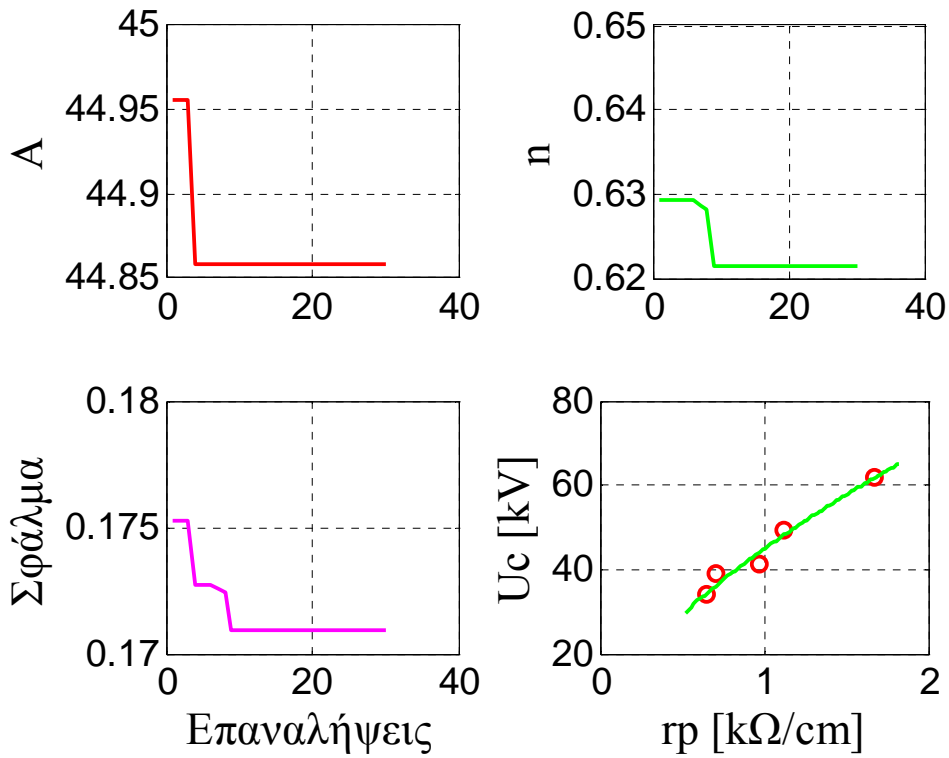
Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Cron.



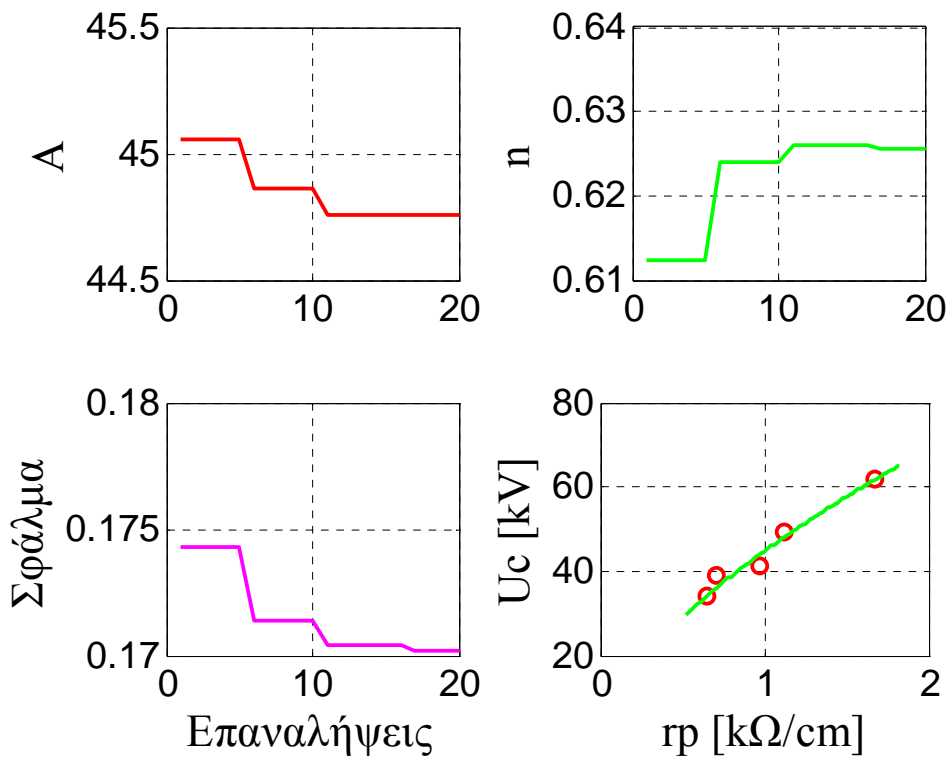
Σχήμα 6.43: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourg και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (1η γραμμή του πίνακα 6.8).



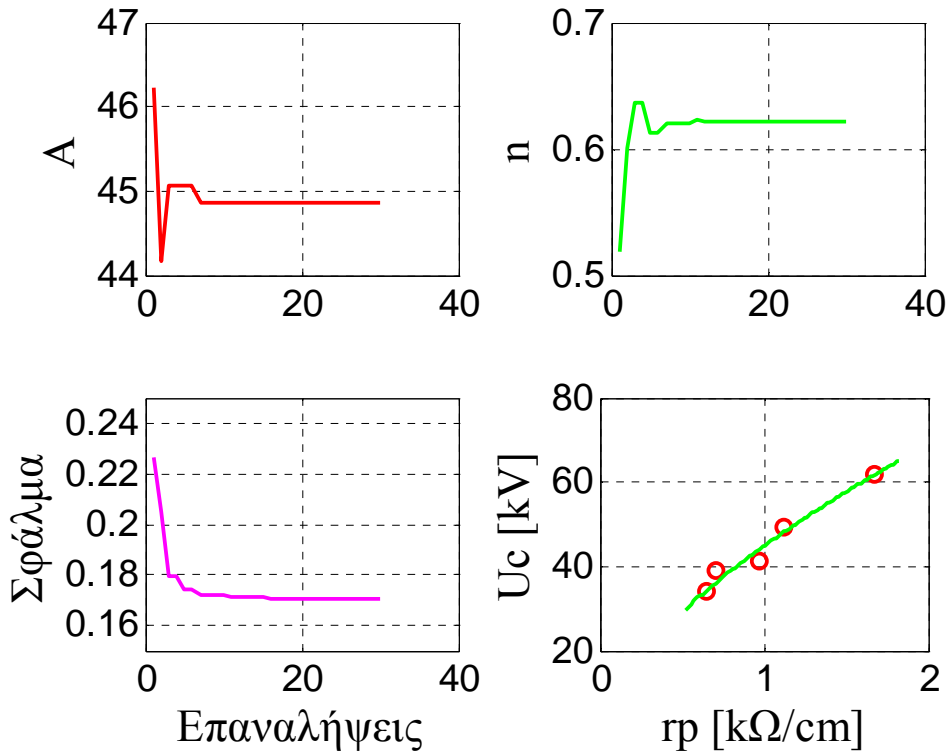
Σχήμα 6.44: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourg και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (2η γραμμή του πίνακα 6.8).



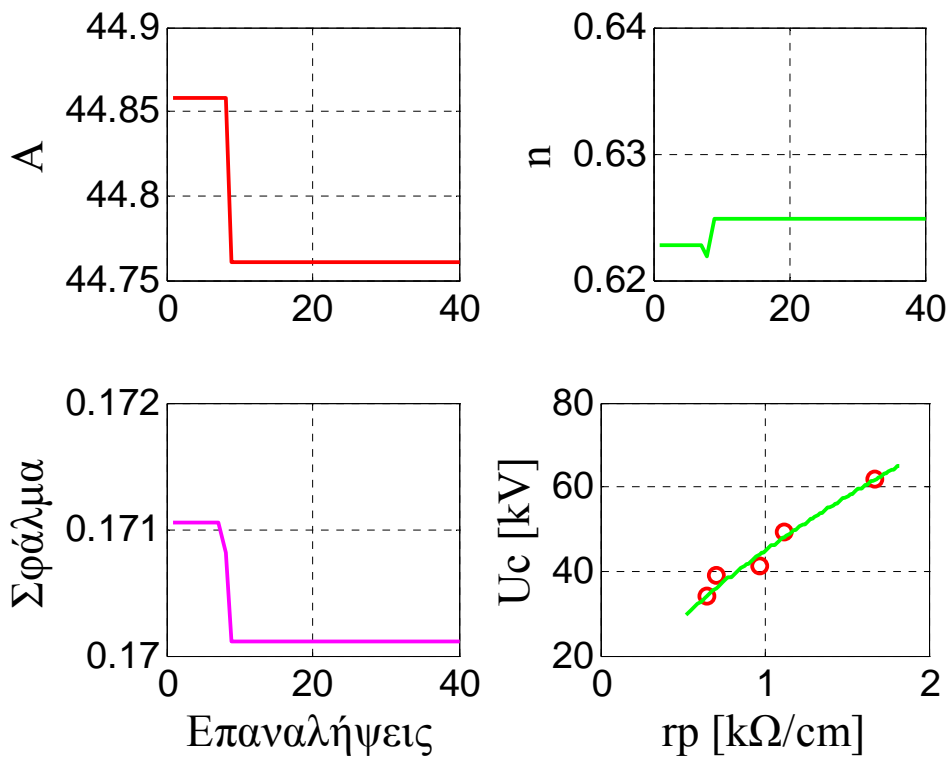
Σχήμα 6.45: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (3η γραμμή του πίνακα 6.8).



Σχήμα 6.46: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (4η γραμμή του πίνακα 6.8).



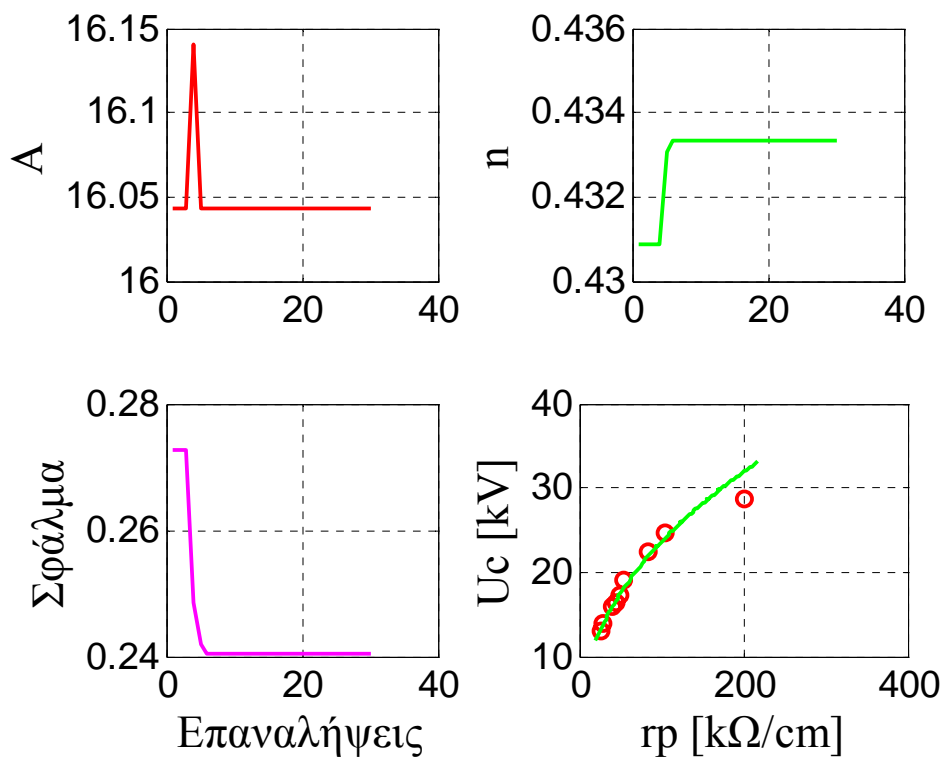
Σχήμα 6.47: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourg και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (5η γραμμή του πίνακα 6.8).



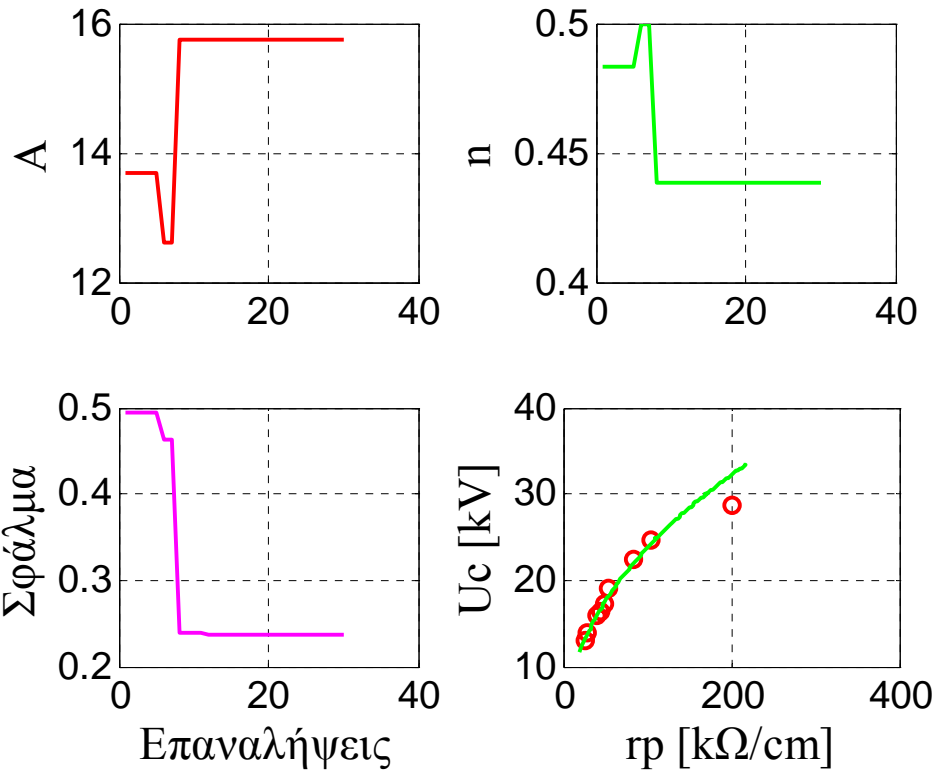
Σχήμα 6.48: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourg και των πειραματικών δεδομένων του Cron. (6η γραμμή του πίνακα 6.8).

α/α	g	I	Σφάλμα	A	n
1	20	30	0.24050725	16.04273504	0.43333333
2	20	30	0.23715790	15.74969475	0.43870574
3	20	30	0.23927495	15.94505495	0.43504274
4	30	20	0.26636125	17.60561661	0.40842491
5	30	20	0.23654905	15.55433455	0.44188034
6	30	40	0.23635007	15.45665446	0.44358974

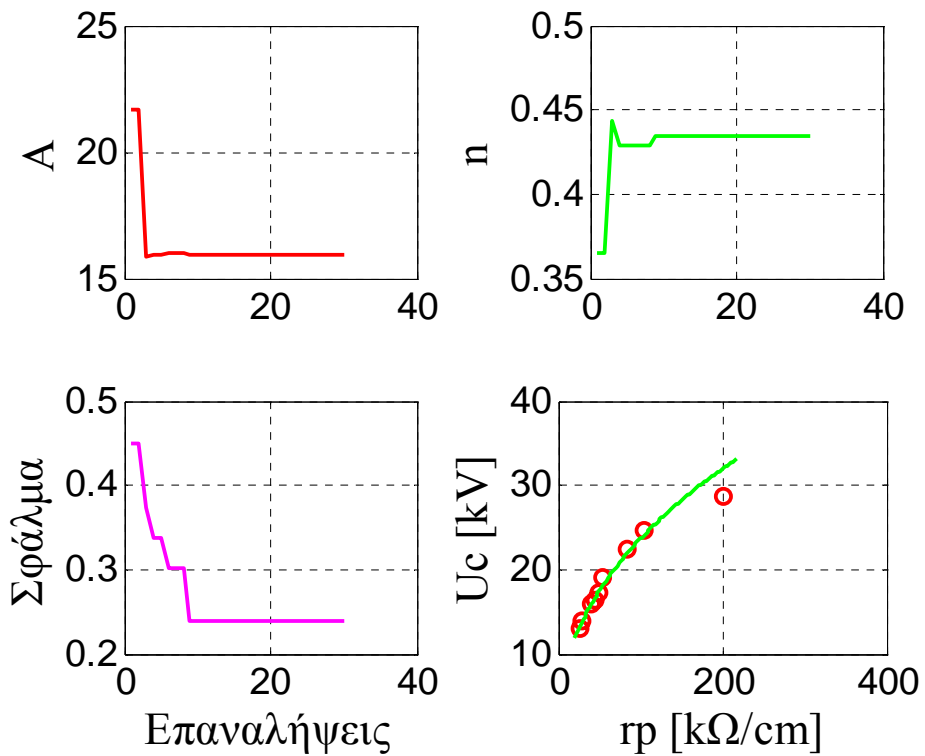
Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins.



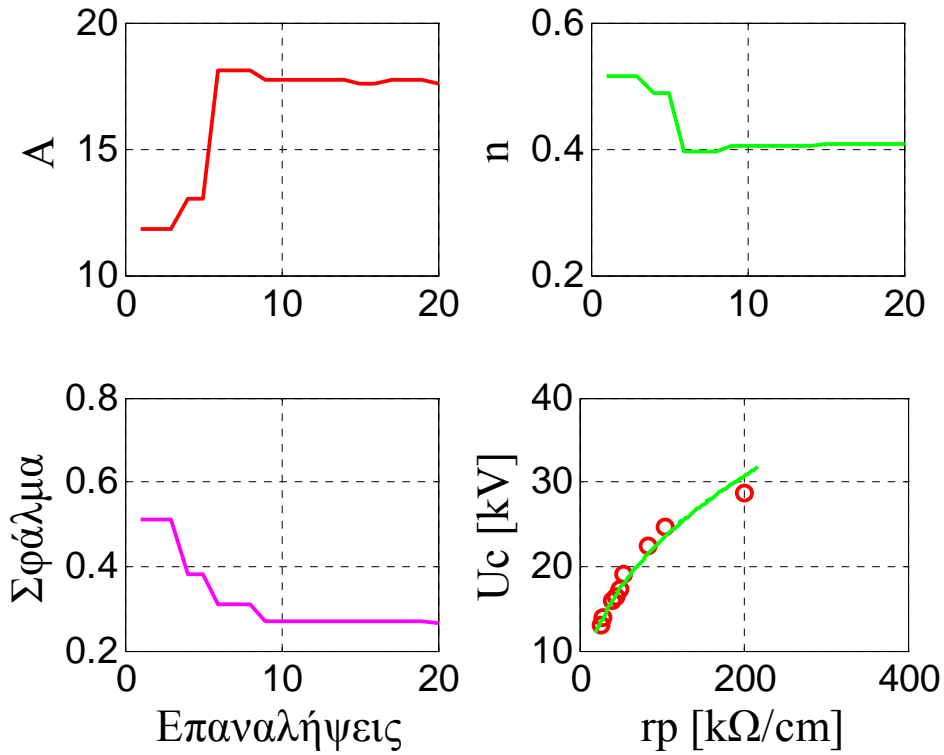
Σχήμα 6.49: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (1η γραμμή του πίνακα 6.9).



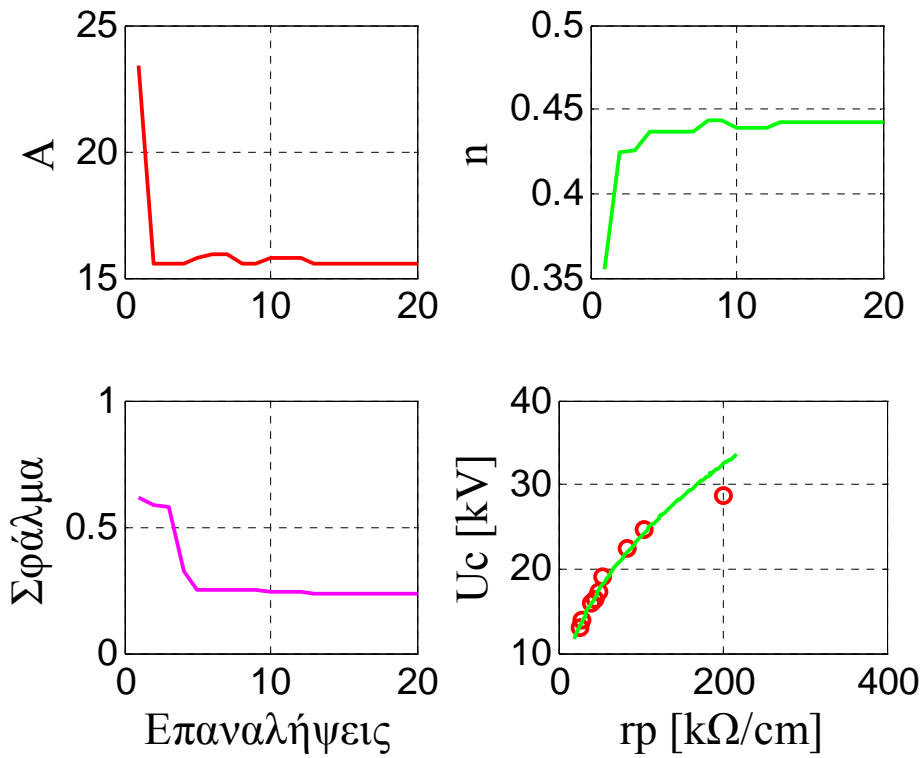
Σχήμα 6.50: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (2η γραμμή του πίνακα 6.9).



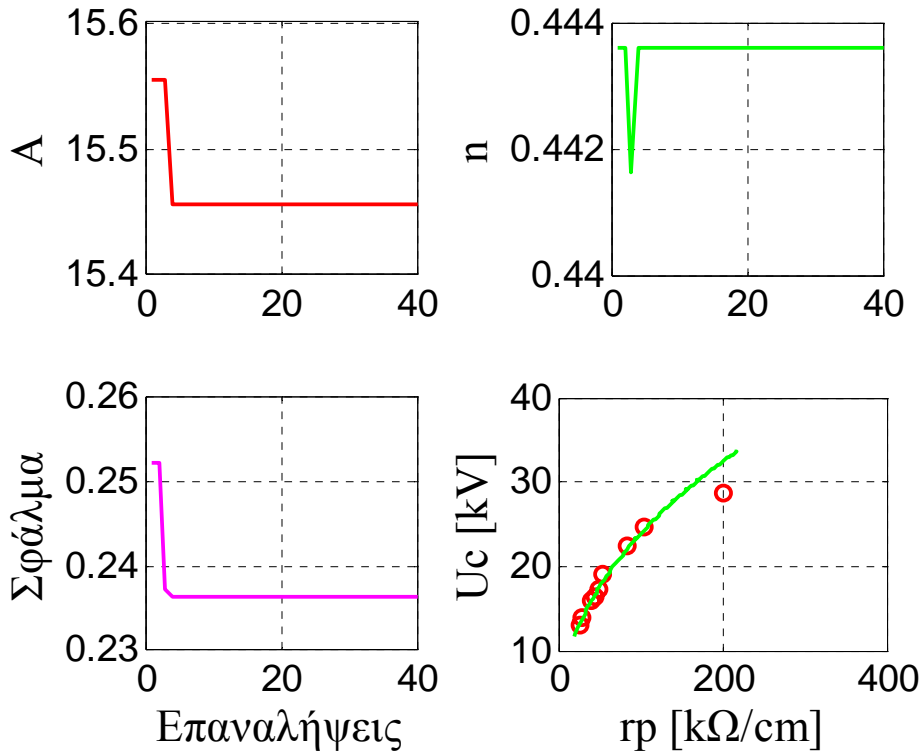
Σχήμα 6.51: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (3η γραμμή του πίνακα 6.9).



Σχήμα 6.52: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (4η γραμμή του πίνακα 6.9).



Σχήμα 6.53: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (5η γραμμή του πίνακα 6.9).



Σχήμα 6.54: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourh και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins. (6η γραμμή του πίνακα 6.9).

### 6.3 Γενικά συμπεράσματα για τον υπολογισμό των τιμών $A$ και $n$ του στατικού τόξου.

Όπως έχει αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 3, οι δύο παράμετροι που καθορίζουν το σχηματισμό ενός τόξου γύρω από έναν αλυσοειδή μονωτήρα είναι τα μεγέθη  $A$  και  $n$ . Ο υπολογισμός τους, όπως έχει εξηγηθεί, δεν είναι ακριβής παρά τις πολλές πειραματικές μελέτες που έχουν γίνει, αλλά τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάμεσα στις διάφορες ερευνητικές ομάδες. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των τιμών αυτών από το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Για το σκοπό αυτό, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.1, έγινε με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου συνδυασμός διάφορων μαθηματικών μοντέλων και πειραματικών αποτελεσμάτων από διάφορες ερευνητικές ομάδες, με σκοπό τον ακριβέστερο υπολογισμό των σταθερών του τόξου. Συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 6.1, λαμβάνουμε για κάθε ομάδα εκτελέσεων του γενετικού αλγορίθμου ξεχωριστά την τιμή εκείνη που



παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε συνδυασμό μοντέλου και πειράματος.

Με βάση τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Dabhi-Beroual και των πειραματικών δεδομένων του Alston οι τιμές των  $A$  και  $n$  είναι:  $A=212.770$  και  $n=0.358$ .

Με βάση τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου θεωρούμε ότι τα πειραματικά δεδομένα του Cron δεν είναι δυνατόν να προσφέρουν ορθές τιμές για τα  $A$  και  $n$  όταν εφαρμόζονται στο μοντέλο των Dabhi-Beroual, καθώς το εύρος τιμών των ζητούμενων μεγεθών παρεκκλίνει σημαντικά των θεωρητικών.

Βάσει του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Dabhi-Beroual και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins καταλήγουμε στις εξής τιμές για τα  $A$  και  $n$ :  $A=94.382$  και  $n=0.795$ .

Με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Alston οι βέλτιστες τιμές των  $A$  και  $n$  που προκύπτουν από τον γενετικό αλγόριθμο είναι:  $A=277.825$  και  $n=0.358$ .

Με την εφαρμογή των πειραματικών δεδομένων του Cron στο μοντέλο των Neumarker-Rizk, τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου κατέδειξαν ότι το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να συνδυαστεί με τα πειραματικά δεδομένα του Cron, καθώς οι τιμές αποκλίνουν σημαντικά από το επιτρεπτό εύρος τιμών.

Τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τις τιμές των  $A$  και  $n$  με χρήση του μοντέλου των Neumarker-Rizk και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins είναι:

$A=136.873$  και  $n=0.794$ .

Από την εφαρμογή των πειραματικών δεδομένων του Alston στο μοντέλο των Hurley-Limbourn καταλήγουμε ότι οι πιο κατάλληλες τιμές για τα  $A$  και  $n$  είναι:

$A=62.636$  και  $n=0.265$ .

Με βάση τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Cron συμπεραίνουμε πως οι τιμές των  $A$  και  $n$  με το μικρότερο σφάλμα είναι:  $A=44.760$  και  $n=0.624$ .

Τέλος, τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τις τιμές των  $A$  και  $n$  με χρήση του μοντέλου των Hurley-Limbourn και των πειραματικών δεδομένων του Wilkins είναι:  $A=15.456$  και  $n= 0.443$

### 7.1 Αποτελέσματα από τον υπολογισμό των χωρητικότητων επί αλυσοειδών μονωτήρων

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του γενετικού αλγόριθμου, τα οποία ελαχιστοποιούν το σφάλμα υπολογισμού των χωρητικότητων για τους δοθέντες τύπους αλυσοειδών μονωτήρων, ώστε να βρούμε τη βέλτιστη τιμή για τα μεγέθη  $C$ ,  $C_e$  και  $C_h$ . Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτών. Έτσι έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Αλυσοειδής μονωτήρας	$C$ [pF]	$C_e$ [pF]	$C_h$ [pF]
Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας αποτελούμενος από 10 δισκοειδείς μονωτήρες (εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π)	92.604	5.572	0.850
Γυάλινος καθαρός αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες (κωδικός ΔΕΗ 161)	131.457	7.447	0.742
Γυάλινος ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες (κωδικός ΔΕΗ 161)	128.177	6.021	0.707
Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες (κωδικός ΔΕΗ 069)	177.333	6.373	0.957
Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου αποτελούμενος από 10 δισκοειδείς μονωτήρες (κωδικός ΔΕΗ 033)	111.712	5.476	0.721
Πορσελάνινος ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες (κωδικός ΔΕΗ 010)	79.886	4.120	0,531
Πορσελάνινος καθαρός αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου, αποτελούμενος από 12 δισκοειδείς μονωτήρες (κωδικός ΔΕΗ 010)	184.003	7.936	0.612

Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου για τον υπολογισμό των χωρητικότητων επί των αλυσοειδών μονωτήρων.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη στο κεφάλαιο 2, συνήθεις περιοχές τιμών για τις παράσιτες χωρητικότητες είναι  $C=20...70\text{pF}$ ,  $C_e= 4...5\text{pF}$  και  $C_h=0.5...1\text{pF}$ . Από τις εκτιμήσεις των τιμών αυτών που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο, παρατηρούμε πως υπάρχει σημαντική απόκλιση, καθώς οι τιμές κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές  $C=30...185\text{pF}$ ,  $C_e= 2...8\text{pF}$  και  $C_h=0.2...1\text{pF}$ . Από τα αποτελέσματα, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, παρατηρείται ιδιαίτερα καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών τιμών και των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου, γεγονός το οποίο καταδεικνύει την ανάγκη για ενδελεχή έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα. Επισταμένες προσπάθειες πρέπει να εστιάσουν στον ακριβέστερο προσδιορισμό του εύρους των τιμών αυτών των χωρητικοτήτων. Ενδεχομένως, ακριβέστερα αποτελέσματα για την τιμή τους να προκύψουν από τη μελέτη των χωρητικοτήτων επί των πυλώνων και όχι εντός εργαστηρίου, καθώς οι χωρητικότητες εξαρτώνται άμεσα από τα περιβάλλοντα στοιχεία γύρω από τους μονωτήρες.

## 7.2 Αποτελέσματα από τον υπολογισμό των τιμών $A$ και $n$ του στατικού τόξου.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου, τα οποία ελαχιστοποιούν το σφάλμα υπολογισμού των τιμών των σταθερών  $A$  και  $n$  του στατικού τόξου για τους δοθέντες τύπους αλυσοειδών μονωτήρων, ώστε να βρούμε την βέλτιστη τιμή για τα μεγέθη αυτά. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτών. Έτσι έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Μοντέλο	Πείραμα	$A$	$n$
Dabhi-Beroual	Wilkins	94.382	0.795
Dabhi-Beroual	Alston	212.770	0.358
Dabhi-Beroual	Cron	-	-
Neumarker-Rizk	Wilkins	136.873	0.794
Neumarker-Rizk	Alston	277.825	0.358
Neumarker-Rizk	Cron	-	-
Hurley-Limbourn	Wilkins	15.456	0.443
Hurley-Limbourn	Alston	62.636	0.2653
Hurley-Limbourn	Cron	44.760	0.624

Πίνακας 7.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό των τιμών  $A$  και  $n$  του στατικού τόξου.

Όπως παρατηρούμε στον πίνακα 7.2, τα πειραματικά δεδομένα του Cron δεν είναι δυνατόν να προσφέρουν ορθές τιμές για τα  $A$  και  $n$  όταν εφαρμόζονται στο μοντέλο των Dabhi-Beroual, καθώς επίσης και στο μοντέλο των Neumarker-Rizk, καθώς οι τιμές αποκλίνουν σημαντικά από το επιτρεπτό εύρος τιμών. Επίσης, παρατηρούμε, πως ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, οι διαφορές στις αναμενόμενες τιμές των  $A$  και  $n$  είναι μεγάλες. Το μεγάλο αυτό εύρος τιμών των σταθερών αυτών πηγάζει από την ανομοιομορφία στη μορφή των μονωτήρων, από τις διαφορές που παρουσιάζει κάθε είδος ρύπανσης, τη μεταβολή της επιφανειακής ειδικής αντίστασης λόγω των θερμικών διαδικασιών και της ανομοιόμορφης ύγρανσης, την ανομοιομορφία των τόξων που σχηματίζονται στην περιοχή της επιφάνειας των μονωτήρων, του πολλαπλασιασμού των τόξων, της επίδρασης των παραμέτρων του κυκλώματος τροφοδοσίας στη συμπεριφορά των μονωτήρων κ.α. Έτσι, ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός των σταθερών αυτών δεν είναι εύκολος και είναι συχνά προσεγγιστικός. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, για τόξα που λαμβάνουν χώρα στον αέρα οι παραπάνω σταθερές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών  $0,3 \leq n \leq 1$  και  $50 \leq A \leq 400$ . Από τα παραπάνω, κατανοούμε πως η τάση υπερπήδησης ενός ρυπασμένου μονωτήρα είναι μια στατιστική μεταβλητή, η οποία χαρακτηρίζεται από σημαντική διασπορά, ακόμη και υπό ελεγχόμενες συνθήκες και τα διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί εμπεριέχουν προσεγγίσεις.

## **Βιβλιογραφία**

- 1) Ι. Α. Σταθόπουλος, “Υψηλές Τάσεις Ι”, Εκδόσεις Συμεών.
- 2) Κ.Θ. Δέρβος, “Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων”, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα 2001.
- 3) Ι.Α. Σταθόπουλος, “Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων Έναντι Υπερτάσεων”, Εκδόσεις Συμεών.
- 4) J.S.T. Looms, “Insulators for high voltages”, Peter Peregrinus Ltd., London, Unighted Kingdom, 1990
- 5) Βασιλική Κονταργύρη, “Ρύπανση μονωτήρων”, Ενδιάμεση Κρίση, ΕΜΠ, 2005
- 6) Κωνσταντίνος Ε. Κοντομάρης, Φώτιος Α. Σούρτζης, «Μελέτη Κατανομής του Ηλεκτρικού πεδίου», Διπλωματική Εργασία, Αθηνά, Φεβρουάριος 2005
- 7) <http://www.ngk-locke.com>
- 8) IEC 507, “Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems”, 1991.
- 9) Κ. Καγκαράκης, “Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.
- 10) CIGRE Working Group 04 of Study Committee No. 33, “The measurement of site pollution severity and its application to insulator dimensioning for A.C. systems”, Electra No. 64, May 1979, pp. 101-116
- 11) IEC TS 62073, “Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces”, 2003.
- 12) Tomas Gustavsson, “Outdoor Aging of Silicone Rubber Formulations in Coastal Environment”, Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Göteborg, Sweden, Technical report No. 353L, June 2000.
- 13) Ευαγγέλου ‘Τεχνολογία ηλεκτρολογικών Εξαρτημάτων’, Ο.Ε.Δ.Β
- 14) Eugenio Concha: “ILMOS, Insulator Leakage Current Monitor”. Άρθρο διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: [http://www.psptechnologies.com/Assets/nonhtml/articulo\\_1\\_ingles.pdf](http://www.psptechnologies.com/Assets/nonhtml/articulo_1_ingles.pdf)

- 15) Tomas Gustavsson: "Outdoor Aging of Silicone Rubber Formulations in Coastal Environment", Licentiate thesis. Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Technical report No. 353L, June 2000
- 16) Kapal Sharma, "Polymeric Insulators", Technical article, R.E.T., Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.aset.ab.ca/pdf/files/article3.pdf>.
- 17) IEC 815, "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions", 1986
- 18) S.V. Hörnfeldt, "DC - probes for electric field distribution measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April 1991, pp. 524-529
- 19) S.M. Al Dhalaan, M.A. Elhirbawy, "Simulation of voltage distribution calculation methods over a string of suspension insulators", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, Texas, 7-12 September 2003, Vol. 3, pp. 909-914.
- 20) W. Sima, F.P. Espino-Cortes, Edward A. Cherney, Shesha H. Jayaram, "Optimization of corona ring design for long-rod insulators using FEM based computational analysis", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, 19-22 September 2004, pp. 480-483.
- 21) F.A.M. Rizk, "Mathematical models for pollution flashover", Electra, No. 78, October 1981, pp. 71-103.
- 22) 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.
- 23) R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films", Proc. IEE, Vol. 116, No. 3, March 1969, pp. 457-465.
- 24) L.L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of discharges on polluted insulation", Proc. IEE, Vol. 110, No. 7, July 1963, pp. 1260-1266.
- 25) IEC TS 62073, "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces", 2003.
- 26) IEC 507, "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems", 1991.

- 27) N. Dhahbi-Megrache, 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.
- 28) D.C.Chaurasia, “Scintillation modelling for insulator strings under polluted conditions”, *XIth International Symposium on High Voltage Engineering*, London, UK, 23-27 August 1999.
- 29) Giordano G., Marignetti F., Scarano M., “A genetic algorithm based off-line feeding optimization for flat-stator micro and mini motors”, *7<sup>th</sup> International conference on Optimization of Electrical and Electronical Equipment*, Brasov, Romania, 11-12 May 2000.
- 30) Βλαχάβας Ι., Κεφαλάς Π., Βασιλειάδης Ν., Ρεφανίδης Ι., Κόκκορας Φ., Σακελλαρίου Η., “Τεχνητή Νοημοσύνη”, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη, 2002.
- 31) Holland H., “Adaptation in natural and artificial systems”, University of Michigan Press, Reprinted in MIT Press, 1992.
- 32) Goldberg D. E., “Genetic Algorithm in search, optimization and machine learning”, Addison - Wesley, 1989.
- 33) Gonos I. F., Topalis F. V., Stathopoulos I. A., “Genetic Algorithm approach to the modeling of polluted insulators”, *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, Vol.149, No.3, May 2002.
- 34) Γκόγκος Β., Κίνγκ Ρ. Ε., “Εισαγωγή σε μεθόδους αριστοποίησης της Υπολογιστικής Νοημοσύνης-Εξελικτικός Υπολογισμός”, *Τεχνικά Χρονικά*, Τεύχος 1/98, 1998.
- 35) Στεφόπουλος Γ. Κ., “Καθορισμός παραμέτρων γεννητριών από μετρήσεις δυναμικής συμπεριφοράς με χρήση γενετικών αλγορίθμων”, *Διπλωματική Εργασία*, Ε.Μ.Π., 2001.
- 36) Διδακτορική Διατριβή Ι.Φ.Γκόνου, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2002.