



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

**Συμβολή στην κυκλωματική προσέγγιση
του ιονισμού του εδάφους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεοδόσιος Α. Παυλόπουλος

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



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

Συμβολή στην κυκλωματική προσέγγιση του ιονισμού του εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεοδόσιος Α. Παυλόπουλος

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17^η Σεπτεμβρίου 2014.

.....

Ιωάννης
Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Φραγκίσκος
Β. Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ιωάννης
Φ. Γκόνος
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

.....
Θεοδόσιος Α. Παυλόπουλος

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

Copyright © Θεοδόσιος Α. Παυλόπουλος

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.

Περίληψη

Ο σχεδιασμός ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης για μία εγκατάσταση ηλεκτρικής ισχύος προϋποθέτει τον προσδιορισμό της αντίστασης γείωσης. Ο ιονισμός του εδάφους είναι ένας από τους παράγοντες που έχουν επωφελή επίδραση στην ειδική αντίσταση του εδάφους και, κατ' επέκταση, στην αντίσταση ενός συστήματος γείωσης, ειδικά για κακές συνθήκες του εδάφους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιούνται με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP ισοδύναμα κυκλώματα συστημάτων γείωσης σε διάφορους τύπους εδαφών, βάσει τριών μοντέλων κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού και προσομοιώνεται η κρουστική τους απόκριση όταν υπόκεινται σε κρουστική τάση. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με δύο σειρές πειραματικών μετρήσεων και γίνεται αξιολόγηση των μοντέλων κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού βάσει αυτών των συγκρίσεων. Για το μοντέλο το οποίο εμφανίζει τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων, εξετάζονται οι δυνατότητες βελτίωσής του, ενώ προτείνεται και ένα νέο συνδυαστικό μοντέλο κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού. Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα για το κάθε μοντέλο ξεχωριστά.

Λέξεις κλειδιά

Ιονισμός του εδάφους, Σύστημα γείωσης, Αντίσταση γείωσης, Ειδική αντίσταση εδάφους, ATP-EMTP, Μοντέλο κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού, Ισοδύναμο κύκλωμα, Προσομοίωση κρουστικής απόκρισης, Κρουστική γεννήτρια, Κρουστικές δοκιμές

Abstract

The design of a safe earthing system for an electrical power installation requires the determination of the grounding resistance. Soil ionization is one of the factors having beneficial effect on soil resistivity and, therefore, on the resistance of an earthing system, especially under poor soil conditions.

In the present diploma thesis, equivalent circuits of earthing systems embedded in various soil types are implemented, using ATP-EMTP software and based on three circuit approximation models of soil ionization, and their impulse response when they are subjected to impulse voltage is simulated. Subsequently, the simulation results are compared with two series of experimental measurements and the circuit approximation models of soil ionization are evaluated taking into account the above-mentioned comparisons. For the model with the largest deviation between simulation and measurements, the possibilities for its improvement are considered, whereas a new combinatory circuit approximation model of soil ionization is proposed. Finally, conclusions for each model are drawn.

Key words

Soil ionization, Earthing system, Ground resistance, Soil resistivity, ATP-EMTP, Circuit approximation model of soil ionization, Equivalent circuit, Simulation of impulse response, Impulse generator, Impulse tests

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τρία μοντέλα κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού. Μετά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση σε σχέση με τα συστήματα γείωσης, το φαινόμενο του ιονισμού, αλλά και τις προηγούμενες προσπάθειες μοντελοποίησης της μεταβατικής συμπεριφοράς του εδάφους, παρουσιάζονται τα τρία μοντέλα, καθώς και οι αλγόριθμοι περιγραφής τους. Στη συνέχεια, προσομοιώνεται η κρουστική απόκριση διάφορων συστημάτων γείωσης βάσει των τριών μοντέλων και εξάγονται συμπεράσματα για όλα τα μοντέλα από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και τη σύγκρισή τους σε σχέση με πειραματικές μετρήσεις για αντίστοιχες τάσεις φόρτισης. Επίσης, προτείνονται τρόποι βελτίωσης του μοντέλου με τη μεγαλύτερη απόκλιση από τις πειραματικές μετρήσεις καθώς και ένα νέο συνδυαστικό μοντέλο κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού.

Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται η αντίσταση των συστημάτων γείωσης και το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και, παράλληλα, γίνεται αναφορά στις μεθόδους μέτρησης της αντίστασης γείωσης, στους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, στην κρίσιμη ένταση κατωφλίου του ιονισμού, αλλά και στους παράγοντες που επηρεάζουν τα κρουστικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναδρομή σε συμπεράσματα προηγούμενων ερευνών για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς του εδάφους και, στη συνέχεια, εξετάζονται τα μοντέλα κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης των συστημάτων γείωσης, ενώ παρατίθενται οι αλγόριθμοι που περιγράφουν τα μοντέλα αυτά.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα δεδομένα για τον εξοπλισμό, τις πειραματικές διατάξεις, τα συστήματα γείωσης και τα δείγματα εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των δύο σειρών μετρήσεων, οι οποίες, με τη σειρά τους, χρησιμοποιήθηκαν ως βάση σύγκρισης για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό, κατ' αρχάς, γίνεται αναφορά στο λογισμικό ATP-EMTP και στα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης της γείωσης. Έπειτα, παρατίθενται τα ισοδύναμα κυκλώματα όπως υλοποιήθηκαν με τη χρήση του προαναφερθέντος λογισμικού καθώς και οι τιμές των παραμέτρων των ισοδύναμων κυκλωμάτων αυτών για κάθε ένα μοντέλο ξεχωριστά. Παράλληλα, παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (γραφικές απεικονίσεις των τιμών τάσης και ρεύματος στο πεδίο του χρόνου).

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό, μετά την αξιολόγηση των τριών μοντέλων βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, μελετώνται οι δυνατότητες βελτίωσης του μοντέλου που προτάθηκε από τον Nixon. Στη συνέχεια, προτείνεται ένα νέο συνδυαστικό μοντέλο και, τέλος, εξάγονται συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του κάθε μοντέλου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα, καθώς και την Ελένη Π. Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη βοήθειά της, για την καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς και για την ευγένεια με την οποία αντιμετώπισε την οποιαδήποτε απορία/δυσκολία μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Πρόλογος.....	iii
Περιεχόμενα.....	v
1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	
1.1 Γείωση.....	1
1.1.1 Συστήματα Γείωσης – Στόχοι.....	1
1.1.2 Χρήσιμες Έννοιες – Ορισμοί.....	2
1.1.3 Γενική μορφή του συστήματος γείωσης.....	2
1.1.4 Προσδιορισμός της Αντίστασης Γείωσης.....	4
1.1.4.1 Μέθοδοι Υπολογισμού της Αντίστασης Γείωσης.....	5
(α) Μέθοδος μείωσης δυναμικού (Fall of Potential).....	5
(β) Μέθοδος 61,8%.....	6
(γ) Μέτρηση με γέφυρα.....	7
1.1.5 Ειδική αντίσταση εδάφους.....	8
1.1.5.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ειδική Αντίσταση του Εδάφους (ρ_{soil}).....	8
1.2 Ιονισμός του Εδάφους.....	11
1.2.1 Χρήσιμες Έννοιες – Ορισμοί.....	11
1.2.2 Μηχανισμοί Διάσπασης του Εδάφους.....	11
1.2.3 Κρουστικές Αντιστάσεις Προ του Ιονισμού και Μετά τον Ιονισμό.....	13
1.2.4 Διάσπαση του Εδάφους.....	16
(α) Παράμετροι Διάσπασης.....	16
(β) Όρια της Διάσπασης.....	17
1.2.5 Μοντελοποίηση του Φαινομένου του Ιονισμού.....	18
1.2.6 Προσδιορισμός της Κρίσιμης Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου (E_c).....	18
1.2.6.1 Εισαγωγή.....	19
1.2.6.2 Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία Δοκιμών.....	19
Α. Κύκλωμα Δοκιμών.....	20
Β. Χαρακτηριστικά Δοκιμών.....	20
1.2.6.3 Καθορισμός της E_c	21
Α. Επίδραση της Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους.....	22
Β. Επίδραση της Πολικότητας.....	28
Γ. Επίδραση των Διαστάσεων του Ηλεκτροδίου Γείωσης.....	29
1.2.6.4 Συμπεράσματα.....	33

1.2.7	Παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους σε ταχείες μεταβατικές καταστάσεις.....	33
1.2.7.1	Η επίδραση της πολικότητας στη συμπεριφορά του εδάφους.....	33
1.2.7.2	Κρουστικές μορφές ρεύματος υπό θετική και αρνητική πολικότητα.....	34
1.2.7.3	Δυναμική της διαδικασίας του ιονισμού και πολικότητα.....	34
1.2.7.4	Επίδραση της πολικότητας στις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος.....	35
1.2.7.5	Χαρακτηριστικά της διάσπασης του εδάφους.....	35
1.2.7.6	Επίδραση του μεγέθους των κόκκων του εδάφους.....	35
1.2.7.7	Κρουστική Αντίσταση της Άμμου σε Ομοιόμορφο Ηλεκτρικό Πεδίο.....	39
1.2.7.8	Ηλεκτρικό Πεδίο Κατωφλίου του Ιονισμού του Εδάφους (E_c).....	39
1.2.7.9	Χρονική Υστέρηση του Ιονισμού του Εδάφους.....	40
1.2.7.10	Συμπεράσματα.....	41
1.3	Βιβλιογραφία.....	43
2	Μοντέλα Κυκλωματικής Προσέγγισης του Ιονισμού	
2.1	Υπόβαθρο της Κυκλωματικής Προσέγγισης του Ιονισμού.....	44
2.1.1	Προηγούμενη Έρευνα.....	44
2.1.2	Υποθέσεις και περιορισμοί στα υπάρχοντα μοντέλα.....	45
2.1.3	Ιονισμός του Εδάφους για ένα Ημισφαιρικό Ηλεκτρόδιο γείωσης.....	46
2.1.4	Βελτιωμένα Μοντέλα Ιονισμού του Εδάφους.....	48
2.1.5	Δυναμική Σύνθετη Αντίσταση ενός Ηλεκτροδίου Γείωσης.....	50
2.2	Κυκλωματικά Μοντέλα Ιονισμού.....	50
2.2.1	Κυκλωματικό Μοντέλο των Nor et al.....	50
2.2.1.1	Αλγόριθμος Περιγραφής του κυκλωματικού μοντέλου των Nor et al.....	51
2.2.2	Κυκλωματικό Μοντέλο των Kalat, Loboda et al.....	52
2.2.2.1	Αλγόριθμος Περιγραφής του Κυκλωματικού Μοντέλου των Kalat, Loboda et al.....	53
2.2.3	Κυκλωματικό Μοντέλο του Nixon.....	54
2.2.3.1	Κυκλωματικό Μοντέλο.....	55
2.2.3.1.1	Αρχικές Υποθέσεις.....	55
2.2.3.1.2	Προσδιορισμός της Ενεργής Αντίστασης Κατακόρυφης Ράβδου.....	56
2.2.3.2	Αλγόριθμος Περιγραφής του Κυκλωματικού Μοντέλου του Nixon.....	58

2.3	Βιβλιογραφία.....	62
3	Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία Μετρήσεων	
3.1	Πειραματική Διάταξη 1 ^{ης} Σειράς Μετρήσεων (Nor).....	63
3.1.1	Ισοδύναμο Κύκλωμα Κρουστικής Γεννήτριας.....	63
3.1.2	Διάταξη και Διαστάσεις Συστημάτων Γείωσης.....	64
3.1.3	Δείγματα Εδάφους.....	66
3.2	Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία 2 ^{ης} Σειράς Μετρήσεων.....	67
3.2.1	Πειραματική Διάταξη.....	67
3.2.2	Εξοπλισμός.....	68
	(α) Λυόμενη Διάταξη Μονοβάθμιας Κρουστικής Γεννήτριας.....	68
	(β) Τράπεζα Χειρισμών StAG MWB 616.....	71
	(γ) Σταθεροποιητής Τάσης Wechelspannungs-Stabilisator 3kW.....	71
	(δ) Διαφορικός Καταμεριστής MD200 Schaffner WS-30.....	72
	(ε) Αμπεροσιμπίδα Pearson.....	73
	(στ) Παλμογράφος Tektronix TDS 3052.....	74
	(ζ) Ομοαξονικά Καλώδια.....	74
	(η) Θερμόμετρο-Υγρόμετρο.....	75
	(θ) Digital Power Meter.....	75
3.2.3	Ηλεκτρόδιο Γείωσης.....	76
3.2.4	Δείγματα Εδάφους.....	78
3.2.5	Διαδικασία μέτρησης.....	78
3.3	Βιβλιογραφία.....	79
4	ΑΤΡ-ΕΜΤΡ / Υλοποίηση Κυκλωμάτων	
4.1	Γενικά για το ΑΤΡ-ΕΜΤΡ.....	80
4.2	Προγράμματα του ΑΤΡ-ΕΜΤΡ.....	81
4.2.1	ATPDraw.....	81
4.2.2	PlotXY.....	84
4.3	Υλοποίηση Ισοδύναμων Κυκλωμάτων στο ΑΤΡ-ΕΜΤΡ.....	85
4.3.1	Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου των Nor et al. για την 1 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	85
	(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα.....	85
	(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα των Nor et al. για την 1 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	87
4.3.2	Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου των Nor et al. για τη 2 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	103
	(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα.....	103
	(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα των Nor et al. για τη 2 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	104

4.3.3	Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου των Kalat, Loboda et al. για τη 2 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	110
	(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα.....	110
	(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα των Kalat, Loboda et al. για τη 2 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	112
4.3.4	Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου του Nixon για τη 2 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	118
	(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα.....	118
	(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Nixon για τη 2 ^η Σειρά Μετρήσεων.....	119
4.4	Βιβλιογραφία.....	125
5	Παρατηρήσεις – Προτάσεις – Συμπεράσματα	
5.1	Παρατηρήσεις.....	126
5.2	Διερεύνηση Δυνατοτήτων Βελτίωσης του Μοντέλου Nixon.....	130
	5.2.1 Διερεύνηση της Μεταβολής των Κυματομορφών Τάσης-Ρεύματος του Μοντέλου Nixon με τη Μεταβολή της Συνθήκης Απιονισμού.....	130
	5.2.2 Διερεύνηση της Μεταβολής των Κυματομορφών Τάσης-Ρεύματος του Μοντέλου Nixon με την Προσθήκη εν Σειρά Αυτεπαγωγής L.....	140
5.3	Πρόταση για Συνδυαστικό Μοντέλο Κυκλωματικής Προσέγγισης του Ιονισμού του Εδάφους.....	150
5.4	Συμπεράσματα.....	156
5.5	Επόμενη Μέρα.....	160
5.6	Βιβλιογραφία.....	161

Κεφάλαιο 1

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Γείωση

Σε αυτό το πρώτο μέρος του 1^{ου} κεφαλαίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται αναφορά στους στόχους και στη γενική μορφή ενός συστήματος γείωσης, ενώ παρατίθενται οι τρεις κυριότερες μέθοδοι προσδιορισμού της αντίστασης ενός συστήματος γείωσης. Στη συνέχεια, εξετάζεται η ειδική αντίσταση του εδάφους, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της.

1.1.1 Συστήματα Γείωσης – Στόχοι

Σε όλες τις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ισχύος, η ασφάλεια τόσο του προσωπικού όσο και του γενικού κοινού αποτελεί κυρίαρχο μέλημα. Γι' αυτόν το λόγο αλλά και για την προστασία του εξοπλισμού, τη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, την εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και τον περιορισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων, γίνεται χρήση συστημάτων γείωσης στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ισχύος.

Οι κύριοι στόχοι, λοιπόν, ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης είναι δύο:

- 1) να μπορεί να διοχετεύει ασφαλώς τα διάφορα ρεύματα στο έδαφος κάτω από κανονικές συνθήκες αλλά και συνθήκες σφαλμάτων, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία των διαφόρων συσκευών στο χώρο που υπάρχει η γείωση και
- 2) να διασφαλίζει ότι τα πρόσωπα που κινούνται στην περιοχή που καλύπτεται από το συγκεκριμένο σύστημα δεν διατρέχουν κανέναν κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

Συχνά, θεωρείται λανθασμένα ότι οποιοδήποτε γειωμένο αντικείμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια. Παρ' όλα αυτά μια μικρή αντίσταση γείωσης δεν αποτελεί από μόνη της εγγύηση ασφάλειας. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει μια απλή σχέση ανάμεσα στη αντίσταση του συστήματος γείωσης και του ρεύματος που μπορεί να περάσει από το ανθρώπινο σώμα σε περίπτωση ενός σφάλματος. Έτσι λοιπόν μπορεί να υπάρξει το παράδοξο ενός υποσταθμού που ενώ έχει μικρή αντίσταση εδάφους είναι επικίνδυνος και ενός άλλου που ενώ έχει μεγάλη αντίσταση εδάφους, έχει σωστά σχεδιασμένο σύστημα γείωσης ώστε να είναι ασφαλέστερος.

Σε περιπτώσεις σφαλμάτων (ground fault conditions) η ροή του ρεύματος προς τη γη προκαλεί διαφορές δυναμικού (potential gradients) τόσο μέσα στον υποσταθμό, όσο και στην περιοχή γύρω από αυτόν.

Εάν δε ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις κατά το σχεδιασμό του συστήματος, οι δυναμικές γραμμές που θα σχηματιστούν κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους ειδικά σε καταστάσεις σφαλμάτων, είναι ικανές να θέσουν σε κίνδυνο τη ζωή ενός ατόμου που βρίσκεται στην περιοχή. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες επικινδυνότητας είναι η απότομη αύξηση των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής κατά τη διάρκεια ενός πιθανού βραχυκυκλώματος.

Επίσης, επικίνδυνες τάσεις μπορούν να επαχθούν ανάμεσα στη γη και σε διάφορες συσκευές που υπάρχουν στην περιοχή.

1.1.2 Χρήσιμες Έννοιες - Ορισμοί

Βηματική τάση: Η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης που θα εφαρμοστεί σε ένα άτομο το οποίο γεφυρώνει με τα πόδια του δύο σημεία που απέχουν μεταξύ τους 1m και δεν αγγίζει κανένα γειωμένο αντικείμενο.

Τάση επαφής: Η διαφορά δυναμικού, μεταξύ της επιφάνειας της γης στο σημείο στο οποίο στέκεται ένα άτομο και της επιφάνειας μιας γειωμένης κατασκευής την οποία αυτό αγγίζει με το ένα χέρι.

Τάση βρόχου: Η μέγιστη τάση επαφής που εμφανίζεται μέσα σ' έναν από τους βρόχους που σχηματίζονται στο πλέγμα γείωσης.

Αντίστασης γείωσης: Η αντίσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος.

Άπειρη γη: Ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους, σε άπειρη απόσταση από τον γειωτή.

Ειδική αντίσταση του εδάφους: Ορίζεται ως η αντίσταση του υλικού του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου.

1.1.3 Γενική μορφή του συστήματος γείωσης

Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να περιορίζει το φαινόμενο της διαφοράς δυναμικού του εδάφους σε τέτοια επίπεδα τάσης και ρεύματος στα οποία δεν θα υπάρχει κίνδυνος τόσο για την ασφάλεια των ανθρώπων όσο και των συσκευών, όχι μόνο κάτω από κανονικές συνθήκες, αλλά και σε περιπτώσεις σφαλμάτων. Ως ένα τυπικό σύστημα γείωσης θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα πλέγμα από οριζόντια τοποθετημένους αγωγούς σε συνδυασμό με κάποιους κατακόρυφα τοποθετημένους αγωγούς (πασσάλους), οι οποίοι συνδέονται με το πλέγμα. Η χρήση ενός συνδυασμού πλέγματος και πασσάλων ως σύστημα γείωσης είναι τυπική επιλογή και έχει πλεονεκτήματα. Κάποια από αυτά αναφέρονται παρακάτω:

- Σε έναν υποσταθμό η χρήση ενός μόνο ηλεκτροδίου γείωσης είναι ανεπαρκής για να προσφέρει την επιθυμητή προστασία. Χρειάζεται ένα σύμπλεγμα από ηλεκτρόδια γείωσης, όπως πασσαλογειωτές, τα οποία συνδέονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τα μέρη τα οποία πρέπει να γειωθούν. Το αποτέλεσμα είναι ουσιαστικά ένα πλέγμα από ηλεκτρόδια.

Εάν το έδαφος μέσα στο οποίο τοποθετηθεί το πλέγμα αυτό έχει καλή απορροφητικότητα ρεύματος, έχει σχεδιαστεί ένα πλήρως αξιόπιστο σύστημα γείωσης. Ωστόσο για να διασφαλιστεί η σωστή του λειτουργία και σε εδάφη με μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης, προστίθενται σε αυτό πασσαλογειωτές, οι οποίοι αυξάνουν την αποτελεσματικότητά του.

- Εάν η τιμή του ρεύματος που διοχετεύεται στη γη είναι υψηλή, είναι πολύ σπάνια εφικτή η τοποθέτηση ενός πλέγματος που θα έχει από μόνο του τόσο χαμηλή αντίσταση ώστε να διασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχει αύξηση δυναμικού τόσο μεγάλη ώστε να αναπτυχθούν επικίνδυνες βηματικές τάσεις. Έτσι είναι απαραίτητη σχεδόν η κατασκευή ενός συνδυασμένου συστήματος γείωσης. Με ένα συνδυασμό πλέγματος και πάσσων θα υπάρχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- 1) οι οριζόντιοι αγωγοί (πλέγματα) είναι πιο αποτελεσματικοί στο να μειώνουν τον κίνδυνο ανάπτυξης υψηλών βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό συμβαίνει γιατί συνήθως τα πλέγματα τοποθετούνται σε βάθος 0,3-0,5m. Στα ανώτερα στρώματα του εδάφους όμως η αντίστασή του αυξομειώνεται με την εναλλαγή των εποχών από τον πάγο που μειώνει την αντίσταση του, στην ξηρασία που την αυξάνει. Χρειάζεται έτσι να σταθεροποιηθεί η απόδοση του συστήματος γείωσης δίνοντας έμφαση στα κατώτερα στρώματα του εδάφους η αντίσταση των οποίων μένει σχεδόν αμετάβλητη με την εναλλαγή των εποχών. Στο σημείο αυτό πλεονεκτούν οι πάσσαλοι και τα συνδυασμένα συστήματα γείωσης αφού τα βάθος ταφής τους είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των πλεγμάτων.
- 2) Οι πάσσαλοι που διεισδύουν στο κατώτερο στρώμα του εδάφους, αν θεωρηθεί μοντέλο γης δύο στρωμάτων, μπορούν να διοχετεύουν πολύ καλύτερα το ρεύμα στο έδαφος, ειδικά στις περιπτώσεις όπου το ανώτερο στρώμα έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από ότι το δεύτερο.
- 3) Εάν σ' ένα συνδυασμένο σύστημα γείωσης το οποίο είναι τοποθετημένο σε έδαφος είτε ομοιογενές, είτε δύο στρωμάτων γης όπου το πρώτο στρώμα έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από ότι το δεύτερο, οι πάσσαλοι τοποθετηθούν περιμετρικά του πλέγματος, τότε θα βοηθήσουν ώστε να αποφευχθούν απότομες αυξήσεις της τάσης περιμετρικά του πλέγματος. Θα έχουμε δηλαδή μια πιο ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του συστήματος γείωσης.

1.1.4 Προσδιορισμός της Αντίστασης Γείωσης

Ο προσδιορισμός της αντίστασης γείωσης δεν είναι εύκολος. Διαφορετικά είδη γειώσεων, (πλέγματα, πασσαλογειωτές και συνδυασμοί αυτών) έχουν διαφορετική αντίσταση γείωσης και επιπλέον στους υπολογισμούς υπεισέρχεται ο σημαντικότερος παράγοντας της σύστασης του εδάφους, μέσα στο οποίο ενταφιάζεται το σύστημα γείωσης. Το έδαφος διαφέρει σημαντικά ακόμα και σε κοντινές γεωγραφικά περιοχές, ενώ η εύρεση της ακριβούς σύστασής του, ιδιαίτερα σε μεγάλα βάθη, είναι δύσκολη και συχνά αντικοινωνική. Εξάλλου, η αντίσταση γείωσης εξαρτάται ευθέως ανάλογα από την ειδική αντίσταση του εδάφους, ρ_{soil} . Η τελευταία εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από το πορώδες του εδάφους, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Επίσης επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης. Έχει παρατηρηθεί ότι με την επιβολή κρουστικής τάσης σε γειωτές με μήκος πάνω από 10 m, η αντίσταση αυξάνεται κατά τον παράγοντα 7. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι είναι αναπόφευκτες μικρές διακυμάνσεις στην ειδική αντίσταση ρ_{soil} , και, συνεπώς, και στην αντίσταση γείωσης, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στόχος του κατασκευαστή πρέπει να είναι η διατήρηση των τιμών των αντιστάσεων αυτών, άρα και των τάσεων επαφής, κάτω από τα ανώτερα επιτρεπτά όρια ασφαλείας. Τα ανώτερα επιτρεπτά όρια ασφαλείας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60479 είναι για το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) τα 50 V (ενεργός τιμή) και για το συνεχές ρεύμα (DC) τα 120 V (με κυμάτωση μικρότερη του 10%).

Για τους παραπάνω λόγους, πολλές από τις μεθόδους που υπολογίζουν την αντίσταση γείωσης ενός συστήματος, αποφεύγουν να χρησιμοποιήσουν επιτόπιες μετρήσεις του εδάφους στο οποίο γίνεται η εγκατάσταση. Προτιμούν να χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα και μια σειρά από παραδοχές που απλοποιούν τη λύση του προβλήματος αυτού.

Η πιο απλή παραδοχή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η ομοιογένεια του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ένα στρώμα γης, το οποίο εκτείνεται σε βάθος τόσο μεγάλο ώστε να είναι το μόνο που επηρεάζει την τιμή της αντίστασης του συστήματος γείωσης, και το οποίο έχει μία και καθορισμένη τιμή ειδικής αντίστασης σε όλο το βάθος του. Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά προσεγγιστικό και συχνά, ιδιαίτερα σε εδάφη με έντονη ανομοιογένεια, δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ένα άλλο συνηθισμένο μοντέλο θεωρεί ότι το έδαφος αποτελείται από δύο οριζόντια, σαφώς διαχωρισμένα στρώματα, το κάθε ένα από τα οποία έχει σταθερή τιμή ειδικής αντίστασης. Το πρώτο από τα στρώματα αυτά έχει πεπερασμένο πάχος, ενώ το δεύτερο εκτείνεται στο άπειρο. Στην ίδια λογική με το μοντέλο της διστρωματοποιημένης γης που περιγράφηκε παραπάνω κινούνται τα μοντέλα που θεωρούν τρία ή και περισσότερα στρώματα γης.

Όλα αυτά τα μοντέλα έχουν το μειονέκτημα ότι βασίζονται σε μια προσεγγιστική θεώρηση του εδάφους. Ως συνέπεια αυτού, οι μέθοδοι που τα χρησιμοποιούν δίνουν

αποτελέσματα που έχουν αποκλίσεις τόσο μεταξύ τους, όσο πιθανόν και με την πραγματική τιμή της αντίστασης γείωσης της εγκατάστασης.

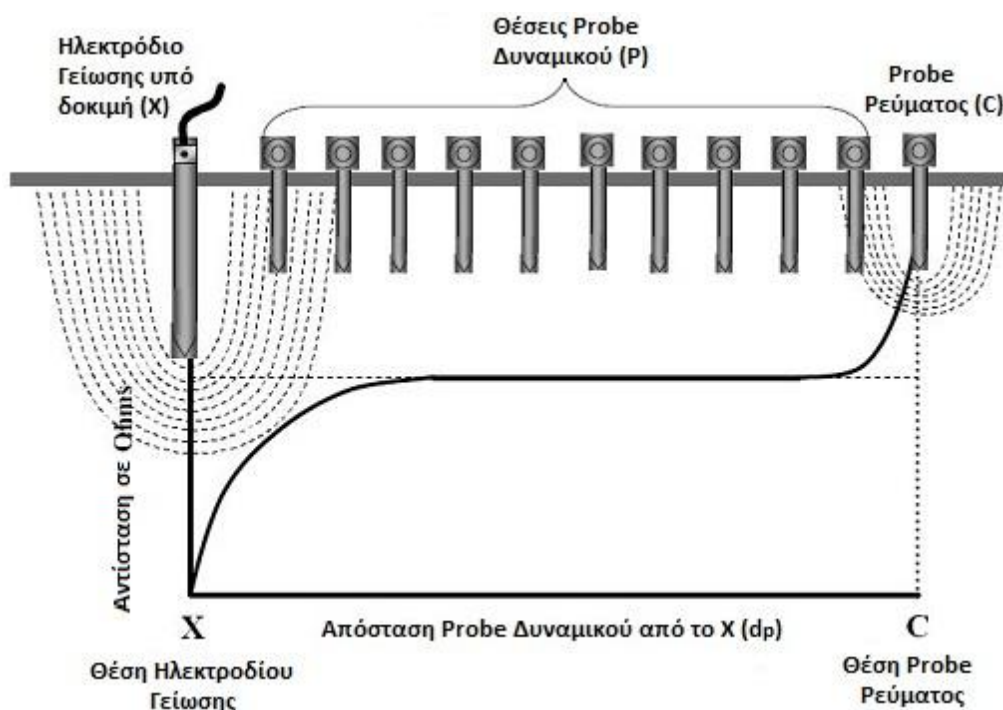
Στόχος λοιπόν είναι η εύρεση μεθόδων που να υπολογίζουν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την αντίσταση ενός συστήματος γείωσης, χρησιμοποιώντας δεδομένα που είναι εύκολο να προσδιοριστούν.

1.1.4.1 Μέθοδοι Υπολογισμού της Αντίστασης Γείωσης

Ο υπολογισμός της αντίστασης γείωσης ενός εγκατεστημένου συστήματος γείωσης χρησιμεύει στην πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας του και στην ενδεχόμενη επέκτασή του. Σε αυτήν την ενότητα, αναφέρονται συνοπτικά οι κυριότερες μέθοδοι που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης ενός εγκατεστημένου συστήματος γείωσης.

(α) Μέθοδος μείωσης δυναμικού (*Fall of Potential*)

Η μέθοδος μείωσης δυναμικού (FoP) είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τη μέτρηση της αντίστασης ενός συστήματος.



Εικόνα 1.1: Διάταξη μέτρησης της αντίστασης γείωσης με τη μέθοδο μείωσης δυναμικού [1]

Η διάταξη αποτελείται από το ηλεκτρόδιο γείωσης (ή ένα σύστημα γείωσης) του οποίου την αντίσταση θέλουμε να μετρήσουμε, ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος (το οποίο διοχετεύει ρεύμα στο κύκλωμα) και έναν πεπερασμένο αριθμό από ηλεκτρόδια τάσης. Από τον υπολογισμό των επιμέρους αντιστάσεων των ηλεκτροδίων τάσης προκύπτει

μια καμπύλη των επιμέρους αντιστάσεων ως προς τις επιμέρους τάσεις των πεπερασμένων ηλεκτροδίων τάσης. Η επικρατούσα τιμή αποτελεί την αντίσταση γείωσης.

Πλεονεκτήματα:

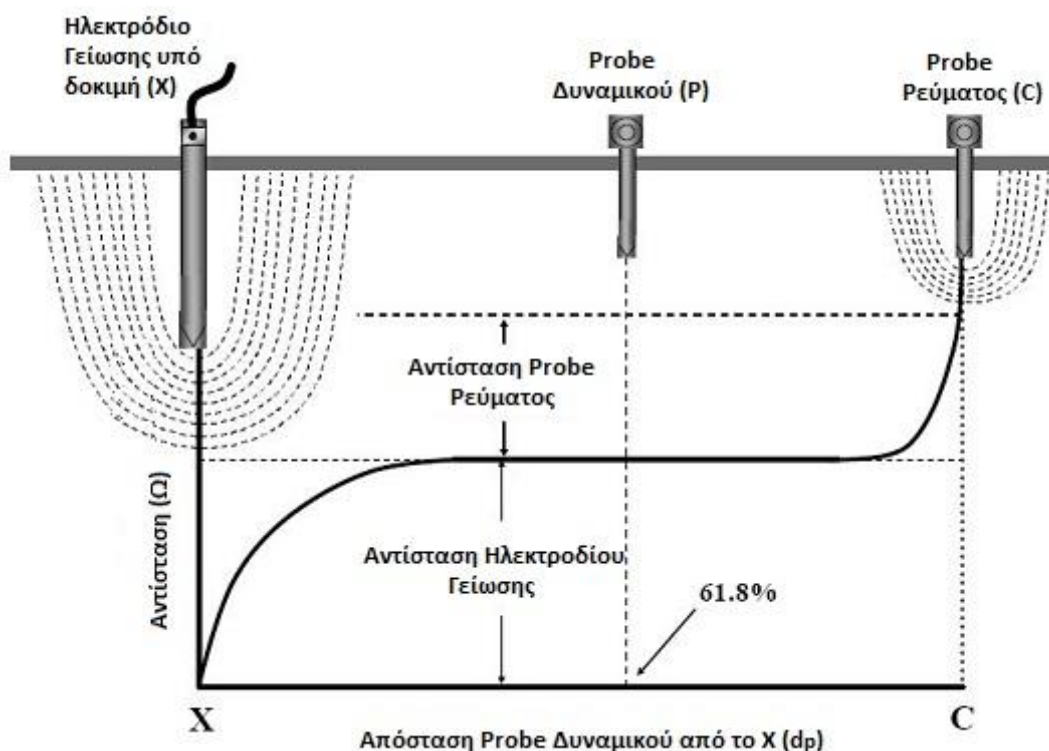
- αξιοπιστία
- ακρίβεια
- πλήρης εποπτεία της μέτρησης
- χρήση για όλους τους τύπους εδαφών χωρίς άλλους περιορισμούς.

Μειονεκτήματα:

- χρονοβόρα διαδικασία υπολογισμού

(β) Μέθοδος 61,8%

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ουσιαστικά μία απλοποίηση της προηγούμενης μεθόδου. Στηρίζεται στη θεώρηση ότι αρκεί ένα και μόνο ηλεκτρόδιο τάσης για να προσδιοριστεί η τιμή της αντίστασης του συστήματος γείωσης που ενδιαφέρει. Το ηλεκτρόδιο αυτό πρέπει βέβαια να είναι τοποθετημένο σε κατάλληλη απόσταση από το σύστημα γείωσης.



Εικόνα 1.2: Διάταξη μέτρησης της αντίστασης γείωσης με τη μέθοδο 61,8% [1]

Πλεονεκτήματα:

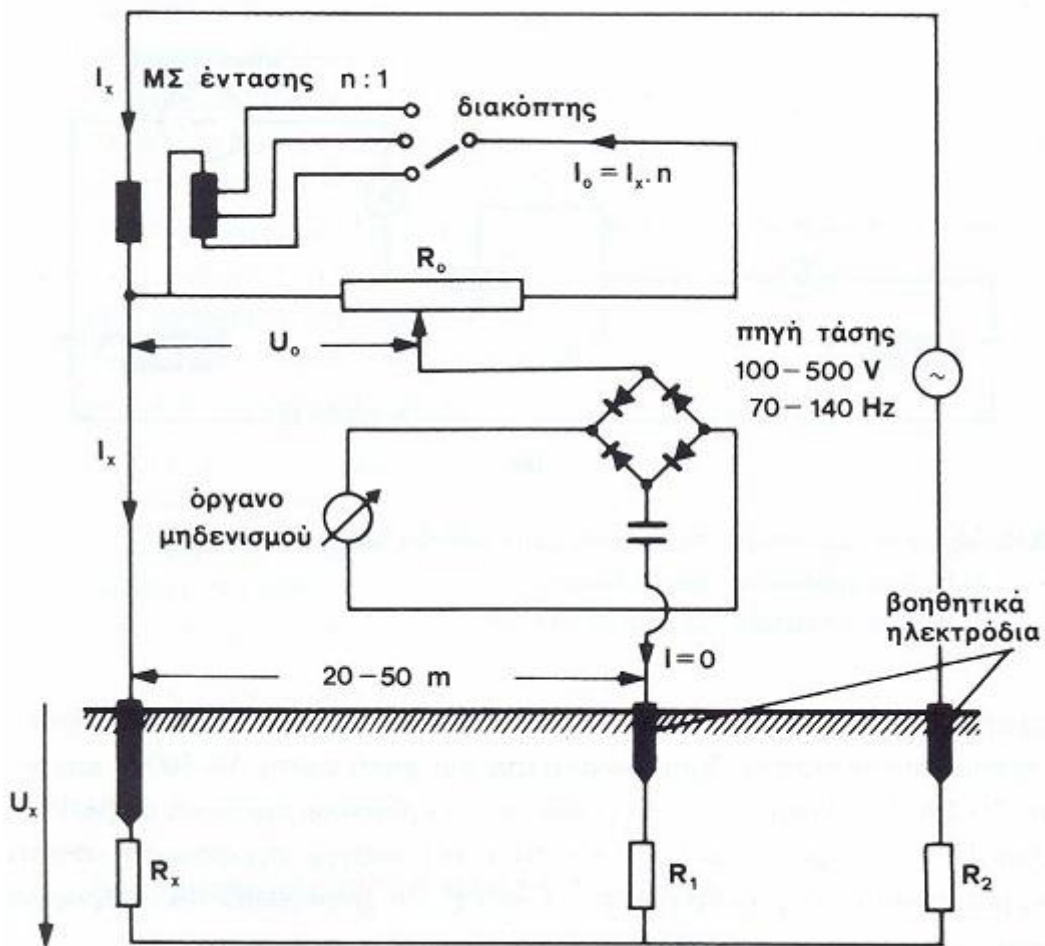
- ευκολία
- ταχύτητα στην εφαρμογή

Μειονεκτήματα:

- μη δυνατότητα εφαρμογής για στρωματοποιημένη γη
- απαίτηση αρκετά μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των ηλεκτροδίων, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν σημειακά.

(γ) Μέτρηση με γέφυρα

Για την μέτρηση της αντίστασης γείωσης κυρίως εγκαταστάσεων χαμηλής και μέσης τάσης, χρησιμοποιείται η μέθοδος μέτρησης με γέφυρα που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1.3: Διάταξη μέτρησης της αντίστασης γείωσης με γέφυρα [1]

Η διάταξη μέτρησης της αντίστασης γείωσης με γέφυρα αποτελείται από μία πηγή τάσης, γειωμένη μέσω βοηθητικού πασσάλου από το ένα άκρο και συνδεδεμένη με τον εξεταζόμενο γειωτή από το άλλο και από ένα μετασχηματιστή ρεύματος (με λόγο 1:n) ο οποίος τροφοδοτεί με ρεύμα τη γέφυρα που φαίνεται στην εικόνα. Τέλος, ένα όργανο μηδενισμού με πυκνωτή γειώνεται μέσω του βοηθητικού πασσάλου και

συνδέεται με τη γέφυρα. Από τους υπολογισμούς του κυκλώματος, προκύπτει η ζητούμενη αντίσταση γείωσης, R_x .

Πλεονέκτημα:

- Μη επηρεασμός από παρασιτικά ρεύματα (=ακρίβεια)

1.1.5 Ειδική αντίσταση εδάφους

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του συστήματος γείωσης είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ_{soil}). Συνεπώς, ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι μια σημαντική παράμετρος της αποτελεσματικής σχεδίασης ενός συστήματος γείωσης, καθώς όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η αντίσταση γείωσης εξαρτάται ευθέως ανάλογα από την ειδική αντίσταση του εδάφους, ρ_{soil} .

Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, όπως ο τύπος του εδάφους, το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, η ομοιογένεια των κόκκων του εδάφους, ο βαθμός συμπίεσης του εδάφους, η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία και άλατα, η θερμοκρασία του εδάφους και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης. Γι' αυτόν το λόγο, κατά τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παραπάνω παράγοντες, ώστε να είναι ασφαλέστερος ο υπολογισμός της απαιτούμενης αντίστασης του συστήματος γείωσης, που θα επιλέξουμε. Στην ακόλουθη ενότητα, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων παραγόντων που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους και του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν την τιμή της.

1.1.5.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ειδική Αντίσταση του Εδάφους (ρ_{soil})

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

Πίνακας 1.1 Ειδική αντίσταση διαφόρων τύπων εδάφους.

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

Μέγεθος κόκκων του εδάφους: Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, τόσο λιγότερη υγρασία παρακρατείται. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Ομοιογένεια των κόκκων του εδάφους: Όσο μεγαλύτερη είναι η ανομοιογένεια των κόκκων του εδάφους τόσο μικρότερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Κι αυτό γιατί, στην περίπτωση που το μέγεθος των κόκκων ποικίλει, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους.

Βαθμός συμπίεσης τους εδάφους: Όσο πιο συμπαγείς είναι οι δομές του εδάφους, τόσο πιο χαμηλή ειδική αντίσταση παρουσιάζει.

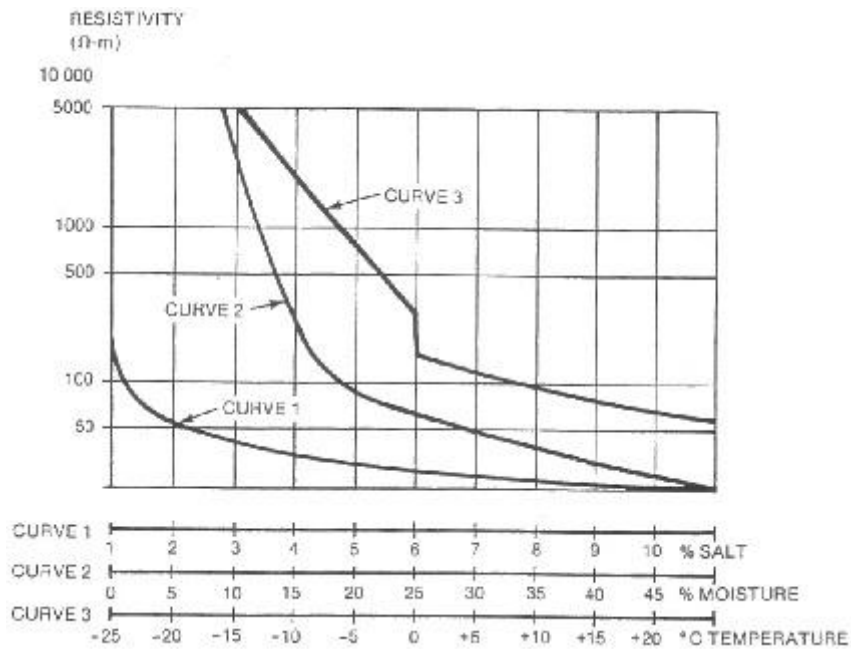
Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία: Για τον ίδιο τύπο εδάφους, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε νερό, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα του νερού είναι, σε μεγάλο βαθμό, ηλεκτρολυτική. Μάλιστα η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία επηρεάζεται με τη σειρά της από μια σειρά παραγόντων (καιρικές συνθήκες, φύση του υπεδάφους, βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού).

Περιεκτικότητα του εδάφους σε άλατα: Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Όμως, δεν επηρεάζουν το ίδιο την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους όλα τα είδη των αλάτων. Το είδος του άλατος παίζει σημαντικό ρόλο στο ποσοστό μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Θερμοκρασία του εδάφους: Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του εδάφους, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε θερμοκρασίες εδάφους κάτω των 0 °C, παρατηρείται πολύ σημαντική αύξηση της ειδικής αντίστασης.

Στην *Εικόνα 1.4* (βλ. διπλανή σελίδα) φαίνεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσεις της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα και υγρασία, καθώς και της θερμοκρασίας του.

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης: Σε περίπτωση που η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου το οποίο αναπτύσσεται γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης υπερβεί την κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_c), μειώνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους. Το φαινόμενο του ιονισμού καθώς και η επίδρασή του στην ειδική αντίσταση του εδάφους και, κατ' επέκταση, στην αντίσταση γείωσης, αναλύεται διεξοδικότερα στο δεύτερο μέρος του 1^{ου} κεφαλαίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 1.4: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα (CURVE 1), της περιεκτικότητας σε υγρασία (CURVE 2) και της θερμοκρασίας (CURVE 3) [2]

Στον Πίνακα 1.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται επιγραμματικά οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους καθώς ο τρόπος επηρεασμού της ειδικής αντίστασης, ανάλογα με τη μεταβολή των παραγόντων.

Πίνακας 1.2: Μεταβολή στην τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ανάλογα με τη μεταβολή των παραγόντων που την επηρεάζουν.

Παράγοντες	Μεταβολή Παράγοντα	Μεταβολή Ειδικής Αντίστασης
Τύπος του εδάφους	(εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους)	
Μέγεθος κόκκων του εδάφους	↑	↑
Ομοιογένεια των κόκκων του εδάφους	↑	↑
Βαθμός συμπίεσης τους εδάφους	↑	↓
Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία	↑	↓
Περιεκτικότητα του εδάφους σε άλατα	↑	↓
Θερμοκρασία του εδάφους	↑	↓
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου ηλεκτροδίου γείωσης	$E \geq E_c$	↓

1.2 Ιονισμός του Εδάφους

Σε αυτό το δεύτερο μέρος του 1^{ου} κεφαλαίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετώνται οι μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους και ειδικότερα το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους. Επίσης, μελετάται η τιμή της αντίστασης γείωσης πριν και μετά τον ιονισμό. Στη συνέχεια, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της κρίσιμης για τον ιονισμό έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, E_c , καθώς και οι τρόποι προσδιορισμού της με τις κατάλληλες διατάξεις δοκιμών. Τέλος, γίνεται αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους σε κρουστικές συνθήκες.

1.2.1 Χρήσιμες Έννοιες – Ορισμοί

Ιονισμός του εδάφους: Είναι η ηλεκτρική διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους. Μάλιστα, με αυτόν τον όρο, περιγράφονται περιορισμένου εύρους μερικές διασπάσεις που συμβαίνουν στο έδαφος, υπό την προϋπόθεση να υπερβεί το ηλεκτρικό πεδίο μια συγκεκριμένη τιμή έντασης.

Τάση έναρξης ιονισμού (V_c): Είναι η τάση, πέραν της οποίας το μέγιστο της τάσης και του ρεύματος δεν ταυτοχρονίζονται.

Κρίσιμη ένταση ιονισμού (E_c): Είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την οποία γίνεται η έναρξη του ιονισμού. Σε ομοιογενές πεδίο, επειδή ο ιονισμός ακολουθείται άμεσα από διάσπαση, η κρίσιμη ένταση ταυτίζεται με την ένταση διάσπασης.

Διάσπαση: Είναι το σημείο στο οποίο παρατηρείται απότομη μείωση της τάσεως μαζί με ταυτόχρονη απότομη μεγάλη αύξηση του ρεύματος.

Τάση διάσπασης (V_b ή U_{50}): Είναι η τιμή της τάσης κατά την οποία αναμένεται να έχουμε πιθανότητα 50% να γίνει διάσπαση και 50% να μη γίνει διάσπαση.

Ένταση διάσπασης (E_b ή E_{50}): Είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου η οποία αντιστοιχεί στην τιμή της τάσης διάσπασης και καθορίζεται από τη γεωμετρία του δοκιμίου.

1.2.2 Μηχανισμοί Διάσπασης του Εδάφους

Είναι γνωστό ότι το έδαφος σε επίπεδο μικροδομής χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανομοιογένεια. Τα κύρια συστατικά του είναι ανομοιόμορφα, αγωγιμα ή μη, σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα ή αέρα.

Η αγωγιμότητα του εδάφους οφείλεται κυρίως στο νερό και στα διαλυμένα σε αυτό άλατα, ενώ το μέγεθος των διακένων μεταξύ των κόκκων του εδάφους επηρεάζει την αναπτυσσόμενη σε αυτά ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, εξαιτίας της επιβαλλόμενης τάσης. Παρόλο που οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί και η συμπεριφορά τους είναι κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος) τότε, μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης, αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους.

Αν και ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η διάσπαση του εδάφους μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστός, στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί δύο μηχανισμοί για την περιγραφή της διάσπασης του εδάφους: ο ένας είναι ο θερμικός μηχανισμός και ο άλλος είναι ο ιονισμός του εδάφους.

Σύμφωνα με το θερμικό μηχανισμό, που προτάθηκε από τους Snowden et al., όταν το ρεύμα εγγέεται μέσω του συστήματος γείωσης στο έδαφος, λόγω του φαινομένου Joule, θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, που είναι παγιδευμένο στο έδαφος, και μείωση της ειδικής του αντίστασης. Καθώς το ρεύμα επιλέγει να ρέει μέσω του δρόμου μικρότερης αντίστασης, θα διαρρεύσει εκείνα τα μονοπάτια, που παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση (και συνεπώς έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία) προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Στις περιοχές εκείνες, που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ξεπερνάει μία κρίσιμη τιμή εκδηλώνεται διάσπαση του εδάφους. Ο χρόνος για την έναρξη της διάσπασης εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για τη θέρμανση και εξάτμιση του νερού, που με τη σειρά του εξαρτάται από την αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του νερού, το μήκος των μονοπατιών, στα οποία έχει εκδηλωθεί διάσπαση, και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους.

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους και προτάθηκε από τους Leadon et al. (βλ. ενότητα 1.2.1). Λόγω της ανομοιομορφίας των κόκκων, η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης, που προκαλεί διάσπαση του εδάφους κατά τη διάρκεια του ιονισμού του εδάφους, είναι μικρότερη από την τιμή που απαιτείται για διάσπαση ενός διακένου αέρα αντίστοιχων διαστάσεων. Με τη βοήθεια πειραμάτων, οι Flanagan et al. υπολόγισαν την κρίσιμη τιμή της έντασης στα 10-20kV/cm.

Πειραματικά αποτελέσματα των Oettlé, , Πετρόπουλου και Liew et al. υποστηρίζουν το μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω του ιονισμού.

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

1.2.3 Κρουστικές Αντιστάσεις Προ του Ιονισμού και Μετά τον Ιονισμό

Οι κυματομορφές ρεύματος που καταγράφονται, κατά τη διάρκεια κρουστικών δοκιμών σε εδάφη με μεγάλη ειδική αντίσταση και μικρή περιεκτικότητα σε άλατα, εμφανίζουν το εξής χαρακτηριστικό: δύο τοπικά μέγιστα (=κορυφές), εκ των οποίων το δεύτερο είναι μεγαλύτερο του πρώτου. Η ύπαρξη της δεύτερης κορυφής του ρεύματος επιτρέπει τον προσδιορισμό δύο αντιστάσεων που αναφέρονται ως:

- 1) Η προ του ιονισμού αντίσταση R_1
- 2) Η μετά τον ιονισμό αντίσταση R_2

Αυτές οι τιμές αντιστάσεων μετριοούνται χρησιμοποιώντας τις δύο κορυφές ρεύματος και τις αντίστοιχες στιγμιαίες τάσεις. Αυτός ο τρόπος μέτρησης της αντίστασης επιλέγεται για να περιοριστεί η οιαδήποτε επαγωγική επίδραση καθώς τη στιγμή της κορυφής του ρεύματος ισχύει $di/dt = 0$.

Οι αντιστάσεις εκφράζονται ακολούθως:

$$R_1 = \frac{V(at \ I_{peak1})}{I_{peak1}} \quad (1.1)$$

$$R_2 = \frac{V(at \ I_{peak2})}{I_{peak2}} \quad (1.2)$$

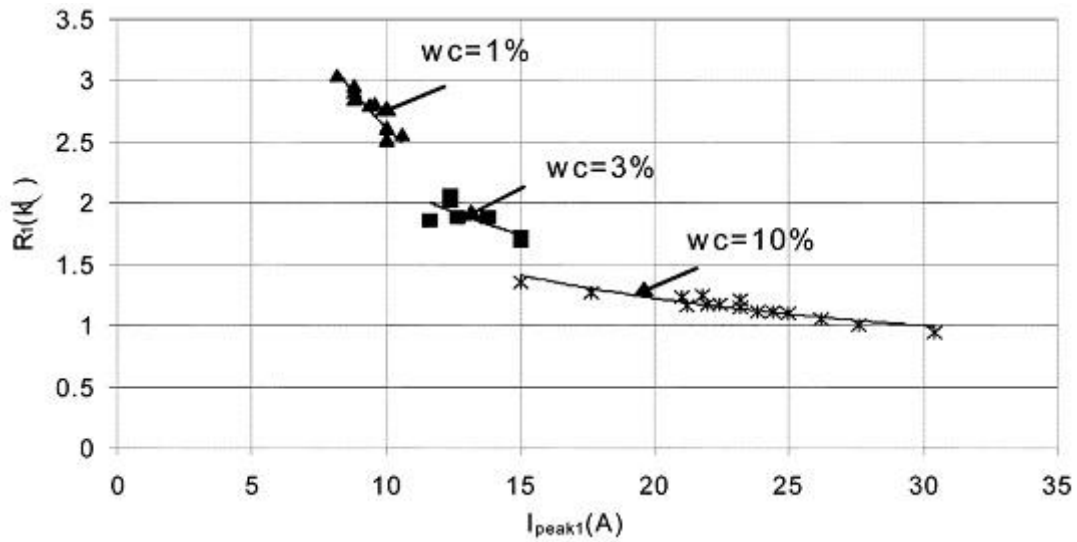
- 1) Προ του ιονισμού Αντίσταση: Αυτή η αντίσταση αντιστοιχεί σε ιδιότητες εδάφους πριν την εκδήλωση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους. Αντανακλά τη μη γραμμική αγώγιμη συμπεριφορά που καθορίζεται από θερμικές επιδράσεις και τη δομή του εδάφους.

Στην *Εικόνα 1.5(a)* φαίνεται η προ του ιονισμού αντίσταση R_1 που προέκυψε για άμμο με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας. Είναι προφανές ότι η R_1 μειώνεται ανάλογα με το μέτρο του ρεύματος. Η μείωση ανάλογα με το μέτρο του ρεύματος δείχνει μια πιθανή μη γραμμική αγώγιμη διαδικασία που οφείλεται σε θερμικές επιδράσεις. Εξαιτίας της θέρμανσης I^2R , η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται, γεγονός που με τη σειρά του αυξάνει την αγωγιμότητα και μειώνει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Όμως, όταν επαναλαμβάνονται οι δοκιμές υπό τις ίδιες κρουστικές συνθήκες αντικαθιστώντας το δοκίμιο με καινούριο ίδιου μεγέθους κόκκων και ίδιας ειδικής αντίστασης παρατηρήθηκαν διαφορές στις τάσεις (της R_1). Αυτές οι διαφορές μπορούν να αποδοθούν στους εξής παράγοντες:

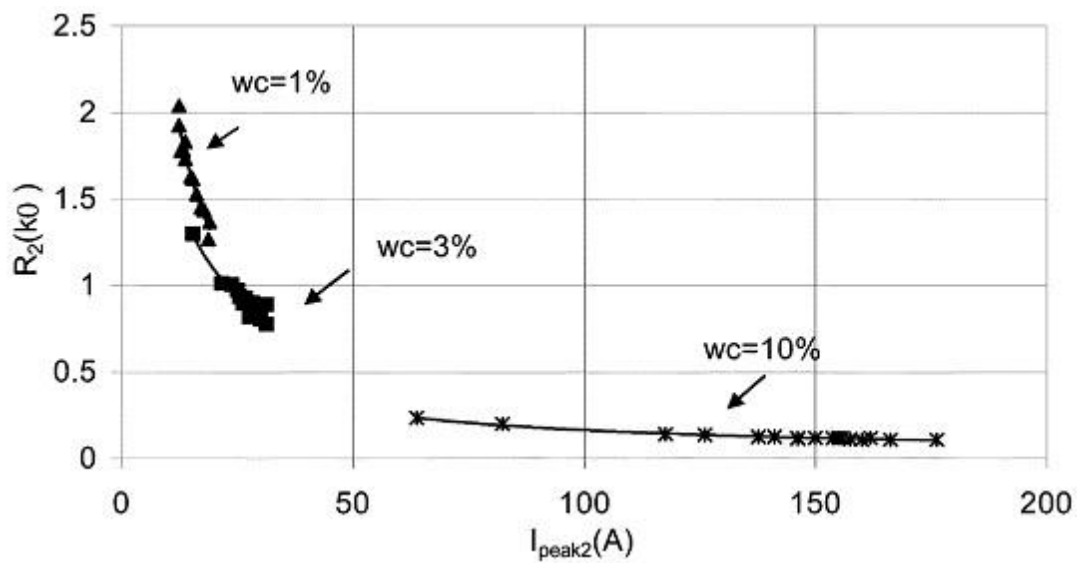
α) Στο μηχανισμό που ελέγχει τη θερμαντική διαδικασία της υγρής άμμου, η οποία επηρεάζεται από τον αριθμό των δοκιμών που πραγματοποιούνται στο δοκίμιο.

β) Στις μη ελεγχόμενες κινήσεις του νερού μέσα στην υγρή άμμο

γ) σε διαφορετικές διαδικασίες κατανομής του νερού.



(α)



(β)

Εικόνα 1.5: Προ του ιονισμού και μετά τον ιονισμό αντιστάσεις ως προς το μέγιστο του ρεύματος. (α) Προ του ιονισμού αντίσταση R_1 (kΩ) ως προς το μέγιστο του ρεύματος (A), (β) Μετά τον ιονισμό αντίσταση R_2 (kΩ) ως προς το μέγιστο του ρεύματος (A). [4]

Σε μερικές δοκιμές, η R_1 βρέθηκε να αυξάνεται ανάλογα με το μέτρο του ρεύματος. Σε περίπτωση υπερβολικής θέρμανσης του εδάφους, συνήθως

εξατμίζεται το νερό που υπάρχει στο έδαφος. Αυτή η εξατμηση του νερού μειώνει την αγωγιμότητα, η οποία συνεπάγεται την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης αντί της μείωσης (που αναμένεται) παράλληλα με την αύξηση του μέτρου του ρεύματος. Αυτή η υπερβολική θέρμανση στα δείγματα εδάφους μπορεί να ελαχιστοποιηθεί περιορίζοντας τον αριθμό των κρουστικών δοκιμών.

Οι μετρηθείσες τάσεις της R_1 κατά τη διάρκεια επαναλαμβανομένων δοκιμών έδειξαν ότι συμφωνούν με την υπόθεση ότι η αντίσταση R_1 εξαρτάται κυρίως από τις διαδικασίες θερμικής αγωγιμότητας. Όμως, η μελέτη των διαδικασιών θέρμανσης και εξατμησης του νερού που συμβαίνουν σε υγρό έδαφος κάτω από την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων απαιτεί μια προσεκτική μέτρηση της θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών.

- 2) Μετά τον ιονισμό Αντίσταση: Αυτή η αντίσταση αντιστοιχεί στην τελική κατάσταση αγωγιμότητας στην οποία φτάνει το έδαφος μετά την επέκταση της περιοχής ιονισμού στο μέγιστο όγκο της στο δείγμα εδάφους. Η αντίσταση R_2 είναι πάντα μικρότερη από την προ του ιονισμού αντίσταση R_1 .

Επίσης, η μετά τον ιονισμό αντίσταση R_2 μειώνεται με την αύξηση του μέτρου του ρεύματος [βλ. *Εικόνα 1.5(β)*], και αυτή η μείωση είναι πιο σημαντική σε άμμο με μικρότερο ποσοστό υγρασίας (με υψηλή ειδική αντίσταση του εδάφους). Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.5(β)*, παρατηρείται μόνο μια μικρή μείωση της R_2 της τάξης των 100 με 250 Ω για άμμο αναμεμιγμένη με 10% νερό.

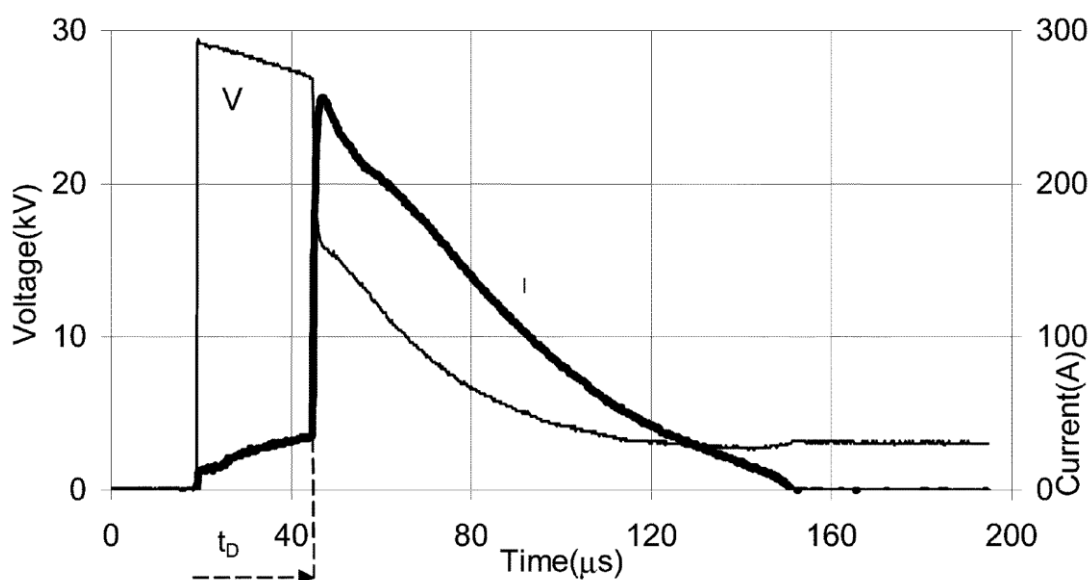
Η αντίσταση R_2 εξαρτάται από τη διαδικασία του ιονισμού που επεκτείνεται από το ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την ενεργή ακτίνα του ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου και, συνεπώς, μειώνοντας την ειδική αντίσταση. Από τη στιγμή που αυτή η διαδικασία εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την εφαρμοζόμενη τάση, η διαδικασία του ιονισμού αναμένεται να έχει καλύτερη «επαναληψιμότητα» σε σχέση με τη θερμική διαδικασία. Όταν επαναλήφθηκαν κρουστικές δοκιμές σε κάθε ένα μίγμα άμμου, χρησιμοποιώντας κάθε φορά ένα νέο δείγμα άμμου με το ίδιο μέγεθος κόκκων και την ίδια αντίσταση και υπό τις ίδιες συνθήκες, παρατηρήθηκε μια καλή «επαναληψιμότητα» και μετρήθηκαν πολύ κοντινές τιμές της R_2 για παρόμοιες συνθήκες δοκιμής.

1.2.4 Διάσπαση του Εδάφους

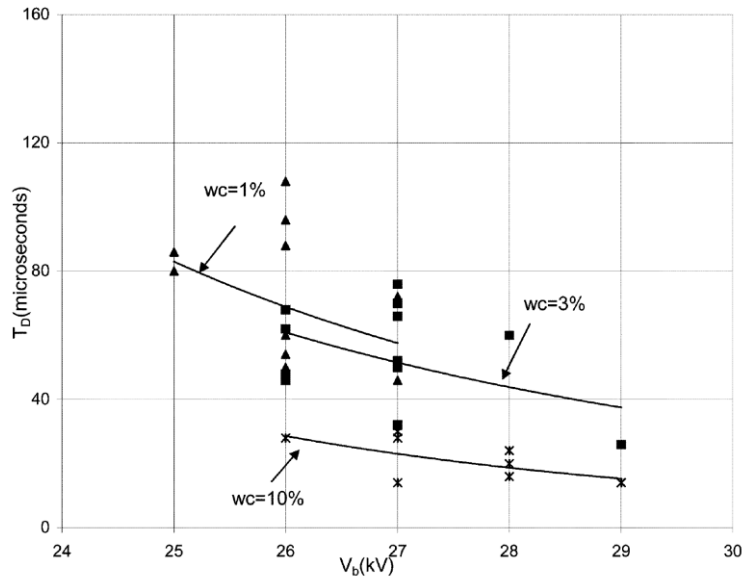
(α) Παράμετροι Διάσπασης

Κατά τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του ιονισμού του εδάφους και κατά τη μέτρηση του μεγέθους της μετά τον ιονισμό αντίστασης R_2 , η τάση φόρτισης της κρουστικής γεννήτριας αυξήθηκε κατά μικρά βήματα. Μετά από ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, έλαβε χώρα πλήρης διάσπαση μέσω του υπό δοκιμή εδάφους και μεταξύ του ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου και του εξωτερικού δοχείου δοκιμών. Αυτό το γεγονός παρατηρήθηκε στις καταγραφές της τάσης και του ρεύματος, όπου, σε κάποια χρονική στιγμή t_D εγγύτερα στη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, μια ξαφνική και μεγάλη αύξηση του ρεύματος συνοδεύτηκε από την πτώση της τάσης στο μηδέν. Αυτή η απότομη αύξηση του ρεύματος με παράλληλη πτώση της τάσης είναι ενδεικτική της χρονικής στιγμής της διάσπασης. Οι τυπικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος, οι οποίες προέκυψαν κατά τη διάρκεια της διάσπασης, φαίνονται στην *Εικόνα 1.6*. Λεπτομερέστερη εξέταση της κρουστικής μορφής του ρεύματος αποκαλύπτει μια αρχική κορυφή, η οποία αντιστοιχεί στην αντίσταση R_1 και ακολουθείται από μια δεύτερη άνοδο προς τη δεύτερη κορυφή του ρεύματος που αντιστοιχεί στη R_2 . Σε αυτή τη δεύτερη κορυφή ρεύματος, συμβαίνει η διάσπαση.

Μετά τη διάσπαση και μετά την προσεκτική απομάκρυνση του ηλεκτροδίου, παρατηρήθηκαν λίγες οπές στο έδαφος. Βρέθηκε ότι ο αριθμός των οπών είναι σχεδόν ίδιος με τον αριθμό των διασπάσεων που συνέβησαν στην άμμο.



Εικόνα 1.6: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος όταν η διάσπαση συμβαίνει σε άμμο με 3% υγρασία (τάση φόρτισης 29 kV). [4]



Εικόνα 1.7: Χρόνος διάσπασης ως προς την τάση διάσπασης για άμμο με 3 διαφορετικά ποσοστά υγρασίας (1%, 3% και 10%). [4]

Βρέθηκε ότι ο χρόνος διάσπασης t_D εξαρτάται κυρίως από τις τάσεις και την αγωγιμότητα της άμμου. Αυτό το εύρημα είναι παρόμοιο με το αποτέλεσμα που προέκυψε από την έρευνα των Cabrera et al. οι οποίοι βρήκαν ότι ο χρόνος διάσπασης t_D αυξάνεται με την αύξηση της ειδικής αντίστασης της άμμου και μειώνεται με την τάση διάσπασης.

(β) Όρια της Διάσπασης

Με την υπόθεση ότι η διαδικασία του ιονισμού στο έδαφος σχηματίζει ημισφαιρικά κελύφη, τα οποία αυξάνουν το μέγεθος του ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου, το ηλεκτρικό πεδίο E_i στην επιφάνεια αυτού του κελύφους ιονισμού ακτίνας r_i προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_i = \frac{V}{r_i^2 \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (1.3)$$

Όπου r_2 είναι η ακτίνα του δοχείου δοκιμών.

Η επέκταση του ιονισμού συνεχίζεται μέχρι μια κρίσιμη ακτίνα r_c πέρα από την οποία το πεδίο είναι πάντα υψηλότερο από το κρίσιμο πεδίο. Πέρα από αυτήν την κρίσιμη ακτίνα, συμβαίνει η διάσπαση. Αυτή η ακτίνα βρέθηκε ίση με $r_2/2$ για το ημισφαιρικό δοκίμιο. Όμως, στην πράξη, αναμένονται μικρές ασυμφωνίες με τη θεωρία, εξαιτίας της σύνθετης μορφής των ζωνών ιονισμού και των τοπικών μεταβολών των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους.

1.2.5 Μοντελοποίηση του Φαινομένου του Ιονισμού

Είναι πλέον αποδεκτό ότι η ενίσχυση του πεδίου σε κενά εγκλεισμένα εντός του εδάφους ευθύνεται για την έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού στο έδαφος. Η ενίσχυση του πεδίου προκαλείται από μη κανονικές μορφές των κόκκων/σωματιδίων του εδάφους και από τη μεγάλη διαφορά των διηλεκτρικών ιδιοτήτων μεταξύ του εδάφους και των κενών αέρα. Η ζώνη ιονισμού αυξάνεται με τη μορφή ορισμένων οχητών οι οποίοι διαδίδονται μακριά από το ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο. Η ταχύτητα της διάδοσης και το τελικό μήκος αυτών των οχητών είναι στενά εξαρτώμενο από την εφαρμοζόμενη τάση και την αγωγιμότητα του εδάφους.

Υποθέτοντας ότι οι ζώνες ιονισμού επεκτείνονται ομοιόμορφα με μια χρονική σταθερά τ_i και ακολουθούν ισοδυναμική κατανομή με τη μορφή απομακρυσμένου από το ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο κελύφους, η αντίσταση αυτών των κελυφών μειώνεται, όταν ιονίζονται πλήρως. Η δυναμική ενός τέτοιου μηχανισμού αγωγής μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση:

$$R(t) = R_1(i) \left(\frac{R_2(i)}{R_1(i)} + e^{-(t/\tau_i)} \right) \quad (1.4)$$

Όπου:

- R_1 η προ του ιονισμού αντίσταση.
- R_2 η μετά τον ιονισμό αντίσταση.
- τ_i η χρονική σταθερά για τη διάδοση του ιονισμού.

Λαμβάνοντας υπόψη τις καταγεγραμμένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος, αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία απιονισμού (δηλ. η επαναφορά του εδάφους) φαίνεται να συμβαίνει με μικρότερο ρυθμό από ότι η φάση του ιονισμού.

1.2.6 Προσδιορισμός της Κρίσιμης Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου (E_c)

Η κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_c , πάνω από την οποία συμβαίνει ο ιονισμός του εδάφους, θεωρείται σημαντική για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους όταν σε αυτό διαρρέονται υψηλά κρουστικά ρεύματα. Όμως, τα αποτελέσματα των δημοσιευμένων ερευνών πάνω σε αυτό το ζήτημα αποκαλύπτουν μια ευρεία διακύμανση των τιμών της E_c (από 1,3 έως 20 kV/cm), ανάλογα με την επίδραση παραγόντων, όπως η ειδική αντίσταση του εδάφους, η πολικότητα της επιβαλλόμενης τάσης, η γεωμετρία του ηλεκτροδίου. Σκοπός της επόμενης ενότητας είναι η ποσοτικοποίηση των επιδράσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της πολικότητας του κρουστικού ρεύματος πάνω στο μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου κατωφλίου (E_c) του εδάφους στη μεταβατική κατάσταση.

1.2.6.1 Εισαγωγή

Το μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου στο οποίο παρατηρείται η έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού είναι γνωστό ως κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο, E_c . Αυτή η παράμετρος μας πληροφορεί για το βαθμό μείωσης της αντίστασης στο έδαφος. Προηγούμενες μελέτες αποκάλυψαν ότι, γενικά, αυτό το «κατώφλι ιονισμού» προσδιορίζεται τη στιγμή όπου η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος αρχίζει να γίνεται μη γραμμική. Έχει βρεθεί από παλαιότερες έρευνες μια ευρεία διακύμανση των τιμών της E_c , γεγονός που αποδίδεται στην επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της πολικότητας των κρουστικών ρευμάτων και στις διαστάσεις του ηλεκτροδίου γείωσης, παράγοντες οι οποίοι θα μελετηθούν στη συνέχεια.

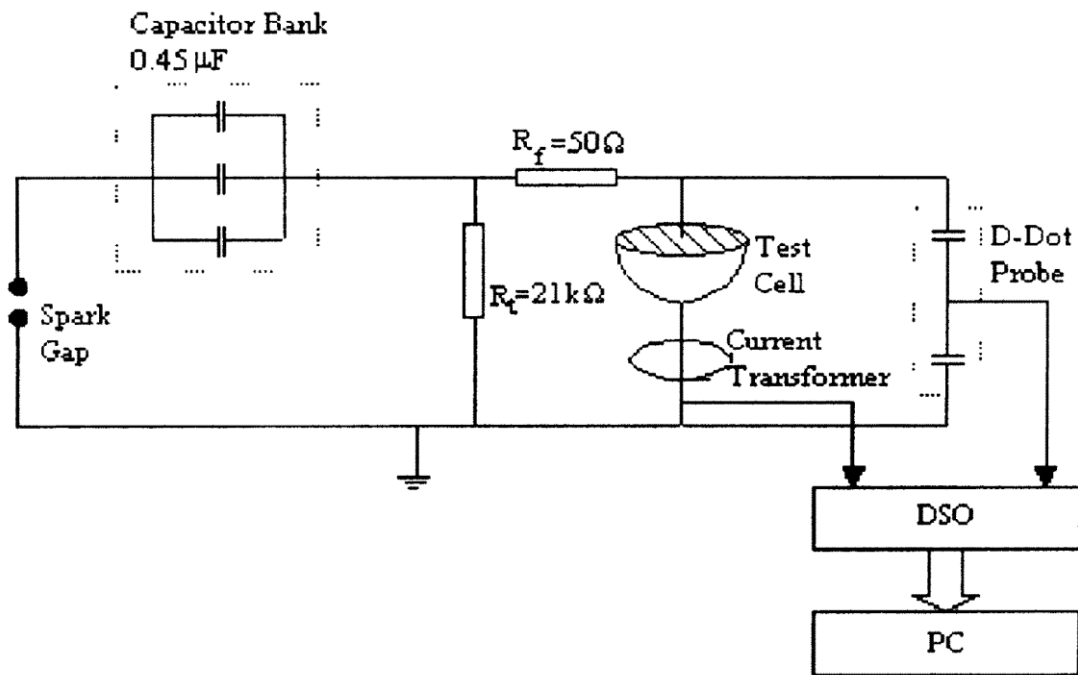
Σε μία παλαιότερη έρευνα η οποία διεξήχθη από τους Nor *et al.*, διερευνήθηκαν υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων οι ιδιότητες της άμμου με μέτριο μέγεθος κόκκων για μια σειρά ποσοστών υγρασίας (από 1% έως 15%). Για το ημισφαιρικό δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε, η εξέταση των καταγεγραμμένων κυματομορφών τάσης και έντασης έδειξε ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους συνέβαινε για εφαρμοζόμενες τάσεις άνω των 15 kV, τάση η οποία αντιστοιχούσε σε κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο 5,5 kV/cm στην επιφάνεια του ενεργού ηλεκτροδίου. Σε αυτήν τη μελέτη, θεωρήθηκε ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους συμβαίνει όταν παρατηρούνται δύο κορυφές στην κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος.

Στην παρούσα ενότητα, διερευνώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της E_c . Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν την ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ_{soil}) στο οποίο διεξάγονται οι κρουστικές δοκιμές, την πολικότητα των κρουστικών ρευμάτων και τις διαστάσεις του ηλεκτροδίου γείωσης. Στις δοκιμές, χρησιμοποιούνται εδάφη με ειδικές αντιστάσεις οι οποίες ποικίλουν σε μέγεθος (από μερικά Ωm έως κάποια $\text{k}\Omega\text{m}$) και οι οποίες ρυθμίζονται με τη χρήση διαφορετικών ποσοστών υγρασίας και αλατιού και με τη χρήση άμμου με διαφορετικό μέγεθος κόκκων.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των διαστάσεων του ηλεκτροδίου στην τιμή της E_c , χρησιμοποιούνται δύο δοκίμια – ένα δοκίμιο παράλληλων πλακών το οποίο παρέχει ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο και ένα ημισφαιρικό δοκίμιο το οποίο προσφέρει μη ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο.

1.2.6.2 Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία Δοκιμών

Στη συνέχεια, περιγράφεται το κύκλωμα δοκιμών που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της επίδρασης των προαναφερθέντων παραγόντων στο μέτρο της κρίσιμης έντασης ηλεκτρικού πεδίου, E_c , καθώς και η διαδικασία των δοκιμών.



Εικόνα 1.8: Κύκλωμα δοκιμών για κρουστικά ρεύματα.[6]

A. Κύκλωμα Δοκιμών

Η Εικόνα 1.8 δείχνει το επιλεγμένο, διπλά εκθετικό, κύκλωμα δοκιμών. Χρησιμοποιώντας αυτό το κύκλωμα, παράγονται υψηλές τάσεις έως 50 kV και υψηλά κρουστικά ρεύματα έως 5 kA. Η κρουστική πηγή διαμορφώνεται ως μία γεννήτρια ρεύματος παραλληλίζοντας τρεις πυκνωτές χαμηλής χωρητικότητας (0,15 μF, 65 kV). Οι πυκνωτές συνδέονται με τη μονάδα dc-φόρτισης και ενεργοποιούνται μέσω ενός σπινθηριστή. Ένας κρουστικός μετασχηματιστής χρησιμοποιείται για να θέσει σε λειτουργία τον σπινθηριστή. Μία αντίσταση ουράς των 21 kΩ και μία αντίσταση μετώπου των 50 Ω χρησιμοποιούνται σε αυτό το κύκλωμα δοκιμών έτσι ώστε να προκύψουν το απαιτούμενο μέτωπο και η απαιτούμενη ουρά των κυματομορφών και να περιοριστούν τα μεγέθη των ρευμάτων βραχυκύκλωσης κατά τη διάσπαση.

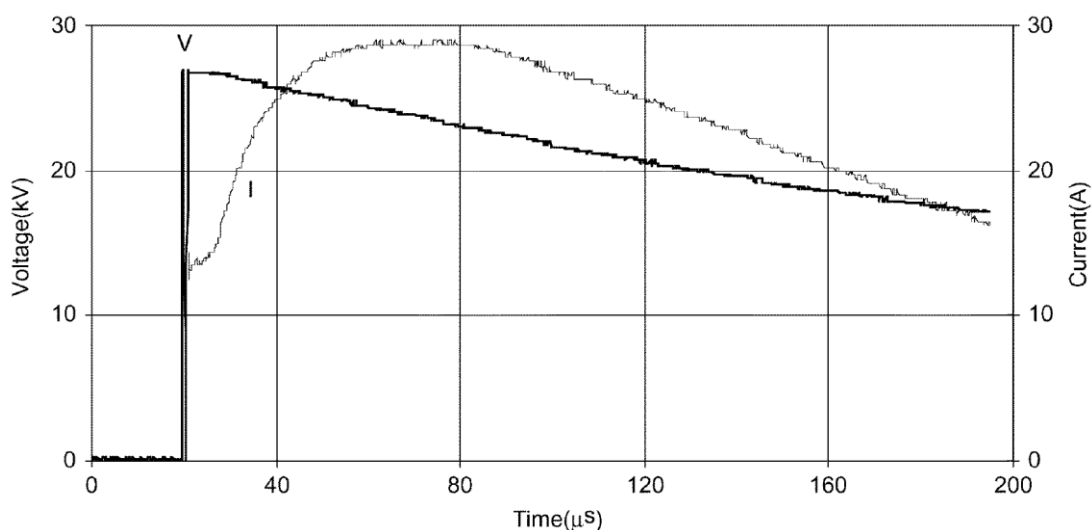
Για τις μετρήσεις του ρεύματος, χρησιμοποιείται ένας εμπορικά διαθέσιμος μετασχηματιστής ρεύματος ευαισθησίας $0,1 \text{ VA}^{-1}$ και χρονικής απόκρισης των 20 ns. Η μέτρηση της τάσης επιτυγχάνεται χάρη σε ένα D-dot probe με λόγο υποβιβασμού 10300:1 και χρονική απόκριση 40 ns. Επιπλέον, για την καταγραφή των σημάτων της τάσης και του ρεύματος, χρησιμοποιείται ένας ψηφιακός παλμογράφος (DSO) Lecroy 9350-A, 500 MHz, ενώ για τη συλλογή και την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιείται το λογισμικό Labview.

B. Χαρακτηριστικά Δοκιμών

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των παραγόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω στο μέγεθος του κρίσιμου ηλεκτρικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκε ένα δοκίμιο που

αποτελείτο από ένα ημισφαιρικό δοχείο διαμέτρου 47,5 cm. Το δοχείο αυτό είχε τέσσερα σημεία σύνδεσης συμμετρικά μεταξύ τους ώστε να εξασφαλισθεί η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος στο έδαφος δοκιμών. Χρησιμοποιήθηκε, επίσης, ένα ημισφαιρικό ενεργό ηλεκτρόδιο διαμέτρου 6,25 cm που τοποθετήθηκε στο κέντρο του δοχείου, αλλά ήταν θαμμένο κατά το ήμισυ στο χώμα. Αυτό έγινε για να αποφευχθούν οι υψηλές εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου στη διεπαφή μεταξύ της άμμου και του αέρα, καθώς και για να προσομοιωθεί το σύστημα ημισφαιρικού ηλεκτροδίου γείωσης.

Όμως, για την επίδραση των διαστάσεων του ηλεκτροδίου γείωσης στην κρίσιμη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, E_c , χρησιμοποιήθηκε επίσης μια διάταξη παράλληλων πλακών για τη συγκριτική μελέτη. Η *Εικόνα 1.8* δείχνει την εργαστηριακή, πειραματική διάταξη.



Εικόνα 1.9: Καταγραφές τάσης και ρεύματος κατά τη διάρκεια μη γραμμικής αγωγής για άμμο με 3% υγρασία (τάση φόρτισης 27 kV). [6]

1.2.6.3 Καθορισμός της E_c

Στις επόμενες ενότητες, γίνεται αναφορά στις σειρές δοκιμών που έγιναν για τη διερεύνηση της επίδρασης των προαναφερθέντων παραγόντων (ειδική αντίσταση του εδάφους, πολικότητα, διαστάσεις ηλεκτροδίου γείωσης) στην τιμή της κρίσιμης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, E_c , καθώς και στα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτές τις δοκιμές.

A. Επίδραση της Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους

Πολλά πρότυπα παρουσιάζουν χρήσιμα δεδομένα σε σχέση με την ειδική αντίσταση του εδάφους. Τα επίπεδα των ειδικών αντιστάσεων των εδαφών κυμαίνονται από μερικά Ωm για τον πηλό μέχρι μερικά kΩm για πυριγενή πετρώματα και έχουν καταγραφεί σε αυτά τα πρότυπα. Η ειδική αντίσταση του εδάφους ποικίλει όχι μόνο ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, αλλά και ανάλογα με τη θερμοκρασία, την υγρασία, την περιεκτικότητα σε αλάτι και ανάλογα με το πόσο συμπαγές είναι το έδαφος. Για τον καθορισμό των επιδράσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην τιμή της E_c , ρυθμίστηκε η ειδική αντίσταση της άμμου αναμιγνύοντας την άμμο με διαφορετικά ποσοστά νερού, επιλέγοντας δείγματα άμμου με διαφορετικά μεγέθη κόκκων, και αναμιγνύοντας την άμμο με αλάτι.

- 1) Άμμος με Ποικίλα Ποσοστά Νερού: Σε αυτήν τη σειρά δοκιμών, μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά της άμμου με μέτριο μέγεθος κόκκων με ποικίλα ποσοστά υγρασίας, χρησιμοποιώντας ένα ημισφαιρικό δοχείο και αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας κρουστικά ρεύματα θετικής πολικότητας. Σε παλαιότερες μελέτες, η E_c προσδιοριζόταν, σε γενικές γραμμές, ως η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τη στιγμή που η χαρακτηριστική αρχίζει να γίνεται μη γραμμική. Θεωρείται ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους υφίσταται, όταν παρατηρείται η δεύτερη κορυφή του ρεύματος, όπως ακριβώς φαίνεται στην *Εικόνα 1.9*. Βρέθηκε ότι η τάση κατωφλίου της υγρής άμμου ανέρχεται στα 15 kV και είναι ανεξάρτητη του ποσοστού υγρασίας (για ποσοστό υγρασίας έως 10%). Το κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$E_c(r) = \frac{V}{r^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (1.5)$$

Όπου:

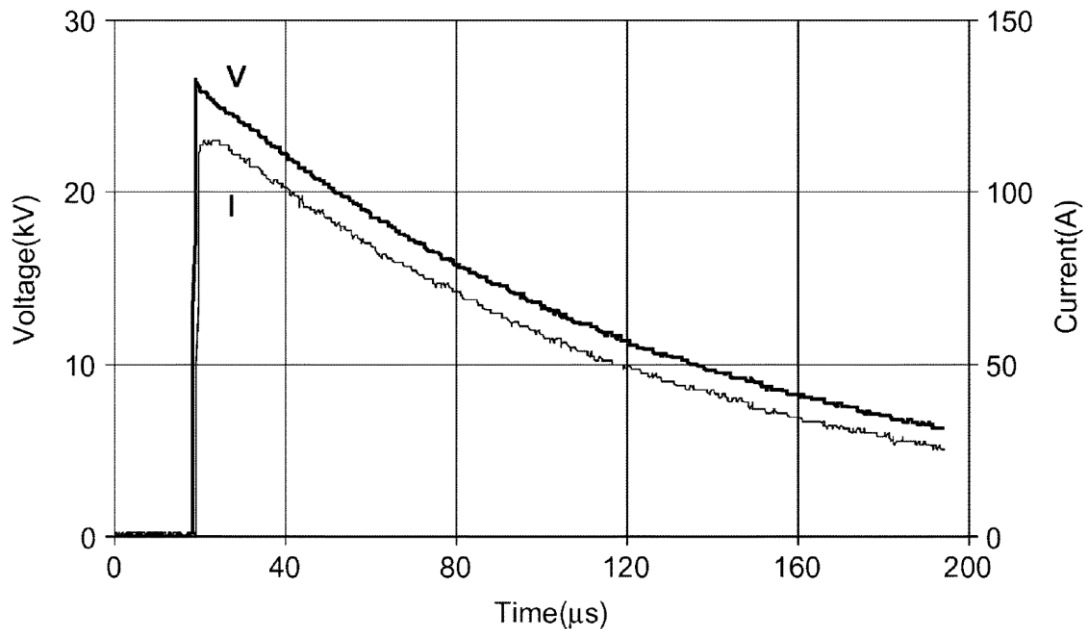
- r_1 η ακτίνα του ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου.
- r_2 η ακτίνα του ημισφαιρικού δοχείου.
- r η ακτίνα ιονισμού.
- V η εφαρμοζόμενη στο ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο τάση.

Εξαιτίας της δυσκολίας πρόβλεψης της ακτίνας ιονισμού, r , θεωρείται ίση με την ακτίνα του ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου γείωσης r_1 . Βρέθηκε, επίσης, ότι τα 15 kV τάσης κατωφλίου αντιστοιχούν σε κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου 5,5 kV/cm.

Όμως, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι δύο κορυφές του ρεύματος δεν παρατηρήθηκαν σε πολύ κορεσμένη με νερό άμμο (δηλαδή σε άμμο αναμεμιγμένη με 15% υγρασία ή περισσότερο). Η *Εικόνα 1.10* δείχνει τις τυπικές καταγραφές τάσης και ρεύματος υπό αυτές τις συνθήκες. Οι μορφές

των καταγεγραμμένων κυματομορφών τάσης και ρεύματος θα μπορούσαν να αποδοθούν στην υψηλή αγωγιμότητα του δοκιμίου. Σε άμμο με πολλή υγρασία, είναι δυνατόν να μη συμβαίνει καθόλου διαδικασία ιονισμού στο δοκίμιο για τα σχετικά μικρά μεγέθη ρεύματος που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές, από τη στιγμή που τα κενά μεταξύ των κόκκων της άμμου γεμίζουν με νερό. Επιπροσθέτως, αναμένεται μικρή ενίσχυση του πεδίου, αφού υπάρχει μόνο μια μικρή διηλεκτρική διαφορά μεταξύ του υγρού εδάφους και των κενών αέρα, τα οποία πλέον είναι γεμάτα με νερό. Εξαιτίας των παραπάνω δεδομένων, δεν προέκυψε κρίσιμη ένταση κατωφλίου, E_c , για άμμο με υψηλό κορεσμό σε νερό. Εκτός αυτού, παρατηρήθηκαν απότομες αυξήσεις στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος.

Έτσι, αποδείχθηκε ότι η κρίσιμη ένταση κατωφλίου, E_c , είναι πιο εύλογη για άμμο υψηλής ειδικής αντίστασης (δηλαδή για άμμο με έως 10% υγρασία).



Εικόνα 1.10: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για πολύ κορεσμένη άμμο (δηλαδή με 15% υγρασία) και για υψηλή εφαρμοζόμενη τάση (27 kV). [6]

- 2) Άμμος με διαφορετικό μέγεθος κόκκων: Είναι γνωστό ότι οι διαφορές στο μέγεθος των κόκκων του εδάφους επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο η υγρασία συγκρατείται εντός του εδάφους και, επιπλέον, τροποποιούν το μέγεθος των θυλάκων αέρα που εγκλωβίζονται μέσα στο έδαφος, οι οποίοι, με τη σειρά τους, θα επηρέαζαν την ειδική αντίσταση του εδάφους. Τα δεδομένα για την ειδική αντίσταση του εδάφους για έδαφος με διαφορετικά μεγέθη κόκκων έχουν δείξει ότι για τον ίδιο τύπο εδάφους, το λεπτόκοκκο έδαφος

είναι πιθανόν να έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από ότι τα εδάφη με μέτριους ή μεγάλους κόκκους.

Σε αυτήν την ενότητα, εξετάζεται η επίδραση των μεγεθών των κόκκων της άμμου στην τιμή της E_c . Τα μεγέθη των κόκκων της άμμου προσδιορίστηκαν, κατ' αρχάς, σύμφωνα με τις συνιστώμενες από το πρότυπο BS 1377 διαδικασίες.

Με αυτή τη μέθοδο, τα μεγέθη των κόκκων των δειγμάτων άμμου με μικρό και μέτριο μέγεθος κόκκων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές προσδιορίστηκαν και συνοψίζονται στον Πίνακα 1.3. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης για αυτούς τους τύπους της άμμου υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων μετρήθηκαν και αναλύθηκαν πλήρως σε παλαιότερες μελέτες. Βρέθηκε, μάλιστα, ότι για το ίδιο ποσοστό υγρασίας, η ειδική αντίσταση για λεπτόκοκκη άμμο είναι υψηλότερη από ότι για άμμο με μέτριο μέγεθος κόκκων.

Πίνακας 1.3: Τύποι εξεταζόμενης άμμου [6]

Τύπος άμμου	Διάμετρος των κόκκων της άμμου (mm)
Με κόκκους μέτριου μεγέθους	0,06-0,6
Με κόκκους μικρού μεγέθους	0,04-0,2

Πίνακας 1.4: Δείγματα δοκιμών μισμάτων άμμου με χαμηλή ειδική αντίσταση [6]

Δείγμα Άμμου	A	B	C	D	E	F
NaCl (%)	5	10	10	15	20	25
Ποσοστό Υγρασίας (%)	5	5	10	10	10	10
Μέση Ειδική Αντίσταση (Ωm)	5,5	5,5	2,3	2,5	2,5	2,7

Χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα πειραματική διάταξη και την αντίστοιχη διαδικασία δοκιμών, διεξήχθησαν δοκιμές σε λεπτόκοκκη άμμο για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας (έως 10%). Οι κρουστικές δοκιμές διεξήχθησαν για αυξανόμενο μέγεθος του ρεύματος. Από τις δοκιμές αυτές, προέκυψαν παρόμοιες κυματομορφές τάσης και ρεύματος και για τους δύο τύπους άμμου (δηλαδή με μικρό και μέτριο μέγεθος κόκκων). Η προσεκτική εξέταση των μετρηθεισών κυματομορφών τάσης και ρεύματος αποκάλυψε ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους άρχισε να συμβαίνει για εφαρμοζόμενες τάσεις άνω των 15 kV για την λεπτόκοκκη άμμο.

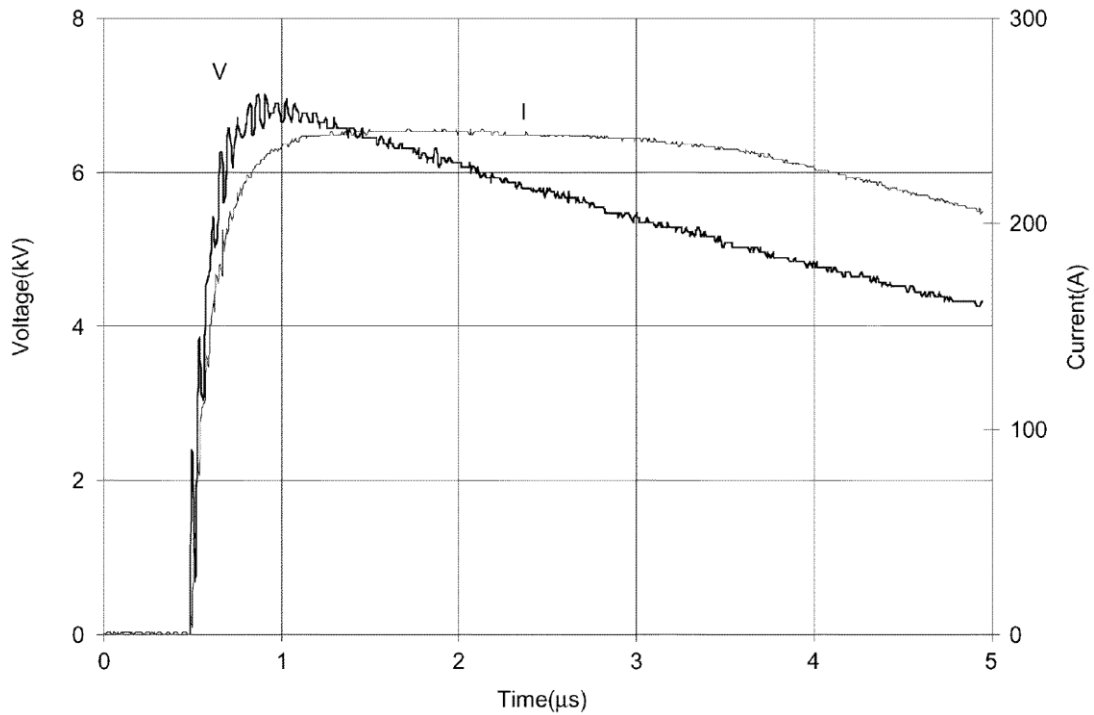
Αυτό το κατώφλι τάσης παράγει ένα κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο E_c των 5,5 kV/cm στην επιφάνεια του ενεργού ηλεκτροδίου. Αυτή η τιμή της E_c είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για την άμμο με μέτριο μέγεθος κόκκων. Αυτή η

διαπίστωση δείχνει ότι η E_c είναι ανεξάρτητη του μεγέθους των κόκκων για χαμηλή ειδική αντίσταση του εδάφους. (και μάλιστα μικρότερη των 10 kΩm).

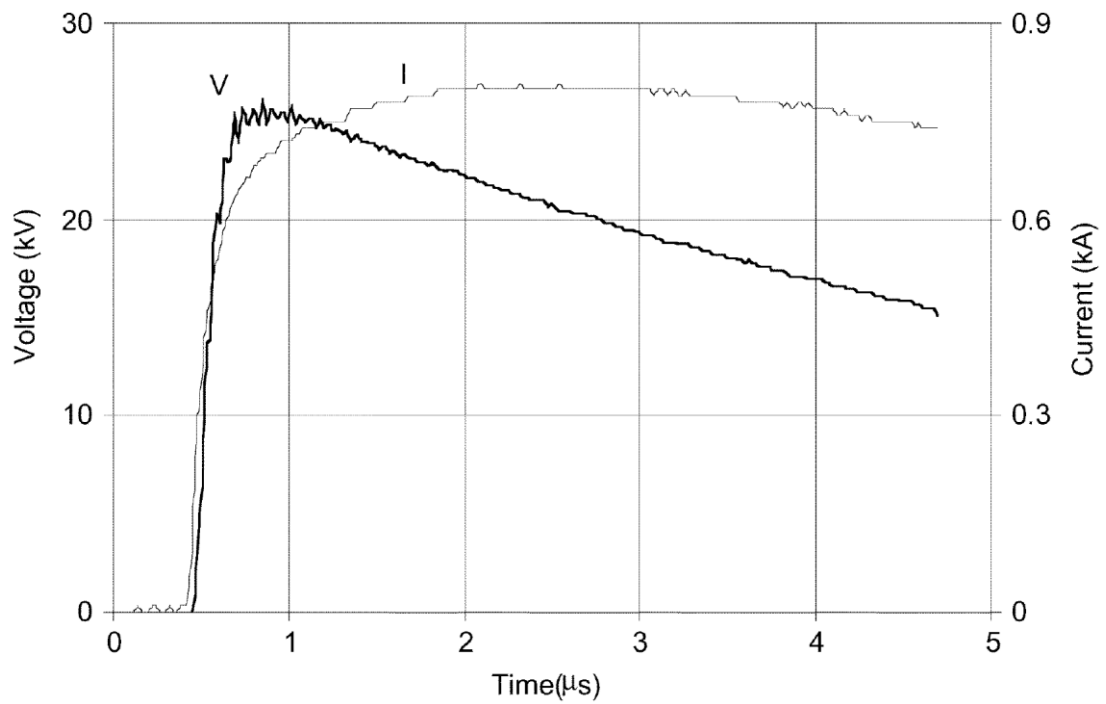
- 3) Μίγματα Εδάφους Άμμου-Αλατιού: Για την αύξηση της αγωγιμότητας του εδάφους που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο γείωσης, γίνεται συνήθως κατεργασία του εδάφους με την προσθήκη μπετονίτη, χλωριούχου νατρίου (NaCl), μαρκονίτη, θεικού χαλκού (Cu_2SO_4) και άλλων προσθέτων. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται σημαντικά η τιμή της αντίστασης του εδάφους. Σε παλαιότερη έρευνα, είχε μελετηθεί η χαρακτηριστική του NaCl υπό συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα μικρού μεγέθους και στη συνέχεια υπό υψηλού μεγέθους κρουστικά ρεύματα. Βρέθηκε ότι το μέγεθος της ειδικής αντίστασης του NaCl υπό συνθήκες διαρροής με συνεχές ρεύμα ήταν παρόμοιο με την τιμή για εναλλασσόμενο ρεύμα στα 50 Hz. Όμως, κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών, βρέθηκε ότι η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος για οιοδήποτε δεδομένο ποσοστό υγρασίας.

Επίσης, η προσθήκη NaCl κάνει το μέσο πιο αγωγίμο και, συνεπώς, η κρουστική του απόκριση αναμένεται να διαφέρει από αυτή της άμμου με διάφορα ποσοστά υγρασίας και διαφορετικό μέγεθος κόκκων. Χρησιμοποιώντας το κύκλωμα δοκιμών της *Εικόνας 1.14*, διεξήχθησαν κρουστικές δοκιμές σε άμμο με μέτριο μέγεθος κόκκων η οποία ήταν αναμεμιγμένη με διάφορες ποσότητες NaCl και νερού.

Αρχικά, παρασκευάστηκε ένα διάλυμα NaCl αναμιγνύοντας μια επαρκή ποσότητα NaCl σε μια ελεγχόμενη ποσότητα νερού. Κατόπιν τούτου, το διάλυμα NaCl περιχύθηκε σε μια ελεγχόμενη ποσότητα ξηρής άμμου η οποία αναμίχθηκε πλήρως σε έναν αναμικτήρα άμμου. Τέλος, το μίγμα άμμου τοποθετήθηκε σε ένα δοχείο δοκιμών και συμπίεστηκε. Ο *Πίνακας 1.4* συνοψίζει τα μέσα δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη σειρά δοκιμών. Επίσης, στον *Πίνακα 1.4*, περιλαμβάνονται οι μέσες τιμές της μετρηθείσας κρουστικής ειδικής αντίστασης. Αυτές οι τιμές της ειδικής αντίστασης ήταν πολύ χαμηλότερες από αυτές της άμμου με τα διάφορα ποσοστά υγρασίας, τα οποία ήταν της τάξεως των μερικών kΩm. Παρόλο που υπάρχει μια ξεκάθαρη τάση να πέφτει η ειδική αντίσταση με την προσθήκη αλατιού και νερού, παρατηρήθηκαν κάποιες ασυμφωνίες κατά τη διάρκεια δοκιμών με τα ίδια χαρακτηριστικά, γεγονός που αναμενόταν, εξαιτίας των διαδικασιών κατανομής του νερού μέσα στο δοκίμιο.



(a)



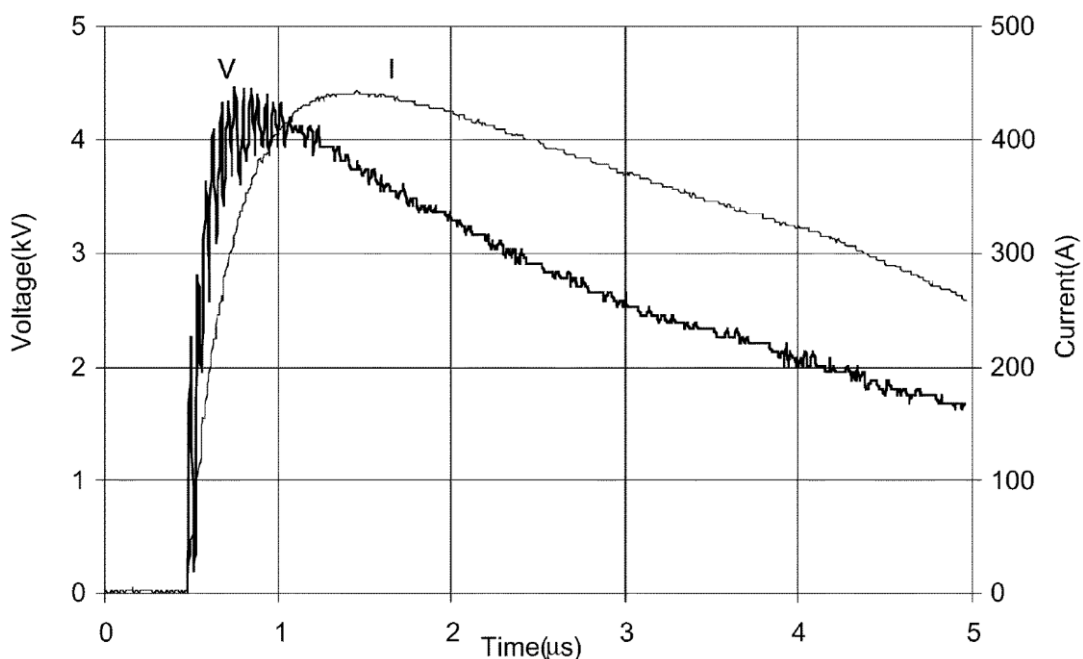
(b)

Εικόνα 1.11: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για το δείγμα άμμου B (άμμος με 10% NaCl και 5% υγρασία). (α) Συνθήκες χαμηλής αγωγιμότητας. (β) Συνθήκες υψηλής αγωγιμότητας. [6]

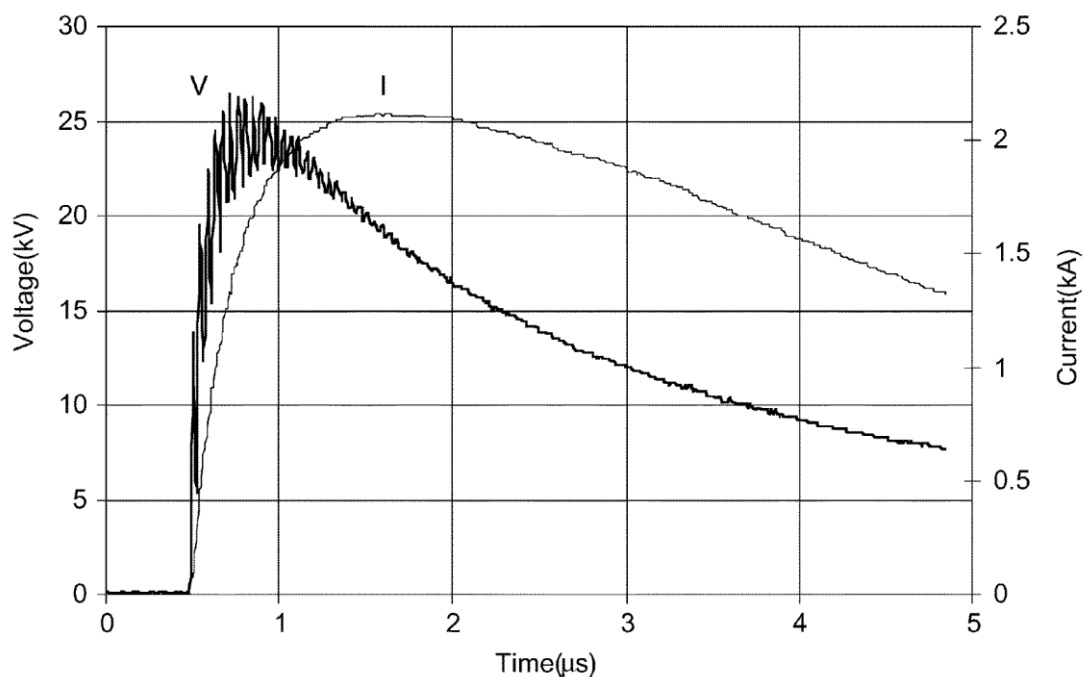
Στη συνέχεια, διεξήχθησαν κρουστικές δοκιμές σε αυτά τα δείγματα εδάφους για αυξανόμενες τάσεις και ρεύματα. Οι Εικόνες 1.11(α) και (β), δείχνουν

τυπικές καταγραφές τάσης και ρεύματος για το δείγμα εδάφους B, τόσο σε συνθήκες χαμηλής αγωγιμότητας όσο και σε συνθήκες υψηλής αγωγιμότητας, αντίστοιχα. Οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για δείγμα δοκιμών A ήταν παρόμοιες με αυτές του δείγματος δοκιμών B, ενώ οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για το μέσο δοκιμών C (οι οποίες φαίνονται στις *Εικόνες 1.12(a)* και *(β)*) για διαφορετικά επίπεδα ρεύματος βρέθηκαν να είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες κυματομορφές, οι οποίες προέκυψαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών για τα δείγματα D, E και F.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η τιμή της E_c βασίζεται στον καθορισμό του επιπέδου τάσης στο οποίο αρχίζει να εμφανίζεται η δεύτερη κορυφή του ρεύματος. Όμως, όπως φαίνεται στις *Εικόνες 1.11* και *1.12*, δεν παρατηρείται ούτε δεύτερη κορυφή ρεύματος ούτε προφανής επίδραση του ιονισμού στις καμπύλες τάσης και ρεύματος. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, δεν προκύπτει από τις παραπάνω δοκιμές τιμή για την κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_c . Αυτές οι κυματομορφές είναι παρόμοιες με αυτές που προέκυψαν για άμμο με 15% υγρασία (βλ. *Εικόνα 1.11*). Αυτή η διαπίστωση μπορεί να οφείλεται στη χαμηλή ειδική αντίσταση των μιγμάτων άμμου-αλατιού, η οποία αποτρέπει τη συσσώρευση υψηλών δυναμικών τα οποία θεωρούνται υπεύθυνα για εκκενώσεις εντός του εδάφους. Παρόλο που δεν προέκυψε τιμή για την κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_c , για αυτά τα μίγματα υψηλής αγωγιμότητας, βρέθηκε ότι το μέγεθος της αντίστασης του εδάφους μειωνόταν υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων, γεγονός που μπορεί επίσης να οφείλεται στη διαδικασία ιονισμού στο έδαφος.



(α)



(β)

Εικόνα 1.12: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για το δείγμα άμμου C (άμμος με 10% NaCl και 10% υγρασία). (α) Συνθήκες χαμηλής αγωγιμότητας. (β) Συνθήκες υψηλής αγωγιμότητας. [6]

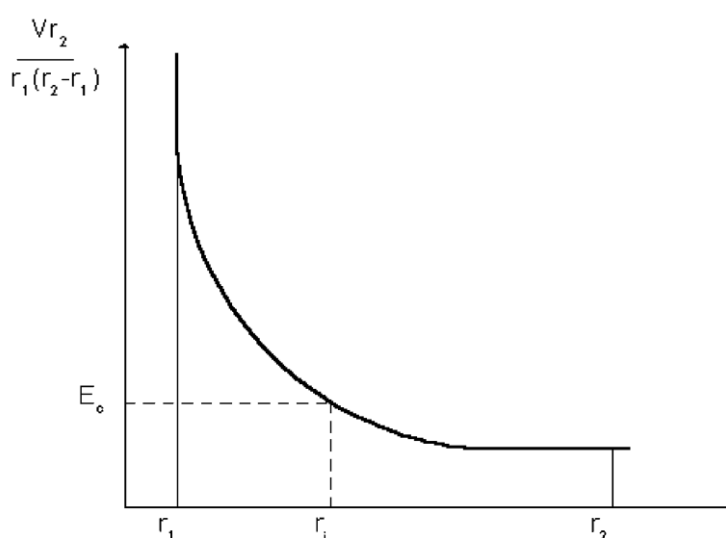
Συμπερασματικά, η E_c , ή η δεύτερη κορυφή του ρεύματος, παρατηρείται μόνο για έδαφος υψηλής ειδικής αντίστασης (δηλαδή άμμο με υγρασία έως 10%), και όχι για έδαφος χαμηλής ειδικής αντίστασης, όπως η άμμος με υψηλή υγρασία (15%) ή μίγματα άμμου με αλάτι.

B. Επίδραση της Πολικότητας

Στην παρούσα ενότητα, διερευνώνται οι επιδράσεις της πολικότητας των κρουστικών ρευμάτων στην τιμή της E_c . Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε άμμος με μέτριο μέγεθος κόκκων και με διάφορα ποσοστά υγρασίας, ενώ έγιναν δοκιμές και για τις δύο πολικότητες. Η τιμή της κρίσιμης έντασης ηλεκτρικού πεδίου (E_c) της άμμου με μέτριο μέγεθος κόκκων για θετική πολικότητα ανήλθε στα 5,5 kV/cm. Χρησιμοποιώντας το ίδιο κύκλωμα δοκιμών και τις ίδιες παραμέτρους για το δοκίμιο, διεξήχθησαν κρουστικές δοκιμές με αρνητική πολικότητα για άμμο με μέτριο μέγεθος κόκκων για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας και για διάφορες τάσεις φόρτισης.

Τόσο η κυματομορφή της κρουστικής τάσης όσο και η κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος που προέκυψαν για αρνητική πολικότητα, αποδείχτηκαν παρόμοιες με τις κυματομορφές για θετική πολικότητα. Όμως, μια πιο προσεκτική ανάλυση των καταγραφών της τάσης και του ρεύματος δείχνει ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του

εδάφους (η οποία εκφράζεται με την εμφάνιση της δεύτερης κορυφής του ρεύματος) αρχίζει να συμβαίνει σε επίπεδο εφαρμοζόμενης τάσης άνω των 18 kV για κάθε δείγμα δοκιμών. Αυτή η τάση κατωφλίου αντιστοιχεί σε κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_c , 6,6 kV/cm στο ενεργό ηλεκτρόδιο. Βρέθηκε ότι αυτή η τιμή είναι ελαφρώς υψηλότερη από την E_c για κρουστικές δοκιμές με θετική πολικότητα (5,5 kV/cm). Αυτό το αποτέλεσμα των δοκιμών ήταν μάλλον αναμενόμενο, αφού είναι γνωστό ότι οι εκκενώσεις στον αέρα συμβαίνουν σε μικρότερα επίπεδα ηλεκτρικού πεδίου για θετική πολικότητα από ότι για αρνητική, ειδικά από τη στιγμή που ο ιονισμός του εδάφους θεωρείται ότι συμβαίνει στα κενά του αέρα που βρίσκονται στο έδαφος.



Εικόνα 1.13: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε ημισφαιρικό δοκίμιο. [6]

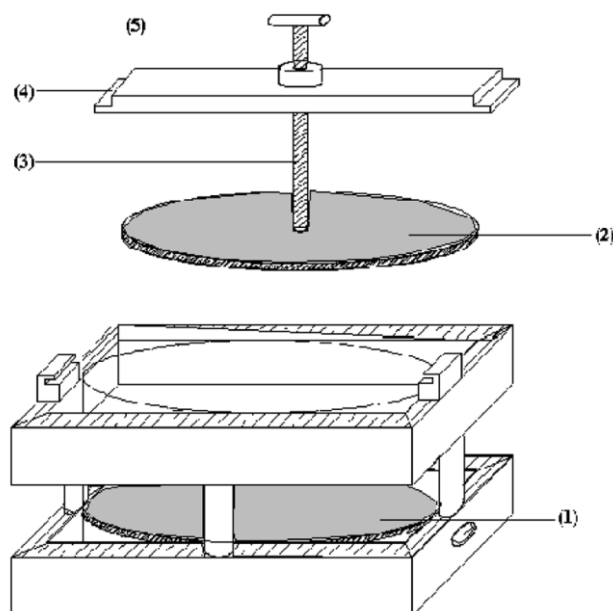
Γ. Επίδραση των Διαστάσεων του Ηλεκτροδίου Γείωσης

Είναι γνωστό ότι, υπό την επίδραση ρεύματος χαμηλού μεγέθους και χαμηλής συχνότητας, η αντίσταση γείωσης επηρεάζεται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και τη διάσταση/διάταξη του ηλεκτροδίου γείωσης.

Στις προηγούμενες ενότητες, διερευνήθηκε η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της πολικότητας στις τιμές της κρίσιμης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, E_c , με τη χρήση ενός ημισφαιρικού δοκιμίου. Όπως είναι γνωστό, το ημισφαιρικό δοχείο που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση των παραπάνω επιδράσεων στην E_c παρέχει μία μη ομοιογενή κατανομή ηλεκτρικού πεδίου. Η Εικόνα 1.13 απεικονίζει τη μη ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου εντός του δοκιμίου.

Όπως φαίνεται σαφώς στην *Εικόνα 1.13*, η κατανομή του πεδίου σε ημισφαιρικό δοκίμιο και ο καθορισμός της E_c βασίζονται στον ακριβή καθορισμό του επιπέδου της τάσης στο οποίο αρχίζει να εμφανίζεται η δεύτερη κορυφή του ρεύματος. Μετά τον καθορισμό του παραπάνω επιπέδου τάσης, η χρήση του αριθμητικά ή αναλυτικά υπολογισμένου πεδίου στο ενεργό ηλεκτρόδιο για αυτήν την κρίσιμη τάση παράγει το πεδίο κατωφλίου E_c . Εξαιτίας των παραπάνω, δεν αναμένεται να είναι εξαιρετικά υψηλή η ακρίβεια μια τέτοιας διαδικασίας.

Συνεπώς, σε αυτήν την ενότητα, αναπτύχθηκε μια εναλλακτική δοκιμή, η οποία επιτρέπει καλύτερη ακρίβεια. Για την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας στις μετρήσεις, σχεδιάστηκε ένα δοκίμιο με ομοιόμορφη κατανομή πεδίου. Η *Εικόνα 1.14* δείχνει τη διάταξη των παράλληλων πλακών, η οποία χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη δοκιμή. Αυτές οι παράλληλες πλάκες, οι οποίες παρέχουν ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο σχεδιάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο BS 1377 για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η εν λόγω πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο παράλληλους δίσκους διαμέτρου 24,7 cm. Ο Δίσκος (1) είναι στερεωμένος στη βάση του δοκιμίου, ενώ ο άνω Δίσκος (2) είναι συνδεδεμένος σε μία ράβδο με σπείρωμα (3). Αυτή η ράβδος μπορεί να ρυθμιστεί με μία υποστηρικτική κατασκευή (4), η οποία είναι άμεσα προσαρτημένη σε μια δοκό. Μια λαβή που συνδέεται στο άνω άκρο της ράβδου (5) επιτρέπει τη ρύθμιση του κενού μεταξύ των δίσκων. Αυτή η λαβή μπορεί να σφικτεί ώστε να συμπιέσει την άμμο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αιχμηρών ακμών και των κενών αέρα, τα οποία μπορεί να υπάρχουν σε σωματίδια του εδάφους, καθώς και μεταξύ του ηλεκτροδίου και του μέσου δοκιμών.



Εικόνα 1.14: Σχηματικό διάγραμμα του δοκιμίου των παράλληλων πλακών.

- (1) Κάτω ηλεκτρόδιο, (2) Άνω ηλεκτρόδιο, (3) Ράβδος ρύθμισης,
(4) Δοκός μανδάλωσης, (5) Λαβή. [6]

Όταν επιτυγχάνεται το επίπεδο ιονισμού στη διάταξη των παράλληλων πλακών, ακολουθεί στιγμιαία διάσπαση. Συνεπώς, η μέτρηση της τάσης διάσπασης θα δώσει μια ακριβέστερη τιμή για το ηλεκτρικό πεδίο κατωφλίου του ιονισμού, E_c . Με άλλα λόγια, κάθε φορά που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του ιονισμού, παρατηρείται στο μέσο των δοκιμών πλήρης διάσπαση. Αυτό το γεγονός είναι χρήσιμο για τον προσδιορισμό του κατωφλίου ιονισμού, ο οποίος πλέον συνίσταται στη μέτρηση της τάσης διάσπασης.

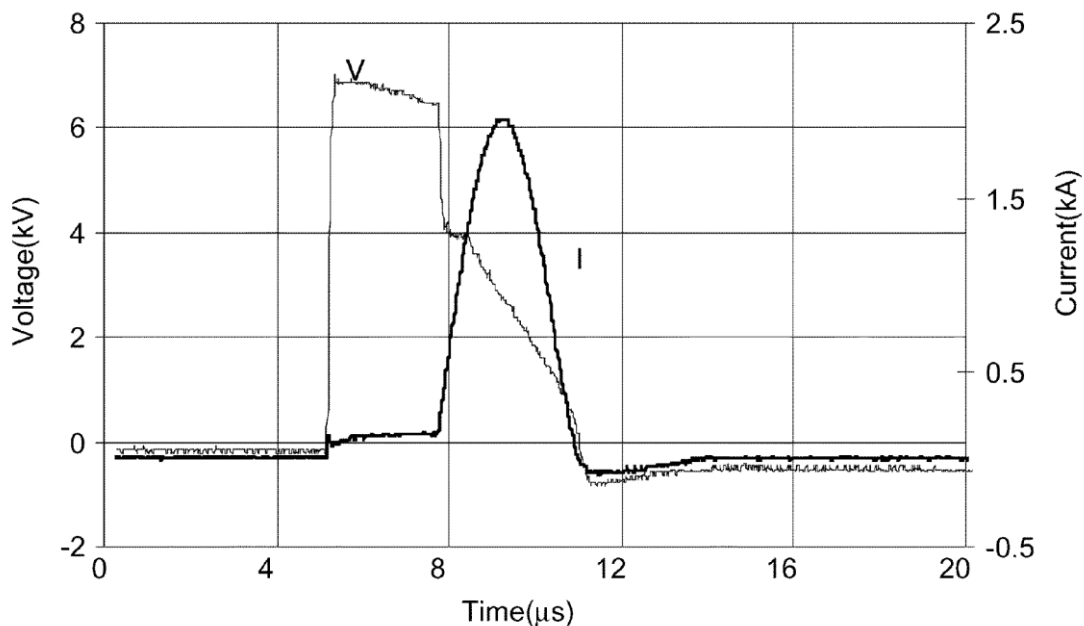
- 1) Βαθμονόμηση Δοκιμίου Παράλληλων Πλακών με Κενό Αέρα: Για το ίδιο δοκίμιο, οι Srisakot *et al.* έχουν βαθμονομήσει το δοκίμιο υπό χαμηλές τάσεις και μεταβλητή ισχύ. Μάλιστα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το δοκίμιο είναι αξιόπιστο μόνο για χαμηλά μεγέθη τάσης και ρεύματος.

Όμως, για τις κρουστικές δοκιμές, ελέγχεται η ομοιομορφία του πεδίου στο δοκίμιο των παράλληλων πλακών έτσι ώστε να μην επηρεάζεται σημαντικά η τάση διάσπασης από τοπικές ανωμαλίες στις επιφάνειες του ηλεκτροδίου. Αρχικά, διεξήχθησαν κρουστικές δοκιμές με αυξανόμενα μεγέθη τάσης τόσο υπό θετική όσο και υπό αρνητική πολικότητα με τις παράλληλες πλάκες να χωρίζονται από ένα κενό αέρα του 1 cm. Επιβεβαιώθηκε ότι υπό αυτές τις συνθήκες δεν μπορούσε να μετρηθεί ρεύμα αγωγής. Η *Εικόνα 1.15* δείχνει τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος της διάσπασης του αέρα υπό θετική πολικότητα. Παρόμοιες κυματομορφές τάσης και ρεύματος κατεγράφησαν και κατά τις δοκιμές υπό αρνητική πολικότητα.

Για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης, U_{50} , για κενό αέρα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αυξομείωσης βασισμένη στο πρότυπο IEC-60, με τουλάχιστον είκοσι δοκιμές για κάθε κρουστική πολικότητα. Η U_{50} μετρήθηκε στα 26 kV για θετική πολικότητα και στα 28 kV για αρνητική πολικότητα. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου 26 kV/cm και 28 kV/cm, για θετική και αρνητική πολικότητα αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές προσεγγίζουν τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία για τη κρουστική διάσπαση του αέρα σε ομοιόμορφο πεδίο. Συνεπώς, θα μπορούσε να υποθεθεί ότι η διάταξη των παράλληλων πλακών η οποία χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές έχει την απαιτούμενη ομοιόμορφη κατανομή πεδίου, που είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του ιονισμού του εδάφους και της διάσπασης.

- 2) Άμμος με μέτριο μέγεθος κόκκων και ελεγχόμενα ποσοστά υγρασίας σε δοκίμιο παράλληλων πλακών: Διεξήχθησαν κρουστικές δοκιμές για διάφορες τάσεις φόρτισης, υπό θετική και αρνητική πολικότητα, σε δοκίμιο παράλληλων πλακών, μεταξύ των οποίων τοποθετήθηκε άμμος με μέτριο μέγεθος κόκκων και διάφορα ποσοστά υγρασίας. Τα μετρηθέντα αποτελέσματα από αυτές τις δοκιμές συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν με το ημισφαιρικό δοχείο.

Εξαιτίας του ομοιόμορφου πεδίου μεταξύ των πλακών, δεν παρατηρήθηκε



Εικόνα 1.15: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος κατά τη διάρκεια διάσπασης για άμμο με 10% υγρασία και τάση φόρτισης 7kV. [6]

δεύτερη κορυφή ρεύματος για όλες τις τάσεις μέχρι το επίπεδο διάσπασης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.15 για θετική πολικότητα. Παρόμοιες κυματομορφές προέκυψαν και για αρνητική πολικότητα. Δεν παρατηρήθηκε δεύτερη κορυφή ρεύματος, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στη μικρή απόσταση μεταξύ των παράλληλων πλακών, με αποτέλεσμα τη γρήγορη διάδοση του ιονισμού, ώστε να μην μπορεί να ανιχνευτεί από τους χρησιμοποιηθέντες μετατροπείς. Διεξήχθησαν, επίσης, δοκιμές σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στο πρότυπο IEC-60 με σκοπό την εκτίμηση της τάσης κατώφλι διάσπασης της άμμου, V_B , για διαφορετικό ποσοστό υγρασίας. Από τις παραπάνω δοκιμές, μπορεί να προκύψει το ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης του δείγματος δοκιμών ως εξής: $E_B = V_B/d$, όπου

V_B η τάση διάσπασης και d η απόσταση μεταξύ των παράλληλων πλακών.

Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης E_B , το οποίο, σε αυτήν την περίπτωση, αντιστοιχεί στο κατώφλι ιονισμού της άμμου, βρέθηκε ότι είναι ανεξάρτητο του ποσοστού υγρασίας της άμμου και έχει μια μέση τιμή των 7,9 kV/cm για θετική πολικότητα και 9 kV/cm για αρνητική. Η διαφορά των τιμών της E_c για θετική και αρνητική πολικότητα είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε σε προηγούμενες ενότητες και, κατ' επέκταση, αναμενόμενη. Βέβαια, βρέθηκε ότι αυτή η τιμή της E_c είναι μικρότερη από την διηλεκτρική αντοχή του αέρα. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι για ίδια ειδική αντίσταση του εδάφους, η E_c που προκύπτει από τις δοκιμές με το δοκίμιο των παράλληλων πλακών είναι

υψηλότερη από το ηλεκτρικό πεδίο κατωφλίου που προκύπτει για την ημισφαιρική διάταξη (5,5 kV/cm). Όμως, η μέτρηση της τάσης διάσπασης με τη διάταξη των παράλληλων πλακών δίνει μια ακριβέστερη εκτίμηση για το πεδίο κατωφλίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι την έναρξη του ιονισμού ακολουθεί στιγμιαία διάσπαση.

1.2.6.4 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την ενότητα διερευνήθηκαν οι επιδράσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της πολικότητας, των διαστάσεων του ηλεκτροδίου στο μέτρο της E_c . Η ειδική αντίσταση του εδάφους ελέγχεται με την προσθήκη διαφορετικών ποσοστών υγρασίας, με τον καθορισμό του μεγέθους των κόκκων της άμμου και με την προσθήκη διαφορετικών ποσοστών προσθέτων. Βρέθηκε ότι η τιμή των 5,5 kV/cm για την E_c είναι ανεξάρτητη του ποσοστού υγρασίας και του μεγέθους των κόκκων της άμμου. Όμως, δεν προέκυψε κάποια τιμή για την E_c όταν η άμμος αναμιγνυόταν με πρόσθετα (NaCl), από τη στιγμή που δεν μπορούσε να παρατηρηθεί στις κυματομορφές προφανής επίδραση λόγω ιονισμού.

Βρέθηκε, επιπλέον, ότι για το ίδιο δείγμα εδάφους και τις ίδιες παραμέτρους του ημισφαιρικού δοκιμίου, δεν παρατηρείται έναρξη μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους για εφαρμοζόμενη τάση άνω των 18 kV για αρνητική πολικότητα, η οποία τάση αντιστοιχεί σε πεδίο E_c των 6,6 kV/cm. Η τιμή της E_c για αρνητική πολικότητα είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή που προέκυψε κατά τις δοκιμές για θετική πολικότητα (5,5 kV/cm).

Τέλος, επετεύχθη μια ακριβέστερη εκτίμηση του ηλεκτρικού πεδίου κατωφλίου E_c με τη χρήση δοκιμίου παράλληλων πλακών. Αυτή η εκτίμηση θεωρείται ακριβέστερη, καθώς την έναρξη του ιονισμού ακολουθεί στιγμιαία διάσπαση. Και με τη χρήση της διάταξης των παράλληλων πλακών, βρέθηκε ότι η τιμή της E_c για αρνητική πολικότητα (9 kV/cm) ήταν υψηλότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη για θετική πολικότητα (7,9 kV/cm). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες που προέκυψαν με τη χρήση του ημισφαιρικού δοχείου. Αυτό το γεγονός θεωρείται ότι οφείλεται στη μη ομοιογενή κατανομή πεδίου του ημισφαιρικού δοκιμίου και δείχνει ότι η τιμή της E_c επηρεάζεται από τις διαστάσεις του ηλεκτροδίου γείωσης.

1.2.7 Παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους σε ταχείες μεταβατικές καταστάσεις

1.2.7.1 Η επίδραση της πολικότητας στη συμπεριφορά του εδάφους

Στην παρούσα ενότητα, γίνεται η σύγκριση των χαρακτηριστικών άμμου με μέσο μέγεθος κόκκων και για διάφορα επίπεδα υγρασίας όταν σε αυτή διαρρέονται κρουστικά ρεύματα θετικής και αρνητικής πολικότητας.

1.2.7.2 Κρουστικές μορφές ρεύματος υπό θετική και αρνητική πολικότητα

Οι *Εικόνες 1.16(α)* έως *1.16(γ)* δείχνουν τις καταγραφές τάσης και ρεύματος για συνθήκες γραμμικής και μη γραμμικής αγωγής υπό αρνητική πολικότητα. Όπως προκύπτει και από τις εικόνες, οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος είναι παρόμοιες με αυτές για θετική πολικότητα. Σε χαμηλές τάσεις φόρτισης, η κυματομορφή του ρεύματος ομοιάζει με την κυματομορφή της τάσης [*Εικόνα 1.16(β)*], γεγονός που είναι ενδεικτικό μιας γραμμικής ωμικής συμπεριφοράς.

Όμως, για τις ίδιες συνθήκες υγρασίας και εφαρμοζόμενης τάσης, καταγράφονται για παρόμοια μέγιστα τάσης χαμηλότερα μεγέθη ρεύματος για αρνητική πολικότητα σε σχέση με τη θετική πολικότητα. Τέτοιες καταγραφές είναι μάλλον αναμενόμενες, από τη στιγμή που είναι γνωστό ότι οι ηλεκτρικές εκκενώσεις στον αέρα συμβαίνουν σε μικρότερα επίπεδα για θετική πολικότητα από ότι για αρνητική και από τη στιγμή που θεωρείται ότι ο ιονισμός του εδάφους λαμβάνει χώρα σε διάκενα αέρα μέσα στο έδαφος. Ως εκ τούτου, για ίδια επίπεδα τάσης, αναμένεται λιγότερη δραστηριότητα για κρουστικά ρεύματα με αρνητική πολικότητα.

Η δε μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους αρχίζει να υφίσταται, όταν παρατηρείται η δεύτερη κορυφή του ρεύματος. Μια προσεκτική ανάλυση των καταγραφών της τάσης και του ρεύματος δείχνει ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους αρχίζει να παρατηρείται για ένα επίπεδο εφαρμοζόμενης τάσης πάνω από 18 kV για κάθε δοκίμιο η οποία αντιστοιχεί σε μια τιμή E_c των 6,6 kV/cm στο ηλεκτρόδιο. Μάλιστα βρέθηκε ότι αυτή η τιμή είναι ελαφρώς υψηλότερη από την αντίστοιχη E_c για δοκιμές με θετική πολικότητα. Σε αυτές τις δοκιμές το όριο της E_c για την εμφάνιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους είναι τα 5,5 kV/cm.

1.2.7.3 Δυναμική της διαδικασίας του ιονισμού και πολικότητα

Οι Snowden και Erler καθώς και οι van Lint και Erler υποθέτουν ότι η χρονική καθυστέρηση που παρατηρείται στο ρεύμα ιονισμού μπορεί να έχει πληροφορίες που σχετίζονται με τη διαμόρφωση των οχτών και με τη διαδικασία αγωγής του εδάφους. Από τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος υγρής άμμου όταν σε αυτή διαρρέονται υψηλά ρεύματα, εκτιμώνται η χρονική στιγμή έναρξης της δεύτερης κορυφής του ρεύματος t_1 και η χρονική στιγμή της δεύτερης κορυφής του ρεύματος t_2 και για τις δύο πολικότητες. Η *Εικόνα 1.16(γ)* δείχνει τους προσδιορισμούς των t_1 και t_2 . Από τις *Εικόνες 1.17(α)* και *1.17(β)* προκύπτει ότι οι τάσεις των t_1 και t_2 για αρνητική πολικότητα είναι παρόμοιες με αυτές για θετική πολικότητα. Όμως, για κάθε δοκίμιο, οι χρονικές στιγμές t_1 και t_2 βρέθηκαν να είναι υψηλότερες για αρνητική πολικότητα από ότι για θετική. Η *Εικόνα 1.17* απεικονίζει τις διαφορές μεταξύ t_1 και t_2 για άμμο με 1% υγρασία και για τις δύο πολικότητες και, όπως είναι προφανές, μπορούν να διαφέρουν οι αντίστοιχες τιμές των t_1 και t_2 μέχρι και 50%.

1.2.7.4 Επίδραση της πολικότητας στις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος

Η προ του ιονισμού αντίσταση R_1 και η μετά τον ιονισμό αντίσταση R_2 υπολογίζονται ως ο λόγος της τάσης η οποία αντιστοιχεί στο ρεύμα I_{peak} προς το ρεύμα I_{peak} , έτσι ώστε να εξαλειφθεί από τη μέτρηση οποιοδήποτε επαγωγικό φαινόμενο. Η *Εικόνα 1.18* δείχνει τις αντιστάσεις R_1 και R_2 για άμμο με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας και διαφορετικές πολικότητες. Όπως είναι εμφανές, τόσο η καμπύλη της R_1 για αρνητική πολικότητα όσο και η καμπύλη της R_2 για την ίδια πολικότητα έχουν μια παρόμοια τάση σε σχέση με τις καμπύλες που προκύπτουν για θετική πολικότητα, στις οποίες οι αντιστάσεις βρέθηκαν να μειώνονται με την αύξηση του μεγέθους του ρεύματος. Αυτή η διαπίστωση εξηγείται από τη θερμική διαδικασία σε υγρή άμμο, η οποία είναι υπεύθυνη για την αύξηση της αγωγιμότητας του εδάφους και γι' αυτό ευθύνεται για τη σχετική μείωση της R_1 .

Όμως, με την αύξηση του μεγέθους του ρεύματος, λαμβάνει χώρα στο έδαφος η διαδικασία του ιονισμού, η οποία μειώνει την R_2 . Βρέθηκε ότι για άμμο με το ίδιο ποσοστό υγρασίας, οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 υπό αρνητική πολικότητα είναι υψηλότερες από αυτές που προέκυψαν υπό θετική πολικότητα. Εν προκειμένω, φαίνονται οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 για άμμο με 3% υγρασία, ενώ είναι εμφανής μια σημαντική διαφορά, της τάξης του 100%.

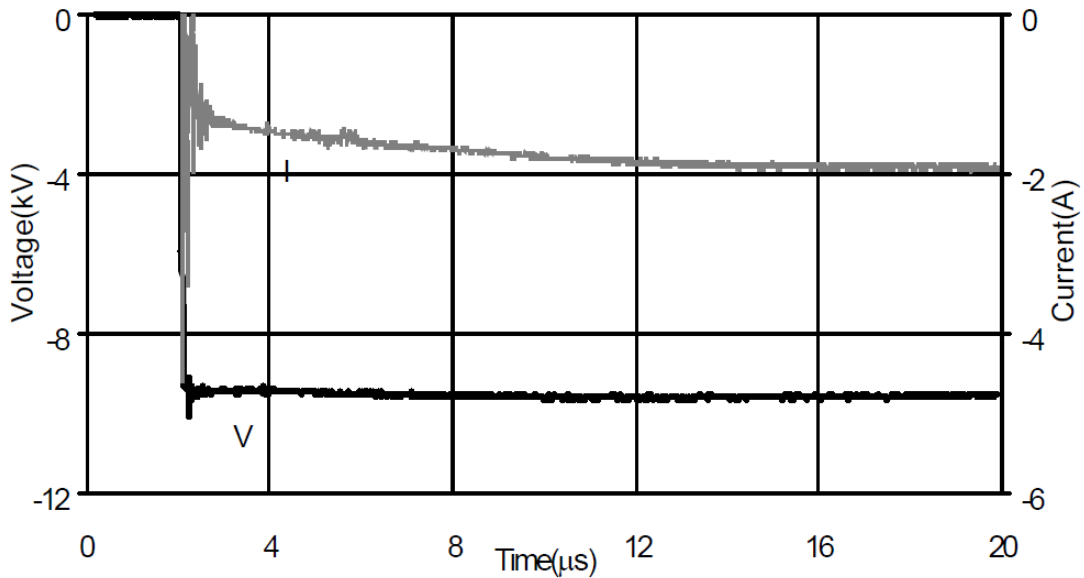
1.2.7.5 Χαρακτηριστικά της διάσπασης του εδάφους

Σε μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια δοκιμών, παρατηρήθηκαν παρόμοιες κυματομορφές της τάσης διάσπασης και του ρεύματος τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα. Οι τιμές της τάσης διάσπασης U_{50} για αρνητική πολικότητα μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο IEC 60. Βρέθηκε ότι η τάση διάσπασης U_{50} τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα είναι ανεξάρτητη του ποσοστού υγρασίας της άμμου. Από μετρήσεις κατά τη διάρκεια δοκιμών για αρνητική πολικότητα προέκυψε ένα μέσο μέγεθος της τάσης διάσπασης των 26,7 kV, το οποίο αντιστοιχεί σε E_{50} 9,8 kV/cm. Αυτή η τιμή είναι ελαφρώς υψηλότερη από την τιμή για θετική πολικότητα, η οποία είναι 25,5 kV με μια αντιστοιχούσα τιμή της E_{50} των 9,4 kV/cm. Και πάλι, αυτή η διαπίστωση είναι αναμενόμενη λόγω της επίδρασης της πολικότητας στη διάσπαση του αέρα. Τα παραπάνω αποτελέσματα συμφωνούν με αυτά που δημοσιεύτηκαν από τον Πετρόπουλο στα οποία η τάση διάσπασης του εδάφους υπό αρνητική πολικότητα ήταν πάντα υψηλότερη από την τάση διάσπασης του εδάφους υπό θετική πολικότητα.

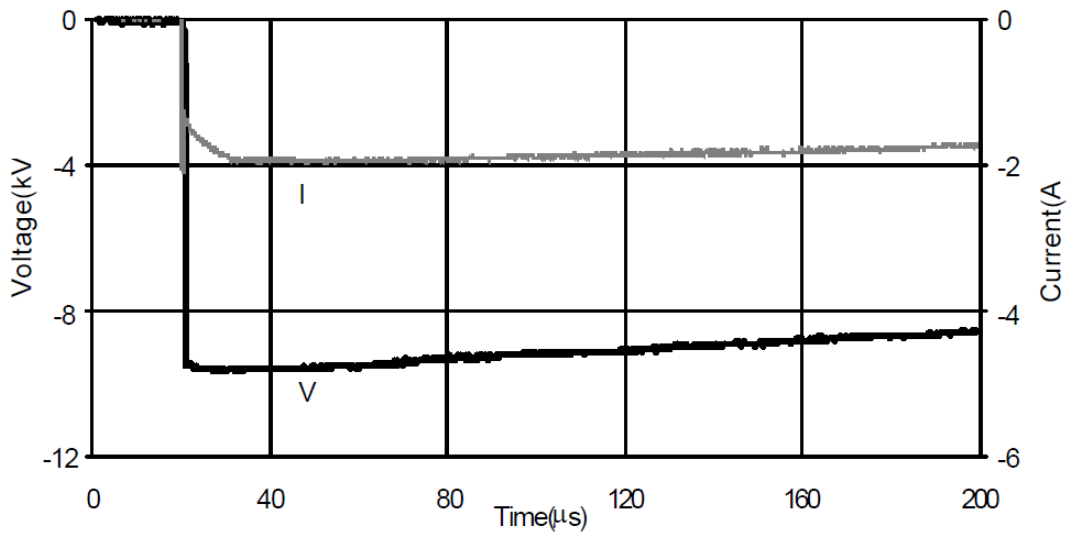
1.2.7.6 Επίδραση του μεγέθους των κόκκων του εδάφους

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η διαφορά στο μέγεθος των κόκκων του εδάφους επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο η υγρασία συγκρατείται μέσα στο έδαφος και, εκτός αυτού, επηρεάζει το μέγεθος των θυλάκων του αέρα που παγιδεύεται μέσα στο έδαφος, ο οποίος με τη σειρά του θα επηρεάσει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Τα δεδομένα για την ειδική αντίσταση του εδάφους για

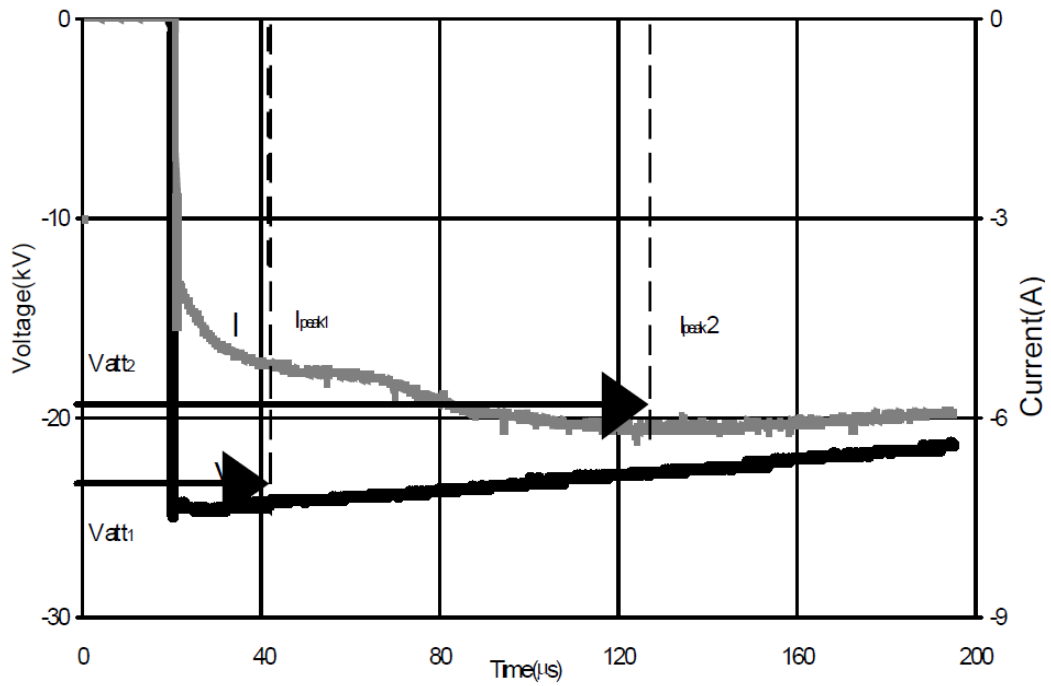
εδάφη με διαφορετικά μεγέθη κόκκων έχουν δημοσιευτεί τόσο από Βρετανικά όσο και από Αμερικανικά Πρότυπα.. Αυτά τα δεδομένα δείχνουν ότι, για τον ίδιο τύπο εδάφους, το λεπτόκοκκο έδαφος έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από ότι το έδαφος με μέσο ή μεγάλο μέγεθος κόκκων. Παρολ' αυτά, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτά τα δημοσιευμένα δεδομένα προέκυψαν για τάσεις DC και για τάσεις με συχνότητα δικτύου. Επομένως, η εγκυρότητα τους για κρουστικές συνθήκες είναι μάλλον περιορισμένη.



(α) Συνθήκες γραμμικής ηλεκτρικής αγωγής

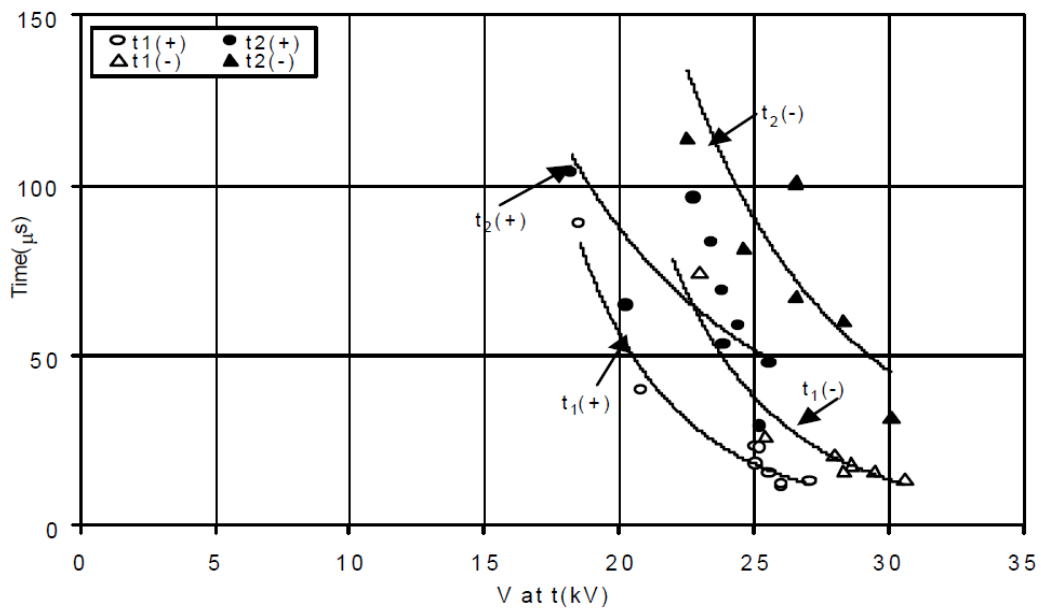


(β) Συνθήκες γραμμικής ηλεκτρικής αγωγής

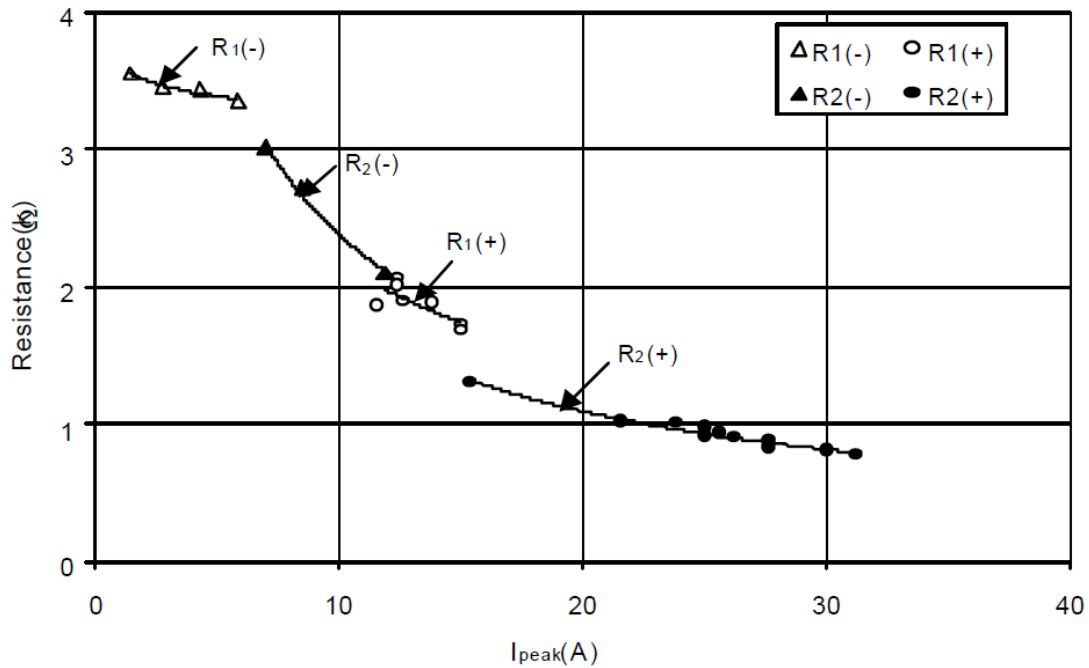


(γ) Συνθήκες μη γραμμικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

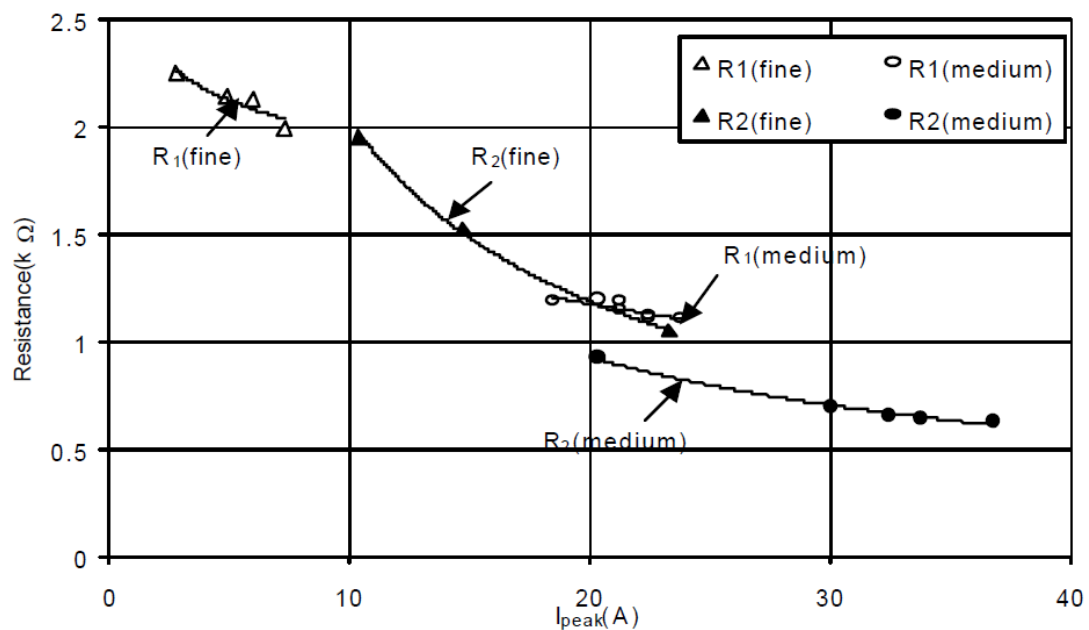
Εικόνα 1.16: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για κρουστικές συνθήκες υπό αρνητική πολικότητα (άμμος με 3% υγρασία) [5]



Εικόνα 1.17: Οι χρονικές παράμετροι t_1 και t_2 για άμμο με υγρασία 1% και για τις δύο πολικότητες. [5]



Εικόνα 1.18: Η επίδραση της πολικότητας στις τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 για άμμο με υγρασία 3%. [5]



Εικόνα 1.19: Προ του ιονισμού αντίσταση R_1 και μετά τον ιονισμό αντίσταση R_2 ως προς το μέγιστο του ρεύματος για άμμο με μέτριο και μικρό μέγεθος κόκκων και με υγρασία 5%. [5]

Η Εικόνα 1.19 δείχνει τις τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 για άμμο με μέτριο και μικρό μέγεθος κόκκων και υγρασία 5% για διάφορα μεγέθη ρεύματος. Και πάλι, για λεπτόκοκκη άμμο, παρατηρήθηκαν παρόμοιες τάσεις για τις προ του ιονισμού και μετά τον ιονισμό αντιστάσεις, R_1 και R_2 . Όμως, βρέθηκε ότι οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 για λεπτόκοκκη άμμο ήταν σημαντικά υψηλότερες από ότι για άμμο με

μέτριο μέγεθος κόκκων και μάλιστα για όλα τα ποσοστά υγρασίας. Αυτή η διαπίστωση αποδίδεται στη σχετικά υψηλότερη ειδική αντίσταση των λεπτόκοκκων εδαφών σε σχέση με τα εδάφη με μέτριο, σύμφωνα με τα δημοσιευμένα πρότυπα, μέγεθος κόκκων.

Η μέση τιμή της τάσης διάσπασης για αυτή τη διάταξη δοκιμών με υγρή λεπτόκοκκη άμμο είναι 26 kV, η οποία αντιστοιχεί σε E_{50} 9,5 kV/cm. Αυτή είναι η τιμή διαφέρει λιγότερο από 2% από την τιμή της E_{50} που μετρήθηκε για υγρή άμμο με μέτριο μέγεθος κόκκων, γεγονός που δείχνει ότι η τιμή της E_{50} είναι ανεξάρτητη του μεγέθους των κόκκων του εδάφους.

1.2.7.7 Κρουστική Αντίσταση της Άμμου σε Ομοιόμορφο Ηλεκτρικό Πεδίο

Στη συνέχεια, διεξήχθησαν κρουστικές δοκιμές με τη χρήση των παράλληλων πλακών, γεμίζοντας το μεταξύ τους κενό με υγρή άμμο πάχους 1 cm, 2 cm, 3 cm και 4 cm. Χρησιμοποιήθηκε ως μέσο δοκιμής άμμο με υγρασία 1%, 3%, 5%, 7% και 10%.

Βρέθηκε ότι το ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης για τα διάφορα μέσα δοκιμής είναι ανεξάρτητο του πάχους του εδάφους.

Οι μετρήσεις για υγρή άμμο πάχους 1 cm μεταξύ της διάταξης των παραλλήλων πλακών έδειξαν ότι η τιμή της αντίστασης (που μετρήθηκε ως εξής: $\frac{V_{at\ I_{peak}}}{I_{peak}}$) μειώθηκε με την αύξηση του μεγέθους του ρεύματος (Εικόνα 1.20), γεγονός που μπορεί να εξηγηθεί από τις θερμικές επιδράσεις που αυξάνει την ηλεκτρική αγωγή. Παρόλο που η αντίσταση μετρήθηκε πριν λάβει χώρα η διαδικασία του ιονισμού στο μέσο του δοκιμίου, οι τιμές της αντίστασης βρέθηκαν μικρότερες από αυτές που προέκυψαν για δοκιμές με DC ή AC ρεύμα, όπως προσδιορίστηκαν από μια παράλληλη έρευνα των Srisakot et al. Αυτό το γεγονός θεωρείται ότι οφείλεται στις θερμικές επιδράσεις, αλλά οι διαδικασίες κατανομής του νερού στο δοκίμιο θα μπορούν επίσης να συνεισφέρουν σε αυτή τη μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφών του δοκιμίου.

1.2.7.8 Ηλεκτρικό Πεδίο Κατωφλίου του Ιονισμού του Εδάφους (E_c)

Ιδανικά, η άμμος θα έπρεπε να αντικατασταθεί με ένα δείγμα εδάφους για κάθε μία δοκιμή καθώς δεν είναι ένα υλικό που επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση από μόνο του.

Παρόλ' αυτά, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, παρατηρήθηκαν στην επιφάνεια της άμμου λίγες οπές διαφορετικών μεγεθών μέσης διαμέτρου 0,5 cm και βάθους 1 cm. Βρέθηκε ότι ο αριθμός των οπών ήταν ίσος με τον αριθμό των διασπάσεων, γεγονός που δείχνει ότι είχε λάβει χώρα το φαινόμενο του ιονισμού για κάθε μία διάσπαση του εδάφους. Αυτή η διαπίστωση δεν προκάλεσε έκπληξη, από τη στιγμή που η διαδικασία ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου «ενθαρρύνει» την έναρξη εκκενώσεων στην άμμο.

Βρέθηκε ότι αυτό το ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης, το οποίο εν προκειμένω αντιστοιχεί στο κατώφλι ιονισμού του εδάφους, είναι ανεξάρτητο από το ποσοστό υγρασίας της άμμου και ανερχόταν στα 7,9 kV/cm για θετική πολικότητα. Επίσης, αυτή η τιμή E_c βρέθηκε ότι είναι μικρότερη από την αντοχή διάσπασης του αέρα. Αυτό το εύρημα είναι παρόμοιο με τα αποτελέσματα των Cabrera et al. για ειδική αντίσταση εδάφους μικρότερη των 100kΩm. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_c που προέκυψε από τις μετρήσεις με το δοκίμιο παράλληλων πλακών είναι υψηλότερη από το ηλεκτρικό πεδίο κατωφλίου που προέκυψε με την ημισφαιρική διάταξη ($E_c=5,5\text{kV/cm}$).

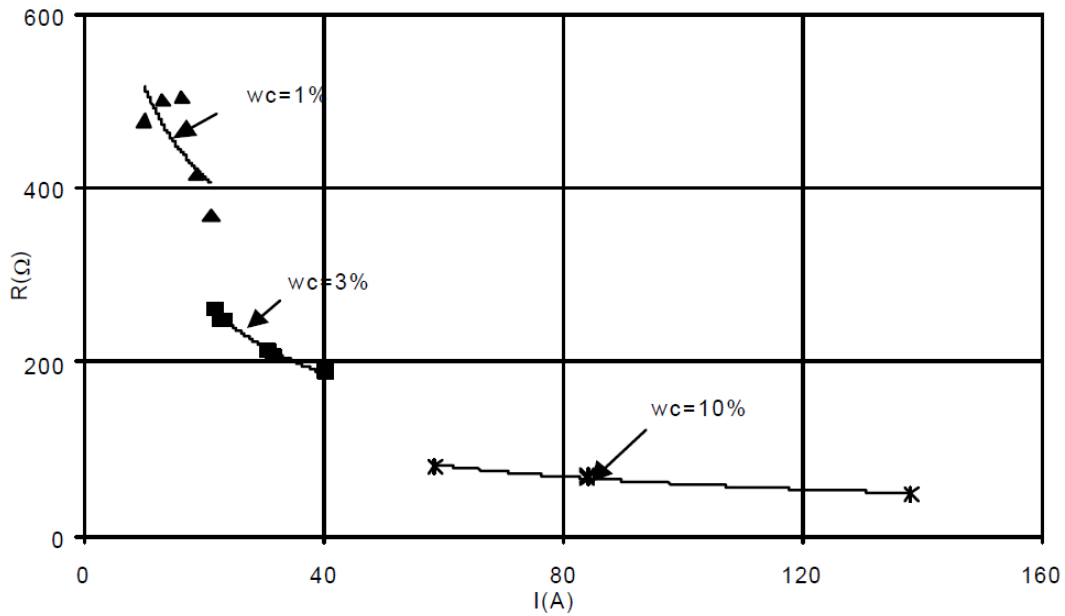
Οι μικρότερες διαστάσεις του δοκιμίου παράλληλων πλακών και η μικρή ποσότητα υγρής άμμου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια κάθε δοκιμής είχε μικρότερη επίδραση στις διαδικασίες ξήρανσης, θέρμανσης και κατανομής του νερού στην άμμο σε σχέση με το μεγαλύτερο σε μέγεθος ημισφαιρικό δοκίμιο.

Επιπλέον, όπως αναμενόταν, βρέθηκε ότι το ηλεκτρικό πεδίο κατωφλίου του ιονισμού του εδάφους είναι μεγαλύτερο υπό αρνητική πολικότητα (με ένα μέσο όρο των 9kV/cm για όλα τα δείγματα) από ότι για θετική πολικότητα (7,9kV/cm). Αυτή η διαφορά των τιμών για τις δύο πολικότητες είναι συγκρίσιμη με αυτή που μετρήθηκε για το ημισφαιρικό δοχείο.

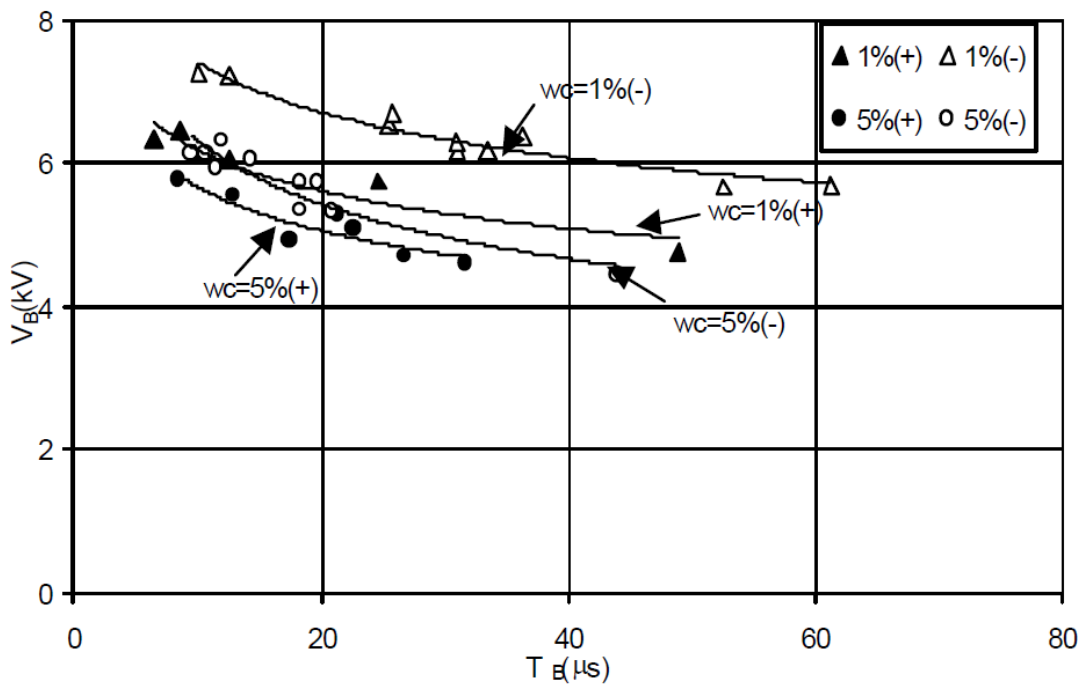
Αυτές οι διαφορές στα χαρακτηριστικά του εδάφους που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κρουστικές πολικότητες ενισχύουν την υπόθεση ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους αποδίδεται στη διαδικασία ιονισμού του εδάφους.

1.2.7.9 Χρονική Υστέρηση του Ιονισμού του Εδάφους

Όταν μετρήθηκε η χρονική στιγμή της διάσπασης (t_B), η οποία προσδιορίστηκε ως η χρονική στιγμή όπου παρατηρείται μια απότομη αύξηση στο ρεύμα ή πτώση της τάσης, βρέθηκε ότι είναι μικρότερη σε εδάφη υψηλής αγωγιμότητας και ότι μειώνεται με τη αύξηση της τάσης διάσπασης. Επίσης, βρέθηκε ότι η χρονική στιγμή t_B για αρνητική πολικότητα να είναι μεγαλύτερη από ότι η αντίστοιχη χρονική στιγμή για θετική πολικότητα. Η *Εικόνα 1.21* δείχνει την τάση διάσπασης, V_B , ως προς το χρόνο διάσπασης, t_B , για άμμο με υγρασία 1% και 5% και για τις δύο πολικότητες.



Εικόνα 1.20: Αντίσταση ως προς το μέγεθος του ρεύματος της διάταξης των παράλληλων πλακών με άμμο διαφορετικών ποσοστών υγρασίας στο μεταξύ τους διάκενο. [5]



Εικόνα 1.21: Τάση διάσπασης ως προς το χρόνο διάσπασης για άμμο με υγρασία 1% και 5% και θετικό και αρνητική πολικότητα. [5]

1.2.7.10 Συμπεράσματα

Στις προηγούμενες ενότητες, ερευνήθηκαν οι επιδράσεις της πολικότητας, του μεγέθους των κόκκων και του επίπεδου κατωφλιού στις ηλεκτρικές ιδιότητες του

εδάφους υπό κρουστικά ρεύματα. Βρέθηκε ότι οι αντιστάσεις προ του ιονισμού και μετά τον ιονισμό, R_1 και R_2 αντίστοιχα, καθώς και το ηλεκτρικό πεδίο κατωφλίου του ιονισμού, E_c , είναι υψηλότερα για αρνητική πολικότητα, ανεξαρτήτως του ποσοστού υγρασίας του εδάφους. Αυτή η παρατήρηση αποδίδεται στα χαρακτηριστικά διάσπασης των θυλάκων αέρα που παγιδεύονται μέσα στο έδαφος. Επιπροσθέτως, βρέθηκε ότι η διαδικασία του ιονισμού για αρνητική πολικότητα σε κρουστικές δοκιμές άρχιζε βραδύτερα και διαδιδόταν με βραδύτερους ρυθμούς μετά την έναρξη της διαδικασίας από ότι για θετική πολικότητα.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι για μέτριο μέγεθος κόκκων του εδάφους οι τιμές των αντιστάσεων προ του ιονισμού και μετά τον ιονισμό ήταν μικρότερες για δεδομένη εφαρμοζόμενη τάση και δεδομένο ποσοστό υγρασίας. Όμως, το μέγεθος των κόκκων του εδάφους δεν επηρέασε το ηλεκτρικό πεδίο κατωφλίου (πάνω από το οποίο ο ιονισμός έχει ήδη αρχίσει).

Χρησιμοποιώντας δοκίμιο με παράλληλες πλάκες, μια απλή μέτρηση της τάσης διάσπασης δίνει μια πιο ακριβή εκτίμηση του πεδίου κατωφλίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι την έναρξη του ιονισμού ακολουθεί στιγμιαία διάσπαση. Οι τιμές που μετρήθηκαν για αρνητική και θετική πολικότητα ήταν 9 kV/cm και 7,9 kV/cm αντίστοιχα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές είναι υψηλότερες από αυτές που προσδιορίστηκαν με το ημισφαιρικό δοκίμιο. Αυτή η διαφορά στις τιμές οφείλεται στη μη ομοιόμορφη κατανομή πεδίου στην περίπτωση του ημισφαιρικού δοκιμίου, η οποία βοηθάει τη γρήγορη εξέλιξη του ιονισμού. Επιπλέον, βρέθηκε ότι στις δοκιμές με το δοκίμιο παράλληλων πλακών η διάσπαση του εδάφους λάμβανε χώρα, παρά την ύπαρξη ενός «καναλιού αέρα» μέσω του οποίου έγινε προηγούμενη διάσπαση. Αυτή η διαπίστωση δείχνει ότι η διηλεκτρική αντοχή του εδάφους ήταν μικρότερη από αυτή του αέρα για όλα τα ποσοστά υγρασίας. Αυτές οι ενδείξεις επιβεβαιώθηκαν παρατηρώντας τα κανάλια διάσπασης σε κάθε σειρά δοκιμών.

1.3 Βιβλιογραφία

[1] Βαρβάρα Κατσάνου , «Μέθοδοι Υπολογισμού της Αντίστασης Συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, 2007, Θεσσαλονίκη

[2] Φανή Ασημακοπούλου, «Συμβολή Στη Μελέτη Του Ιονισμού Του Εδάφους», Διδακτορική διατριβή, 2011, Αθήνα

[3] Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνος, Ι.Α. Σταθόπουλος, «Αβεβαιότητα στον Υπολογισμό της Κρίσιμης Έντασης Ιονισμού του Εδάφους», 4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, 2012, Αθήνα

[4] N.Mohamad Nor, A.Haddad, H.Griffiths, «Characterization of Soil Ionization Phenomena in Soil under Fast Impulses», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.21, No.1, January 2006

[5] N.Mohamad Nor, A.Haddad, H.Griffiths, «Factors affecting soil characteristics under fast transients», *International Conference on Power Transients, IPST 2003 in New Orleans, USA*

[6] N. Mohamad Nor, A. Haddad, H. Griffiths, «Determination of Threshold Electric Field E_c of Soil Under High Impulse Currents», *2108 IEEE Transactions on Power Delivery*, VOL. 20, NO. 3, JULY 2005

Μοντέλα Κυκλωματικής Προσέγγισης του Ιονισμού

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μια αναδρομή σε συμπεράσματα προηγούμενων ερευνών για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς του εδάφους. Επίσης, εξετάζονται τα μοντέλα κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την προσομοίωση κρουστικών δοκιμών και παρατίθενται οι αλγόριθμοι που περιγράφουν τα μοντέλα αυτά.

2.1 Υπόβαθρο της Κυκλωματικής Προσέγγισης του Ιονισμού

Σε αυτήν την ενότητα, παρέχεται ένα σύντομο περίγραμμα προηγούμενης έρευνας πάνω στη μεταβατική συμπεριφορά ενός ηλεκτροδίου γείωσης. Συγκεκριμένα, μελετώνται οι υποθέσεις και οι περιορισμοί των υπάρχοντων μοντέλων. Επίσης, παρουσιάζονται θεμελιώδεις αρχές για την εξέταση της μεταβατικής συμπεριφοράς ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου και συνοψίζονται βελτιωμένα μοντέλα ιονισμού του εδάφους. Τέλος, εξηγείται η έννοια της δυναμικής σύνθετης αντίστασης ενός ηλεκτροδίου γείωσης.

2.1.1 Προηγούμενη Έρευνα

Οι πρώτες έρευνες που διεξήχθησαν από τους Towne (1929) και Sunde (1940) αποκάλυψαν μια σημαντική διαφορά της συμπεριφοράς ενός ηλεκτροδίου γείωσης μεταξύ της μεταβατικής κατάστασης και της μόνιμης κατάστασης. Περαιτέρω ολοκληρωμένες πειραματικές έρευνες από τους Bellaschi et al. (1942) πιστοποίησαν αυτήν την παρατήρηση για μια σειρά τύπων εδάφους και διατάξεων ηλεκτροδίου. Από τότε, κάποιοι ερευνητές ανέπτυξαν μοντέλα που συνυπολογίζουν αυτήν τη διαφορά στη συμπεριφορά (Chisholm και Janischewskyj, 1989; Geri, 1999; Korsuncev, 1958; Liew και Darveniza, 1974; Oettlé, 1988).

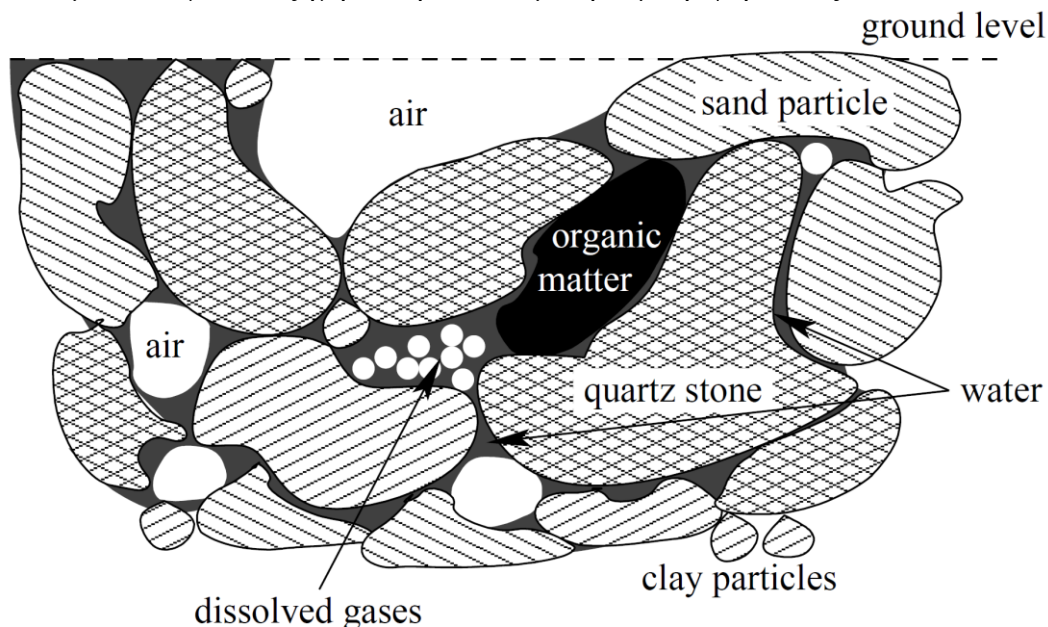
Πρόσφατα, θεωρείται σημαντική μια επανεξέταση και περεταίρω ποσοτικοποίηση αυτής της συμπεριφοράς εξαιτίας της αυξανόμενης ανάγκης για ασφαλή και αξιόπιστη παροχή ισχύος, συνοδευόμενη από την αυξανόμενη ευαισθησία του μοντέρνου ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε ζημιογόνες μεταβατικές καταστάσεις που προκαλούνται από κεραυνούς.

Η άμεση οικονομική επιρροή που έχει σε αυτό το πλαίσιο η μεταβατική συμπεριφορά ενός ηλεκτροδίου γείωσης δεν μπορεί να αποτιμηθεί επαρκώς, αφού η επωφελής επίδραση της διάσπασης που συμβαίνει στο περιβάλλον έδαφος είναι προφανής ακόμη και για ρεύματα 1 kA (Phillips et al., 2004).

Σε παλαιότερες έρευνες, έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη γείωση των πυλώνων μεταφοράς (CIGRE WG 33:01, 1991; Oettlé, 1988; Phillips et al., 2004), αφού αυτή η γείωση έχει σημαντική επίδραση στην αντικεραυνική προστασία και προσφέρει αποτελεσματική λειτουργία σε ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Από την άλλη μεριά, το δυναμικό μοντέλο το οποίο αρχικά προτάθηκε από τους Liew και Darveniza (1974) και στη συνέχεια τροποποιήθηκε από το Nixon (1999) για προσομοίωση της μεταβατικής κατάστασης στο πεδίο του χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιο ολοκληρωμένες και γενικές έρευνες, όσον αφορά τη συμπεριφορά των κεραυνών. Όμως, κοινός τόπος σε όλα τα υπάρχοντα μοντέλα είναι το γεγονός ότι πρέπει να εισαχθούν κάποιες υποθέσεις-κλειδιά για την απλοποίηση των μοντέλων. Επιπλέον, δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως οι ακριβείς φυσικές διαδικασίες που συμβαίνουν στο έδαφος (βλ. επόμενη ενότητα).

2.1.2 Υποθέσεις και περιορισμοί στα υπάρχοντα μοντέλα

Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.1*, το έδαφος αποτελείται τυπικά από διάφορα συστατικά, συμπεριλαμβανομένων, για παράδειγμα, του νερού, των θυλάκων αέρα, των χαλικιών, της άμμου, του πηλού, των διαλυμένων στο έδαφος αερίων, των μεταλλικών αλάτων και της οργανικής ύλης (Oettlé, 1987). Όλα αυτά τα συστατικά επηρεάζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Παρόλο που τα χαρακτηριστικά διάσπασης των συνιστώντων στερεών, υγρών και αερίων διηλεκτρικών έχουν κατανοηθεί αρκετά καλά για το κάθε ένα συστατικό στοιχείο ξεχωριστά (Kuffel et al., 2000), δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα ένα ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο για να εξηγήσει τη συνισταμένη συμπεριφορά τους.



Εικόνα 2.1: Τυπική σύσταση του εδάφους.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από υψηλές πυκνότητες ρεύματος καταλήγει σε κανάλια εκκενώσεων εντός των διεπαφών του νερού και των

αερίων τα οποία υπάρχουν μέσα στο έδαφος που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο (Oettlé, 1987). Από τη στιγμή που η ειδική αντίσταση του πλάσματος στα κανάλια των εκκενώσεων είναι μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος εδάφους υπάρχει μια προφανής μείωση της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου. Αυτό το φαινόμενο συνήθως αναφέρεται ως ιονισμός του εδάφους.

Συνήθως, λαμβάνονται υπόψη τρεις απλοποιήσεις κατά τη μοντελοποίηση του συνθέτου σεναρίου που περιγράφεται από πάνω (Mousa, 1994; Oettlé, 1988):

1. Το έδαφος θεωρείται ομοιόμορφο και ομογενές.
2. Η διάσπαση στο περιβάλλον έδαφος θεωρείται ότι συμβαίνει εντός μια ομοιόμορφης ζώνης.
3. Διαφορετικοί τύποι εδάφους θεωρούνται ότι έχουν την ίδια διηλεκτρική αντοχή ανεξαρτήτως του ποσοστού υγρασίας ή των συνιστώντων στοιχείων.

Μια τέταρτη απλοποίηση που λαμβάνεται υπόψη συχνά είναι η αγνόηση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους στη βάση ότι το μοντέλο που προκύπτει αναπαριστά ένα συντηρητικό σενάριο ή ένα σενάριο της χειρότερης περίπτωσης. Ειδικότερα, αυστηρές προσομοιώσεις της ηλεκτρομαγνητικής μεταβατικής κατάστασης για συστήματα γείωσης, βασισμένες στην ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας, δε λαμβάνουν υπόψη τον ιονισμό του εδάφους αφού είναι πολύ δύσκολο να συμπεριληφθεί αυτό το μη γραμμικό φαινόμενο (Dawalibi et al., 1995).

Σε οικονομικό επίπεδο, είναι δύσκολο να αγνοηθεί η επωφελής επίδραση που προκύπτει από τον ιονισμό του εδάφους, ειδικά αφού αυτό η επίδραση είναι πιο έντονη για κακές συνθήκες του εδάφους. Συνεπώς, η αδυναμία υπολογισμού της επωφελούς επίδρασης οδηγεί στο σχεδιασμό ακριβότερων και ανεπαρκών συστημάτων γείωσης.

Παρόλο που οι υποθέσεις που παρατίθενται παραπάνω μοιάζουν μη ρεαλιστικές, βοηθούν στη διαμόρφωση πρακτικών μοντέλων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες μηχανικής και να έχουν ικανοποιητικά για τις μελέτες αποτελέσματα. Η πιο σημαντική πτυχή είναι ότι οι θεμελιώδεις παράμετροι, όπως για παράδειγμα το ποσοστό υγρασίας, οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία ενός ηλεκτροδίου γείωσης (IEEE Std 80, 2000) ποικίλουν τόσο πολύ που είναι δύσκολο να προκύψουν ακριβείς προβλέψεις και συχνά είναι καλύτερο να εξετάζονται τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια της λειτουργίας.

2.1.3 Ιονισμός του Εδάφους για ένα Ημισφαιρικό Ηλεκτρόδιο γείωσης

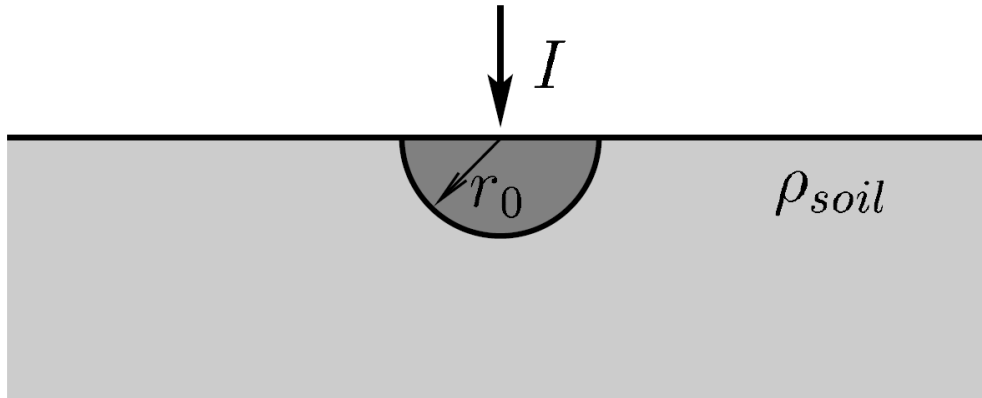
Στην παρούσα ενότητα, εξετάζεται η συμπεριφορά ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου (CIGRE WG 33:01, 1991), με σκοπό να παρουσιαστούν οι θεμελιώδεις αρχές και παράμετροι που εμπλέκονται στη μη γραμμική μεταβατική συμπεριφορά ενός ηλεκτροδίου γείωσης.

Θεωρούμε, λοιπόν, ένα βασικό ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο θαμμένο σε ομογενές έδαφος με συγκεκριμένη ειδική αντίσταση (βλ. Εικόνα 2.2). Η αντίσταση μόνιμης κατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$R_0 = \frac{\rho_{soil}}{2\pi r_0} \quad (2.1)$$

Όπου:

- R_0 η αντίσταση μόνιμης κατάστασης για ένα ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο [Ω]
- ρ_{soil} η ειδική αντίσταση του εδάφους [Ωm]
- r_0 η ακτίνα του ημισφαιρικού ηλεκτροδίου [m]



Εικόνα 2.2: Ένα τέλεια αγώγιμο ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο γείωσης ακτίνας r_0 , θαμμένο σε ομογενές έδαφος με ειδική αντίσταση ρ_{soil} και με εγχεόμενο ρεύμα I .

Όταν ένα δοθέν κρουστικό ρεύμα εγχέεται μέσα στο ηλεκτρόδιο, η πυκνότητα του ρεύματος σε μια ορισμένη ακτίνα στο περιβάλλον έδαφος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.2)$$

Όπου:

- J η πυκνότητα του ρεύματος [A/m^2]
- I το μέτρο του εγχεόμενου ρεύματος [A]
- r η ακτίνα που μας ενδιαφέρει [m]

Θεωρείται ότι ο ιονισμός του εδάφους συμβαίνει όταν η πυκνότητα του ρεύματος του προκύπτοντος ηλεκτρικού πεδίου στο έδαφος υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλιού που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$J_c = \frac{E_0}{\rho_{soil}} \quad (2.3)$$

Όπου:

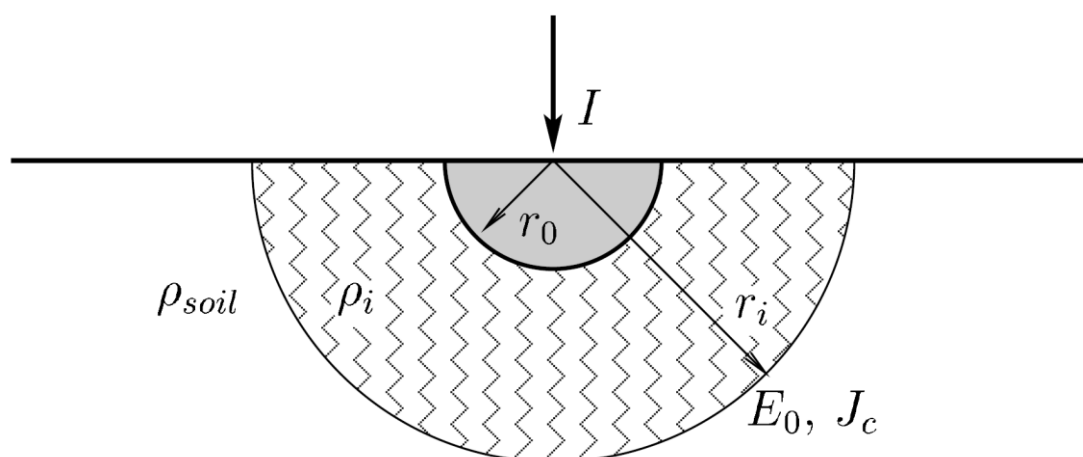
- J_c η κρίσιμη πυκνότητα του ρεύματος [A/m^2]
- E_0 το κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο [V/m]
- ρ_{soil} η ειδική αντίσταση του εδάφους [Ωm]

Από την Εξίσωση (2.3), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η ακτίνα της ζώνης ιονισμού του εδάφους που φαίνεται στην *Εικόνα 2.3*:

$$r_i = \sqrt{\frac{\rho_{soil} I}{2\pi E_0}} \quad (2.4)$$

Όπου:

- r_i η ακτίνα της ζώνης ιονισμού του εδάφους [m]
- ρ_{soil} η ειδική αντίσταση του εδάφους [Ωm]
- I το μέτρο του εγγεόμενου ρεύματος [A]
- E_0 το κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο [V/m]



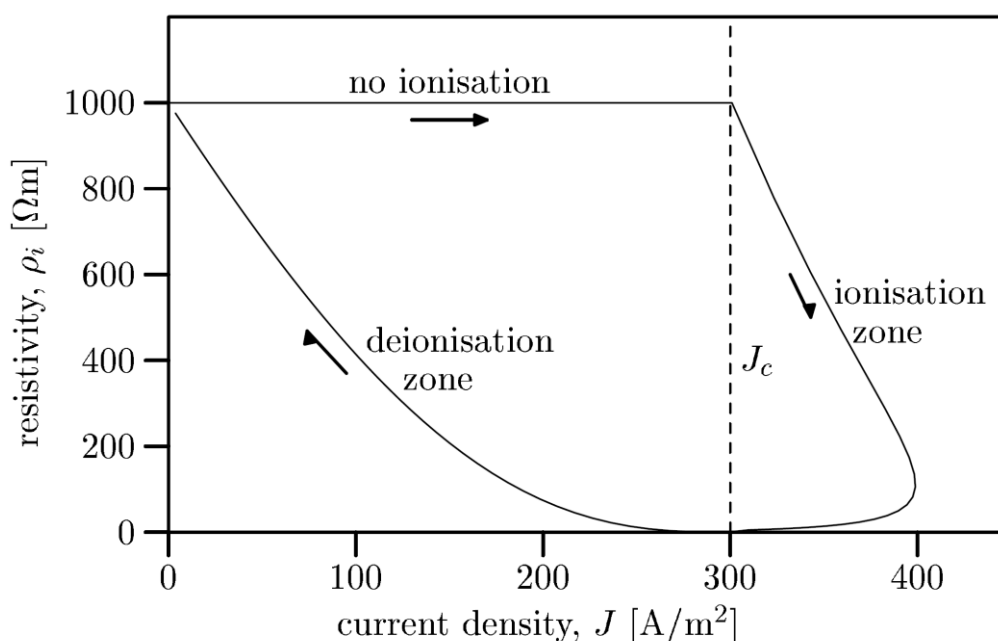
Εικόνα 2.3: Ένα τέλειο αγώγιμο ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο γείωσης ακτίνας r_0 θαμμένο σε ομογενές έδαφος ειδικής αντίστασης ρ_{soil} και στο οποίο εγγέεται ρεύμα I . Η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ρ_i και η ακτίνα της r_i εξαρτάται από την $E_0(J_c)$.

Η προηγούμενη ανάλυση υποθέτει εμμέσως ότι ο ιονισμός συνβαίνει εντός μιας ομοιόμορφης ζώνης γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης. Οι Bellaschi et al. (1942) και ο Πετρόπουλος (1948) πρότειναν ότι η ειδική αντίσταση αυτής της ζώνης, ρ_i , στιγμιαία λαμβάνει την ίδια τιμή με αυτή του ηλεκτροδίου γείωσης. Με άλλα λόγια, ο ιονισμός του εδάφους μοντελοποιείται με μια αύξηση της δραστηκής ακτίνας του ηλεκτροδίου. Δεδομένης της απλότητάς του, αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει τη συμπεριφορά μίας κινούμενης ράβδου σε ευρύτερες μελέτες παρά την έλλειψη ακρίβειας.

2.1.4 Βελτιωμένα Μοντέλα Ιονισμού του Εδάφους

Οι Liew και Darveniza (1974) έκαναν βελτιώσεις στο βασικό μοντέλο που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα αναπτύσσοντας ένα μοντέλο που

παρουσιάζει μια δυναμική ειδική αντίσταση όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.4*. Στην ουσία, το μοντέλο υποθέτει ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε διαφορετικές αποστάσεις από το ηλεκτρόδιο γείωσης μεταβάλλεται ως συνάρτηση του ρεύματος και του χρόνου. Αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις φυσικές χρονικές σταθερές που περιλαμβάνονται στη διαδικασία. Αυτό το μοντέλο μορφοποιήθηκε και υλοποιήθηκε στο λογισμικό ATP-EMTP (Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program) (Meyer και Liu, 1982) από το Nixon (1999) επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη χρήση του στο πλαίσιο ευρύτερων μελετών για ολοκληρωμένη αντικεραυνική προστασία. Περαιτέρω έρευνα που διεξήχθη από τους Yasuda et al. (2003) έδειξε συνοχή μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με το μοντέλο και των πειραματικών αποτελεσμάτων για ρεύματα μέχρι 120kA που εγχέονται στη βάση πυλώνα γραμμής μεταφοράς 500kV.



Εικόνα 2.4: Απεικονιστική περιγραφή της δυναμικής ειδικής αντίστασης που προτείνεται από τους Liew και Darveniza (1974). Τα βέλη δείχνουν την εξέλιξη με την πάροδο του χρόνου.

Πιο πρόσφατα, παρουσιάστηκε μια επέκταση του μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους Liew και Darveniza (1974), η οποία λαμβάνει υπόψη διακριτής επιφάνειας βραχυκυκλώματα που παρατηρούνται κάτω από ειδικές συνθήκες (Wang et al., 2005). Όμως, εισάγονται κάποιες επιπρόσθετες εμπειρικές παράμετροι, που μειώνουν τη χρησιμότητα για τη μηχανική του μοντέλου.

Το 2006, δημοσιεύτηκε μια πολύ διαφορετική προσέγγιση από τους Sekioaka et al. (2006) που παρατήρησαν ότι η μη γραμμική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου γείωσης ομοιάζει με αυτή του τόξου υψηλής τάσης. Πρότειναν, λοιπόν, ένα εναλλακτικό

μοντέλο, το οποίο βασίζεται στο ευρέως αποδεκτό μοντέλο για τόξο Cassie-Mayr (CIGR_E WG 13:01, 1993), που εξετάζει την ενεργειακή ισορροπία του εδάφους. Όσον αφορά τη συμπεριφορά ή τη λειτουργία ενός ηλεκτροδίου γείωσης, είναι πιο βολικό να εξεταστεί η σχέση τάσης-ρεύματος που αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

2.1.5 Δυναμική Σύνθετη Αντίσταση ενός Ηλεκτροδίου Γείωσης

Για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, ένα ηλεκτρόδιο γείωσης περιγράφεται από την αντίσταση του προς τη γη. Όμως, για κατάσταση μεταβατικής λειτουργίας, είναι σημαντικό να εξεταστεί η δυναμική σύνθετη αντίσταση, όπως προτείνουν οι Nixon και Jandrell (2004). Η δυναμική σύνθετη αντίσταση ενός ηλεκτροδίου γείωσης είναι ο λόγος της στιγμιαίας τιμής της τάσης του ηλεκτροδίου γείωσης προς τη στιγμιαία τιμή του εγγεόμενου ρεύματος:

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (2.5)$$

Όπου:

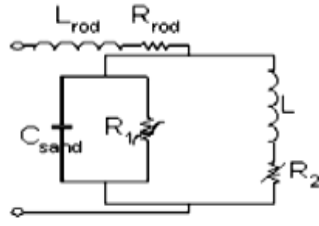
- t ο χρόνος [s]
- $Z(t)$ η δυναμική σύνθετη αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης τη χρονική στιγμή t [Ω]
- $V(t)$ το δυναμικό του ηλεκτροδίου γείωσης σε σχέση με το πραγματικό δυναμικό της γης τη χρονική στιγμή t [V]
- $I(t)$ το ρεύμα που ρέει στο ηλεκτρόδιο γείωσης τη χρονική στιγμή t [A]

2.2 Κυκλωματικά Μοντέλα Ιονισμού

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα που έχουν προταθεί για την αναπαράσταση της διαδικασίας του ιονισμού και πάνω στα οποία βασίστηκαν οι προσομοιώσεις, που διεξήχθησαν με τη βοήθεια του λογισμικού ATP-EMTP. Επίσης, παρατίθενται οι αλγόριθμοι περιγραφής των μοντέλων.

2.2.1 Κυκλωματικό Μοντέλο των Nor et al.

Οι μετρήσεις υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών τάσεων, οι οποίες εφαρμόστηκαν από τους Nor et al. σε δείγματα εδάφους, έδωσαν κυματομορφές ρεύματος με δύο μέγιστες τιμές (κορυφές). Αυτό οδήγησε τους Nor et al. στη διαμόρφωση ενός ισοδύναμου κυκλώματος το οποίο αποτελείται από δύο παράλληλους κλάδους, οι οποίοι, με τη σειρά τους, αναπαριστούν το προ του ιονισμού και το μετά τον ιονισμό στάδιο αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.5*.



Εικόνα 2.5: Το κύκλωμα ιονισμού που πρότειναν οι Nor et al.

Η προ του ιονισμού αντίσταση, R_1 , εκφράζει την αγωγή συμπεριφορά η οποία σχετίζεται με τις θερμικές επιδράσεις και την αλληλεπίδρασή τους με τις ιδιότητες και τη δομή του εδάφους. Η μετά τον ιονισμό αντίσταση, R_2 , αντιπροσωπεύει την τελική κατάσταση αγωγιμότητας, αφότου, δηλαδή, η διαδικασία του ιονισμού έχει φτάσει στην πλήρη έκτασή της και άρα η τιμή της είναι πάντα μικρότερη από την προ του ιονισμού αντίσταση R_1 . Οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις δύο μέγιστες τιμές του ρεύματος (στις κορυφές των κυματομορφών ρεύματος) και τις αντίστοιχες στιγμιαίες τάσεις, όπως στις εξισώσεις (1) και (2). Το στοιχείο αυτεπαγωγής L εισάγει την απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση για την επέκταση της ζώνης ιονισμού.

$$R_1 = \frac{V_{I_{peak1}}}{I_{peak1}} \quad (2.6)$$

$$R_2 = \frac{V_{I_{peak2}}}{I_{peak2}} \quad (2.7)$$

2.2.1.1 Αλγόριθμος Περιγραφής του κυκλωματικού μοντέλου των Nor et al.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις και έχοντας υπόψη το κυκλωματικό μοντέλο που προτείνεται από τους Nor et al. (βλ. Εικόνα 2.5), μπορεί να παραχθεί ένας αλγόριθμος για το μοντέλο που προβλέπει τη δυναμική αντίσταση μιας διάταξης ηλεκτροδίου γείωσης για κάθε χρονική στιγμή.

Ακολουθεί ο αλγόριθμος του μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί αντίσταση διάταξης ηλεκτροδίου γείωσης συμπεριλαμβάνοντας το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους. Στα άγκιστρα περιλαμβάνονται τα σχόλια.

	Είσοδος: t	{από τον εξωτερικό προσομοιωτή κυκλώματος}
	Έξοδος: R	{επιστροφή στον εξωτερικό προσομοιωτή}
1:	$R_1 \leftarrow \frac{V_{I_{peak1}}}{I_{peak1}}$	{αρχικοποίηση της R_1 από την Εξίσωση (2.6)}
2:	$R_2 \leftarrow \frac{V_{I_{peak2}}}{I_{peak2}}$	{αρχικοποίηση της R_2 από την Εξίσωση (2.7)}
3:	$Z_1 \leftarrow \left(\frac{1}{j\omega C_{sand}} \right) // R_1$	{σύνθετη αντίσταση στον πρώτο κλάδο}

- 4: $Z_2 \Leftarrow R_2 + j\omega L$ {σύνθετη αντίσταση στο δεύτερο κλάδο}
- 5: **αν** $t < t_{\text{SWITCH}}$ **τότε** {πριν το χρόνο έναρξης του ιονισμού}
- 6: $R \Leftarrow |Z_1|$
- 7: **αλλιώς** {μετά το χρόνο έναρξης του ιονισμού}
- 8: $Z_{o\lambda} \Leftarrow Z_1 // Z_2$ {ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση δύο παράλληλων κλάδων}
- 9: $R \Leftarrow |Z_{o\lambda}|$
- 10: **τέλος**

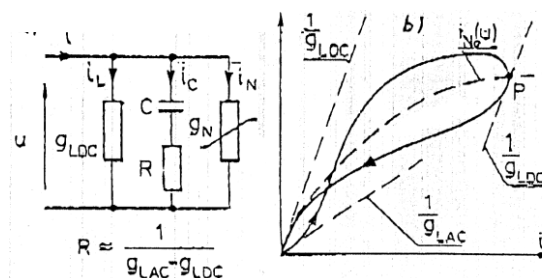
Ο αλγόριθμος παίρνει ως είσοδο την τιμή του χρόνου από μια εξωτερική προσομοίωση κυκλώματος και επιστρέφει την αντίσταση γείωσης ενός ηλεκτροδίου γείωσης. Αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά στοιχεία:

- *Γραμμές 1-2:* Απόδοση αρχικών τιμών στις αντιστάσεις R_1 και R_2 .
- *Γραμμή 3-4:* Υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων των 2 παράλληλων κλάδων (οι οποίοι αντικατοπτρίζουν τα προ του ιονισμού και μετά τον ιονισμό στάδια).
- *Γραμμή 5-6:* Επιστροφή της αντίστασης του πρώτου κλάδου στην περίπτωση που δεν έχει ξεκινήσει ο ιονισμός.
- *Γραμμές 7-9:* Επιστροφή της ισοδύναμης αντίστασης των δύο αντιστάσεων των αντίστοιχων παράλληλων κλάδων στην περίπτωση που έχει ξεκινήσει να λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του ιονισμού.

Ο παραπάνω αλγόριθμος, ο οποίος περιγράφει το μοντέλο που προτάθηκε από τους Nor et al., χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των κρουστικών δοκιμών τόσο με ραβδοειδές ηλεκτρόδιο όσο και με συστοιχία ράβδων.

2.2.2 Κυκλωματικό Μοντέλο των Kalat, Loboda et al.

Βασιζόμενοι στις πειραματικές καμπύλες I-V, οι Kalat, Loboda et al. πρότειναν το δυναμικό μοντέλο αγωγιμότητας της άμμου που φαίνεται στην *Εικόνα 2.6*.



Εικόνα 2.6: Το μοντέλο που προτείνεται από τους Kalat, Loboda et al. για δείγμα αμμώδους εδάφους [2]

Η αγωγιμότητα του εδάφους για μικρές τιμές ρεύματος λαμβάνεται υπόψη από τα γραμμικά στοιχεία g_{LDC} και g_{LAC} . Το σχήμα βρόχου που έχει η καμπύλη μεταφράζεται ως μία μη γραμμική αγωγιμότητα g_N η οποία περιγράφεται από τη χαρακτηριστική της σταθερής κατάστασης (2.8) και τη διαφορική εξίσωση (2.9).

$$i_{No} = Au^a \quad (2.8)$$

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{1}{T} [i_{No}(u) - i_N] \quad (2.9)$$

Το μοντέλο συμπληρώνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$ug_{LDC} + i_C + i_N = i(t) \quad (2.10)$$

$$R_0 i_C + \frac{1}{C} \int i_C dt = u \quad (2.11)$$

2.2.2.1 Αλγόριθμος Περιγραφής του Κυκλωματικού Μοντέλου των Kalat, Loboda et al.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις και λαμβάνοντας υπόψη το κυκλωματικό μοντέλο που προτείνεται από τους Kalat, Loboda et al. (βλ. Εικόνα 2.6), μπορεί να παραχθεί ένας αλγόριθμος για το μοντέλο που προβλέπει τη δυναμική αντίσταση μιας κινητής ράβδου για μια συγκεκριμένη κρουστική τάση.

Ακολουθεί ο αλγόριθμος του μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η δυναμική αντίσταση διάταξης ηλεκτροδίου γείωσης συμπεριλαμβάνοντας το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους. Στα άγκιστρα περιλαμβάνονται τα σχόλια.

- | | | |
|----|---|--|
| | Είσοδος: t και $V(t)$ | {από τον εξωτερικό προσομοιωτή κυκλώματος} |
| | Έξοδος: R_{rod} | {επιστροφή στον εξωτερικό προσομοιωτή} |
| 1: | $R_0 \leftarrow \frac{1}{g_{LAC} - g_{LDC}}$ | {Αρχικοποίηση της R_0 } |
| 2: | $V_{abs} \leftarrow V(t) $ | |
| 3: | $V_a \leftarrow Ae^{a \cdot \ln V_{abs}}$ | {α καθορίζεται αυθαίρετα και $A = \frac{I_{max}}{(V_{I_{max}})^a}$ } |
| 4: | $\mathcal{L} \left(\frac{I_n(t)}{V_a(t)} \right) \leftarrow \frac{1}{1 + \tau s}$ | |
| 5: | $\mathcal{L} \left(\frac{I_c(t)}{V(t)} \right) \leftarrow \frac{s}{\frac{1}{C} + R_0 s}$ | |
| 6: | $I_g \leftarrow g_{LDC} V$ | |
| 7: | $I \leftarrow I_n + I_c + I_g$ | {Συνολικό ρεύμα I } |
| 8: | $R_{rod} \leftarrow \frac{V_{abs}}{I}$ | {Αντίσταση ράβδου R_{rod} } |

Ο αλγόριθμος παίρνει ως εισόδους την τιμή του χρόνου και την τάση από μια εξωτερική προσομοίωση κυκλώματος και επιστρέφει την αντίσταση γείωσης ενός ραβδοειδούς ηλεκτροδίου γείωσης. Αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά στοιχεία:

- Γραμμές 1-3: Αρχικοποίηση.
- Γραμμές 4-7: Υπολογισμός και άθροισμα των ρευμάτων των τριών κλάδων του κυκλωματικού μοντέλου.
- Γραμμή 8: Επιστροφή της αντίστασης της ράβδου.

Ο παραπάνω αλγόριθμος, ο οποίος περιγράφει το μοντέλο που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al., χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των κρουστικών δοκιμών με ραβδοειδές ηλεκτρόδιο.

2.2.3 Κυκλωματικό Μοντέλο του Nixon

Το δυναμικό μοντέλο που είχε προταθεί αρχικά από τους Liew και Darveniza (1974) και στη συνέχεια τροποποιήθηκε και υλοποιήθηκε σε ένα πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικής μεταβατικής ανάλυσης από το Nixon (1999) χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί η μεταβατική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου γείωσης. Σε αυτό το μοντέλο, οι μη γραμμικές επιδράσεις του ιονισμού στο έδαφος που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο λογίζονται εισάγοντας δύο χρονικές σταθερές τ_i και τ_d , οι οποίες περιγράφουν τη μεταβαλλόμενη ειδική αντίσταση στο περιβάλλον έδαφος υπό κρουστικές συνθήκες. Άλλα μοντέλα και υπολογισμοί, σαν αυτά που προτείνονται από τους Oettlé (1988), Chisholm και Janischewskyj (1989) και CIGRE WG 33:01 (1991), είναι πολύτιμα εργαλεία που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς της επίδρασης των κεραυνών σε γραμμή μεταφοράς, αλλά δεν προορίζονται για την περιγραφή της πλήρους χρονικά μεταβαλλόμενης υστέρησης που παρατηρείται σε πρακτικά πειράματα (Bellaschi et al., 1942; Geri & Veca, 1994; Kosztaluk et al., 1981; Liew και Darveniza, 1974).

Η πλήρης απόκριση του ηλεκτροδίου γείωσης στο πεδίο του χρόνου είναι απαραίτητη για την παρούσα έρευνα.

Η παραγωγή και η υλοποίηση του δυναμικού μοντέλου περιγράφεται στις ακόλουθες ενότητες. Ουσιαστικά, το μοντέλο περιγράφει την δυναμικά μεταβαλλόμενη ειδική αντίσταση στο έδαφος που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο γείωσης. Αυτό το μοντέλο αποτελείται από τα ακόλουθα τρία συστατικά στοιχεία ή ζώνες (Liew & Darveniza, 1974):

1. Τη ζώνη όπου δεν υπάρχει καθόλου ιονισμός στο έδαφος και όπου η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή.
2. Την περιοχή όπου η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος έχει ξεπεραστεί και η ειδική αντίσταση μειώνεται με την πάροδο του χρόνου μέχρι μια ελάχιστη τιμή καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του ρεύματος.

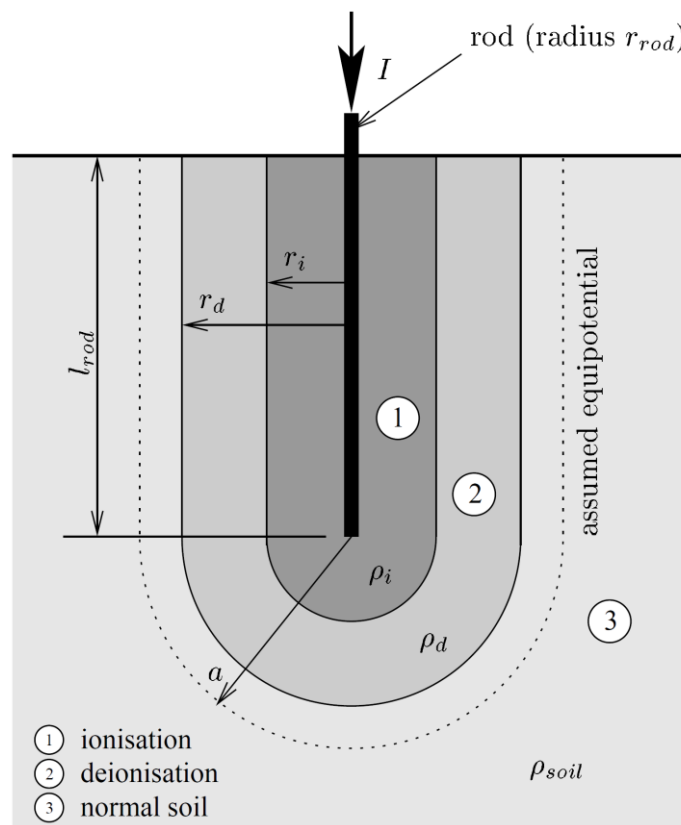
3. Την περιοχή όπου δεν υπάρχει πλέον υπέρβαση της κρίσιμης πυκνότητας του ρεύματος σε μια ζώνη ιονισμού και όπου η ειδική αντίσταση επανακάμπει καθώς το έδαφος απιονίζεται.

Αυτά τα συστατικά στοιχεία φαίνονται στην καμπύλη περιγραφής της ειδικής αντίστασης που φαίνεται στην *Εικόνα 2.4*. Στην ακόλουθη ενότητα αναλύεται η παραγωγή του μοντέλου.

2.2.3.1 Κυκλωματικό Μοντέλο

Θεωρούμε μία ενιαία ράβδο μήκους l_{rod} και ακτίνας r_{rod} θαμμένη σε ομογενές έδαφος με ειδική αντίσταση ρ_{soil} όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.7*. Πρέπει, κατ' αρχάς, να γίνουν κάποιες υποθέσεις για το κυκλωματικό μοντέλο, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

2.2.3.1.1 Αρχικές Υποθέσεις



Εικόνα 2.7: Απλοποιημένο μοντέλο για την σύνθετη αντίσταση κατακόρυφης ράβδου που δείχνει τις ζώνες ιονισμού και απιονισμού τις οποίες υπέθεσαν οι Liew και Darveniza (1974).

Γίνονται, λοιπόν, οι ακόλουθες αρχικές υποθέσεις σε σχέση με το ηλεκτρόδιο γείωσης που φαίνεται στην *Εικόνα 2.7*:

- Το έδαφος που περιβάλλει την κατακόρυφη ράβδο είναι ομογενές και ιστροπικό με ειδική αντίσταση ρ_{soil} .
- Ένα εγχεόμενο κρουστικό ρεύμα, I , έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ισοδυναμικών επιφανειών που μπορούν να προσεγγιστούν από ένα κυλινδρικό και ημισφαιρικό τμήμα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.7*.
- Η πυκνότητα του ρεύματος, J , στο έδαφος σε μια ακτινική απόσταση, a , από το κέντρο της ράβδου μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$J = \frac{I}{2\pi(al_{rod} + a^2)} \quad (2.11)$$

- Η διάσπαση λόγω ιονισμού συμβαίνει στο έδαφος όπου η πυκνότητα του ρεύματος υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή της πυκνότητας του ρεύματος που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$J_c = \frac{E_0}{\rho_{soil}} \quad (2.12)$$

- Οι περιοχές ιονισμού και απιονισμού θεωρούνται ομοιόμορφες όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.7* και η ειδική αντίσταση σε αυτές τις περιοχές του εδάφους είναι συνάρτηση του χρόνου.

2.2.3.1.2 Προσδιορισμός της Ενεργής Αντίστασης Κατακόρυφης Ράβδου

Κάνοντας χρήση των υποθέσεων που παρατέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι Liew και Darveniza (1974) προσδιορίζουν την ενεργή αντίσταση μιας ενιαίας κινητής ράβδου, R_{rod} , αθροίζοντας στοιχειώδη κελύφη αντίστασης, dR , τα οποία δίνονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$dR = \frac{\rho_a}{2\pi l_{rod}} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a+l_{rod}} \right) da \quad (2.13)$$

Όπου:

- ρ_a η ειδική αντίσταση του στοιχειώδους κελύφους [Ωm]
- da το πάχος του στοιχειώδους κελύφους [m]

Αυτά τα στοιχειώδη κελύφη εμπίπτουν σε τρεις διαφορετικές περιοχές όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.7*:

Στην **Περιοχή 1**, όπου συμβαίνει ο ιονισμός, $J \geq J_c$ και $r_{rod} < a < r_i$.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους σε αυτήν την περιοχή, ρ_i , δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho_i = \rho_{soil} e^{-\frac{t_i}{\tau_i}} \quad (2.14)$$

Όπου:

- t_i ο χρόνος από την έναρξη του ιονισμού [s]
- τ_i η χρονική παράμετρος του ιονισμού [s]

Στην **Περιοχή 2**, όπου εξακολουθεί να υπάρχει η υπολειπόμενη δραστηριότητα (απιονισμός), $J < J_c$ και $r_i < a < r_d$.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους σε αυτήν την περιοχή, ρ_d , δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho_d = \rho_m + (\rho_{soil} - \rho_m) \left(1 - e^{-\frac{t_d}{\tau_d}}\right) \left(1 - \frac{J}{J_c}\right) \quad (2.15)$$

Όπου:

- ρ_m η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους κατά την έναρξη του απιονισμού, η οποία δίνεται από την εξίσωση (4.4) [Ωm]
- t_d ο χρόνος από την έναρξη του απιονισμού [s]
- τ_d η χρονική παράμετρος του απιονισμού [s]

Στην **Περιοχή 3**, όπου η ειδική αντίσταση είναι σταθερή, $J < J_c$ και $a > r_d$.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους σε αυτήν την περιοχή είναι ίδια με την ειδική αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους, δηλ. η ρ_{soil} .

Η ενεργή αντίσταση, R_{rod} , μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας τις αντιστάσεις των τριών περιοχών και, επομένως, ισούται με:

$$R_{rod} = \frac{\rho_i}{2\pi l_{rod}} \ln \frac{r_i(r_{rod}+l_{rod})}{r_{rod}(r_i+l_{rod})} + \frac{\rho_d}{2\pi l_{rod}} \ln \frac{r_d(r_i+l_{rod})}{r_i(r_d+l_{rod})} + \frac{\rho_{soil}}{2\pi l_{rod}} \ln \frac{r_d+l_{rod}}{r_d} \quad (2.16)$$

Στην ειδική περίπτωση όπου δεν υφίσταται ιονισμός του εδάφους, η αντίσταση της μόνιμης κατάστασης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_{rod} = \frac{\rho_{soil}}{2\pi l_{rod}} \ln \frac{r_d+l_{rod}}{r_d} \quad (2.17)$$

Σημείωση: Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για μία ενιαία ράβδο μήκους l_{rod} και ακτίνας r_{rod} θαμμένη σε ομογενές άπειρο έδαφος με ειδική αντίσταση ρ_{soil} . Στο δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τη 2^η σειρά μετρήσεων (βλ. *Ενότητα 3.2.4*) το έδαφος είναι τοποθετημένο σε κυλινδρικό δοχείο με διάμετρο 25 cm. Επομένως, σε

αυτήν την περίπτωση, οι εξισώσεις για τις αντιστάσεις των τριών περιοχών, η ακτίνα ιονισμού και η πυκνότητα του ρεύματος στο όριο απιονισμού προσαρμόζονται στην κυλινδρική γεωμετρία του δοκιμίου ως εξής:

$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi l} \ln\left(\frac{r_i}{r_{in}}\right) \quad (2.18)$$

$$R_d = \frac{\rho_d}{2\pi l} \ln\left(\frac{r_d}{r_i}\right) \quad (2.19)$$

$$R_n = \frac{\rho_{soil}}{2\pi l} \ln\left(\frac{r_{out}}{r_d}\right) \quad (2.20)$$

$$r_i = \frac{I(t)}{2\pi l J_c} \quad (2.21)$$

$$J(t) = \frac{I(t)}{2\pi l r_d} \quad (2.22)$$

Όπου:

- l το μήκος του δοκιμίου

2.2.3.2 Αλγόριθμος Περιγραφής του Κυκλωματικού Μοντέλου του Nixon

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις και θεωρία, μπορεί να παραχθεί ένας αλγόριθμος για το μοντέλο που προβλέπει τη δυναμική αντίσταση μιας ράβδου για ένα συγκεκριμένο κρουστικό ρεύμα.

Ακολουθεί ο αλγόριθμος του μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η ενεργή δυναμική αντίσταση ενός κατακόρυφου ηλεκτροδίου συμπεριλαμβάνοντας το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους. Στα άγκιστρα περιλαμβάνονται τα σχόλια.

- | | | |
|-----|---|--|
| | Είσοδος: t και $ I(t) $ | {από τον εξωτερικό προσομοιωτή κυκλώματος} |
| | Έξοδος: R_{rod} | {επιστροφή στον εξωτερικό προσομοιωτή} |
| 1: | $J_c \Leftarrow \frac{E_0}{\rho_{soil}}$ | {Εξίσωση (2.12)} |
| 2: | αν $t = 0$ ή $I(t) = 0$ τότε | |
| 3: | $R_{rod} \Leftarrow \frac{\rho_{soil}}{2\pi l r_{rod}} \ln \frac{r_d + l_{rod}}{r_d}$ | {χρήση της Εξίσωσης (4.7) ως «αρχική συνθήκη»} |
| 4: | αλλιώς | |
| 5: | $r_i \Leftarrow \frac{1}{2} \left(-l_{rod} + \sqrt{l_{rod}^2 + \frac{2I(t)}{\pi J_c}} \right)$ | {Εξίσωση (2.11)} |
| 6: | αν $r_i \leq r_{rod}$ τότε | {όταν δε λαμβάνει χώρα ιονισμός} |
| 7: | $r_i \Leftarrow r_{rod}$ | |
| 8: | $\rho_i \Leftarrow 0$ | {ζώνη χωρίς ιονισμό} |
| 9: | αλλιώς | |
| 10: | αν το t_i δεν είναι προσδιορισμένο τότε | |
| 11: | $t_i \Leftarrow t$ | {καταγραφή του χρόνου έναρξης του ιονισμού} |
| 12: | τέλος | |

- 13: $\rho_i \Leftarrow \rho_{soil} e^{-\frac{t_i}{\tau_i}}$ {Εξίσωση (2.14)}
- 14: **τέλος**
- 15: **αν** $r_i > r_d$ **ή** η r_d δεν είναι προσδιορισμένη **τότε** {καταγραφή του μέγιστου εύρους του ιονισμού}
- 16: $r_d \Leftarrow r_i$
- 17: **τέλος**
- 18: **αν** $r_i < r_d$ **τότε** {μείωση του ρεύματος/έλεγχος για ζώνη απιονισμού}
- 19: $J_d \Leftarrow \frac{I(t)}{2\pi(r_d l_{rod} + r_d^2)}$ {H J στο όριο του απιονισμού- Εξίσωση (2.11)}
- 20: **αν** $J_d \geq 0,999J_c$ **τότε** {σήμανση ότι η J_c έχει προσεγγιστεί }
- 21: $F_{Jc} \Leftarrow 1$
- 22: **τέλος**
- 23: **αν** η ρ_m δεν είναι προσδιορισμένη **και** $t_i > 0$ **και** $F_{Jc} = 1$ **και** $J_d = 0,8J_c$ **τότε**
- 24: $\rho_m \Leftarrow \rho_i$ {αναφορά στην Εξίσωση (2.15)}
- 25: $t_d \Leftarrow t$ {καταγραφή χρόνου έναρξης απιονισμού για τιμές μικρότερες του 80% της J_c }
- 26: **τέλος**
- 27: **αν** $t_d > 0$ **τότε** {ο απιονισμός έχει αρχίσει}
- 28: $\rho_d \Leftarrow \rho_m + (\rho_{soil} - \rho_m) \left(1 - e^{-\frac{t_d}{\tau_d}}\right) \left(1 - \frac{J}{J_c}\right)$ {Εξίσωση (2.15)}
- 29: **αλλιώς**
- 30: $\rho_d \Leftarrow 0$ {ζώνη χωρίς ιονισμό}
- 31: **τέλος**
- 32: **τέλος**
- 33: $R_i \Leftarrow \frac{\rho_i}{2\pi l_{rod}} \ln \left[\frac{r_i(r_{rod} + l_{rod})}{r_{rod}(r_i + l_{rod})} \right]$ {H R των κελυφών στη ζώνη ιονισμού}
- 34: $R_d \Leftarrow \frac{\rho_d}{2\pi l_{rod}} \ln \left[\frac{r_d(r_i + l_{rod})}{r_i(r_d + l_{rod})} \right]$ {H R των κελυφών στη ζώνη απιονισμού}
- 35: $R_n \Leftarrow \frac{\rho_{soil}}{2\pi l_{rod}} \ln \left[\frac{r_d + l_{rod}}{r_d} \right]$ {H R των κελυφών στη ζώνη χωρίς ιονισμό}
- 36: $R_{rod} \Leftarrow R_i + R_d + R_n$ {H εξίσωση (4.6) που προκύπτει με χρήση της Εξίσωσης (2.13)}
- 37: **τέλος**

Ο αλγόριθμος παίρνει ως εισόδους την τιμή του χρόνου και του μέτρου του ρεύματος από μια εξωτερική προσομοίωση κυκλώματος και επιστρέφει την ενεργή αντίσταση μιας κινητής ράβδου. Αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά στοιχεία:

- *Γραμμές 2-3:* Έναρξη της προσομοίωσης, επιστροφή της αντίστασης μόνιμης κατάστασης ως αρχική συνθήκη στον εξωτερικό προσομοιωτή κυκλώματος.
- *Γραμμή 5:* Υπολογισμός της ακτίνας της ζώνης ιονισμού η οποία να υφίσταται ή να μην υφίσταται.
- *Γραμμή 6:* Δεν υφίσταται ιονισμός.

- *Γραμμές 9-17:* Ο ιονισμός έχει ξεκινήσει ή συνεχίζεται. Καταγραφή του χρόνου έναρξης του ιονισμού και παρακολούθηση του μεγίστου εύρους της ζώνης ιονισμού.
 - *Γραμμή 13:* Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης της ζώνης ιονισμού (αν υφίσταται).
- *Γραμμές 18-32:* Η πυκνότητα του ρεύματος έχει μειωθεί και, επομένως, υπάρχει πιθανότητα να έχει αρχίσει ο απιονισμός.
 - *Γραμμές 20-21:* Εξασφάλιση ότι ο απιονισμός αρχίζει μόνο μόλις ξεπεραστεί η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος J_c , αποφεύγοντας να θεωρηθούν ως έναρξη του απιονισμού ψευδοταλαντώσεις με προσωρινές μειώσεις στο ρεύμα και συγκεκριμένα στο μέτωπο του κύματος. Μάλιστα, εξαιτίας αριθμητικών λαθών στρογγυλοποίησης το 99,9% της τιμής της J_c θεωρείται αρκετά κοντά στην J_c .
 - *Γραμμές 23-23:* Καταγραφή του χρόνου έναρξης του απιονισμού από το σημείο, όπου η πυκνότητα του ρεύματος στη ακτίνα της ζώνης απιονισμού είναι 80% της κρίσιμης πυκνότητας του ρεύματος (βλ. ακόλουθη ανάλυση). Καταγράφεται επίσης η τιμή της ειδικής αντίστασης κατά την έναρξη του απιονισμού.
 - *Γραμμή 28:* Υπολογισμός της ειδικής αντίστασης της ζώνης απιονισμού (αν υφίσταται).
- *Γραμμές 33-36:* Άθροισμα των αντιστάσεων των τριών κελυφών ώστε να προκύψει η ενεργή αντίσταση της κινητής ράβδου.

Ο παραπάνω αλγόριθμος, ο οποίος περιγράφει το μοντέλο που προτάθηκε από τον Nixon, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των κρουστικών δοκιμών με ραβδοειδές ηλεκτρόδιο.

Στο πρωτότυπο μοντέλο το οποίο προτάθηκε από τους Liew και Darveniza (1974), από τη στιγμή που όλα τα στοιχειώδη κελύφη που αποτελούν μέρος των περιοχών ιονισμού και απιονισμού έχουν διαφορετική πυκνότητα ρεύματος για μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος ή χρόνου, θα έπρεπε να διεξαχθούν ξεχωριστοί υπολογισμοί για κάθε ένα κέλυφος και, έπειτα, να αθροιστούν όλα μαζί ώστε να προκύψει η συνολική αντίσταση.

Η υλοποίηση που προτάθηκε από το Nixon (1999) υπολογίζει την ειδική αντίσταση των περιοχών ιονισμού και απιονισμού ως μία ενιαία περιοχή χρησιμοποιώντας την πυκνότητα του ρεύματος στα εξώτερα σύνορα αυτών των περιοχών, με σκοπό να απλοποιηθεί τόσο ο αλγόριθμος όσο και ο κώδικας.

Για την επαλήθευση αυτής της απλοποίησης, το μοντέλο συγκρίθηκε με μια υλοποίηση του μοντέλου των Liew-Darveniza από τον Anderson (Phillips et al., 2004) και βρέθηκε επαρκές. Όμως, βρέθηκε ότι ο χρόνος έναρξης για τη ζώνη απιονισμού δεν ήταν ορθός, και ήταν απαραίτητο να τροποποιηθεί η υλοποίηση έτσι ώστε η έναρξη του απιονισμού να καταγράφεται μόλις η πυκνότητα του ρεύματος υποχωρεί στο 80% της κρίσιμης πυκνότητας του ρεύματος. Αυτή βέβαια η διαπίστωση δεν ήταν μείζονος σημασίας, καθώς η κρίσιμη συνιστώσα των μελετών

για τη μεταβατική συμπεριφορά όσον αφορά την αντικεραυνική προστασία τυπικά συμβαίνει πριν την έναρξη του απιονισμού (Phillips et al., 2004).

Σημείωση: Στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι θαμμένο σε έδαφος περιορισμένων διαστάσεων (π.χ. σε κυλινδρικό δοχείο / βλ. *Ενότητα 3.2.4*), ο αλγόριθμος προσαρμόζεται ανάλογα (βλ. *Εξισώσεις 2.18-2.22*).

2.3 Βιβλιογραφία

[1] *Kenneth John Nixon, «The lightning transient behavior of a driven rod earth electrode in multi-layer soil», PhD thesis, July 2006, Johannesburg, South Africa*

[2] *E. P. Nicolopoulou, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, «Comparison of Circuit Models for the Simulation of Soil Ionization», Electric Power Systems Research Volume 113, August 2014, Pages 180–187, Lightning Research and Lightning Protection Technologies*

Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία Μετρήσεων

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθούν μοντέλα κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού του εδάφους υπό την επίδραση κρουστικών τάσεων, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα αποτελέσματα πραγματικών δοκιμών. Σε αυτό το πλαίσιο και για αυτόν το σκοπό, χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων: (α) μετρήσεις τις οποίες πραγματοποίησε η ερευνητική ομάδα της Καθηγήτριας Nor και (β) μετρήσεις οι οποίες προέκυψαν από πειραματικές δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ [1].

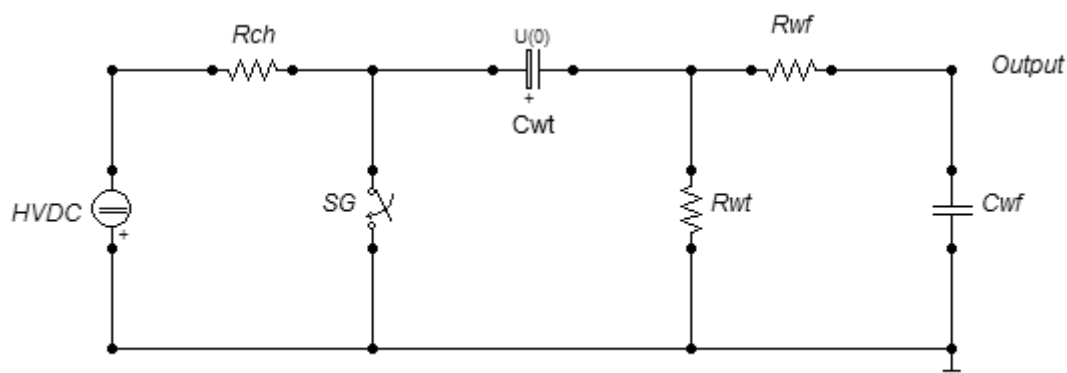
Στις επόμενες ενότητες, λοιπόν, παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών καθώς και η διαδικασία των μετρήσεων.

3.1 Πειραματική Διάταξη 1^{ης} Σειράς Μετρήσεων (Nor)

Οι τιμές των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος της κρουστικής γεννήτριας για τη διεξαγωγή της 1^{ης} σειράς μετρήσεων, καθώς και στοιχεία για τη διάταξη και τις διαστάσεις των συστημάτων γείωσης παρατίθενται στη συνέχεια. Επίσης, υπάρχουν δεδομένα για την ειδική αντίσταση και το πάχος των δειγμάτων εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές.

3.1.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κρουστικής Γεννήτριας

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα της κρουστικής γεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών:



Εικόνα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα του ισοδύναμου κυκλώματος της κρουστικής γεννήτριας

Όπου:

- HVDC: DC-Πηγή ισχύος υψηλών τάσεων (50kV, 100 W)

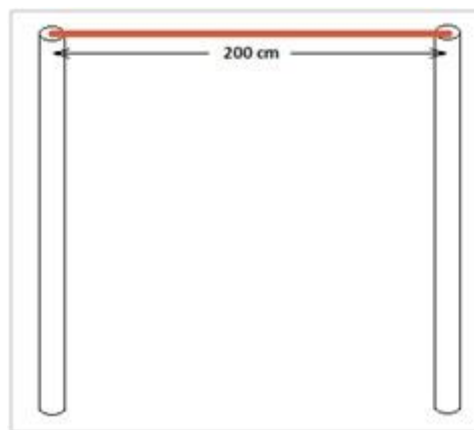
- R_{ch} : Αντίσταση φόρτισης (25 MΩ)
- SG: Σπινθηριστής
- C_{wt} : Πυκνωτής ουράς (100 nF)
- R_{wt} : Αντίσταση ουράς (1,0-2,4 kΩ)
- R_{wf} : Αντίσταση μετώπου (40-100 Ω)
- C_{wf} : Πυκνωτής μετώπου (8 nF)

3.1.2 Διάταξη και Διαστάσεις Συστημάτων Γείωσης

Η 1^η σειρά μετρήσεων περιλαμβάνει δοκιμές σε τρεις διατάξεις συστημάτων γείωσης:

- 1) Η πρώτη διάταξη αποτελείται από δύο παράλληλες ράβδους (ηλεκτρόδια) με διάμετρο 1 cm, ενωμένες με μία χάλκινη λωρίδα μήκους $l=200$ cm, πλάτους $w=2$ cm και πάχους $th=0,2$ mm. Οι δύο ράβδοι θάφτηκαν στο έδαφος σε βάθος $d=180$ cm.

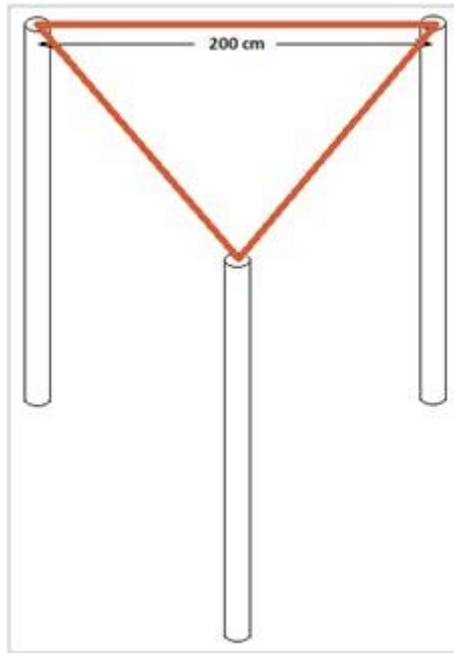
Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το σχήμα της διάταξης του συστήματος γείωσης με τις δύο ενωμένες παράλληλες ράβδους.



Εικόνα 3.2: Διάταξη συστήματος γείωσης με δύο παράλληλες ράβδους ενωμένες με χάλκινη λωρίδα.

- 2) Η δεύτερη διάταξη αποτελείται από τρεις παράλληλες ράβδους (ηλεκτρόδια) με διάμετρο 1 cm, οι οποίες ενώνονται ανά δύο με μία χάλκινη λωρίδα μήκους $l=200$ cm, πλάτους $w=2$ cm και πάχους $th=0,2$ mm, ώστε οι λωρίδες να σχηματίζουν ισόπλευρο τρίγωνο. Οι τρεις ράβδοι θάφτηκαν, επίσης, στο έδαφος σε βάθος $d=180$ cm.

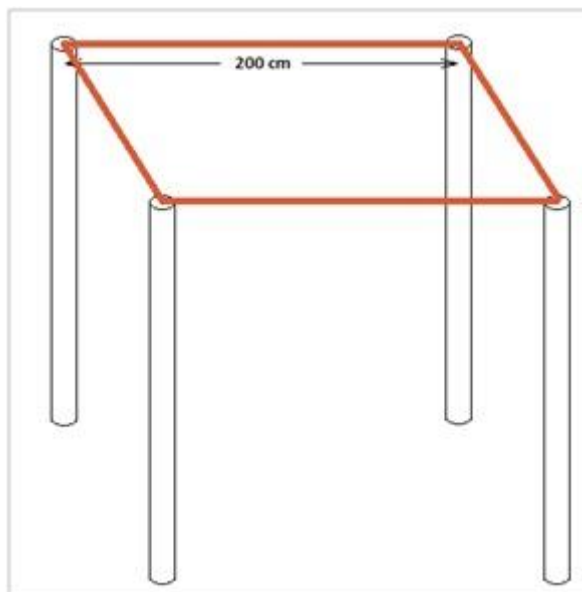
Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το σχήμα της διάταξης του συστήματος γείωσης με τις τρεις ενωμένες παράλληλες ράβδους.



Εικόνα 3.3: Διάταξη συστήματος γείωσης με τρεις παράλληλες ράβδους ενωμένες ανά δύο με χάλκινες λωρίδες.

- 3) Η τρίτη διάταξη αποτελείται από τέσσερις παράλληλες ράβδους με διάμετρο 1 cm, οι οποίες ενώνονται ανά δύο με μία χάλκινη λωρίδα μήκους $l=200$ cm, πλάτους $w=2$ cm και πάχους $t_h=0,2$ mm, ώστε οι λωρίδες να σχηματίζουν τετράγωνο. Οι τέσσερις ράβδοι θάφτηκαν, επίσης, στο έδαφος σε βάθος $d=180$ cm.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το σχήμα της διάταξης του συστήματος γείωσης με τις τέσσερις ενωμένες παράλληλες ράβδους.



Εικόνα 3.4: Διάταξη συστήματος γείωσης με τέσσερις παράλληλες ράβδους ενωμένες ανά δύο με χάλκινες λωρίδες.

3.1.3 Δείγματα Εδάφους

Οι παραπάνω τρεις τοπολογίες συστημάτων γείωσης εγκαταστάθηκαν σε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες, επομένως ελήφθησαν μετρήσεις σε τρία διαφορετικά δείγματα εδάφους. Όμως, μόνο για το δείγμα εδάφους 1 και το δείγμα εδάφους 3 δόθηκαν οι ακριβείς καταγραφές των κυματομορφών τάσης και ρεύματος (για το δείγμα εδάφους 2 τα δεδομένα ήταν ελλιπή).

Οι τιμές των ειδικών αντιστάσεων καθώς και το πάχος των δύο δειγμάτων εδάφους φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά δειγμάτων εδάφους

	Δείγμα Εδάφους 1	Δείγμα Εδάφους 2	Δείγμα Εδάφους 3
Ειδική αντίσταση άνω στρώματος ρ_1 (Ωm)	525,6	806,4	709,4
Ειδική αντίσταση κάτω στρώματος ρ_2 (Ωm)	112,5	180,8	290,6
Πάχος δείγματος εδάφους h (m)	0,83	1,34	1,3

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, η καλύτερη ειδική αντίσταση προκύπτει για το δείγμα εδάφους 1. Το γεγονός ότι οι κυματομορφές ρεύματος που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές με το δείγμα εδάφους 1 δεν παρουσιάζουν δεύτερη κορυφή ρεύματος για όλες τις διατάξεις των συστημάτων γείωσης (με δύο, τρεις και τέσσερις ράβδους) αποδίδεται στην παραπάνω διαπίστωση.

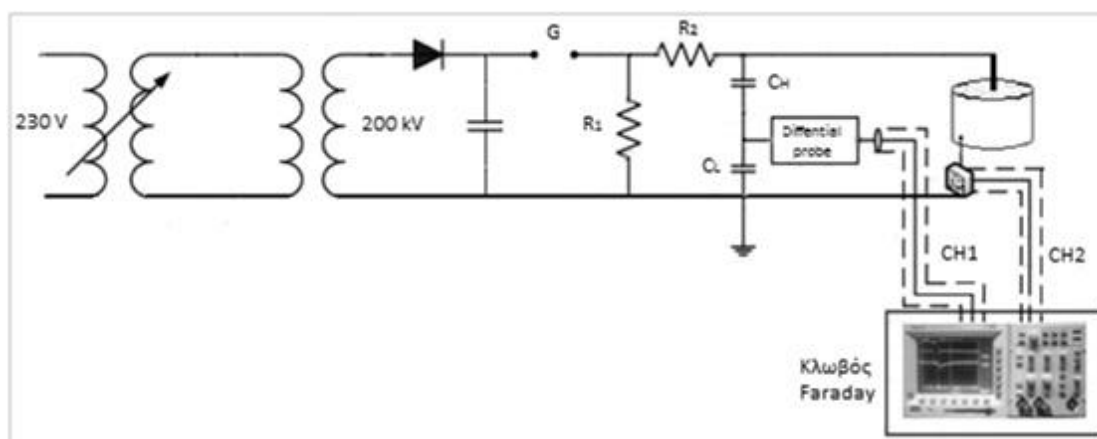
Αντιθέτως, όσον αφορά το δείγμα εδάφους 3, η τιμή της ειδικής αντίστασης είναι υψηλή και, συνεπώς, οι κυματομορφές ρεύματος που κατεγράφησαν παρουσιάζουν δεύτερη κορυφή ρεύματος και για τις τρεις διατάξεις συστημάτων γείωσης.

3.2 Πειραματική Διάταξη και Διαδικασία 2^{ης} Σειράς Μετρήσεων

Η 2^η σειρά μετρήσεων διεξήχθη στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Τα στοιχεία [1] για τον εξοπλισμό του εργαστηρίου, την πειραματική διάταξη, τα δοκίμια και τη διαδικασία των μετρήσεων παρατίθενται στις ακόλουθες ενότητες.

3.2.1 Πειραματική Διάταξη

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών για την παραγωγή κυματομορφών 1,2/50 μ s.



Εικόνα 3.5: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Όπου:

- $R_1=9,5 \text{ k}\Omega$ (αντίσταση ουράς)
- $R_2=416 \Omega$ (αντίσταση μετώπου)
- $C_H=1200 \text{ pF}$
- $C_L=504 \text{ nF}$

Η γεννήτρια κρουστικών τάσεων τροφοδοτείται από έναν αυτομετασχηματιστή AC (0-230V) και ένα μετασχηματιστή ανύψωσης με λόγο 220V/200kV. Η διακύμανση του AC δικτύου τροφοδοσίας 230V, 50 Hz ελαχιστοποιείται σε $\pm 0.1\%$ μέσω ενός σταθεροποιητή τάσης. Ένα βαθυπερατό φίλτρο και ένας μετασχηματιστής απομόνωσης απαλλάσσουν την τροφοδοσία από το θόρυβο και τις διακυμάνσεις.

Ένας χωρητικός καταμεριστής με λόγο 421:1 και ένα διαφορικό καταμεριστής (probe) με λόγο 100:1 συνδεδεμένα με την έξοδο της γεννήτριας κρουστικών τάσεων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της παραγόμενης τάσης. Το ρεύμα που εγχέεται στο δείγμα εδάφους μετρείται με μία αμπεροτσιμπίδα Pearson με ευαισθησία 0,002 A/V. Τα σήματα τάσης και ρεύματος καταγράφονται από ένα δικάναλο ψηφιακό παλμογράφο 500 Hz, ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ένα κλωβό Faraday (με εξασθένηση 50dB για σήματα μέχρι 1 GHz).

Στην *Εικόνα 3.6*, απεικονίζεται η πειραματική διάταξη.



Εικόνα 3.6: Πειραματική διάταξη παραγωγής κυματομορφής 1,2/50 μ s

3.2.2 Εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- λύομενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας Messwandler-Bau GmbH Bamberg
- τράπεζα χειρισμών StAG MWB 616
- σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator 3kW
- διαφορικός καταμεριστής MD 200 Schaffner WS-30
- αμπεροσιμπίδα Current Monitor Pearson Model 8260
- παλμογράφος Tektronix TDS 3052
- ομοαξονικά καλώδια
- κλωβός Faraday
- υγρόμετρο – θερμόμετρο TESTO 625
- βατόμετρο, digital power meter WT210, Yokogawa

Στις επόμενες υποενότητες, γίνεται μία διεξοδικότερη αναφορά στα χαρακτηριστικά του παραπάνω εργαστηριακού εξοπλισμού.

(α) Λύομενη Διάταξη Μονοβάθμιας Κρουστικής Γεννήτριας

Η λύομενη κρουστική γεννήτρια της Messwandler-Bau GmbH Bamberg, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή των στοιχείων της σαν γεννήτρια παραγωγής

υψηλής εναλλασσόμενης, συνεχούς και κρουστικής τάσης με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά της λυόμενης κρουστικής γεννήτριας της Messwandler-Bau GmbH Bamberg

	Εναλλασσόμενη τάση χωρίς φορτίο	Συνεχής τάση χωρίς φορτίο	Κρουστική τάση χωρίς φορτίο
Μονοβάθμια	100kV/5kVA	140kV/20mA	140kV/245J
Διβάθμια	200kV/5kVA	280kV/15mA	280kV/490J
Τριβάθμια	300kV/5kVA	420kV/10mA	420kV/735J

Η λυόμενη γεννήτρια είναι μία συσκευή εύκολα συναρμολογήσιμη, η οποία αποτελείται από στοιχεία που περιέχουν μονωτικό λάδι ερμητικά κλεισμένο σε αυτά και έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια μορφή. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν κατάλληλα αναγνωριστικά σύμβολα που διευκολύνουν το χειριστή στη λειτουργία της γεννήτριας. Το εύρος της θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια είναι από $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως και $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Για τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, η γεννήτρια διαμορφώθηκε, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.7*, σε μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια και παράγαγε κρουστική τάση θετικής και αρνητικής πολικότητας. Η τάση του δικτύου πόλεως (230V) έφθανε στο πρωτεύον του αυτομετασχηματιστή M_1 , μέσω του οποίου μπορούσαμε να ρυθμίζουμε την τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή M_2 με σχέση μεταφοράς 220V/200kV, μεταθέτοντας τη λήψη του δευτερεύοντος του M_1 .



Εικόνα 3.7 Λυόμενη μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια

Στη συνέχεια, η υψηλή εναλλασσόμενη τάση ανορθωνόταν μέσω του ανορθωτικού στοιχείου, το οποίο περιείχε αντίσταση προστασίας, και μετατρεπόταν σε συνεχή τάση U_- , η οποία φόρτιζε τον πυκνωτή C_L . Μετά τη φόρτιση του πυκνωτή C_L ο σπινθηριστής $\Sigma\pi$, τίθεται σε κοινή τάση με τον πυκνωτή. Όπως είναι προφανές, το διάκενο του σπινθηριστή έπρεπε να είναι τέτοιο ώστε να μην προκαλείται διάσπαση προτού ο πυκνωτής C_L αποκτήσει την επιθυμητή τάση στα άκρα του. Η κρουστική τάση εμφανίζεται μεταξύ των δύο άκρων του σπινθηριστή, k_1 και k_2 .

Μόλις συνέβαινε η διάσπαση του σπινθηριστή άρχιζε το στάδιο της εκφόρτισης της γεννήτριας. Την ώρα που ξεκινούσε η διάσπαση του σπινθηριστή, ο πυκνωτής φορτίου C_H ήταν εντελώς αφόρτιστος και γι' αυτό αρχικά δεν εμφάνισε σημαντική αντίδραση στη διέλευση του ρεύματος φορτίσεως που περνά μέσα του, δηλαδή αρχικά συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα. Για τον λόγο αυτό, αρχικά εθεωρείτο η αντίδραση της R_L αμελητέα, αφού γενικά το ρεύμα επιλέγει να διέλθει από τον κλάδο με την μικρότερη αντίσταση.

Το πώς θα μεταβληθεί η τάση φόρτισης της γεννήτριας εξαρτάται από τον λόγο C_L/C_H . Βασική επιδίωξη είναι ο πυκνωτής κρούσης C_L να έχει πολύ μεγαλύτερη

χωρητικότητα από τον πυκνωτή φορτίου C_H , ώστε ένα μικρό μόνο μέρος του φορτίου του πυκνωτή C_L να είναι σε θέση να φορτίσει τον C_H . Με άλλα λόγια, επιτυγχάνεται με δεδομένη τάση φόρτισης, η παραγόμενη κρουστική τάση να είναι υψηλή και όσο το δυνατό πλησιέστερα στην τάση C_L .

Σημειώνεται, ότι η παραγόμενη κρουστική τάση δεν μπορεί να φτάσει το πλάτος της ανορθωμένης τάσης U_- που χρησιμοποιείται στη φόρτιση της γεννήτριας. Το μέγεθος, που καθορίζει πόσο κοντά στην τιμή U_- μπορεί να φτάσει η κρουστική τάση λέγεται συντελεστής χρησιμοποίησης και ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{U_{k(max)}}{U_-} \quad (3.1)$$

Δηλαδή ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης, $U_{k(max)}$, προς τη μέγιστη τιμή της ανορθωμένης τάσης με την οποία φορτίζεται η γεννήτρια, U_- . Όσο υψηλότερος ο συντελεστής χρησιμοποίησης τόσο καλύτερα αξιοποιείται η γεννήτρια.

Μεγάλη σημασία έχει ο τρόπος με τον οποίο γειώθηκε η γεννήτρια. Η γείωση αυτή έπρεπε να βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στο δοκίμιο και στα στοιχεία R_L και C_L . Χρησιμοποιήθηκε ειδικό ηλεκτρόδιο γείωσης, το οποίο δε συνδέθηκε με τη γείωση του δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος. Η ξεχωριστή αυτή προσγείωση λέγεται κρουστική γη και συνδέεται με το δίκτυο E.P. μέσω αντίστασης προστασίας (της τάξης των MΩ) και κατάλληλης ονομαστικής τάσης. Ο λόγος για τον οποίο έγιναν τα παραπάνω είναι ότι αν η γεννήτρια γειωνόταν πάνω στη γείωση του δικτύου, τότε λόγω των παράσιτων χωρητικοτήτων της γεννήτριας θα δημιουργούνταν βρόχοι μικρής αντίστασης στους οποίους θα επάγονταν υψηλές

τάσεις μεγάλης συχνότητας, οι οποίες θα υπερτίθεντο στην κρουστική τάση και θα την παραμόρφωναν σημαντικά.

(β) Τράπεζα Χειρισμών StAG MWB 616

Οι χειρισμοί της όλης διάταξης, καθώς και η παρακολούθηση της λειτουργίας, είναι δυνατοί από την τράπεζα ελέγχου και χειρισμών, *Εικόνα 3.8*. Η τράπεζα περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Μεταγωγικό διακόπτη δύο θέσεων (1).
- Κλειδί (2)
- Buttons για να τίθεται υπό τάση και εκτός τάσης η γεννήτρια (3,4).
- Buttons μέσω των οποίων ρυθμίζεται η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή M1 (5α, 5β).
- Αμπερόμετρο, βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης στο δευτερεύον του M1 και βολτόμετρο για τη μέτρηση της υψηλής συνεχούς τάσης υπό την οποία φορτίζεται ο πυκνωτής κρούσης.
- Διακόπτη ταχείας θέσεως εκτός τάσης σε περίπτωση κινδύνου (6) και ηλεκτρονόμος υπερεντάσεως.



Εικόνα 3.8: Τράπεζα ελέγχου και χειρισμών

(γ) Σταθεροποιητής Τάσης Wechelspannungs-Stabilisator 3kW

Ο χρησιμοποιούμενος σταθεροποιητής 3kW, που φαίνεται στην *Εικόνα 3.9*, εξασφαλίζει ότι για τη μεταβολή της τάσης του δικτύου εντός των ορίων $230V \pm 10\%V$, η τάση στην έξοδο του θα έχει μικρή διακύμανση $230V \pm 0,5\%V$ (μεταξύ 228,9 και 231,1V).



Εικόνα 3.9: Σταθεροποιητής τάσης

(δ) Διαφορικός Καταμεριστής MD200 Schaffner WS-30

Τα διαφορικά probe είναι συσκευές με τις οποίες οι παλμογράφοι μπορούν να καταγράψουν αρκετά υψηλές τιμές τάσεων, οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν στα κυκλώματα. Με αυτόν τον τρόπο, εκτείνεται η περιοχή μέτρησης των παλμογράφων στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, στους αναστροφείς, στους ελέγχους ταχύτητας των μηχανών και σε αρκετές άλλες εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή φαίνονται στο παρακάτω Πίνακα 3.3, ενώ στην Εικόνα 3.10 απεικονίζεται το εν λόγω όργανο.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή

Εξασθένιση	1:100/1000
Εύρος ζώνης	DC - 50MHz (-3db)
Ακρίβεια	± 2%
Σύνθετη αντίσταση εισόδου	10MΩ//7pF ως προς γη
Τάση εισόδου	
Διαφορικό εύρος	± 700V(DC+ Peak AC) ή 500Vrms για 1/100 ± 7000V(DC+ Peak AC) ή 5000Vrms για 1/1000
Μέγιστη τάση	± 7000V(DC+ Peak AC) ή 2500Vrms για 1/100 και 1/1000 ± 7000V(DC+ Peak AC) ή 5000Vrms για 1/100 και 1/1000
Τάση εξόδου	
Μέγιστο πλάτος	± 7V(μέσα σε 50kΩ ή περισσότερο)



Εικόνα 3.10: Διαφορικός καταμεριστής MD200 Schaffner

(ε) Αμπεροτσιμπίδα Pearson

Η αμπεροτσιμπίδα (Current Monitor) που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών για τη μέτρηση του ρεύματος είναι η Current Monitor Pearson Model 8260, με λόγο μετασχηματισμού 0,002V/A και φαίνεται στην Εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11: Αμπεροτσιμπίδα

(στ) Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε (μοντέλο της Tektronix) λειτουργεί με εύρος ζώνης στα 500MHz, διαθέτει δύο κανάλια, οθόνη διαστάσεως 6 in (=165mm) και ανάλυσης 640×480 και διαθέτει οδηγό δισκέτας (3,5'), για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο παλμογράφος TDS 3052 απεικονίζεται στην *Εικόνα 3.12*, ενώ τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον *Πίνακα 3.4* που ακολουθεί.

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά παλμογράφου

Κανάλια εισόδου	2
Εύρος ζώνης	500MHz, 5mV/div έως 1V/div
Χρόνος ανόδου	0,7ns
Ακρίβεια DC κέρδους	± 2%
Ζεύξη εισόδου	DC, AC ή GND
Αντίσταση εισόδου	1MΩ ± 1% παράλληλα με 13pF
Ευαισθησία εισόδου στα 50Ω	1mV/div έως 1V/div
Κάθετη ανάλυση	9 bit ανάλυση, ξεχωριστή για κάθε κανάλι
Μέγιστη τάση εισόδου, 50Ω	5 Vrms με κορυφές ≤ ± 30
Ταχύτητα δειγματοληψίας	100 S/s έως 5 GS/s



Εικόνα 3.12: Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

(ζ) Ομοαξονικά Καλώδια

Για τη σύνδεση της πειραματικής διάταξης με τα κανάλια CH₁ και CH₂ του παλμογράφου (βλ. *Εικόνα 3.5*) χρησιμοποιήθηκαν ομοαξονικά καλώδια με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά ομοαξονικού καλωδίου

Εσωτερικός αγωγός	Πλεγμένος χαλκός, 7×1,0mm
Διάμετρος εσωτερικού αγωγού	2,85mm

Διηλεκτρικό	Χαμηλής απώλειας μείγματος PE
Διάμετρος διηλεκτρικού	7,25mm
Εξωτερικός αγωγός 1	Χάλκινο έλασμα, με PE επικάλυψη
Θωράκιση	100%
Εξωτερικός αγωγός 2	Ανάμιξη χαλκού 72%
Περίβλημα	Μαύρο PVC, υν-αντίστασης
Εξωτερική διάμετρος	10,2 mm
Σύνθετη αντίσταση	50 Ω
Χωρητικότητα	78pF/m
F_{max}	6GHz
DC-αντίσταση κεντρικού αγωγού	3,3 Ω/km
DC-αντίσταση εξωτερικού αγωγού	8,4 Ω/km
Εξασθένηση 1GHz/100m	14,2 dB
Εξασθένηση 1GHz/100ft	4,33dB

(η) Θερμόμετρο-Υγρόμετρο

Για την καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασίας και θερμοκρασίας) κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το υγρόμετρο – θερμόμετρο TESTO 625, το οποίο φαίνεται στην *Εικόνα 3.13*.



Εικόνα 3.13: Θερμόμετρο-υγρόμετρο

(θ) Digital Power Meter

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, για την καταγραφή της τάσης στο πρωτεύον του μετασχηματιστή χρησιμοποιήσαμε το πολύμετρο, το οποίο φαίνεται στην *Εικόνα 3.14*.



Εικόνα 3.14: Πολύμετρο

3.2.3 Ηλεκτρόδιο Γείωσης

Στην παρούσα ενότητα, γίνεται αναφορά στις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτροδίου γείωσης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών.

Οι κρουστικές τάσεις, λοιπόν, εφαρμόστηκαν σε ένα κατακόρυφο χάλκινο ηλεκτρόδιο με διάμετρο 5 mm και μήκος 19 cm, το οποίο διαπερνούσε κατά μήκος το εκάστοτε δείγμα εδάφους.

Η επαγωγή της ράβδου $L_{rod}=0,191\mu\text{H}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$L_{rod} = 2\ell \cdot \ln\left(\frac{4\ell}{d}\right) \cdot 10^{-7} \text{ H} \quad (3.1)$$

Όπου:

- $\ell=19\text{cm}$ είναι το μήκος της ράβδου
- $d=5\text{mm}$ είναι η διάμετρος της ράβδου

Η ωμική αντίσταση της ράβδου θεωρείται αμελητέα.

3.2.4 Δείγματα Εδάφους

Τα δείγματα εδάφους τοποθετήθηκαν σε ένα μεταλλικό κύλινδρο με βάθος 19 cm, διάμετρο 25 cm και ξύλινες βάσεις (βλ. *Εικόνα 3.15*). Μέσα στο εκάστοτε δείγμα εδάφους και κατά μήκος του κυλίνδρου τοποθετήθηκε το ηλεκτρόδιο γείωσης (βλ. προηγούμενη ενότητα).



Εικόνα 3.15: Κυλινδρικό δοκίμιο

Πριν τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, τα δείγματα εδάφους υπέστησαν μία ειδική προετοιμασία ώστε να αναλυθούν τα συστατικά τους και για να επιτευχθεί το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας. Αρχικά, αφαιρέθηκαν με κόσκινο οι πέτρες και τα ξένα υλικά από τα δείγματα και, στη συνέχεια, το έδαφος αφυδατώθηκε σε ένα φούρνο στους 105 °C για δύο μέρες. Η περιεκτικότητα σε υγρασία προσδιορίστηκε προσθέτοντας την απαραίτητη ποσότητα απιονισμένου νερού (% κατά βάρος). Εκτός των άλλων, μετρήθηκε η αντίσταση (R_0) σε χαμηλή κρουστική τάση για να υπολογιστεί η ειδική αντίσταση των χρησιμοποιούμενων δειγμάτων βάσει της σχέσης:

$$R_0 = \frac{\rho \ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)}{2\pi\ell} \Rightarrow \rho = \frac{2\pi\ell}{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)} \cdot R_0 \quad (3.2)$$

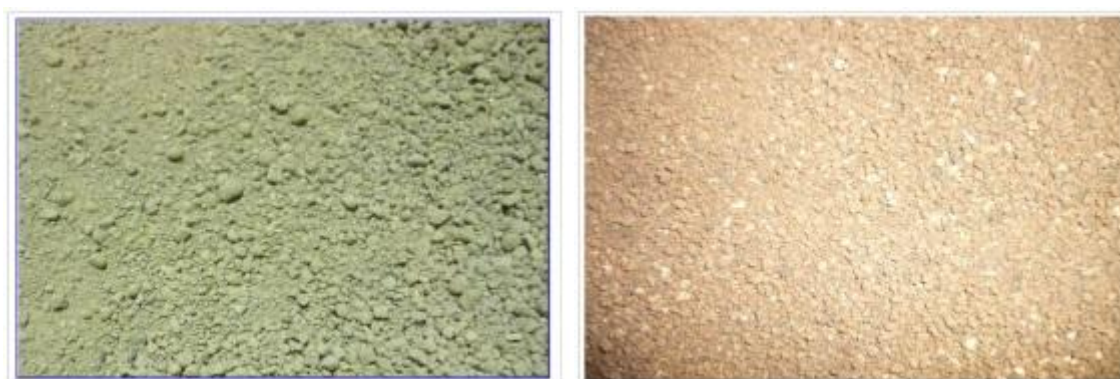
Όπου:

- $\ell=19\text{cm}$ είναι το ύψος του κυλίνδρου
- $r_{out}=12.5\text{cm}$ είναι η εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου (κυλίνδρου)
- $r_{in}=2.5\text{mm}$ είναι η ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου

Η τιμή της σχετικής επιτρεπτότητας ϵ_r επελέγη λαμβάνοντας υπόψη την ειδική αντίσταση του εδάφους και το ποσοστό υγρασίας όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Ιδιότητες των δειγμάτων εδάφους

Δείγμα Εδάφους	Περιεκτικότητα σε νερό κατά βάρος (%)	Αντίσταση σε χαμηλή κρουστική τάση R_0 (Ω)	Ειδική αντίσταση εδάφους ρ (Ωm)	ϵ_r
A	5	3113	950	12
B	10	2884	880	15



Εικόνα 3.16: Αριστερά το δείγμα εδάφους A και δεξιά το δείγμα εδάφους B

3.2.5 Διαδικασία μέτρησης

Τα βασικά βήματα της διαδικασίας μέτρησης ήταν τα ακόλουθα:

- Βήμα 1:** Σύνδεση δοκιμίου και έλεγχος των συνδέσεων των γειώσεων
- Βήμα 2:** Ενεργοποίηση της διάταξης
- Βήμα 3:** Αύξηση του διακένου μέσω της τράπεζας χειρισμού
- Βήμα 4:** Καθορισμός, μέσω του βολτομέτρου και της τράπεζας χειρισμού, της τάσης στο πρωτεύον του μετασχηματιστή
- Βήμα 5:** Μείωση του διακένου μέχρι να γίνει διάσπαση
- Βήμα 6:** Διακοπής της τάσης
- Βήμα 7:** Λήψη της μέτρησης

3.3 Βιβλιογραφία

[1] *Ιωάννης Δ. Φραγγής, «Ιονισμός εδάφους υπό κρουστική τάση», Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2010, Αθήνα*

[2] *E. P. Nicolopoulou, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, «Comparison of Circuit Models for the Simulation of Soil Ionization», Electric Power Systems Research, Volume 113, (2014) 180-187*

ΑΤΡ-ΕΜΤΡ / Υλοποίηση Κυκλωμάτων

4.1 Γενικά για το ΑΤΡ-ΕΜΤΡ

Το πρόγραμμα ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων ΕΜΤΡ έχει τις ρίζες του στο Όρεγκον των ΗΠΑ, και συγκεκριμένα στην Bonneville Power Administration (BPA), συνεργάτη της Αμερικανικής Υπηρεσίας Ενέργειας. Το ΕΜΤΡ αναπτύχθηκε με κρατικά χρήματα για περισσότερο από μία δεκαετία με σκοπό την ελεύθερη διανομή του σε κάθε ενδιαφερόμενο.

Το 1984 έγινε απόπειρα εμπορευματοποίησης του προγράμματος και από την περαιτέρω ανάπτυξη του ΕΜΤΡ αποκλείστηκε η BPA. Από εκείνη τη χρονική στιγμή δημιουργήθηκε μία μη εμπορική έκδοση του ΕΜΤΡ, το ΑΤΡ. Το ΑΤΡ διανέμεται χωρίς τέλη αδειών, δωρεάν, για όσους δε συμμετέχουν στην εμπορευματοποίηση του ΕΜΤΡ.

Το ΑΤΡ-ΕΜΤΡ (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα ψηφιακής προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, διαθέτοντας μεγάλες δυνατότητες μοντελοποίησης. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε με σκοπό την προσομοίωση ηλεκτρικών κυκλωμάτων, συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και εξοπλισμού. Ο πυρήνας του προγράμματος αποτελείται από ένα μεταφραστή (compiler) που μεταφράζει τα καταλλήλως γραμμένα αρχεία εισόδου σε αρχεία εξόδου-αποτελεσμάτων. Ο μεταφραστής υποστηρίζεται από άλλες εφαρμογές (υποστηρικτικά προγράμματα) που χρησιμεύουν στη διαδικασία κατασκευής των αρχείων εισόδου ή στην επεξεργασία αρχείων εξόδου.

Το ΑΤΡ-ΕΜΤΡ αναλύει το σύστημα που θα του δοθεί στο πεδίο του χρόνου επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις των στοιχείων που απαρτίζουν το κύκλωμα ή το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι διαφορικές εξισώσεις των στοιχείων επιλύονται από τον πυρήνα του προγράμματος αριθμητικά. Η ανάλυση του κυκλώματος, με επίλυση διαφορικών εξισώσεων δίνει στο πρόγραμμα τη δυνατότητα να υπολογίζει όλα τα μεταβατικά φαινόμενα που θα εμφανιστούν σε αυτό. Φυσικά, αυτό δε σημαίνει ότι με το ΑΤΡ-ΕΜΤΡ υπολογίζονται μόνο μεταβατικές καταστάσεις, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανάλυση κυκλωμάτων στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Το ΑΤΡ-ΕΜΤΡ περιλαμβάνει μεθόδους επίλυσης του ηλεκτρικού δικτύου στο πεδίο του χρόνου (time domain) και στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain). Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή στις μεθόδους αυτές.

4.2 Προγράμματα του ATP-EMTP

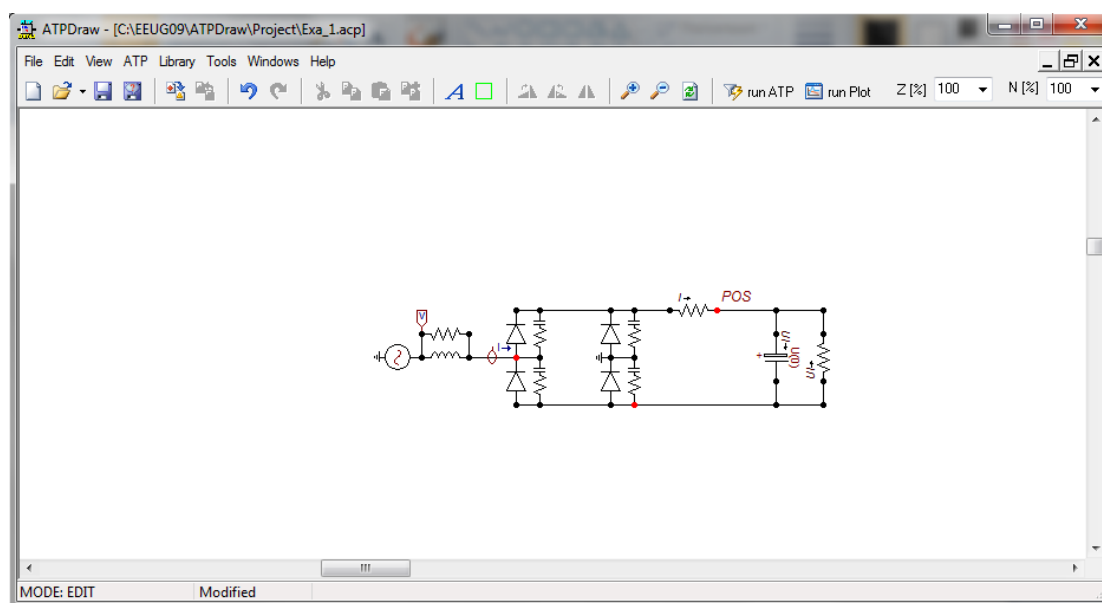
4.2.1 ATPDraw

Το πρόγραμμα ATPDraw είναι ένας γραφικός προεπεξεργαστής για το πρόγραμμα ATP σε περιβάλλον Windows. Με το ATPDraw δίνεται η δυνατότητα της γραφικής απεικόνισης στον υπολογιστή του κυκλώματος ή ηλεκτρικού συστήματος προς προσομοίωση. Μέσα από το πρόγραμμα αναπαρίσταται με τη μορφή δομικών στοιχείων το κυκλωματικό σχέδιο του κυκλώματος ή ηλεκτρικού δικτύου, ορίζονται οι απαραίτητες παράμετροι με σχετικά εύκολο και απλό τρόπο, προκειμένου να προχωρήσει ο μελετητής στην ανάλυση με το ATP-EMTP. Η έξοδος του ATPDraw είναι το αρχείο εισόδου (text file) που χρειάζεται το ATP-EMTP, ώστε να προσομοιώσει το σύστημα.

Το ATPDraw κατασκευάστηκε προκειμένου να απλουστευτεί η διαδικασία προσομοίωσης ενός κυκλώματος με το ATP-EMTP.

Στο περιβάλλον του προγράμματος δίνεται η δυνατότητα της σχεδίασης του κυκλώματος με τη βοήθεια του mouse, τοποθετώντας σε αυτό όλα τα ηλεκτρικά στοιχεία, όπως για παράδειγμα γραμμικά στοιχεία, μη γραμμικά στοιχεία, πηγές, μηχανές, γραμμές μεταφοράς κ.ο.κ. Τα περισσότερα από τα στοιχεία υπάρχουν ήδη έτοιμα (μοντελοποιημένα) σε παλέτες στοιχείων, όμως το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα του ορισμού και νέων στοιχείων.

Το ATPDraw υποστηρίζει όλες τις λειτουργίες του περιβάλλοντος Windows, όπως copy/paste, rotate, import/export, group καθώς και πολλαπλά παράθυρα ανοιχτά.



Εικόνα 4.1: Το ATPDraw

Το ATPDraw υποστηρίζει τους ακόλουθους τύπους στοιχείων:

- Γραμμικοί κλάδοι – συγκεντρωμένα στοιχεία, περιλαμβάνοντας και τα TACS
- Μη γραμμικοί κλάδοι

- Διακόπτες
- Πηγές
- Δυνατότητα κατασκευής νέων μοντέλων (MODELS)
- Δυνατότητα ορισμού στοιχείων από το χρήστη (User Object)

Οι βασικοί τύποι αρχείων που υποστηρίζονται από το ATPDraw είναι:

- .atp – atp αρχείο. Αρχείο που παράγεται από το ATPDraw και μεταφράζεται απευθείας με το ATP-EMTP.
- .adp – project αρχείο. Αρχείο που περιέχει την περιγραφή του κυκλώματος και όλα τα εξωτερικά οριζόμενα στοιχεία αυτού, όπως model, user specified, line/cable data και lib αρχεία. Μαζί με αυτό το αρχείο ανοίγουν και τα υπόλοιπα εξωτερικά αρχεία που αφορούν το συγκεκριμένο κύκλωμα έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του.
- .sup – support αρχείο. Περιλαμβάνει πληροφορίες για κάθε στοιχείο ξεχωριστά όπως αριθμό συνδέσεων, εικονίδιο, κείμενο βοήθειας.
- .mod, .lib – model, user specified αρχείο. Αρχεία που περιέχουν πληροφορίες για τα MODEL ή τα User specified στοιχεία.

Με τη βοήθεια του ATPDraw ο μελετητής σχεδιάζει το κύκλωμα, το οποίο μαζί με όλες τις παραμέτρους αποθηκεύεται σε αρχείο με κατάληξη .adp . Κατόπιν, παράγεται το αρχείο κειμένου .atp, το οποίο και θα αποτελέσει την είσοδο του ATP-EMTP. Μετά την προσομοίωση, επιστρέφεται ένα αρχείο κειμένου (text file) με την κατάληξη .lis και ένα αρχείο με κατάληξη .pl4, στην περίπτωση που η προσομοίωση έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς. Στην αντίθετη περίπτωση, παράγεται μόνο το 1^ο αρχείο, αναφέροντας και το λόγο για τον οποίο παρουσιάστηκε το σφάλμα. Το αρχείο .pl4 περιλαμβάνει τις γραφικές παραστάσεις που έχουν ζητηθεί από το χρήστη.

Τρόπος σχεδίασης κυκλώματος

Ανοίγοντας το ATPDraw και επιλέγοντας New από το menu File, εμφανίζεται μια λευκή οθόνη επί της οποίας μπορεί να αρχίσει ο σχεδιασμός του κυκλώματος. Πατώντας το δεξί πλήκτρο του mouse, εμφανίζεται μια λίστα που περιλαμβάνει κάποια ηλεκτρικά στοιχεία. Ο μελετητής επιλέγει ένα στοιχείο, και κατόπιν αυτό εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας με μαύρο χρώμα και μαύρο περίγραμμα. Με το δεξί πλήκτρο του mouse πάνω στο στοιχείο, διαπιστώνει κανείς ότι το στοιχείο περιστρέφεται (rotate). Το στοιχείο μπορεί να μετακινηθεί κρατώντας πατημένο πάνω του το αριστερό πλήκτρο του mouse, ενώ με double-click εμφανίζονται οι παράμετροί του (properties). Με πάτημα του αριστερού πλήκτρου του mouse οπουδήποτε αλλού εκτός του στοιχείου, εξαφανίζεται το περίγραμμά του.

Εάν πάνω σε έναν ακροδέκτη του στοιχείου πατηθεί το αριστερό πλήκτρο του mouse, ξεκινά η σχεδίαση αγωγίμου δρόμου, ο οποίος για να τερματίσει σε κάποιον άλλον ακροδέκτη πρέπει να πατηθεί πάλι το αριστερό πλήκτρο του mouse, πάνω στο δεύτερο ακροδέκτη.

Τα διαθέσιμα προεγκατεστημένα κυκλωματικά στοιχεία στο ATPDraw

Το ATPDraw περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό από προεγκατεστημένα (predefined) κυκλωματικά στοιχεία. Οι κατηγορίες των διαθέσιμων στοιχείων είναι οι ακόλουθες:

- Branch Linear (Γραμμικά Στοιχεία): π.χ. γραμμικός αντιστάτης, γραμμικός επαγωγός, γραμμικός πυκνωτής κτλ.
- Branch Nonlinear (Μη Γραμμικά Στοιχεία): π.χ. μη γραμμικός αντιστάτης [R(i)], μη γραμμικός επαγωγός [L(i)], μη γραμμικός αντιστάτης [R(t)] κτλ.
- Line Lumped (Γραμμές Συγκεντρωμένων Παραμέτρων): π.χ. ισοδύναμο Π-μοντέλο κτλ.
- Line Distributed (Γραμμές Κατανεμημένων Παραμέτρων): π.χ. μοντέλο Clarke, μοντέλο KCLea κτλ.
- Switches (Διακόπτες): π.χ. χρονοεξαρτώμενος διακόπτης, δίοδος, στατιστικός διακόπτης κτλ.
- Sources (Πηγές): π.χ. συνεχούς τάσης, εναλλασσόμενης τάσης, κρουστικής τάσης κτλ.
- Machines (Μηχανές): σύγχρονη, dc κτλ.
- Transformers (Μετασχηματιστές): π.χ. ιδανικός ΜΣ, μη ιδανικός ΜΣ κτλ.
- Probes & 3phase
- MODELS
- TACS
- User Specified
- Steady state

Τα Probe

Με τη βοήθεια των probe ορίζουμε τα μεγέθη τα οποία αναμένουμε ως έξοδο από το ATP-EMTP. Αυτά μπορεί να είναι η τάση στα άκρα ενός στοιχείου, η τάση στον κόμβο ενός στοιχείου, το ρεύμα που διαρρέει έναν κλάδο κτλ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι αν παραλειφθούν τα probe, τότε το αρχείο .pl4 θα είναι κενό.

MODELS

Η MODELS είναι μια περιγραφική γλώσσα γενικού σκοπού, η οποία υποστηρίζεται από ένα σύνολο εργαλείων προσομοίωσης για την αναπαράσταση και τη μελέτη των χρονομεταβλητών συστημάτων. Το ATPDraw υποστηρίζει μόνο μία απλοποιημένη χρήση της MODELS.

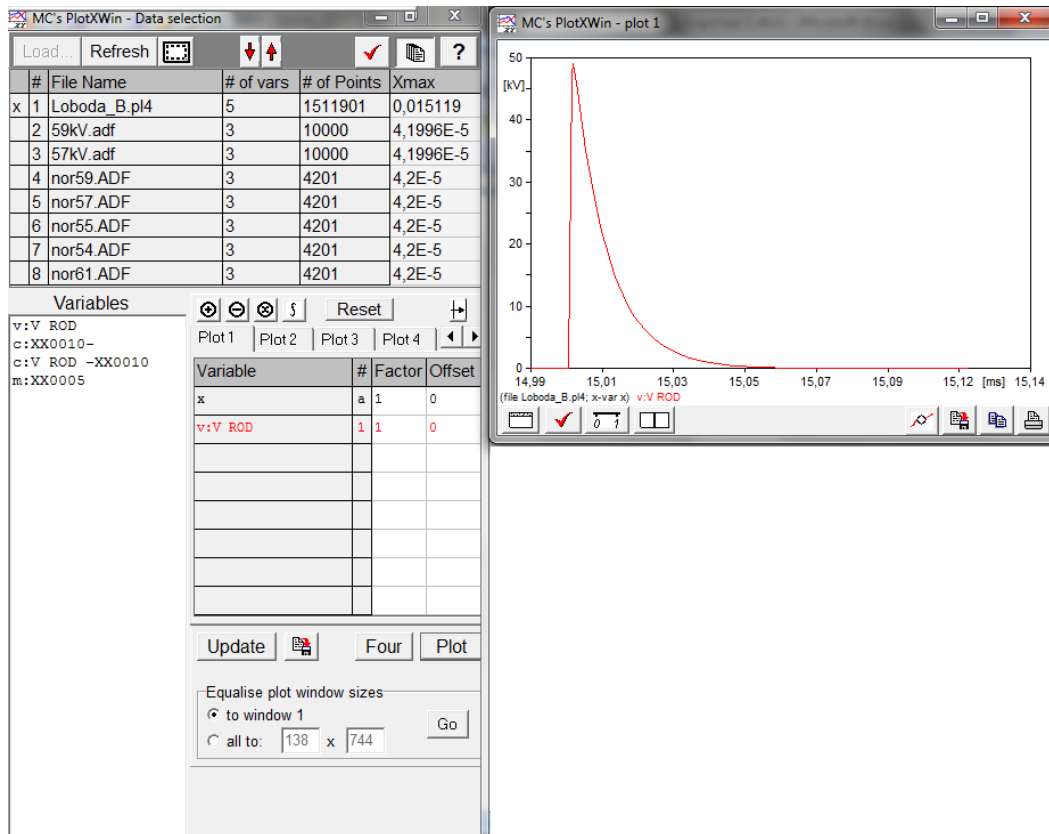
Η γλώσσα MODELS χρησιμοποιείται στον κώδικα των στοιχείων MODELS του ATPDraw.

Δημιουργία του αρχείου .atp

Όταν ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του κυκλώματος, πρέπει να οριστεί το delta T, το οποίο είναι το βήμα της αριθμητικής επανάληψης και η παράμετρος Tmax, η οποία είναι ο

μέγιστος χρόνος προσομοίωσης του κυκλώματος. Όσο μικρότερο είναι το βήμα, τόσο πιο λεπτομερής και ακριβής είναι η ανάλυση και, από τη μια μεριά, και τόσο πιο χρονοβόρα, καθώς απαιτούνται περισσότερες επαναλήψεις για δεδομένο μέγιστο χρόνο προσομοίωσης.

4.2.2 PlotXY



Εικόνα 4.2: Το PlotXY

Το PlotXY είναι πρόγραμμα σχεδιασμού κυματομορφών – γραφικών παραστάσεων. Το PlotXY επεξεργάζεται τα αρχεία εξόδου ATP-EMTP *.pl4 και σχεδιάζει τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις. Τα αρχεία *.pl4 προκύπτουν ως έξοδος από τις εκδόσεις του ATP-EMTP: Salford, Watcom και GNU/Mingw32.

Το Plot XY δημιουργήθηκε αρχικά για μετά-επεξεργασία αρχείων του ATP-EMTP, υποστηρίζει όμως και αρχεία ASCII data.

Κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Εύκολο στη χρήση GUI (Graphical User Interface)
- 7 μεταβλητές μέγιστο όριο επεξεργασίας – σχεδιασμού
- Σχεδιασμός από μέχρι 8 αρχεία στο ίδιο φύλλο
- Σχεδιασμός ως προς το χρόνο ή με X-Y προεπιλεγμένους άξονες
- Δυνατότητα επιλογής χρωμάτων
- Επιλογή μεγέθυνσης

- Δυνατότητες copy-paste, BMP format saving

4.3 Υλοποίηση Ισοδύναμων Κυκλωμάτων στο ATP-EMTP

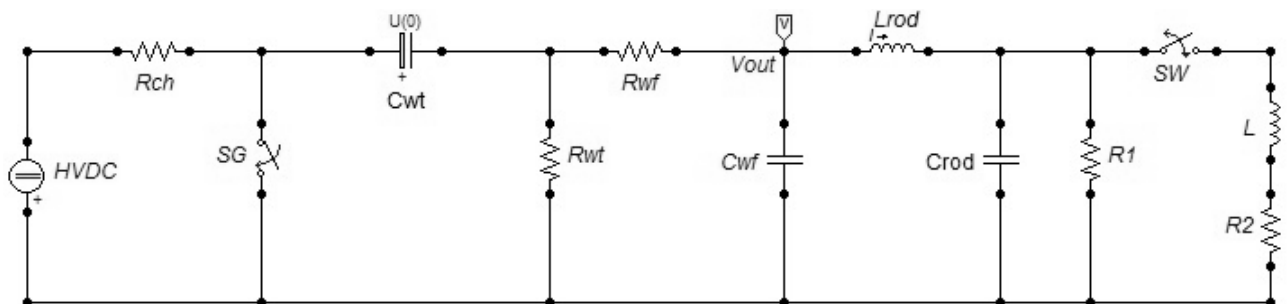
Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς ορισμένων συστημάτων γείωσης (βλ. *Κεφάλαιο 3*) με το λογισμικό ATP-EMTP (βλ. *Ενότητα 4.1*) και με τη χρήση ορισμένων μοντέλων (βλ. *Ενότητα 2.2*), ώστε μέσω της σύγκρισης με τα πειραματικά αποτελέσματα να μελετηθεί κατά πόσον είναι αξιόπιστα αυτά τα μοντέλα.

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα των τριών υπό εξέταση μοντέλων κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού τα οποία υλοποιήθηκαν στο ATPDraw, αναφέρονται οι τιμές των παραμέτρων των κυκλωμάτων αυτών για κάθε τάση φόρτισης της κρουστικής γεννήτριας και παρουσιάζονται οι κυματομορφές που προέκυψαν από το «τρέξιμο» των .pl4 αρχείων στο PlotXY σε σύγκριση με τις καταγεγραμμένες κατά τη διάρκεια των κρουστικών δοκιμών κυματομορφές.

4.3.1 Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου των Nor et al. για την 1^η Σειρά Μετρήσεων

(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα

Στην *Εικόνα 4.3* φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου που προτάθηκε από τους Nor et al., όπως αυτό υλοποιήθηκε στο ATPDraw του λογισμικού ATP-EMTP, με σκοπό την προσομοίωση των κρουστικών δοκιμών της 1^{ης} σειράς μετρήσεων.



Εικόνα 4.3: Ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου των Nor et al.

Όπου:

- $R_{ch} = 25 \text{ M}\Omega$
- $C_{wt} = 100 \text{ nF}$
- $C_{wf} = 8 \text{ nF}$
- $T_{close_SG} = 0$

Οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 προέκυψαν βάσει των καταγεγραμμένων κυματομορφών τάσης και ρεύματος για κάθε τάση φόρτισης και των *Εξισώσεων 2.6* και *2.7*. Η χρονική στιγμή βραχυκυκλώσεως του διακόπτη *SW* (η οποία αναλογεί με τη

χρονική στιγμή έναρξης της δεύτερης κορυφής της κυματομορφής του ρεύματος) προέκυψε επίσης από τις καταγεγραμμένες κυματομορφές του ρεύματος για κάθε τάση φόρτισης.

Οι δε τιμές των λοιπών στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος για κάθε τάση φόρτισης προσδιορίστηκαν με αυξομειώσεις, ώστε να προκύπτει η ελάχιστη απόκλιση μεταξύ των καμπυλών τάσης και ρεύματος της προσομοίωσης και των καμπυλών των πειραματικών δοκιμών

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές όλων των παραπάνω στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος για το δείγμα εδάφους 1 και για τάση φόρτισης 30 kV και διάταξη συστήματος γείωσης με τρεις παράλληλες ράβδους (βλ. Ενότητα 3.1).

Πίνακας 4.1: Τιμές των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος των Nor et al. (Δείγμα Εδάφους 1)

Αριθμός ράβδων	HVDC (kV)	R_{wt} (Ω)	R_{wf} (Ω)	L_{rod} (mH)	C_{rod} (pF)	R_1 (Ω)	T_{close_SW} (μ sec)	L (mH)	R_2 (Ω)
3	30	2400	40	0,03	10	114	1.08	0.1	23.65

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές των στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος για την 1^η σειρά μετρήσεων, για το δείγμα εδάφους 3 και για τις διάφορες τάσεις φόρτισης και τις διάφορες διατάξεις των συστημάτων γείωσης (βλ. Ενότητα 3.1).

Πίνακας 4.2: Τιμές των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος των Nor et al. (Δείγμα Εδάφους 3)

Αριθμός ράβδων	HVDC (kV)	R_{wt} (Ω)	R_{wf} (Ω)	L_{rod} (mH)	C_{rod} (pF)	R_1 (Ω)	T_{close_SW} (μ sec)	L (mH)	R_2 (Ω)
2	17,5	2400	40	0,05	10	113,64	1,64	0,12	78,13
2	20	2400	40	0,035	10	116,67	1,58	0,17	72,3
2	22,5	2400	40	0,029	10	115,36	1,52	0,16	84,07
2	25	2400	40	0,029	10	111,84	1,54	0,17	87,7
2	27,5	2400	40	0,022	10	113,97	1,6	0,2	78,36
2	30	2400	40	0,015	10	113,07	1,7	0,215	75,17
2	32,5	2400	40	0,017	10	110,77	1,68	0,23	77,92
2	35	2400	40	0,024	10	110,5	1,46	0,26	77,84
2	37,5	2250	48	0,032	10	107,76	1,62	0,2	78,3
2	40	2000	40	0,02	10	111,47	1,74	0,23	77,96
3	17,5	2400	40	0,038	10	108,93	1,54	0,09	61,88
3	20	2400	43	0,039	10	104,43	1,58	0,09	68,13
3	22,5	2400	43	0,034	10	105,56	1,58	0,1	63,51
3	25	2400	44	0,034	10	104,17	1,54	0,107	63,42
3	27,5	2400	47	0,034	10	100,11	1,58	0,125	57,36
3	30	2350	46,5	0,034	10	93,99	1,64	0,115	64,84
3	32,5	2350	47	0,028	10	98,76	1,58	0,13	63,97

3	35	2400	44	0,028	10	95,75	1,74	0,13	64,53
3	37,5	2400	45	0,028	10	98,02	1,68	0,13	65,71
3	40	2400	45	0,028	10	94,85	1,62	0,13	65,48
4	17,5	2400	40	0,028	10	103,3	1,48	0,06	51,8
4	20	2400	40	0,028	10	100,9	1,48	0,07	52,92
4	22,5	2400	42	0,025	10	97,07	1,44	0,084	50,64
4	25	2400	42,5	0,02	10	95,83	1,44	0,09	52,85
4	27,5	2400	42,5	0,02	10	92,71	1,44	0,098	54,01
4	30	2400	42,5	0,02	10	90,91	1,46	0,0965	55
4	32,5	2400	44	0,018	10	89,6	1,64	0,094	53,67
4	35	2400	44	0,018	10	87,1	1,7	0,094	55,63

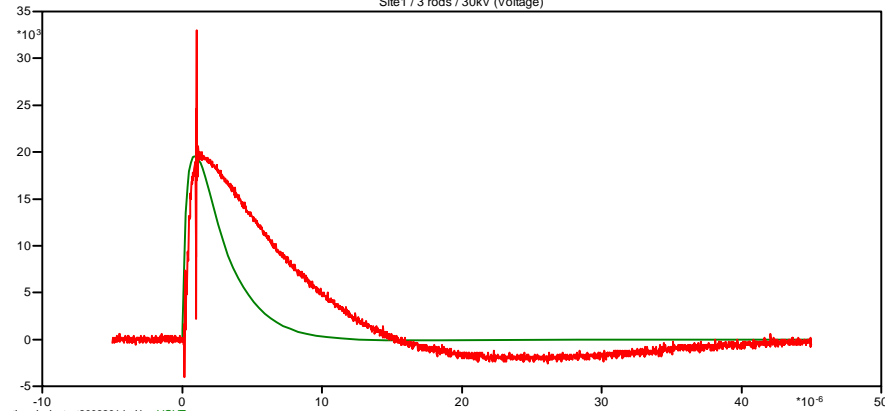
(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα των Nor et al. για την 1^η Σειρά Μετρήσεων

Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος που προέκυψαν από την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών (με πράσινο χρώμα) βάσει του μοντέλου που προτάθηκε από τους Nor et al. με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP (και συγκεκριμένα των προγραμμάτων ATPDraw και PlotXY) όπως και οι αντίστοιχες καταγεγραμμένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές της 1^{ης} σειράς μετρήσεων (με κόκκινο χρώμα). Αριστερά φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης (σε kV) και δεξιά οι κυματομορφές του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε μs.

Δείγμα Εδάφους 1 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 30kV

Κυματομορφές Τάσης

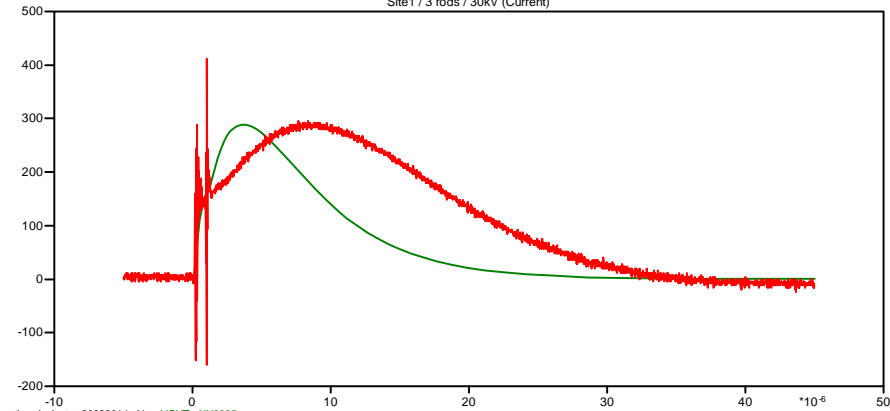
Site1 / 3 rods / 30kV (Voltage)



theodosis_test20032014.p4: v:VOUT
Site1_30_KW_3rods.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Site1 / 3 rods / 30kV (Current)

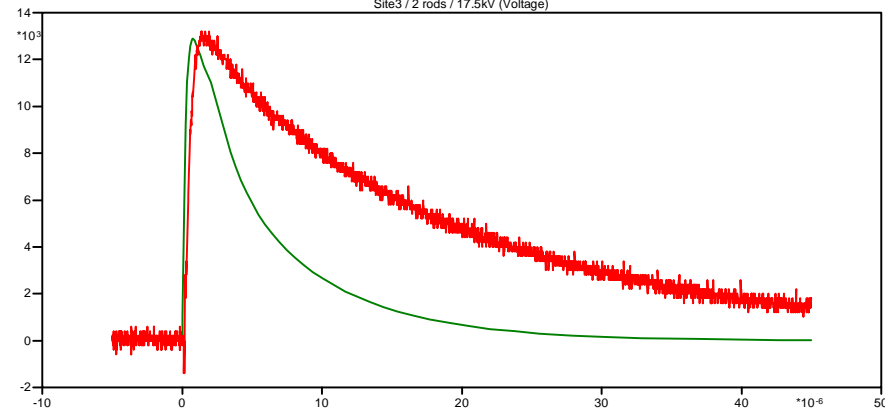


theodosis_test20032014.p4: c:VOUT -XX0005
Site1_30_KW_3rods.adf: I

Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 17,5kV

Κυματομορφές Τάσης

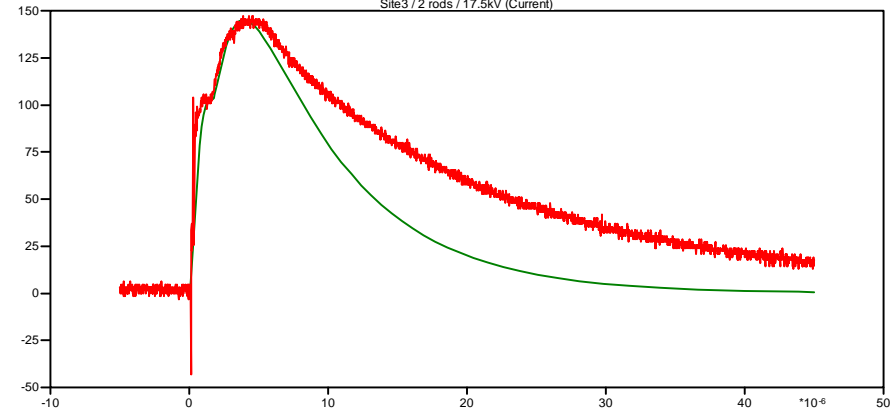
Site3 / 2 rods / 17.5kV (Voltage)



theodosis_test20032014.p4: v:VOUT
Site3_17_5_KW_2rods.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

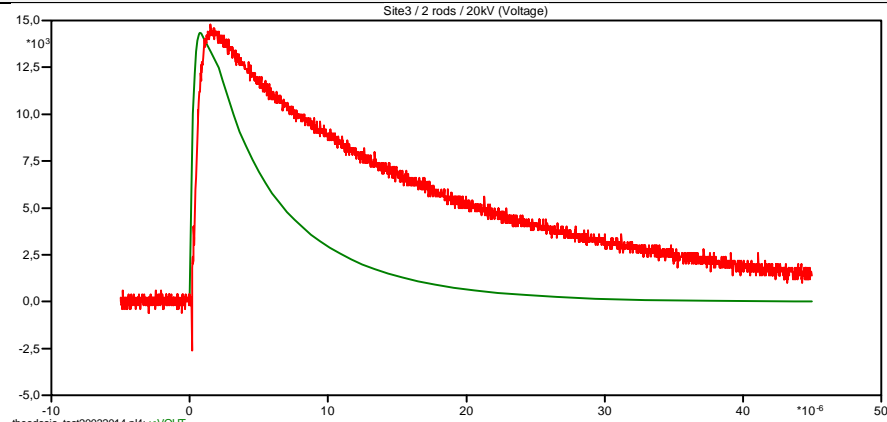
Site3 / 2 rods / 17.5kV (Current)



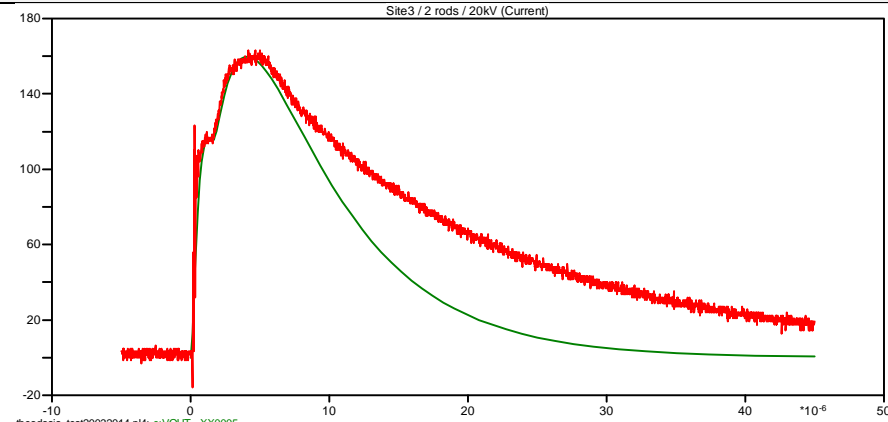
theodosis_test20032014.p4: c:VOUT -XX0005
Site3_17_5_KW_2rods.adf: I

Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 20kV

Κυματομορφές Τάσης

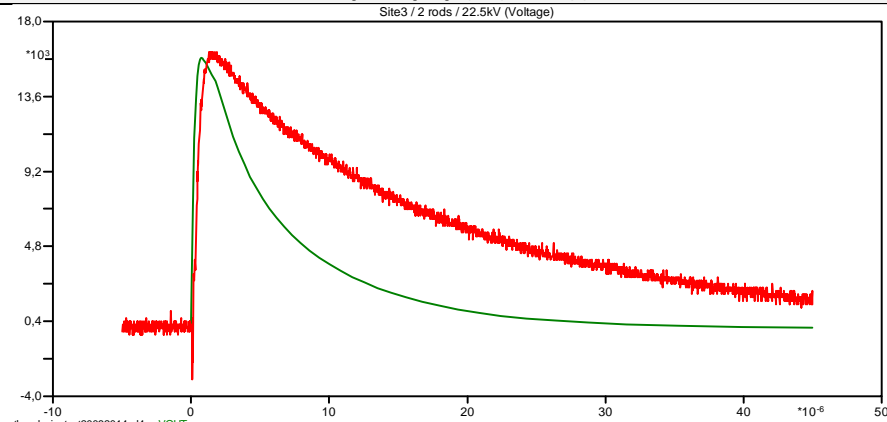


Κυματομορφές Ρεύματος

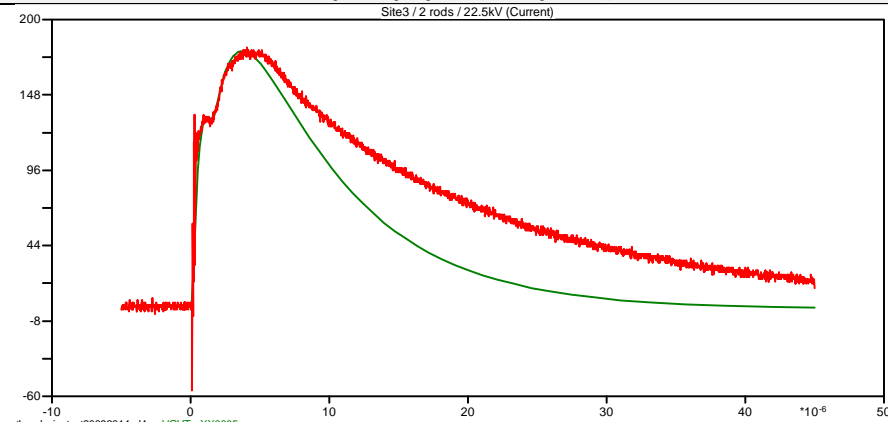


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 22,5kV

Κυματομορφές Τάσης

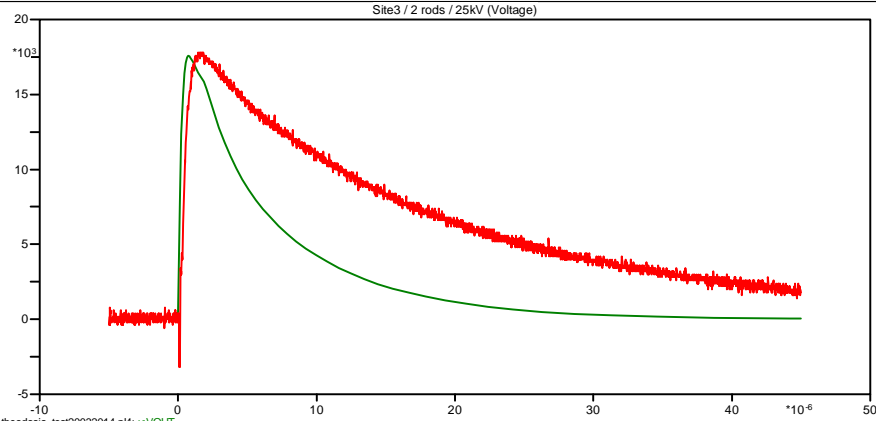


Κυματομορφές Ρεύματος

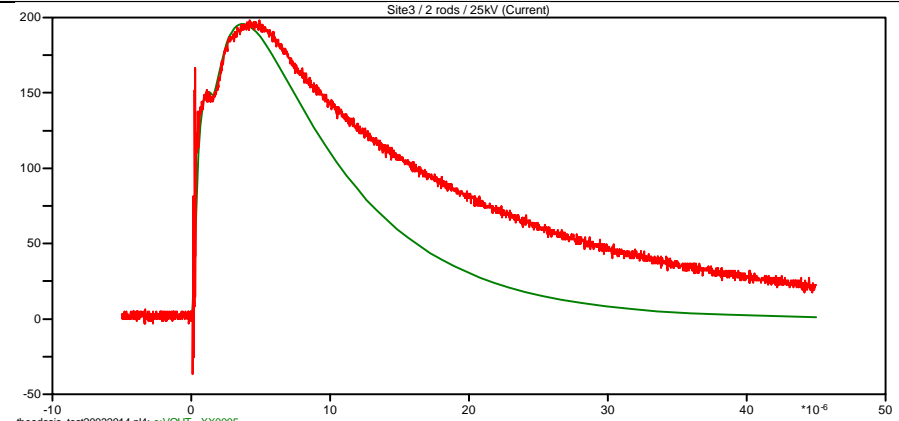


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 25kV

Κυματομορφές Τάσης

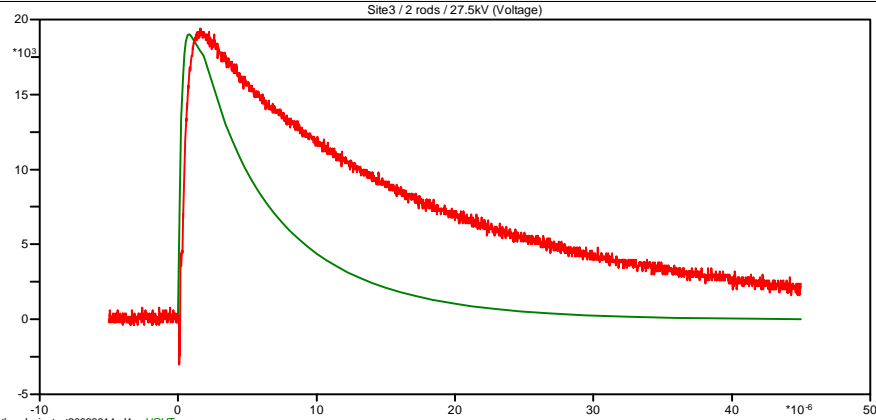


Κυματομορφές Ρεύματος

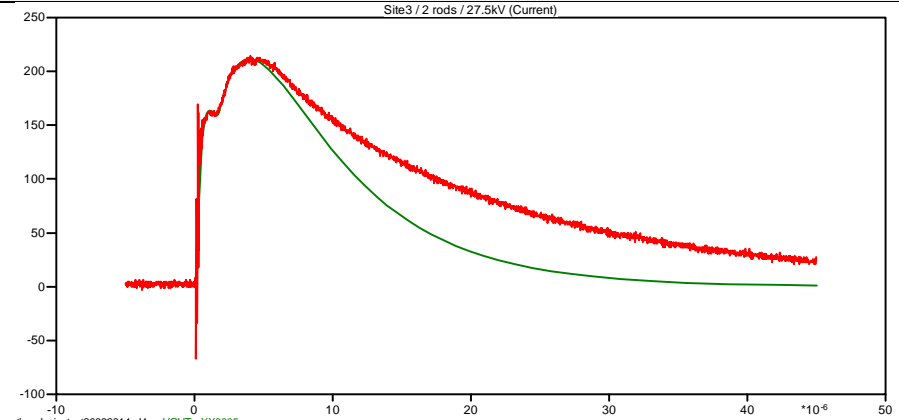


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 27,5kV

Κυματομορφές Τάσης

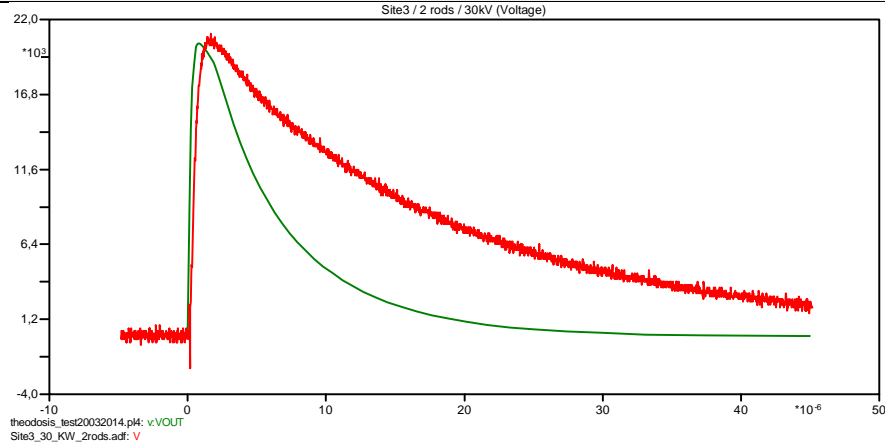


Κυματομορφές Ρεύματος

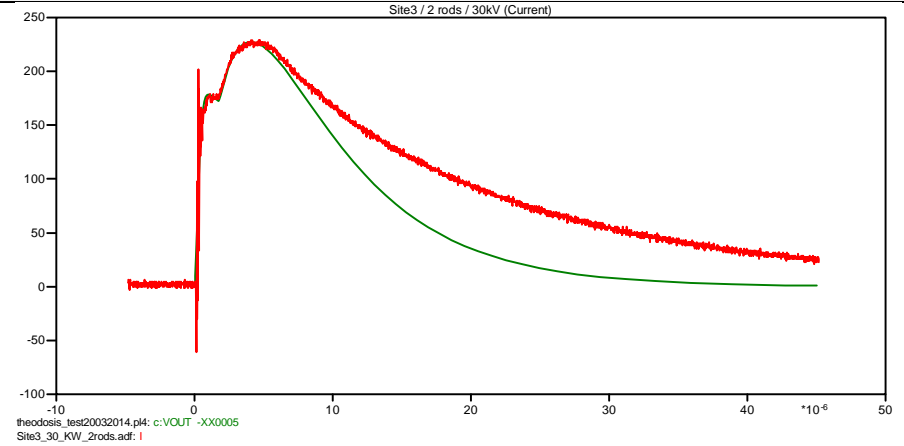


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 30kV

Κυματομορφές Τάσης

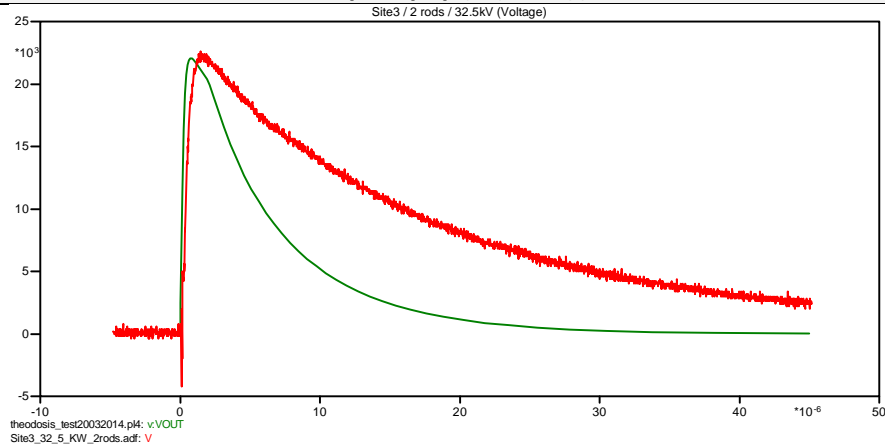


Κυματομορφές Ρεύματος

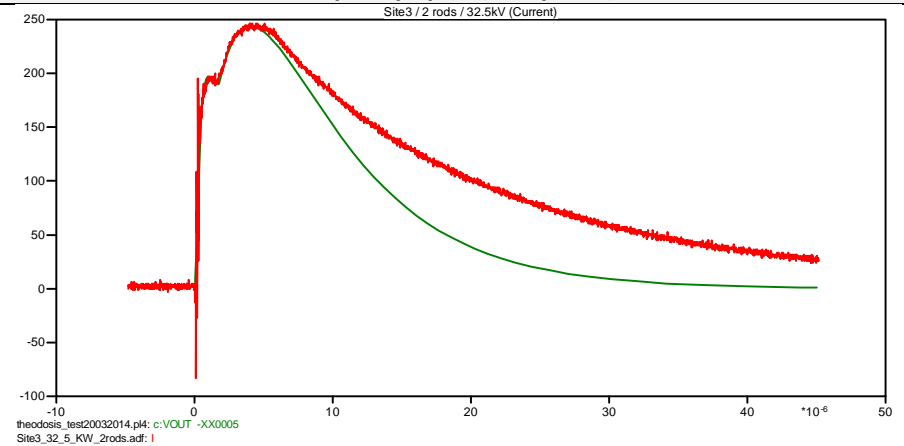


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 32,5kV

Κυματομορφές Τάσης

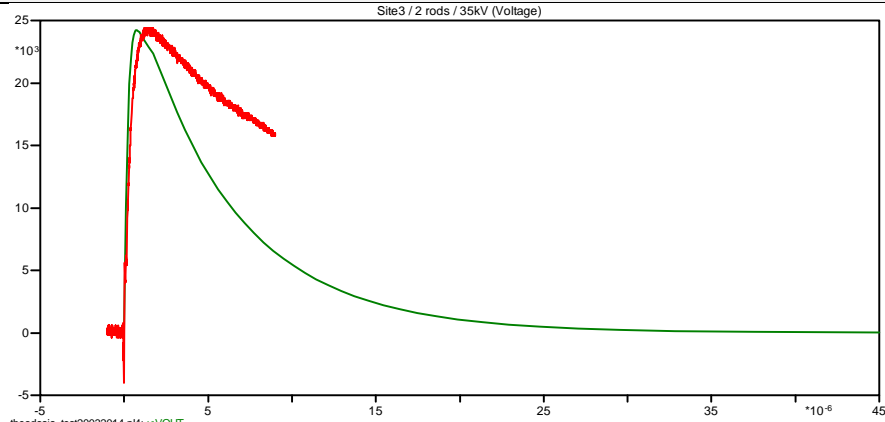


Κυματομορφές Ρεύματος

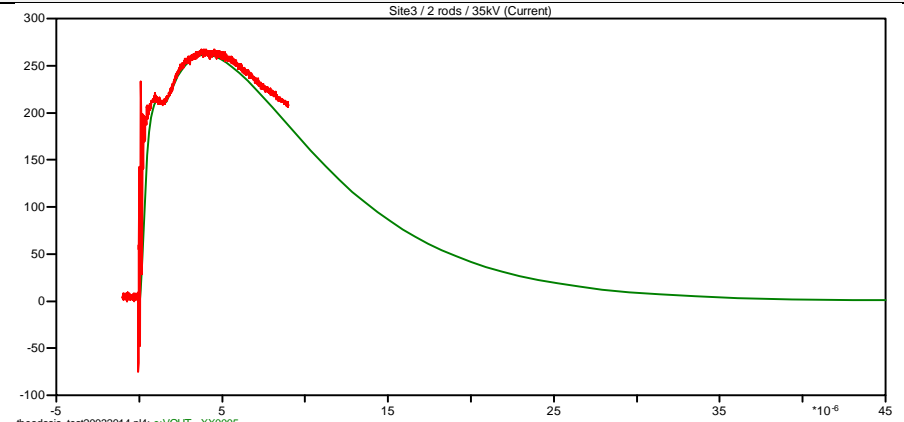


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 35kV

Κυματομορφές Τάσης

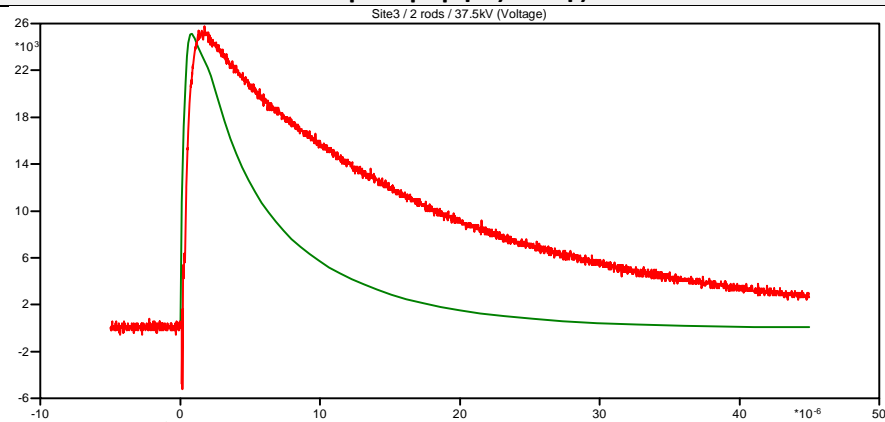


Κυματομορφές Ρεύματος

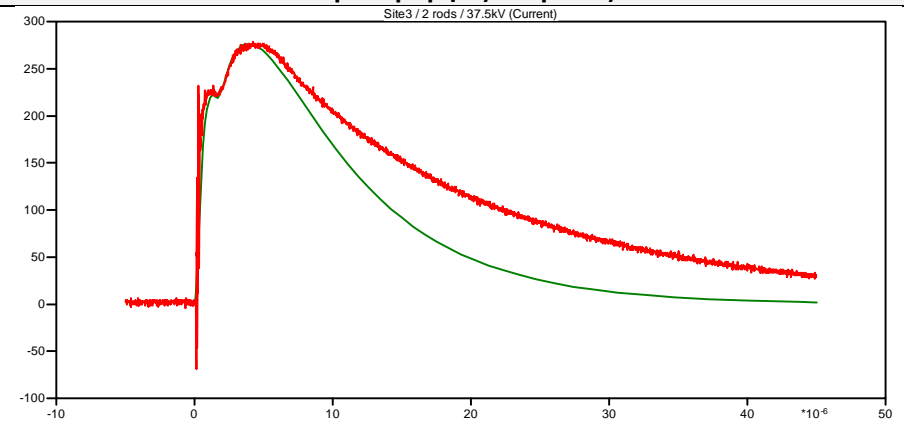


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 37,5kV

Κυματομορφές Τάσης



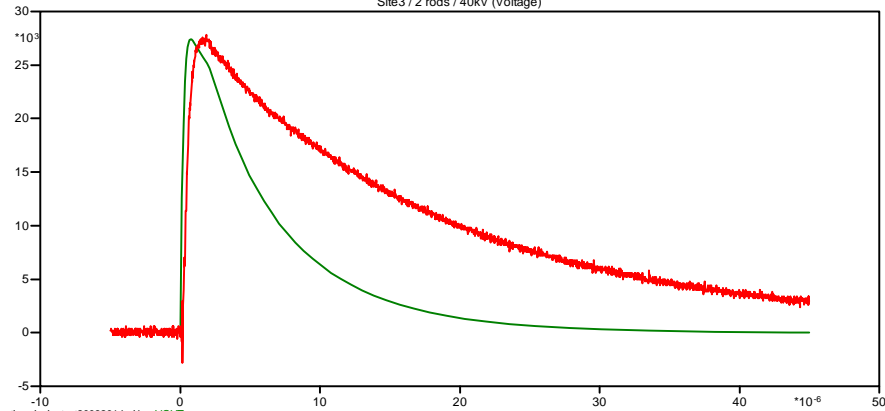
Κυματομορφές Ρεύματος



Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 2 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 40kV

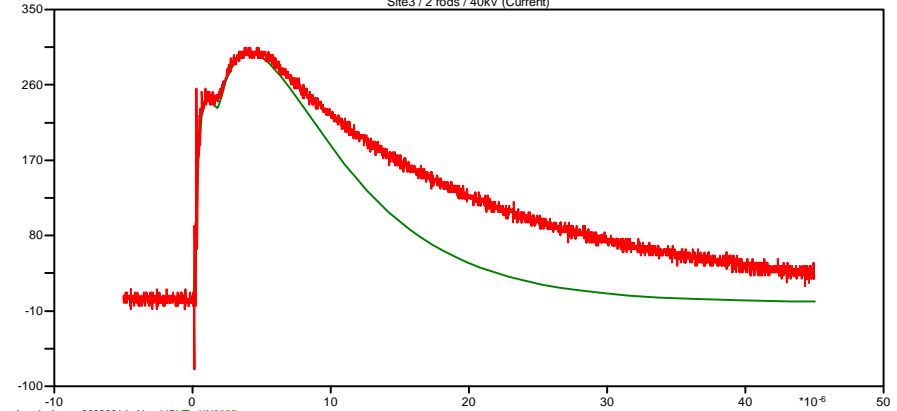
Κυματομορφές Τάσης

Site3 / 2 rods / 40kV (Voltage)



Κυματομορφές Ρεύματος

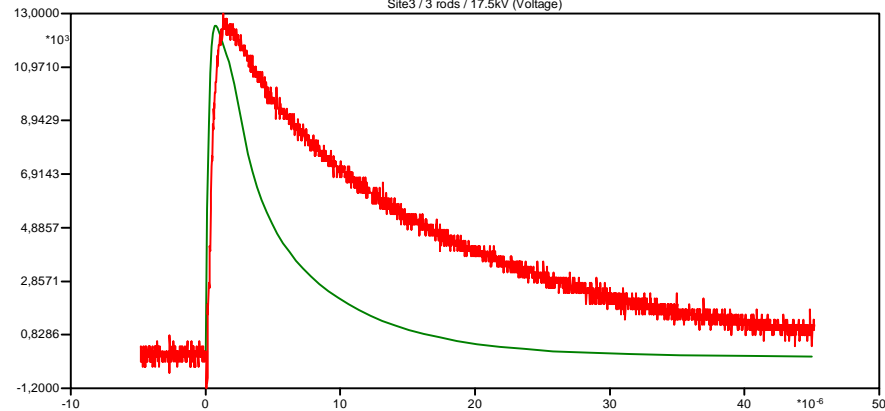
Site3 / 2 rods / 40kV (Current)



Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 17,5kV

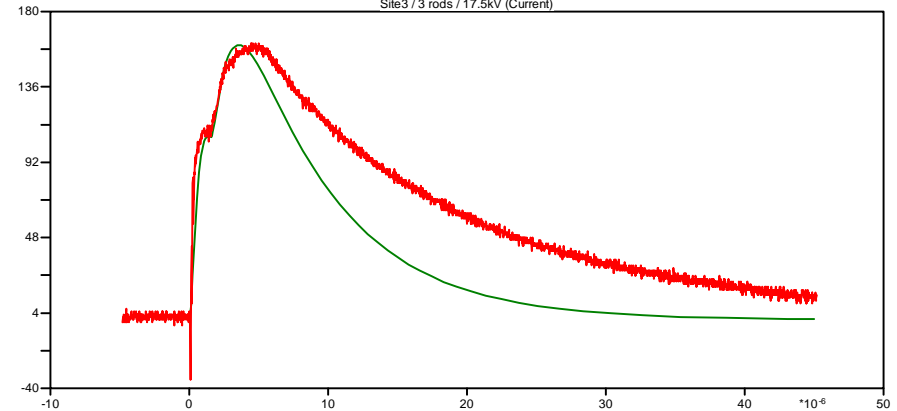
Κυματομορφές Τάσης

Site3 / 3 rods / 17.5kV (Voltage)



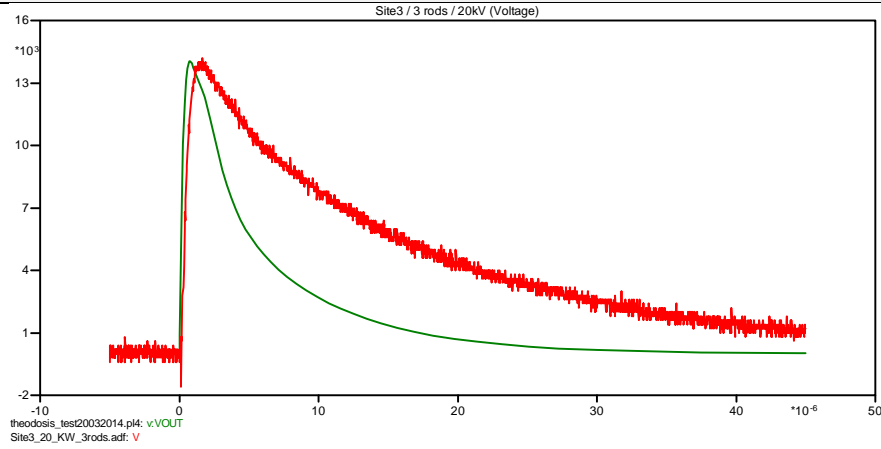
Κυματομορφές Ρεύματος

Site3 / 3 rods / 17.5kV (Current)

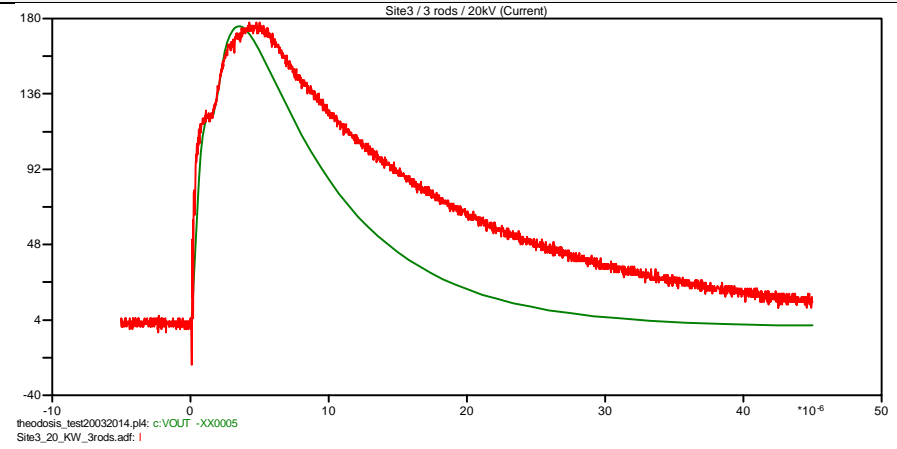


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 20kV

Κυματομορφές Τάσης

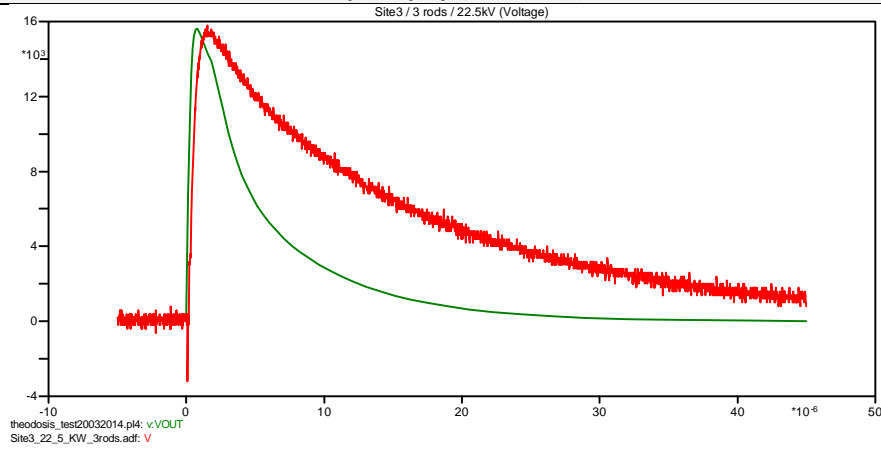


Κυματομορφές Ρεύματος

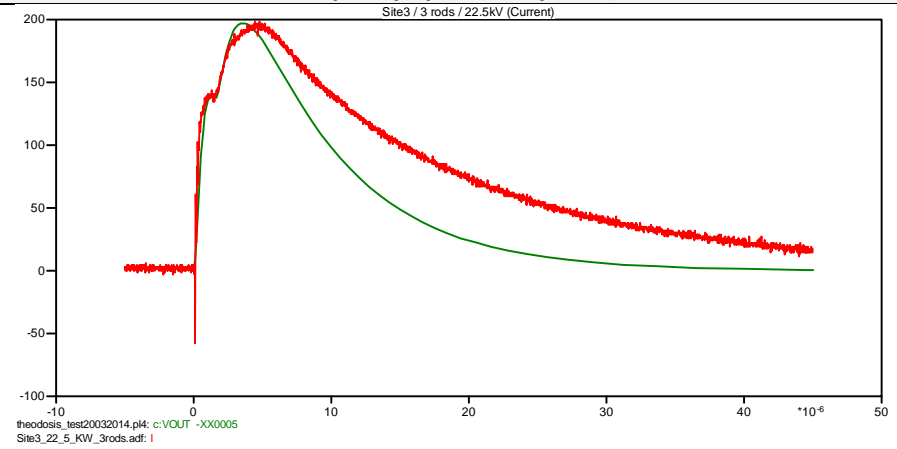


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 22,5kV

Κυματομορφές Τάσης

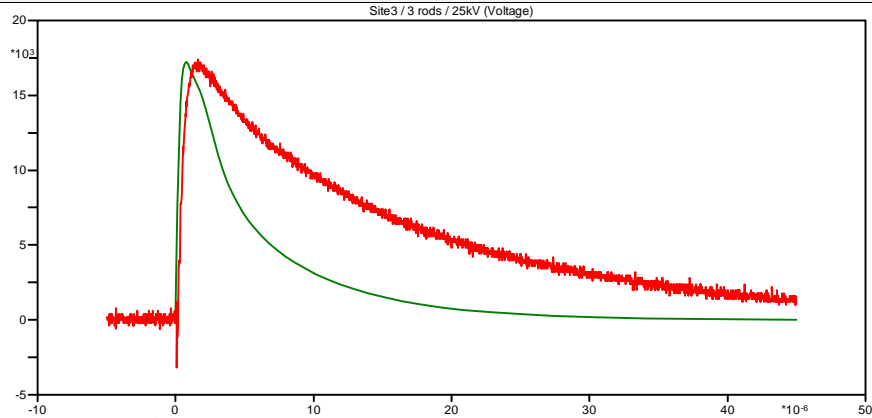


Κυματομορφές Ρεύματος

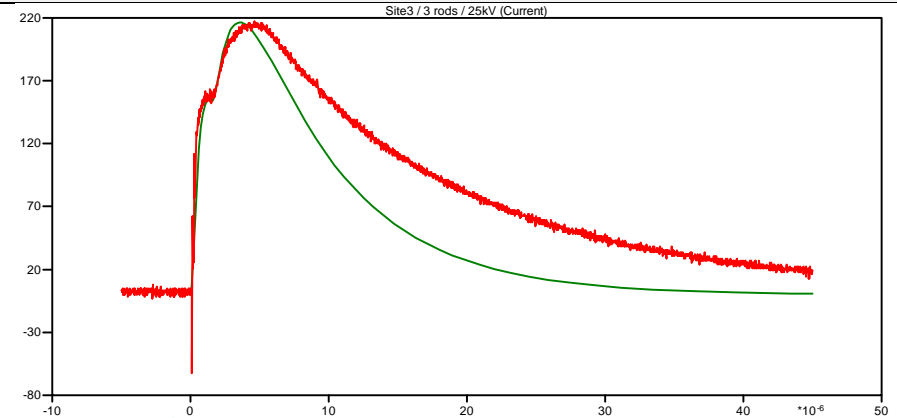


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 25kV

Κυματομορφές Τάσης

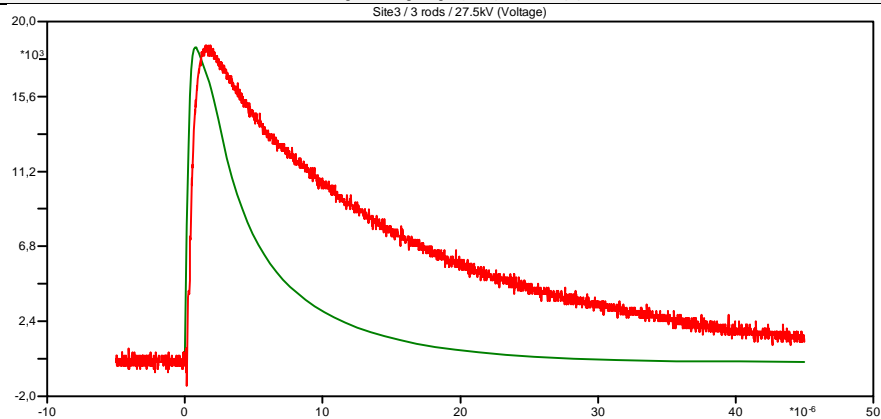


Κυματομορφές Ρεύματος

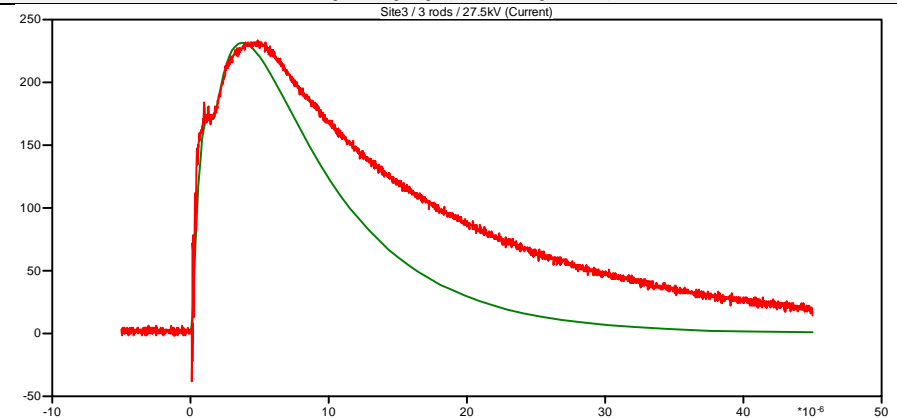


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 27,5kV

Κυματομορφές Τάσης

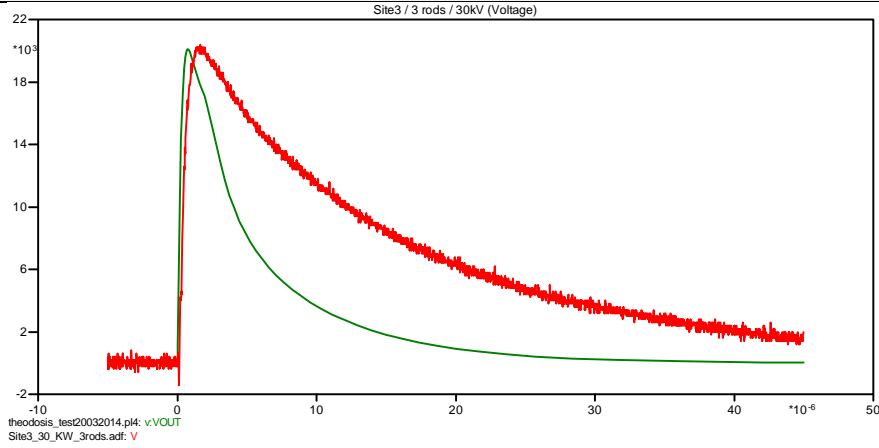


Κυματομορφές Ρεύματος

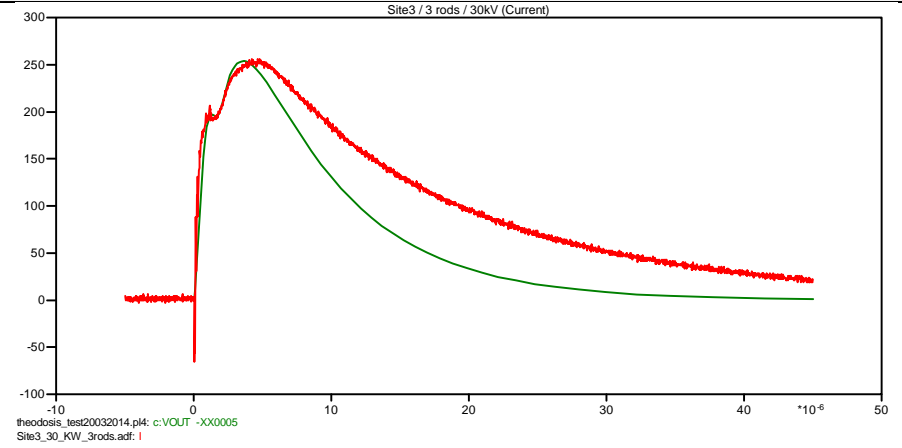


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 30kV

Κυματομορφές Τάσης

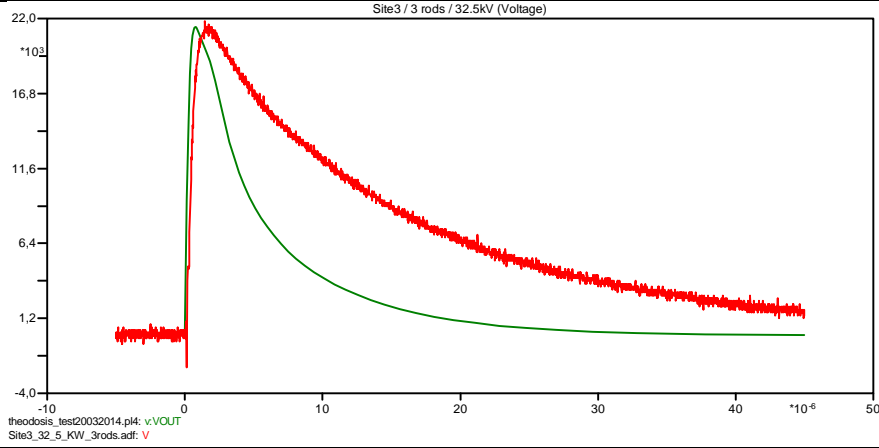


Κυματομορφές Ρεύματος

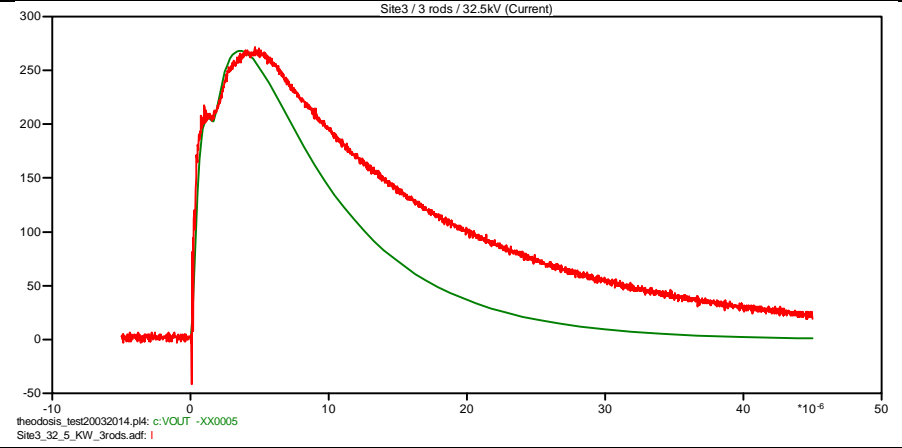


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 32,5kV

Κυματομορφές Τάσης

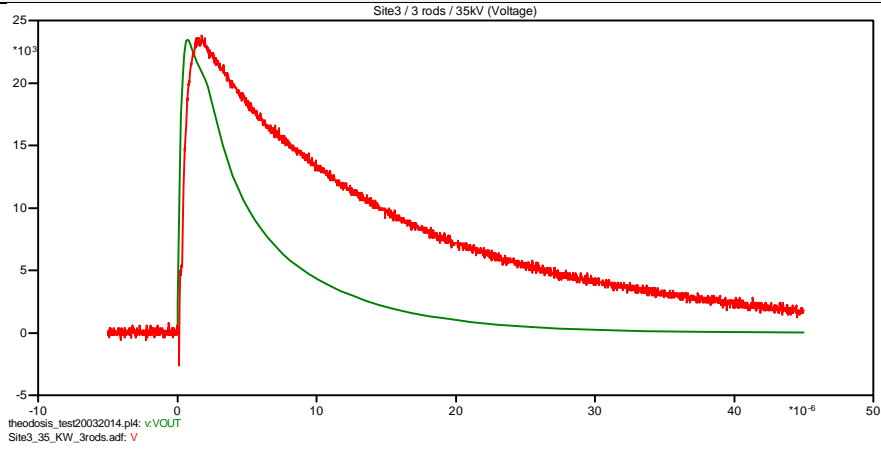


Κυματομορφές Ρεύματος

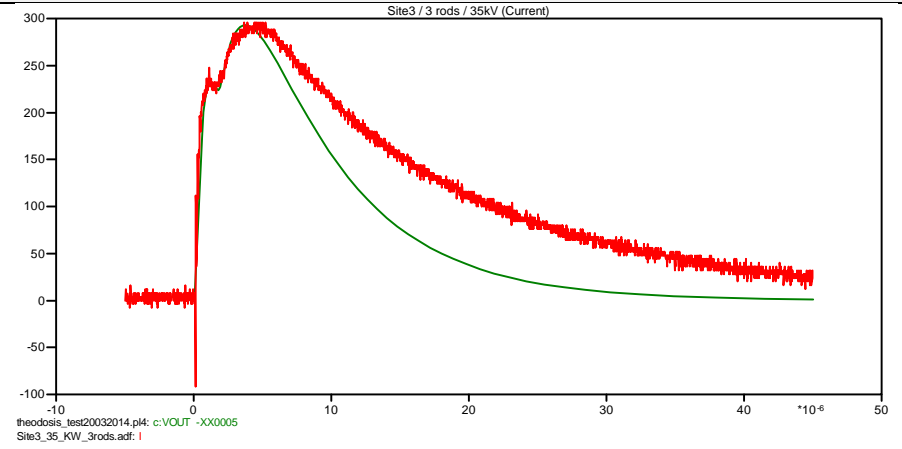


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 35kV

Κυματομορφές Τάσης

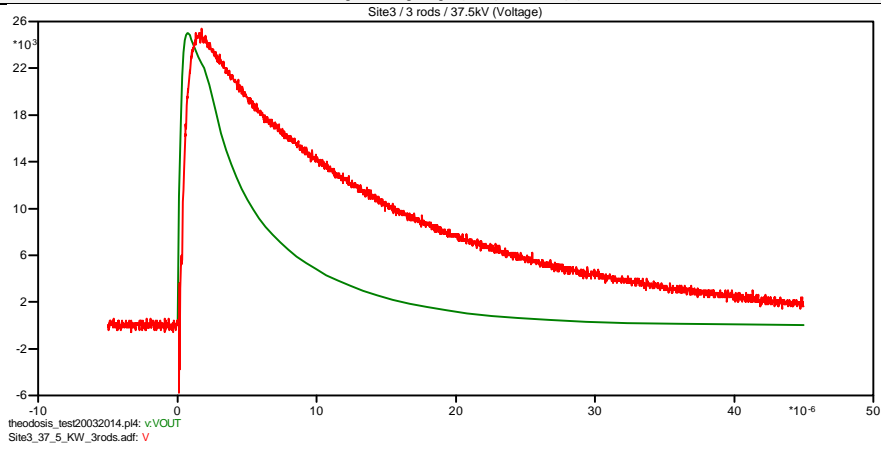


Κυματομορφές Ρεύματος

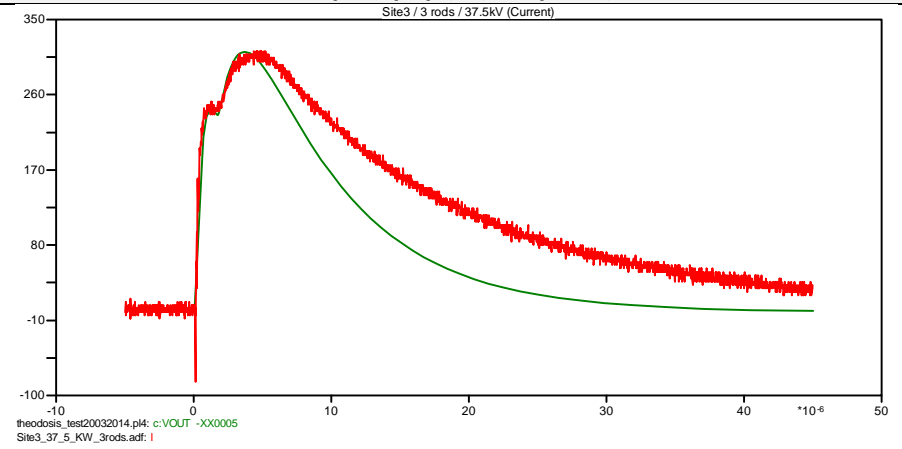


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 37,5kV

Κυματομορφές Τάσης

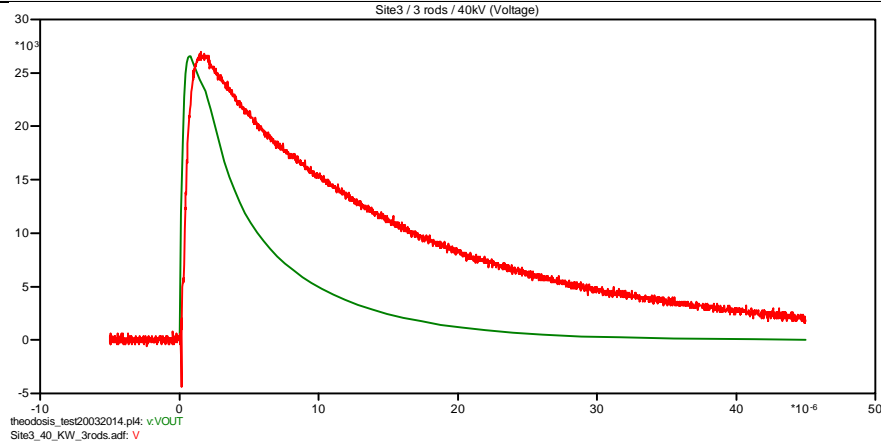


Κυματομορφές Ρεύματος

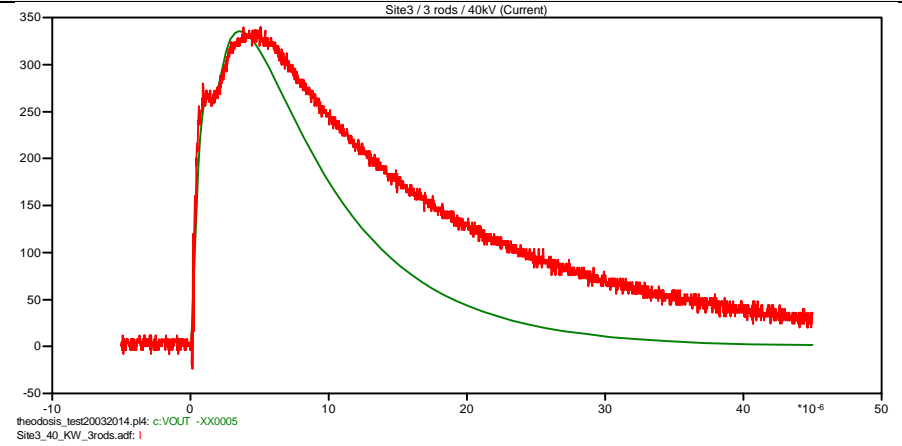


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 3 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 40kV

Κυματομορφές Τάσης

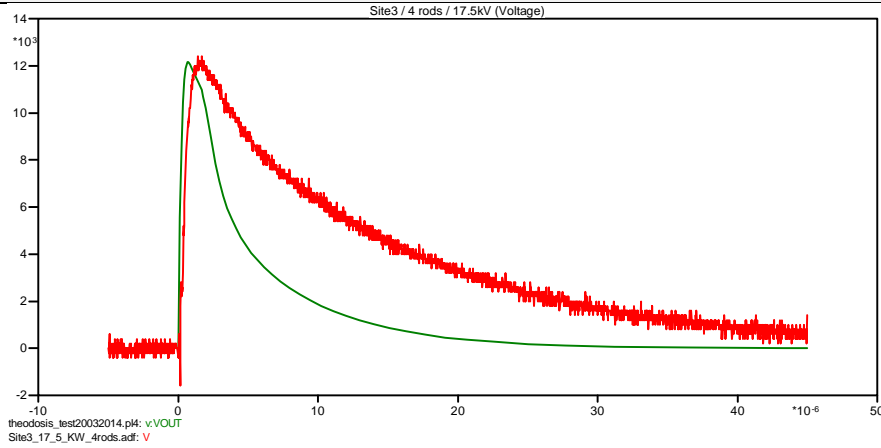


Κυματομορφές Ρεύματος

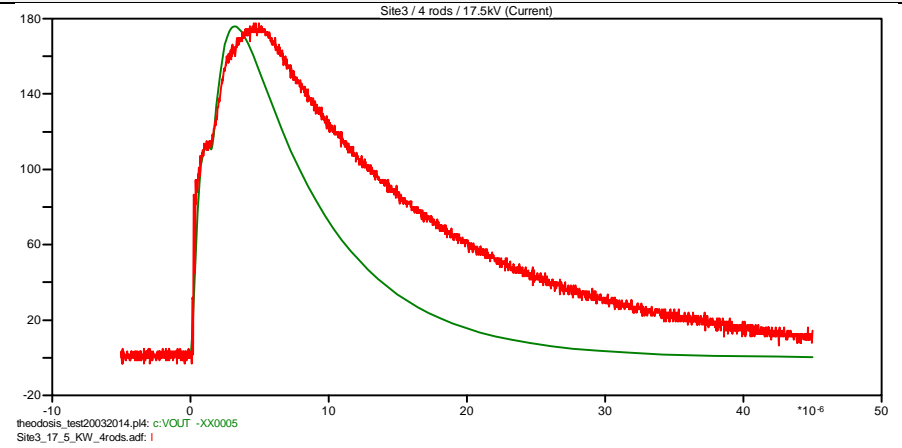


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 17,5kV

Κυματομορφές Τάσης

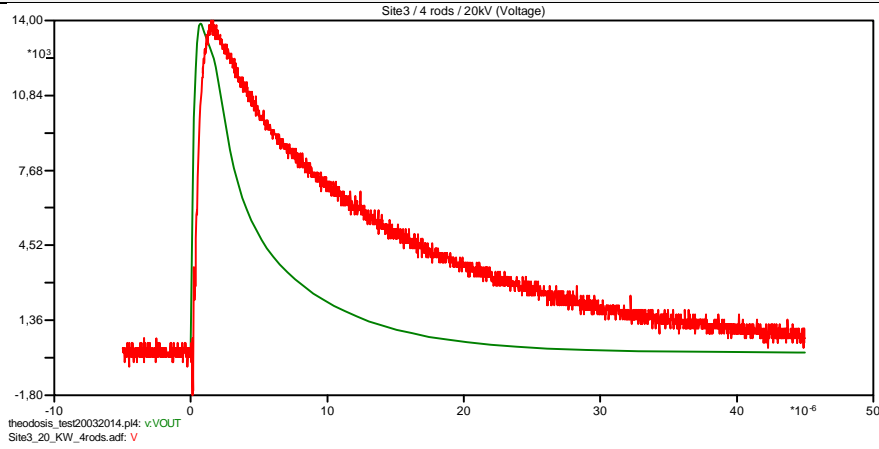


Κυματομορφές Ρεύματος

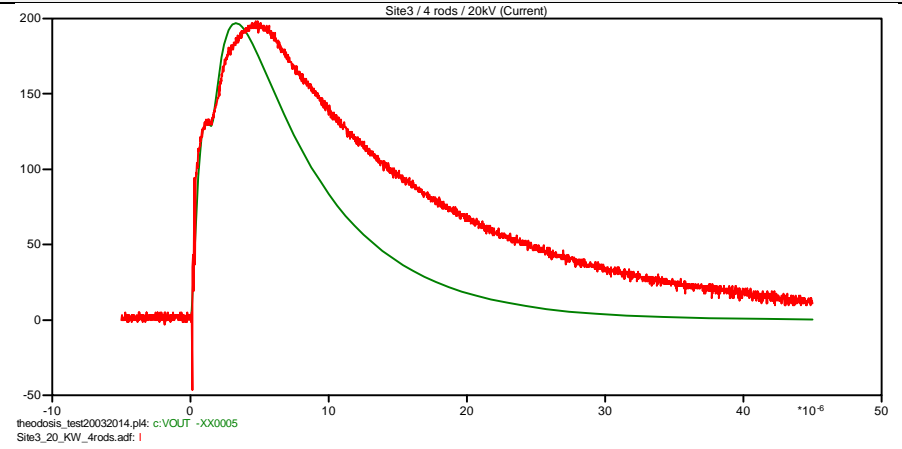


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 20kV

Κυματομορφές Τάσης

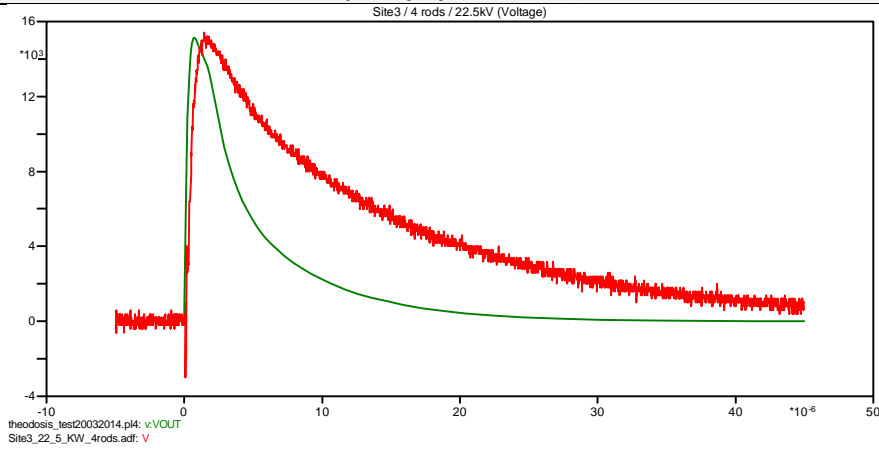


Κυματομορφές Ρεύματος

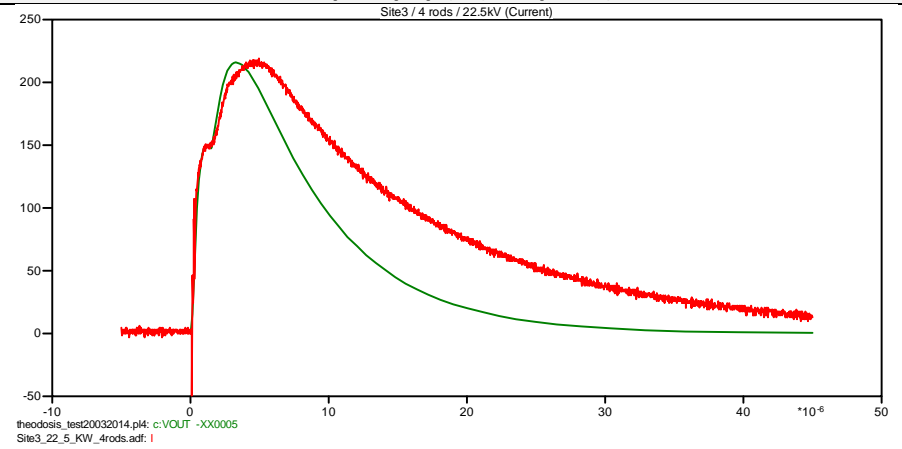


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 22,5kV

Κυματομορφές Τάσης

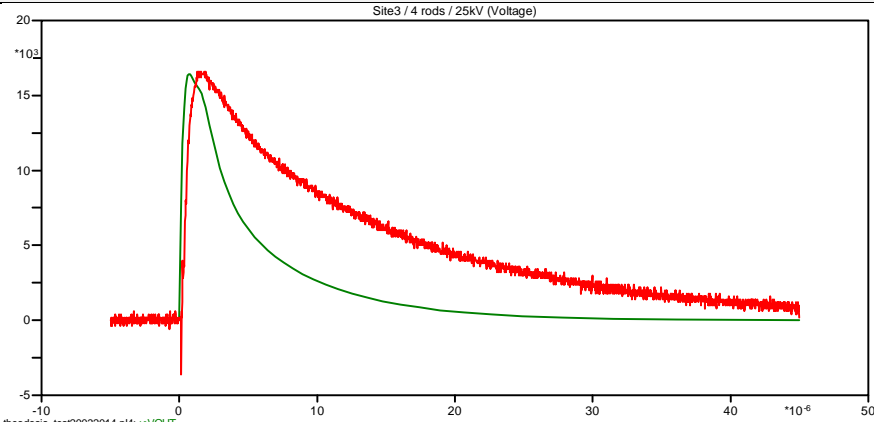


Κυματομορφές Ρεύματος

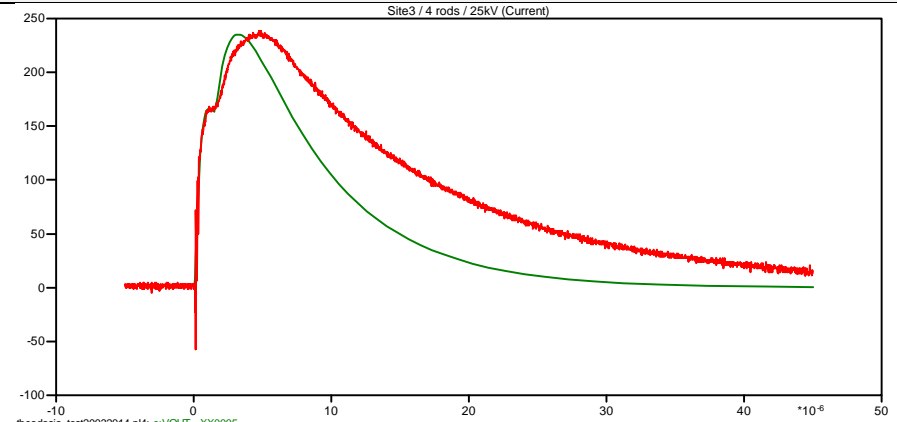


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 25kV

Κυματομορφές Τάσης

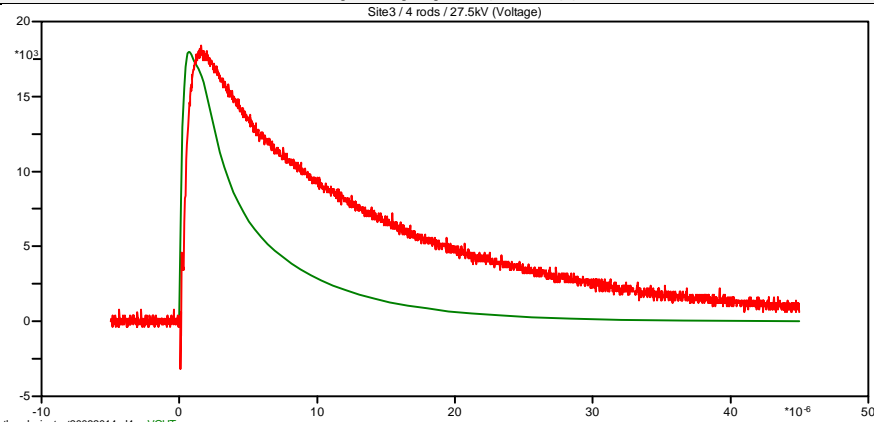


Κυματομορφές Ρεύματος

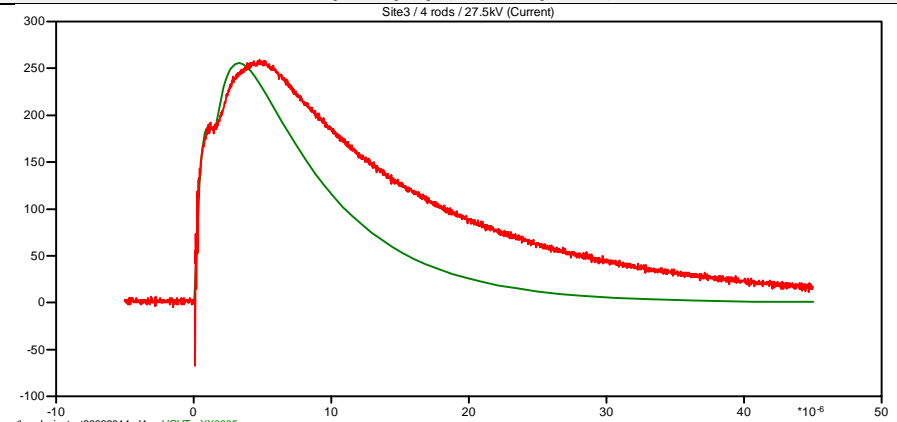


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 27,5kV

Κυματομορφές Τάσης

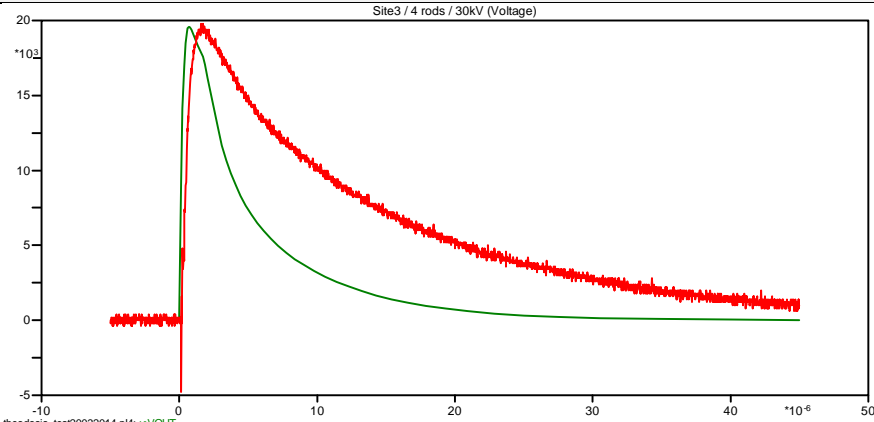


Κυματομορφές Ρεύματος

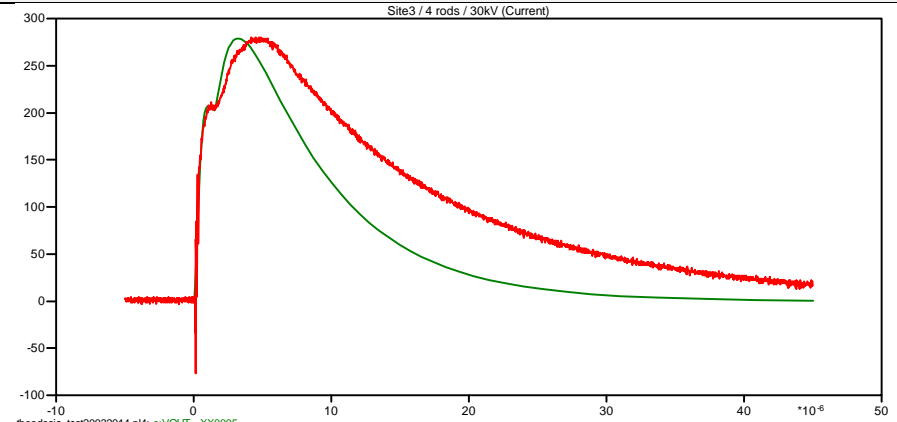


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 30kV

Κυματομορφές Τάσης

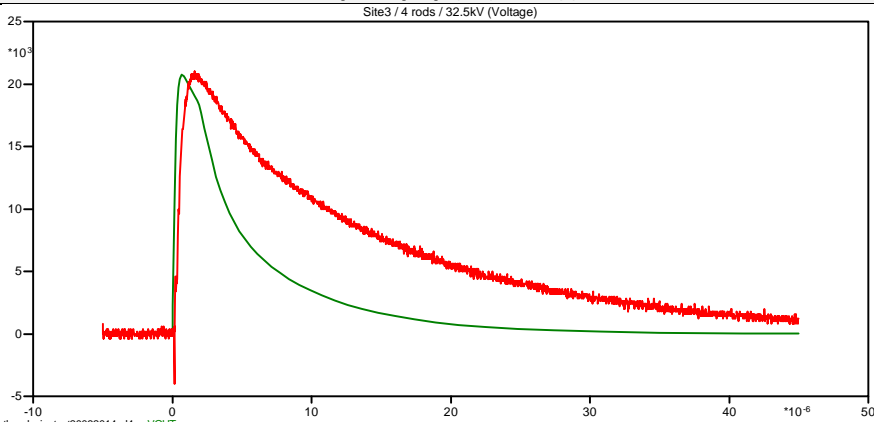


Κυματομορφές Ρεύματος

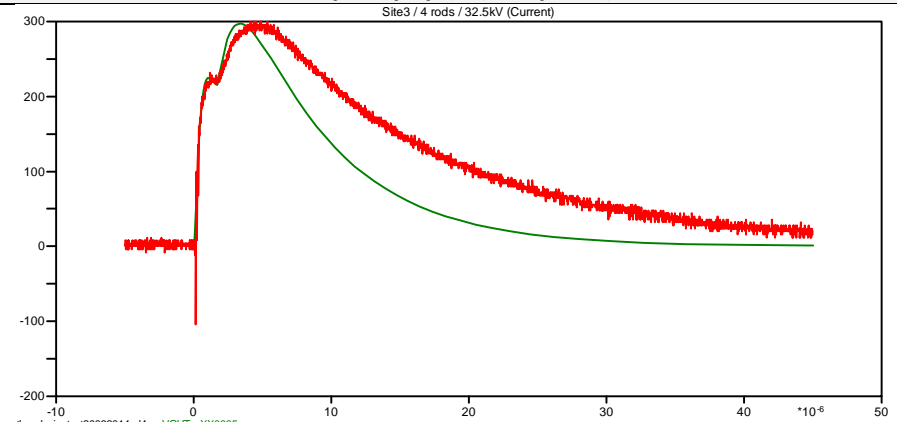


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 32,5kV

Κυματομορφές Τάσης

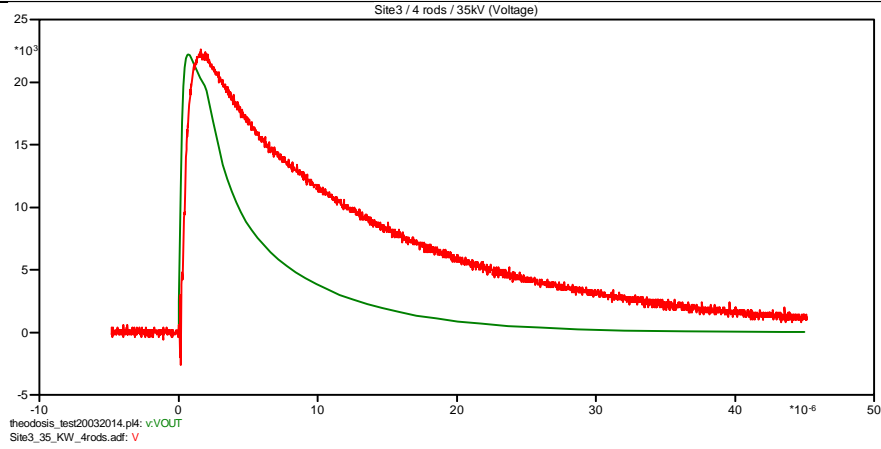


Κυματομορφές Ρεύματος

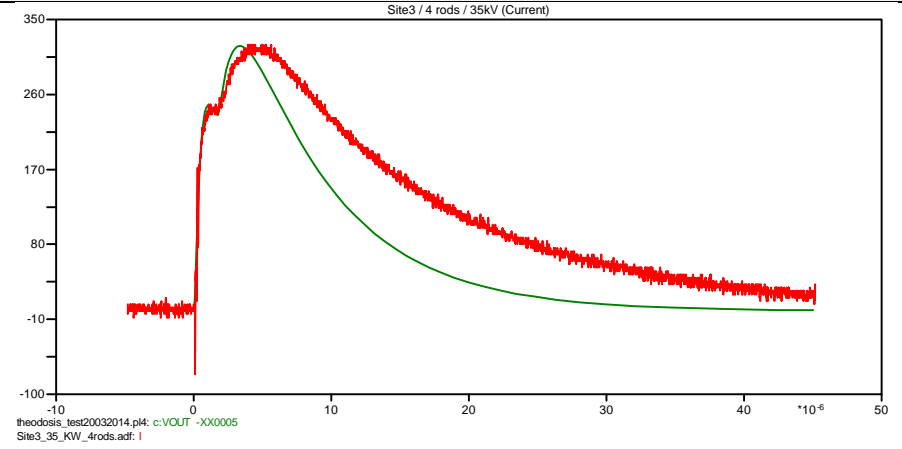


Δείγμα Εδάφους 3 / Διάταξη Δοκιμών με 4 Ράβδους / Τάση Φόρτισης 35kV

Κυματομορφές Τάσης



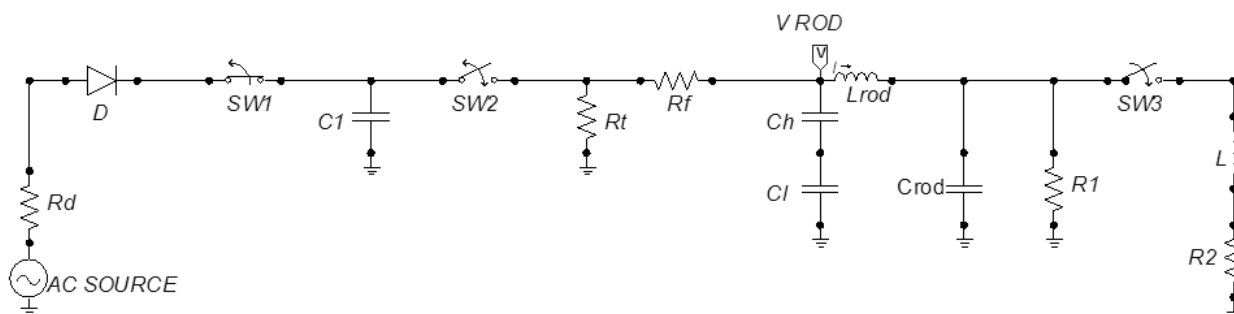
Κυματομορφές Ρεύματος



4.3.2 Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου των Nor et al. για τη 2^η Σειρά Μετρήσεων

(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα

Στην *Εικόνα 4.4* φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου που προτάθηκε από τους Nor et al. και όπως αυτό υλοποιήθηκε στο ATPDraw του λογισμικού ATP-EMTP, με σκοπό την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών της 2^{ης} σειράς μετρήσεων (δείγμα εδάφους B με υγρασία 10% και θετική πολικότητα).



Εικόνα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου των Nor et al.

Όπου:

- $R_d = 100 \Omega$
- $C_1 = 6 \text{ nF}$
- $R_t = 9,5 \text{ k}\Omega$
- $R_f = 416 \Omega$
- $C_h = 1,2 \text{ nF}$
- $C_l = 504 \text{ nF}$
- $L_{rod} = 191 \text{ mH}$ (από Εξίσωση 3.1)
- $C_{rod} = 40,53 \text{ pF}$ (από Εξίσωση 4.6)
- $T_{open_SW1} = 0$
- $T_{close_SW2} = 10 \mu\text{sec}$

Οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 , γενικά, προκύπτουν βάσει των καταγεγραμμένων κυματομορφών τάσης και ρεύματος για κάθε τάση φόρτισης και των Εξισώσεων 2.6 και 2.7. Επειδή, όμως, ειδικά για το δείγμα εδάφους B (βλ. *Ενότητα 3.2.3*) η κυματομορφή ρεύματος έχει μόνο μία κορυφή για τις δεδομένες τάσεις φόρτισης, έγινε προσπάθεια να προσαρμοστεί το κύκλωμα των Nor et al. ώστε να προσεγγίζει τα παλμογραφήματα του δείγματος εδάφους B. Σύμφωνα με την προσέγγιση του μοντέλου, η εμφάνιση της κορυφής του ρεύματος στο κύκλωμα απαιτεί μια ισοδύναμη συνολική αντίσταση:

$$R = \frac{V_{Imax}}{I_{max}} \quad (4.1)$$

Αγνοώντας τη συνεισφορά του L στο μέγεθος του ρεύματος, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κατά τη διάρκεια του ιονισμού η παραπάνω αντίσταση είναι η παράλληλη σύνδεση των προ και μετά τον ιονισμό αντιστάσεων R_1 και R_2 . Έτσι, μια προσέγγιση των R_1 και R_2 δίνεται από την *Εξίσωση 4.2*:

$$R \cong R_1 // R_2 \Rightarrow R_1 = R_2 = 2 \cdot \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \quad (4.2)$$

Η χρονική στιγμή βραχυκυκλώσεως του διακόπτη SW_3 προσδιορίστηκε με αυξομειώσεις της τιμής κατά την προσομοίωση και επιλογή της βέλτιστης, ώστε οι προκύπτουσες από τις προσομοιώσεις κυματομορφές τάσης και ρεύματος να προσεγγίζει τις αντίστοιχες κυματομορφές που καταγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών. Με τον ίδιο τρόπο, προσδιορίστηκε και η τιμή του στοιχείου L .

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των R_1 και R_2 , T_{close_SW3} και L για τη 2^η σειρά δοκιμών (δείγμα εδάφους B / υγρασία 10%).

Πίνακας 4.3: Τιμές των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος των Nor et al. (Δείγμα Εδάφους B)

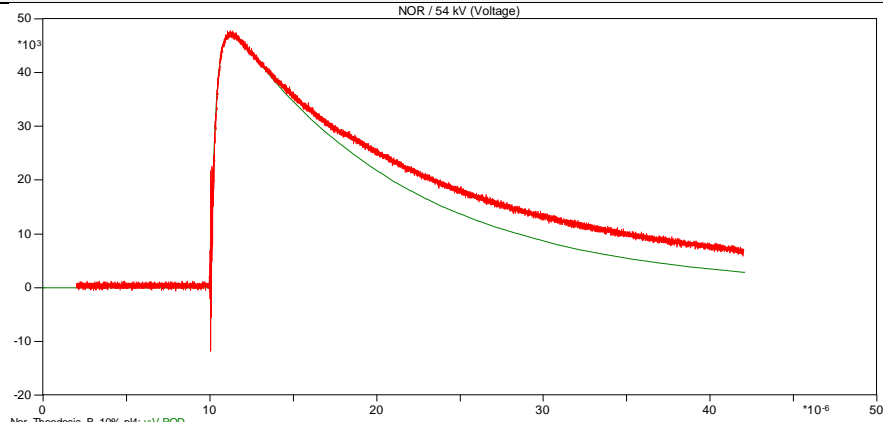
Τάση φόρτισης (kV)	$R_1=R_2$ (Ω)	T_{close_SW3} (μsec)	L (mH)
54	3018,3	10	0,02
55	2936,803	10	1,1
57	2810,191	10,2	1
59	2755,472	10,2	0,8
61	2703,036	10	0,8
64	2605,434	10	0,8
66	2478,669	10	0,8
68	2342,757	10,5	0,6
73	2176,117	10,55	0,5

(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα των Nor et al. για τη 2^η Σειρά Μετρήσεων

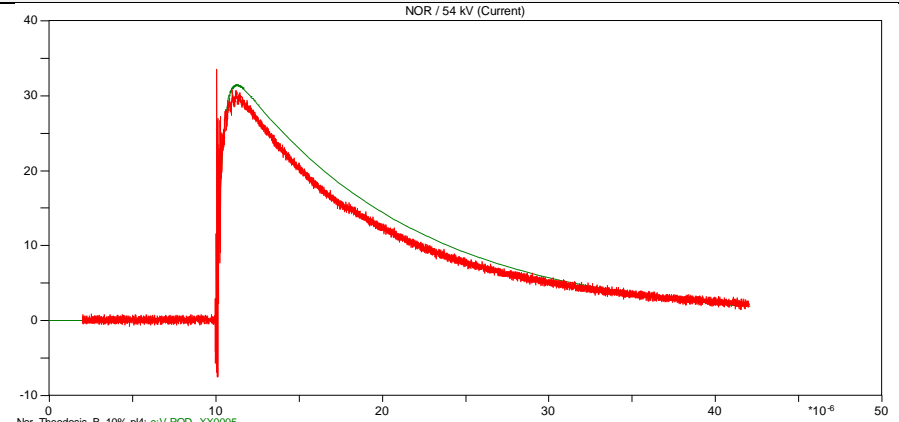
Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος (με το πράσινο χρώμα) που προέκυψαν από την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών βάσει του μοντέλου που προτάθηκε από τους Nor et al. και με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP (και συγκεκριμένα των προγραμμάτων ATPDraw και PlotXY) όπως και οι αντίστοιχες καταγεγραμμένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές της 2^{ης} σειράς μετρήσεων για το δείγμα εδάφους B με 10% υγρασία (με το κόκκινο χρώμα). Αριστερά φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης (σε kV) και δεξιά οι κυματομορφές του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε μs .

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 54kV

Κυματομορφές Τάσης

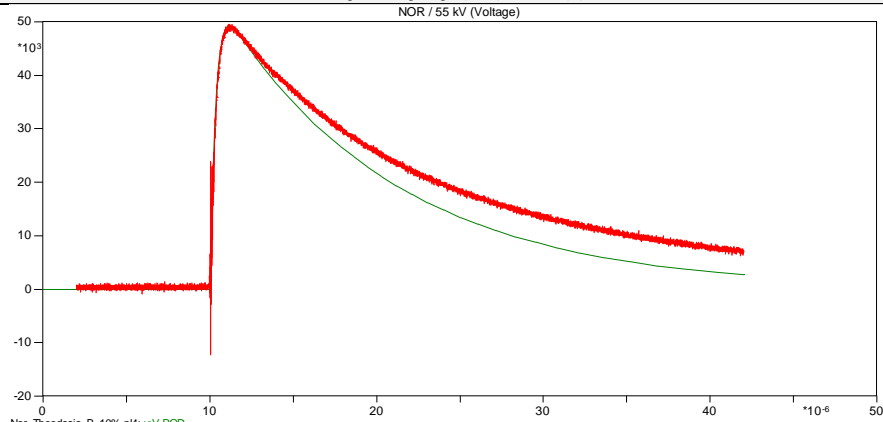


Κυματομορφές Ρεύματος

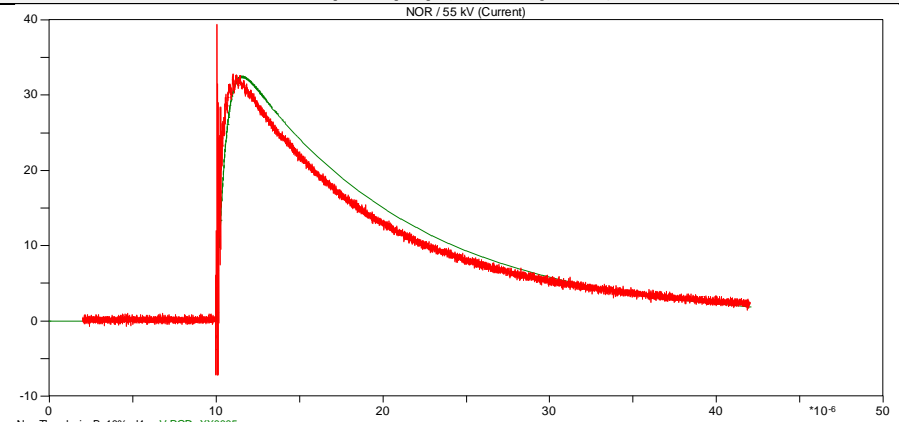


Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 55kV

Κυματομορφές Τάσης



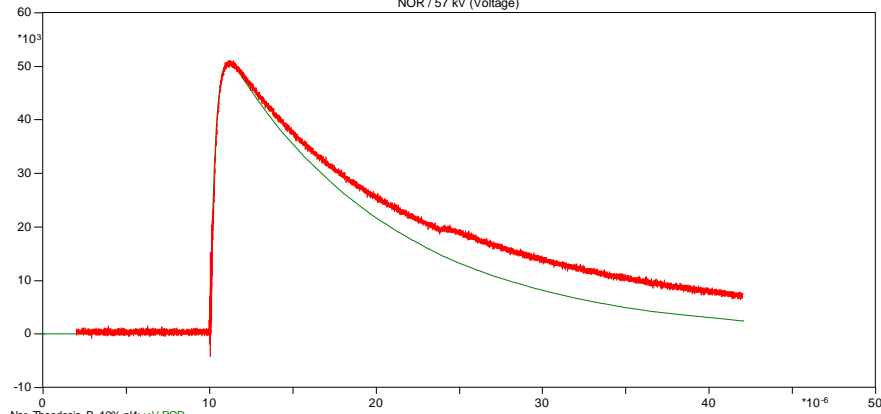
Κυματομορφές Ρεύματος



Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 57kV

Κυματομορφές Τάσης

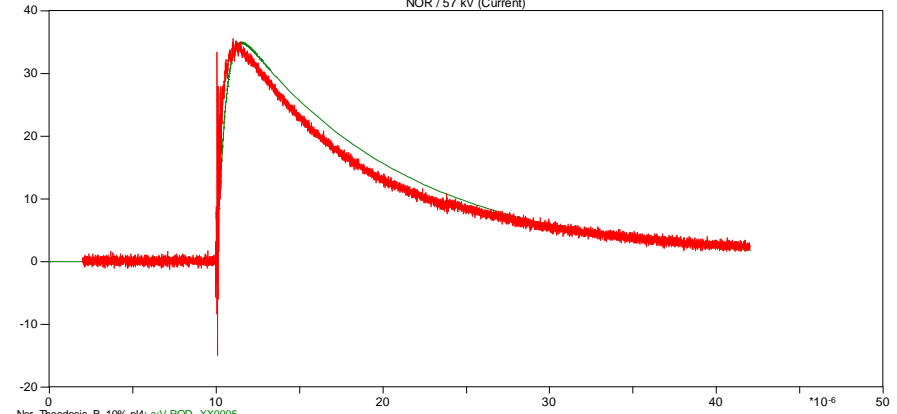
NOR / 57 kV (Voltage)



Nor_Theodosis_B_10%.p4: v:V ROD
57kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NOR / 57 kV (Current)

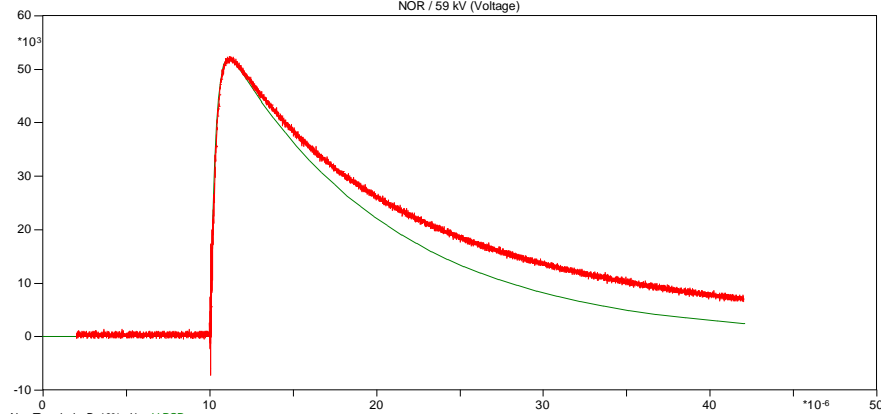


Nor_Theodosis_B_10%.p4: c:V ROD -XX0005
57kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 59kV

Κυματομορφές Τάσης

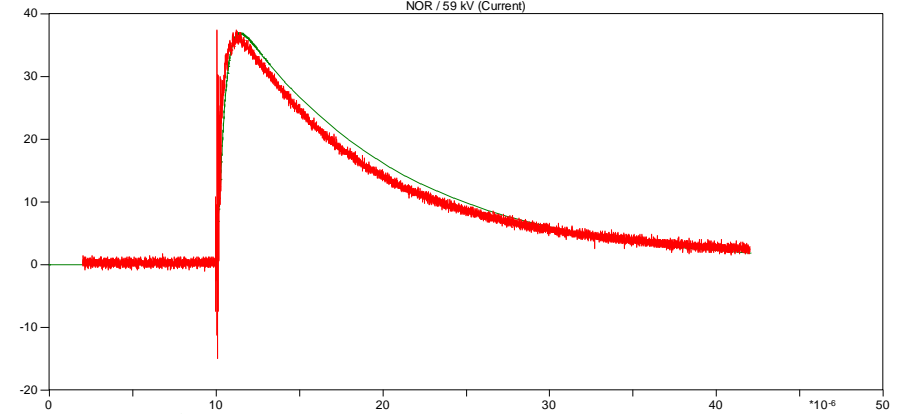
NOR / 59 kV (Voltage)



Nor_Theodosis_B_10%.p4: v:V ROD
59kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NOR / 59 kV (Current)

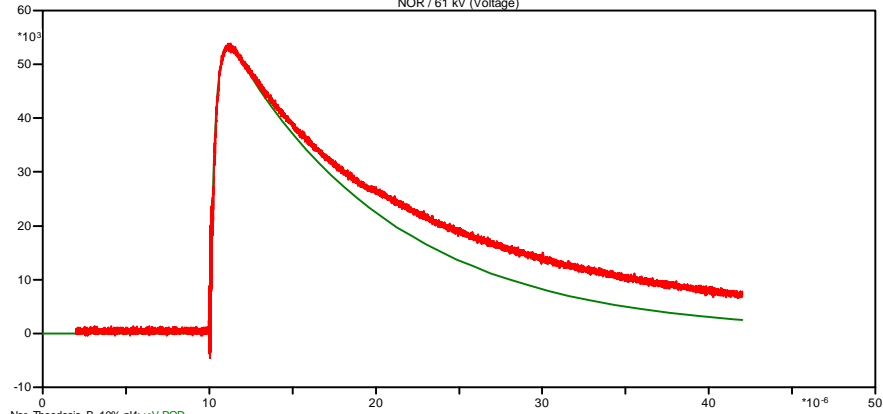


Nor_Theodosis_B_10%.p4: c:V ROD -XX0005
59kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 61kV

Κυματομορφές Τάσης

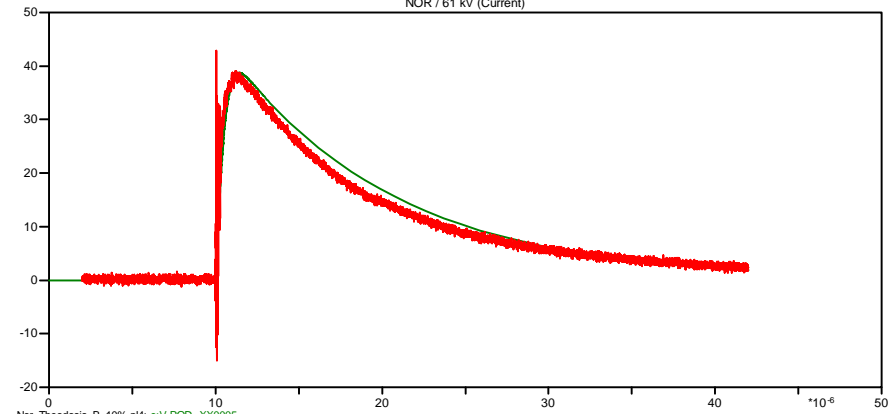
NOR / 61 kV (Voltage)



Nor_Theodosis_B_10%,p4: v:V ROD
61kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NOR / 61 kV (Current)

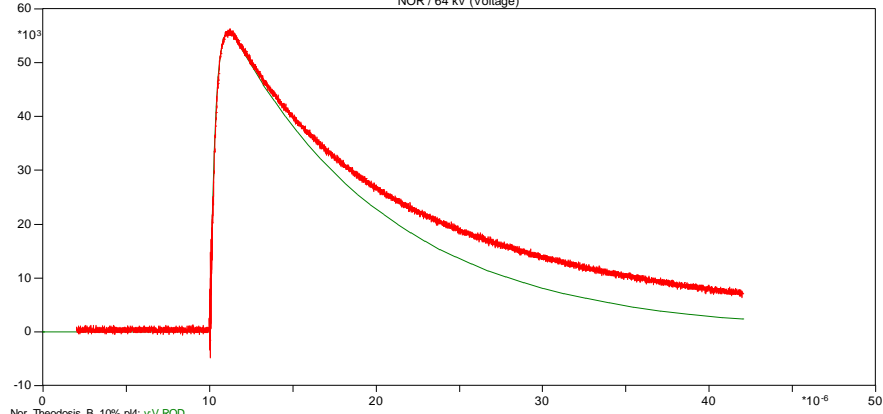


Nor_Theodosis_B_10%,p4: c:V ROD -XX0005
61kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 64kV

Κυματομορφές Τάσης

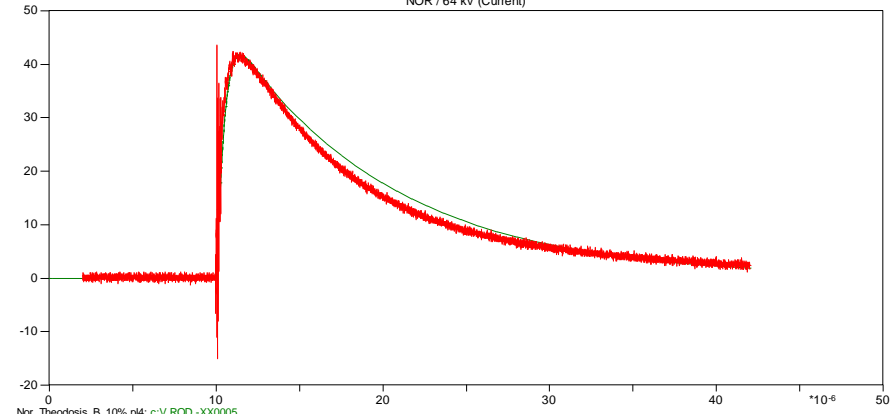
NOR / 64 kV (Voltage)



Nor_Theodosis_B_10%,p4: v:V ROD
64kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NOR / 64 kV (Current)

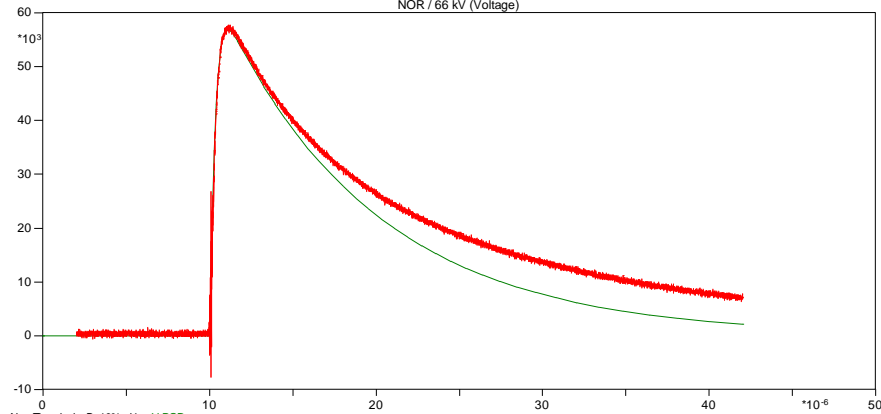


Nor_Theodosis_B_10%,p4: c:V ROD -XX0005
64kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 66kV

Κυματομορφές Τάσης

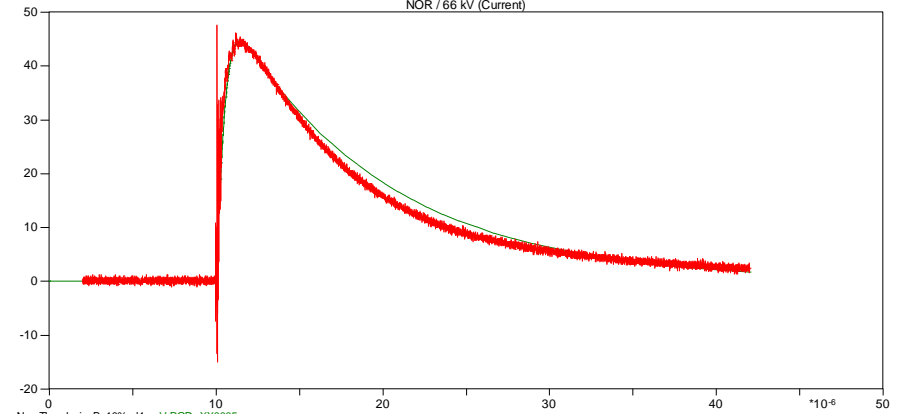
NOR / 66 kV (Voltage)



Nor_Theodosis_B_10%.p4: v:V ROD
66kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NOR / 66 kV (Current)

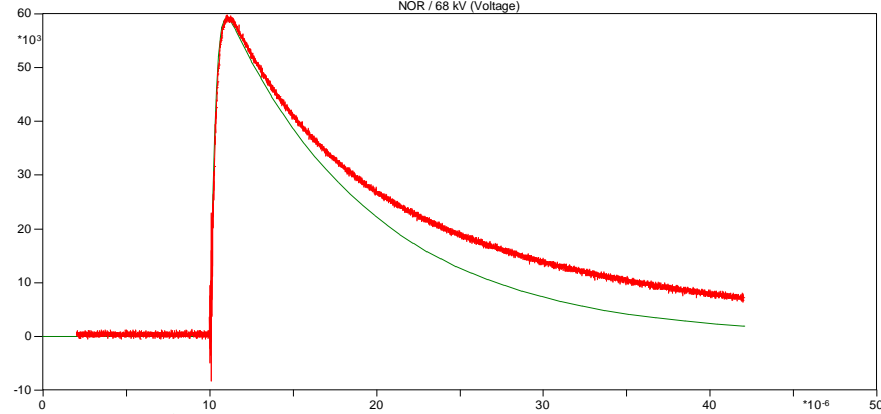


Nor_Theodosis_B_10%.p4: c:V ROD -XX0005
66kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 68kV

Κυματομορφές Τάσης

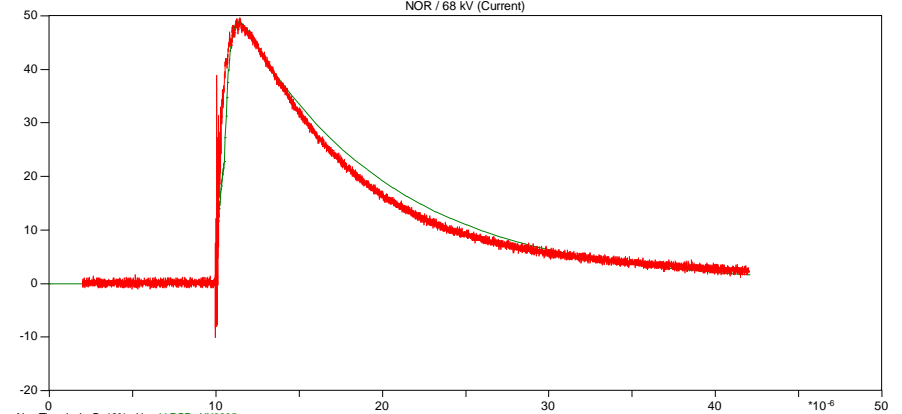
NOR / 68 kV (Voltage)



Nor_Theodosis_B_10%.p4: v:V ROD
68kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NOR / 68 kV (Current)

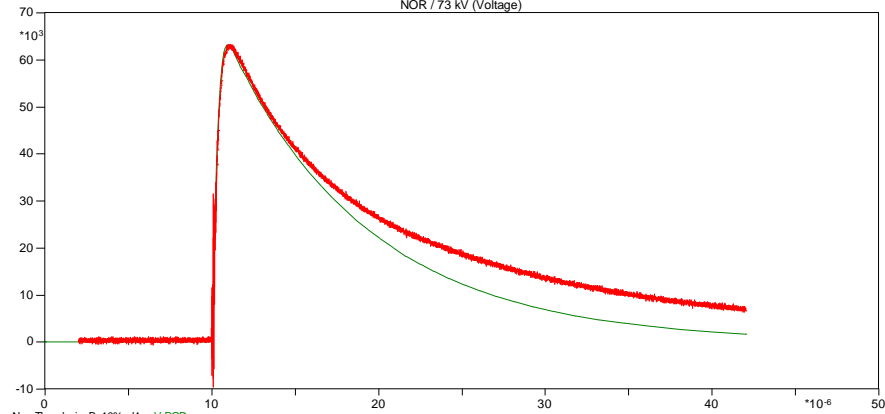


Nor_Theodosis_B_10%.p4: c:V ROD -XX0005
68kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Nor et al. / Τάση Φόρτισης 73kV

Κυματομορφές Τάσης

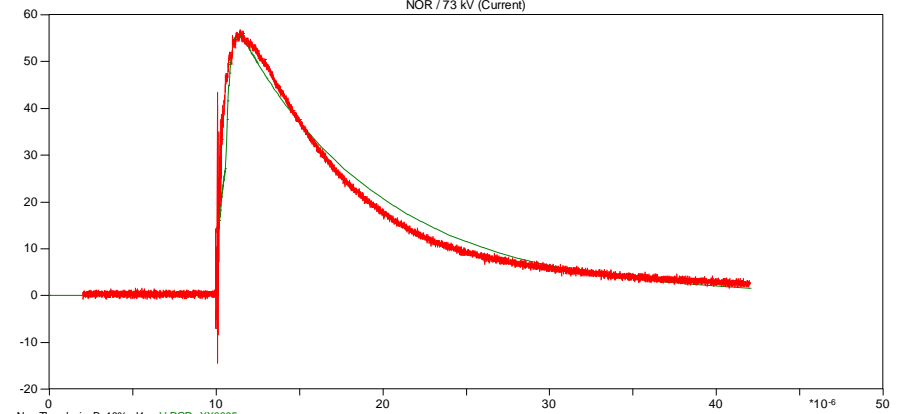
NOR / 73 kV (Voltage)



Nor_Theodosis_B_10%.p4; v:V ROD
73kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NOR / 73 kV (Current)

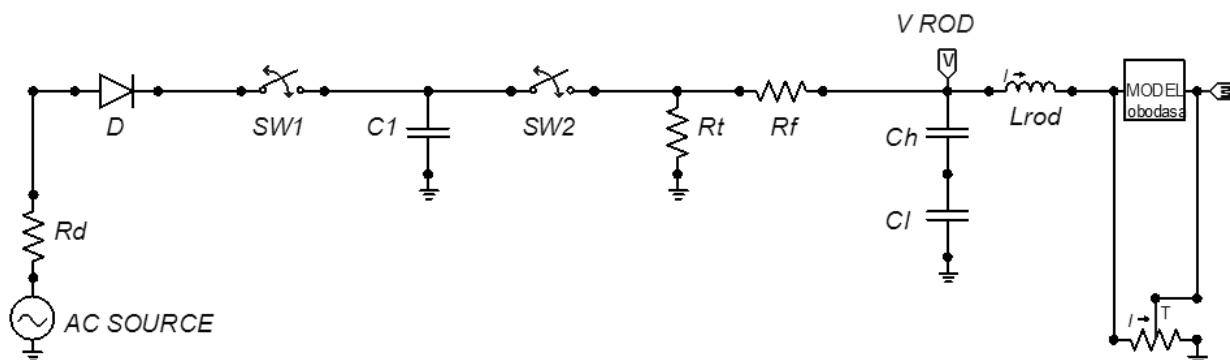


Nor_Theodosis_B_10%.p4; c:V ROD -XX0005
73kV.adf: I

4.3.3 Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου των Kalat, Loboda et al. για τη 2^η Σειρά Μετρήσεων

(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα

Στην *Εικόνα 4.5* φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al. και όπως αυτό υλοποιήθηκε στο ATPDraw του λογισμικού ATP-EMTP, με σκοπό την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών της 2^{ης} σειράς μετρήσεων (δείγμα εδάφους Β με υγρασία 10% και θετική πολικότητα).



Εικόνα 4.5: Ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου των Kalat, Loboda et al.

Όπου:

- $R_d = 100 \Omega$
- $C_1 = 6 \text{ nF}$
- $R_t = 9,5 \text{ k}\Omega$
- $R_f = 416 \Omega$
- $C_h = 1,2 \text{ nF}$
- $C_l = 504 \text{ nF}$
- $L_{rod} = 191 \text{ mH}$ (από την *Εξίσωση 3.1*)
- $T_{open_SW1} = 0$
- $T_{close_SW2} = 10 \mu\text{sec}$

Το βασικό συστατικό του μοντέλου των Kalat, Loboda et al. είναι ένα στοιχείο MODEL, που ονομάζεται «lobodasand», γραμμένο στη γλώσσα MODELS, η οποία ενσωματώνει τον αλγόριθμο για την αγωγιμότητα αμμώδους εδάφους (βλ. *Ενότητα 2.2.2.1*). Αυτό το συστατικό MODEL χρησιμοποιεί ως είσοδο την τάση της ράβδου για να υπολογίσει σύμφωνα με τις *Εξισώσεις 2.8 έως 2.11* το ρεύμα της ράβδου και για να παράξει συνεπώς ως έξοδο την κρουστική αντίσταση. Η κρουστική απόκριση υλοποιείται από ένα στοιχείο ρυθμιζόμενης αντίστασης TACS, που συνδέεται με την έξοδο του στοιχείου MODEL «lobodasand». Η αντίσταση σταθερής κατάστασης R_0 χρησιμοποιείται ως αρχική τιμή $R(0)$ που απαιτείται από το στοιχείο TACS.

Οι παράμετροι του στοιχείου MODEL «lobodasand» καθορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο: για μια αυθαίρετα επιλεγμένη τιμή του εκθέτη a , η παράμετρος A της γραμμικής εξίσωσης (3) υπολογίζεται ως εξής:

$$A = \frac{I_{\max}}{(V_{I_{\max}})^a} \quad (4.3)$$

Όπου I_{\max} και $V_{I_{\max}}$ καθορίζονται από τα παλμογραφήματα για το συγκεκριμένο δείγμα εδάφους. Οι γραμμικές αγωγιμότητες του μοντέλου καθορίζονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις (4.4) και (4.5):

$$g_{LDC} = \frac{I_{\max}}{V_{I_{\max}}} \quad (4.4)$$

$$g_{LAC} = \frac{1}{R_0} + g_{LDC} \quad (4.5)$$

Η ακόλουθη σχέση υιοθετείται για την εκτίμηση της χωρητικότητας του εδάφους:

$$C = \frac{2\pi\epsilon \cdot \ell}{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)} F \quad (4.6)$$

Όπου:

- ϵ είναι η επιτρεπτότητα του εδάφους.
- ℓ , r_{out} και r_{in} οι διαστάσεις του ηλεκτροδίου γείωσης.

Από τις Εξισώσεις 3.2 και 4.6 προκύπτουν οι εξής τιμές:

- $R_0 = 2883,7 \Omega$
- $C = 40,53 pF$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των λοιπών παραμέτρων του στοιχείου MODEL για τις πειραματικές δοκιμές με το δείγμα εδάφους Β όπως προέκυψαν από τα παλμογραφήματα και τις παραπάνω εξισώσεις:

Πίνακας 4.4: Τιμές των παραμέτρων του στοιχείου MODEL «lobodasand» (Δείγμα Εδάφους Β με υγρασία 10%)

Τάση φόρτισης (kV)	I_{\max} (A)	$V_{I_{\max}}$ (V)	a	A	T (msec)	g_{LDC} (Ω^{-1})	g_{LAC} (Ω^{-1})
54	30,8	46477,1	2,5	0,002091263	1	0,000662625	0,001009401
55	32,8	48162,4	2,5	0,002037478	1	0,000681013	0,001027789
57	35,6	50014,8	2,5	0,002012085	1	0,000711695	0,001058472
59	37,4	51531,7	3	0,000273329	1	0,000725829	0,001072605
61	39	52709,2	2,5	0,001933519	1	0,000739909	0,001086685
64	42,4	55235,2	2,5	0,001869933	1	0,000767626	0,001114403

66	46,2	57257,3	2,5	0,001862368	1	0,000806885	0,001153661
68	49,6	58096,7	3	0,000252929	1	0,000853695	0,001200471
73	56,8	61804	3	0,000240607	1	0,000919058	0,001265834

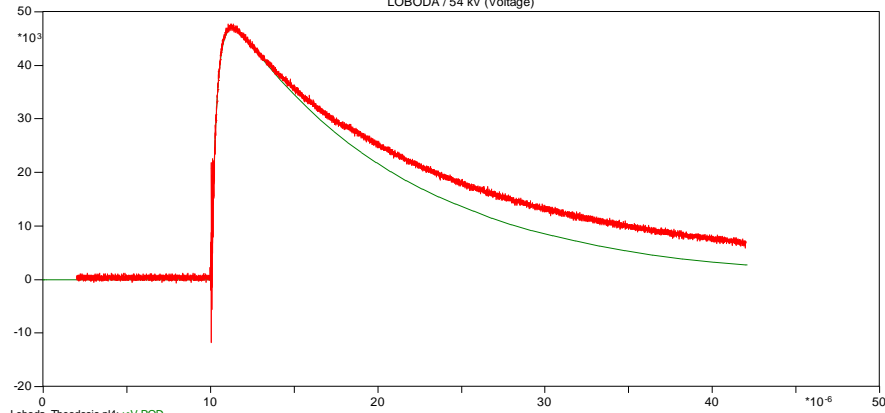
(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα των Kalat, Loboda et al. για τη 2^η Σειρά Μετρήσεων

Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος (με πράσινο χρώμα) που προέκυψαν από την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών βάσει του μοντέλου που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al. με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP (και συγκεκριμένα των προγραμμάτων ATPDraw και PlotXY) όπως και οι αντίστοιχες καταγεγραμμένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές της 2^{ης} σειράς μετρήσεων για το δείγμα εδάφους Β (με κόκκινο χρώμα). Αριστερά φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης (σε kV) και δεξιά οι κυματομορφές του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε ms.

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 54kV

Κυματομορφές Τάσης

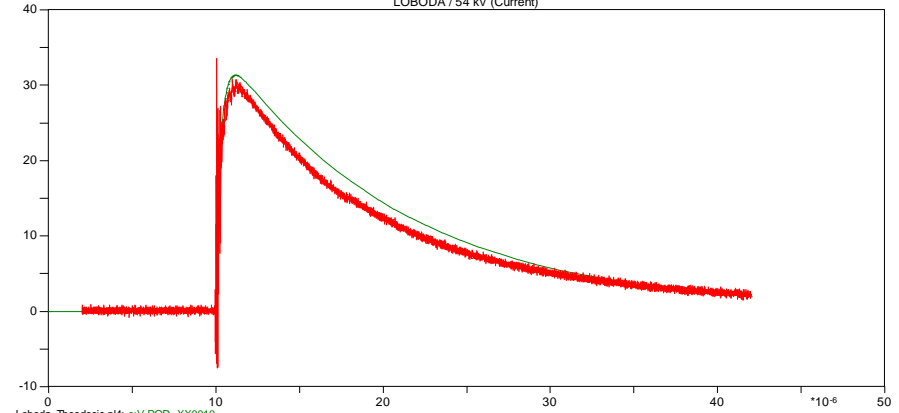
LOBODA / 54 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis.p4: v:V ROD
54kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 54 kV (Current)

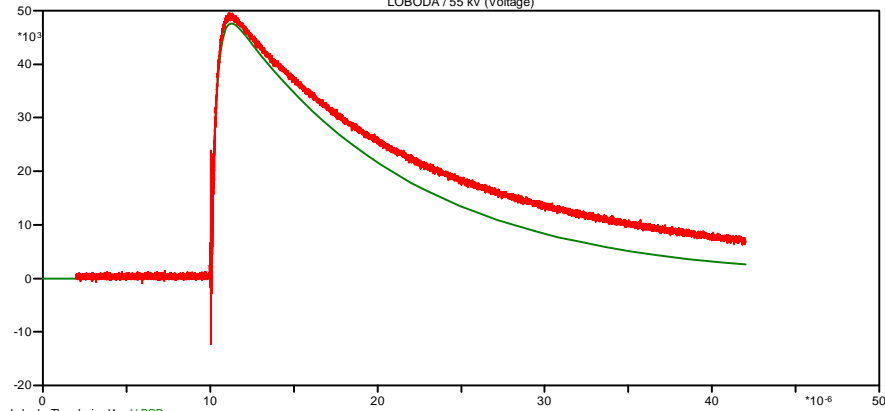


Loboda_Theodosis.p4: c:V ROD -XX0010
54kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 55kV

Κυματομορφές Τάσης

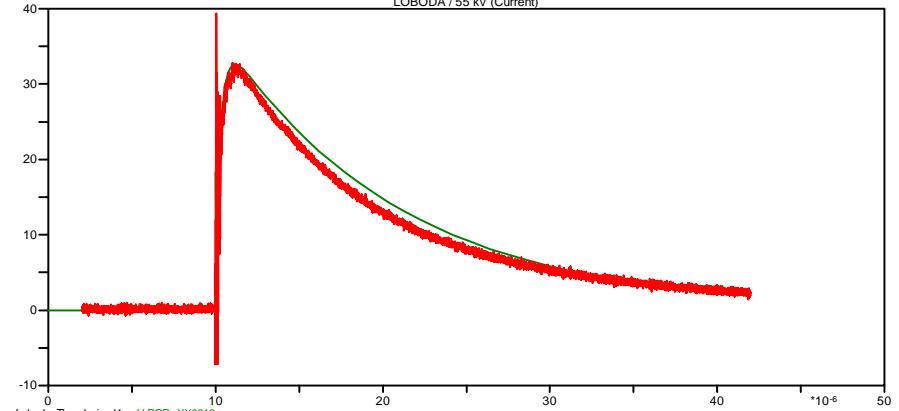
LOBODA / 55 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis.p4: v:V ROD
55kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 55 kV (Current)

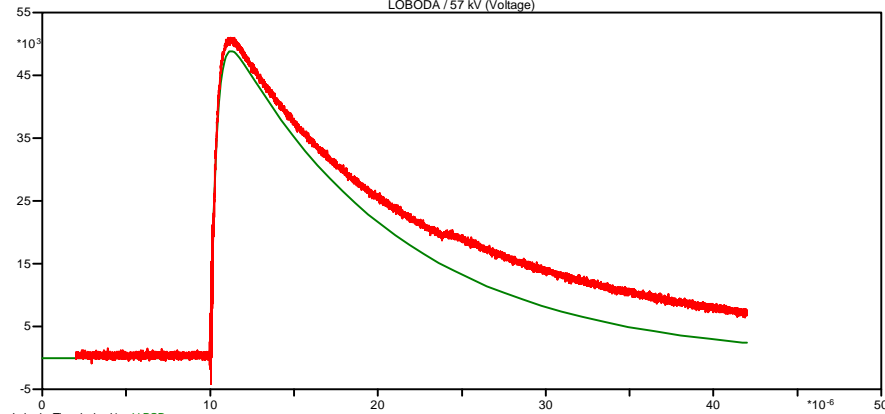


Loboda_Theodosis.p4: c:V ROD -XX0010
55kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 57kV

Κυματομορφές Τάσης

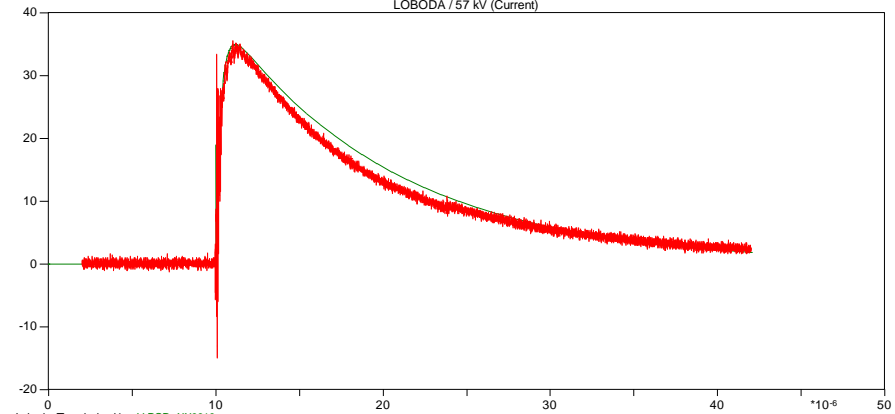
LOBODA / 57 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis,p4: v:V ROD
57kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 57 kV (Current)

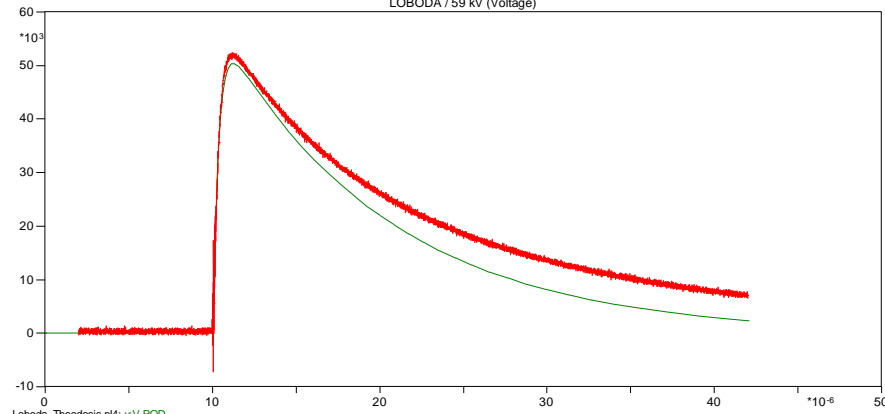


Loboda_Theodosis,p4: c:V ROD -XX0010
57kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 59kV

Κυματομορφές Τάσης

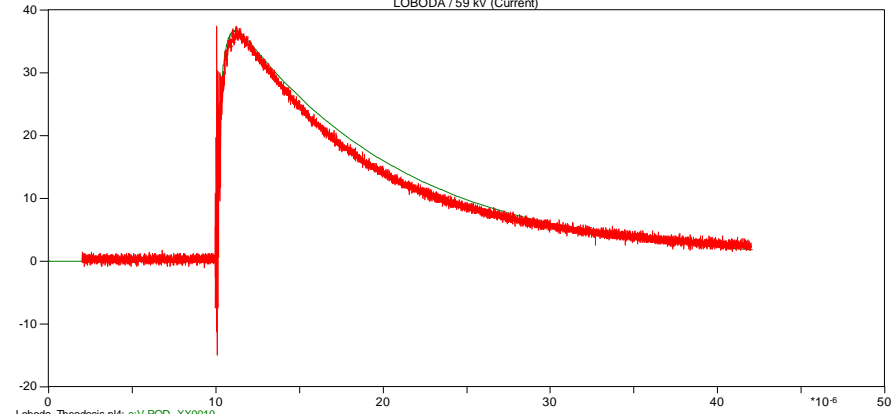
LOBODA / 59 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis,p4: v:V ROD
59kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 59 kV (Current)

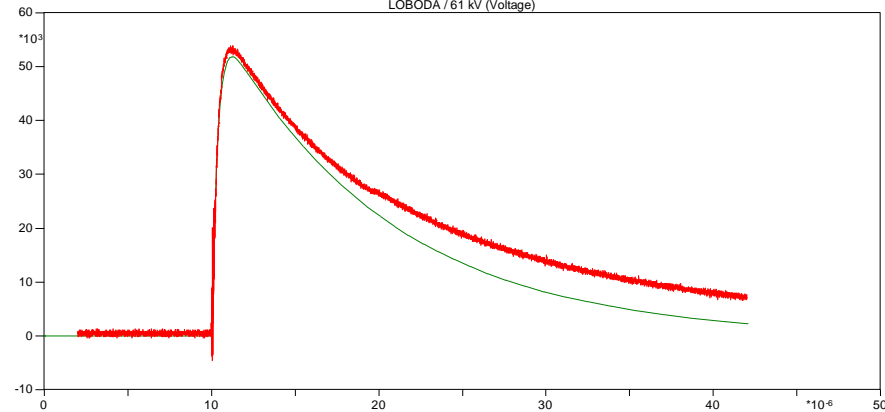


Loboda_Theodosis,p4: c:V ROD -XX0010
59kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 61kV

Κυματομορφές Τάσης

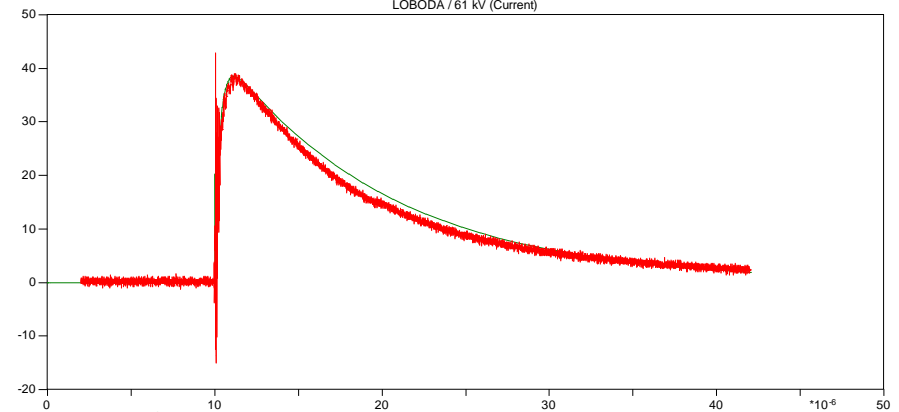
LOBODA / 61 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis,p4: v:V ROD
61kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 61 kV (Current)

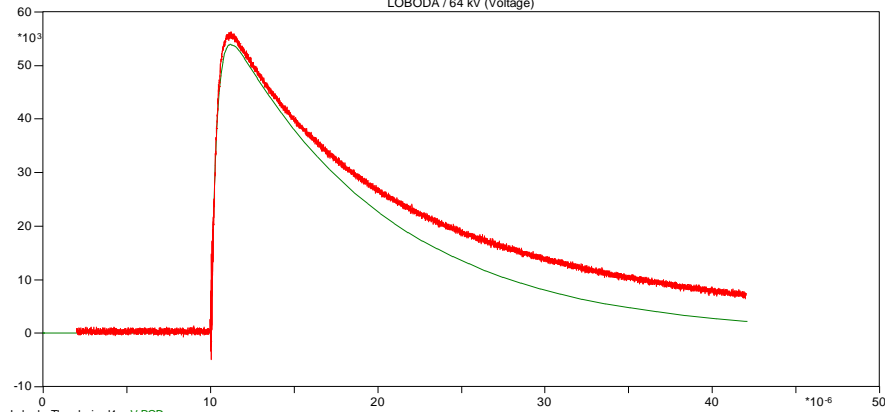


Loboda_Theodosis,p4: c:V ROD -XX0010
61kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 64kV

Κυματομορφές Τάσης

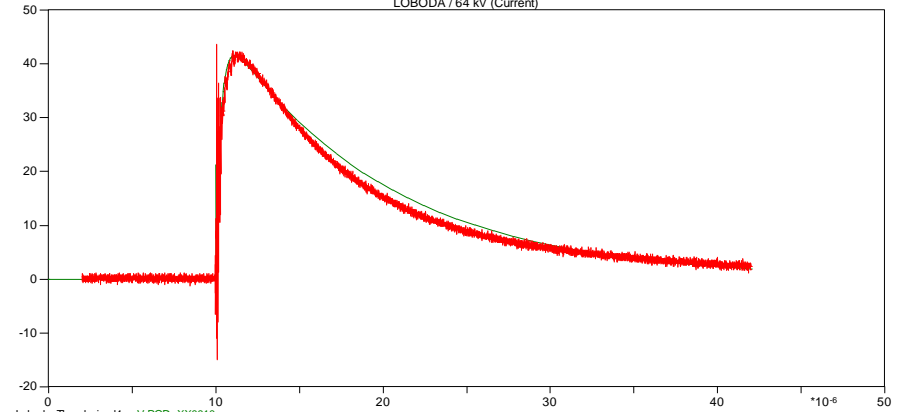
LOBODA / 64 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis,p4: v:V ROD
64kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 64 kV (Current)

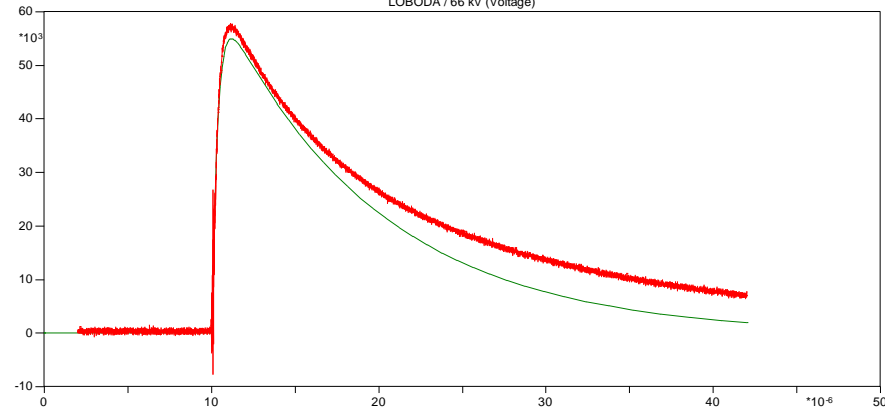


Loboda_Theodosis,p4: c:V ROD -XX0010
64kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 66kV

Κυματομορφές Τάσης

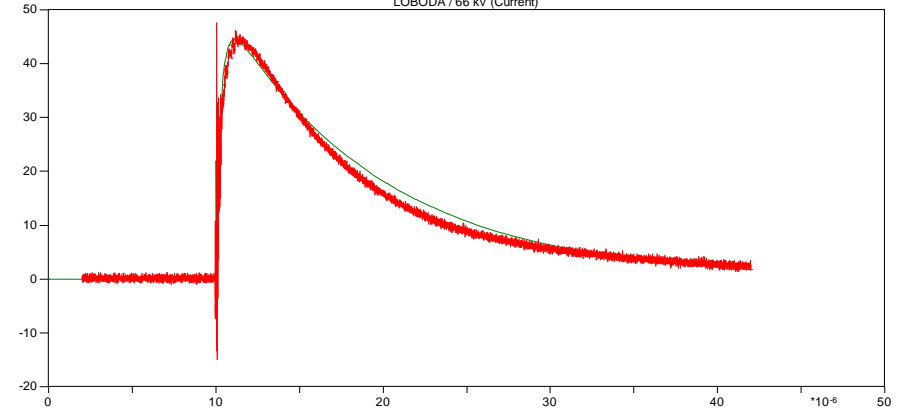
LOBODA / 66 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis,p4: v:V ROD
66kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 66 kV (Current)

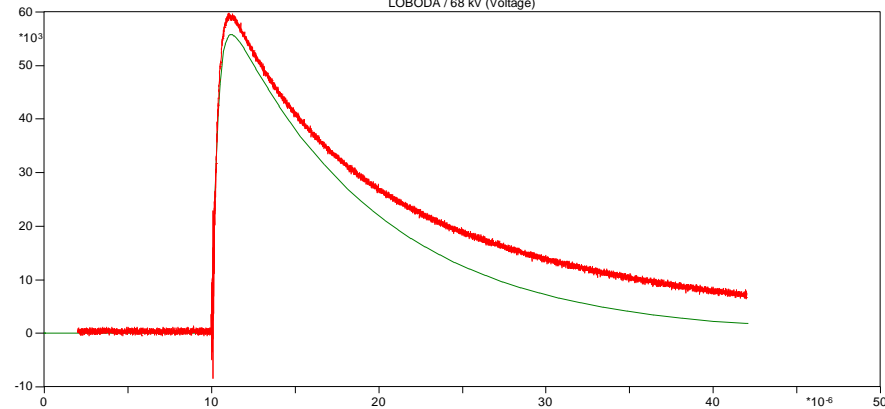


Loboda_Theodosis,p4: c:V ROD -XX0010
66kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 68kV

Κυματομορφές Τάσης

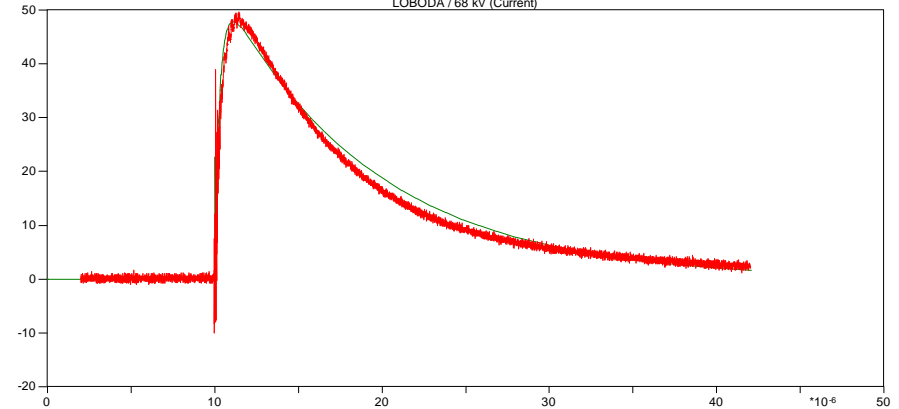
LOBODA / 68 kV (Voltage)



Loboda_Theodosis,p4: v:V ROD
68kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

LOBODA / 68 kV (Current)

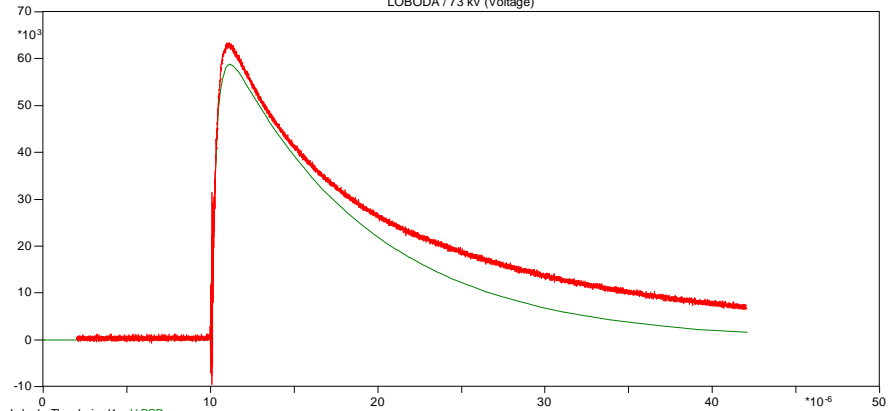


Loboda_Theodosis,p4: c:V ROD -XX0010
68kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Kalat, Loboda et al. / Τάση Φόρτισης 73kV

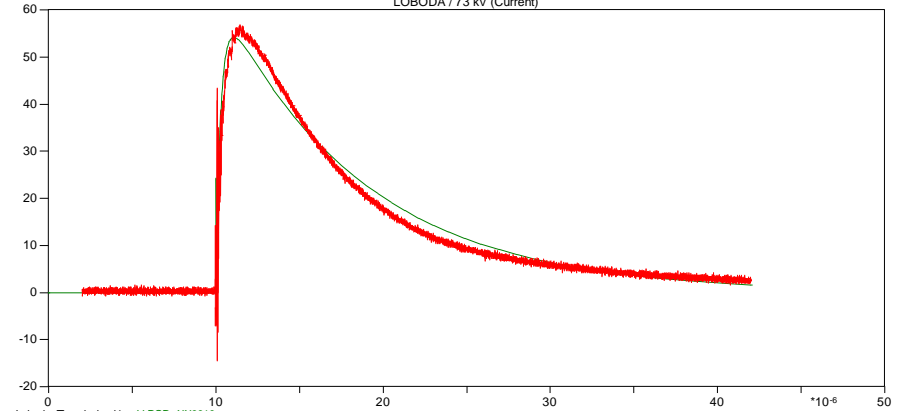
Κυματομορφές Τάσης

LOBODA / 73 kV (Voltage)



Κυματομορφές Ρεύματος

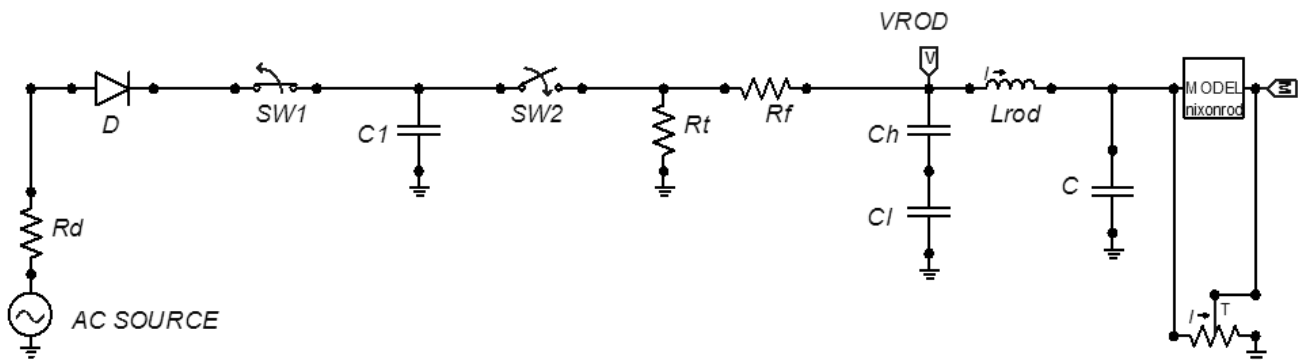
LOBODA / 73 kV (Current)



4.3.4 Υλοποίηση του Κυκλωματικού Μοντέλου του Nixon για τη 2^η Σειρά Μετρήσεων

(α) Ισοδύναμο Κύκλωμα

Στην *Εικόνα 4.6* φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου που προτάθηκε από το Nixon και όπως αυτό υλοποιήθηκε στο ATPDraw του λογισμικού ATP-EMTP, με σκοπό την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών της 2^{ης} σειράς μετρήσεων (δείγμα εδάφους B με υγρασία 10% και θετική πολικότητα).



Εικόνα 4.6: Ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου του Nixon.

Όπου:

- $R_d = 100 \Omega$
- $C_1 = 6 \text{ nF}$
- $R_t = 9,5 \text{ k}\Omega$
- $R_f = 416 \Omega$
- $C_h = 1,2 \text{ nF}$
- $C_l = 504 \text{ nF}$
- $L_{rod} = 191 \text{ mH}$ (από την *Εξίσωση 3.1*)
- $C = 40,53 \text{ pF}$ (από την *Εξίσωση 4.6*)
- $R_o = 2883,7 \Omega$ (από την *Εξίσωση 3.2*)
- $T_{open_SW1} = 0$
- $T_{close_SW2} = 10 \mu\text{sec}$

Το βασικό συστατικό του μοντέλου του Nixon είναι ένα στοιχείο MODEL, που ονομάζεται «*nixonrod*», γραμμένο στη γλώσσα MODELS, η οποία ενσωματώνει τον αλγόριθμο της *Ενότητας 2.2.3.2*. Αυτό το συστατικό MODEL χρησιμοποιεί ως είσοδο το ρεύμα που διαρρέει τη ράβδο για να υπολογίσει σύμφωνα με την *Εξίσωση 2.17* τις επιμέρους αντιστάσεις των τριών περιοχών του εδάφους, οι οποίες συναποτελούν το περιβάλλον εδάφος και για να παράξει ως έξοδο την κρουστική αντίσταση (προσθέτοντας τις επιμέρους αντιστάσεις των τριών περιοχών). Η κρουστική απόκριση υλοποιείται από ένα στοιχείο ρυθμιζόμενης αντίστασης TACS, που συνδέεται με την έξοδο του στοιχείου

MODEL «*nixonrod*». Η αντίσταση σταθερής κατάστασης R_o χρησιμοποιείται ως αρχική τιμή $R(0)$ που απαιτείται από το στοιχείο TACS.

Οι παράμετροι του στοιχείου MODEL «*nixonrod*» παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

Πίνακας 4.5(α): Τιμές των παραμέτρων του στοιχείου MODEL «*nixonrod*» (Δείγμα Εδάφους B με υγρασία 10%)

r_{rod} (cm)	l_{rod} (cm)	r_{out} (cm)	E_o (kV/cm)	ρ_o (Ωm)
0,25	19	12,5	9	880

Σημείωση: Η τιμή της κρίσιμης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, E_o , είναι ο μέσος όρος των τιμών της E_o , οι οποίες προσδιορίστηκαν με διάφορες μεθόδους για το δείγμα εδάφους B με 10% υγρασία [3].

Οι τιμές των παραμέτρων τ_i και τ_d του στοιχείου MODEL «*nixonrod*» προσδιορίζονται με αυξομειώσεις, έτσι ώστε οι καμπύλες τάσης και ρεύματος που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις να προσεγγίζουν καλύτερα τα καταγεγραμμένα παλμογραφήματα τάσης και ρεύματος. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων για κάθε τάση φόρτισης φαίνονται στον Πίνακα 4.5(β).

Πίνακας 4.5(β): Τιμές των παραμέτρων τ_i και τ_d του στοιχείου MODEL «*nixonrod*» (Δείγμα Εδάφους B με υγρασία 10%)

Τάση φόρτισης (kV)	τ_i (μsec)	τ_d (μsec)
54	1,42	3
55	1,25	3
57	1,18	3
59	1,2	3
61	1,2	3
64	1,2	3
66	1,18	3
68	1,11	3
73	1,11	3

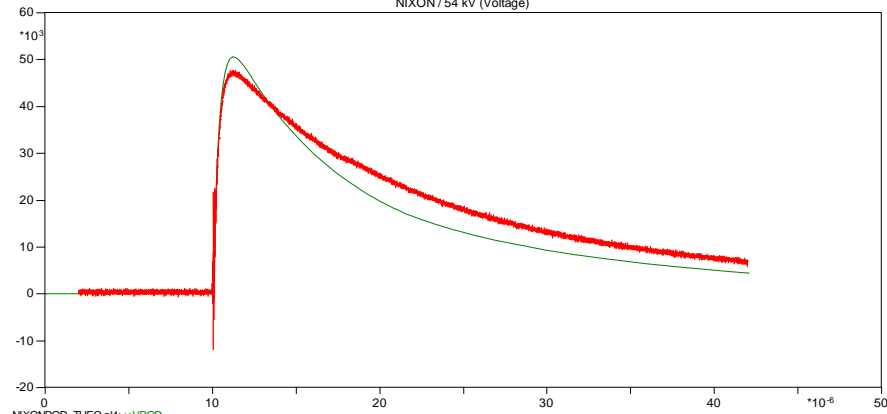
(β) Αποτελέσματα Προσομοίωσης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Nixon για τη 2^η Σειρά Μετρήσεων

Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος (με πράσινο χρώμα) που προέκυψαν από την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών βάσει του μοντέλου που προτάθηκε από το Nixon με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP (και συγκεκριμένα των προγραμμάτων ATPDraw και PlotXY) όπως και οι αντίστοιχες καταγεγραμμένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές της 2^{ης} σειράς μετρήσεων για το δείγμα εδάφους B (με κόκκινο χρώμα). Αριστερά φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης (σε kV) και δεξιά οι κυματομορφές του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε μs .

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV

Κυματομορφές Τάσης

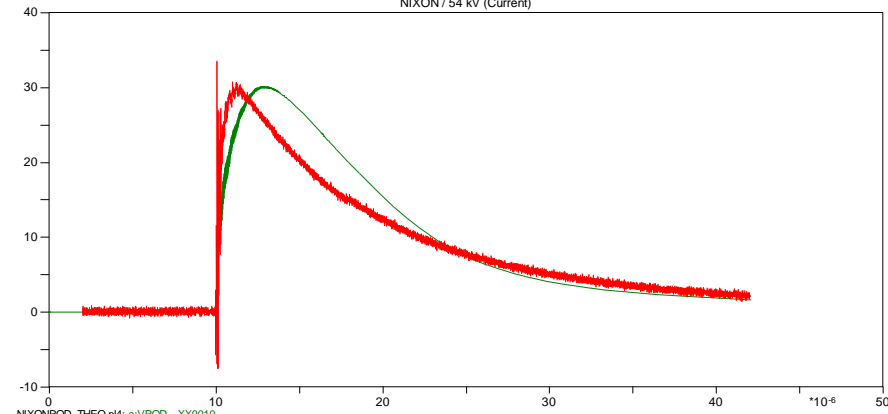
NIXON / 54 kV (Voltage)



NIXONROD_THEO,p4: v:VROD
54kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NIXON / 54 kV (Current)

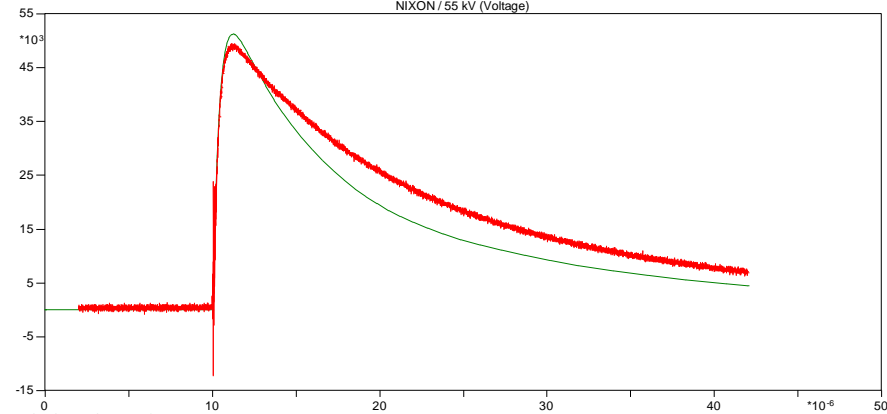


NIXONROD_THEO,p4: c:VROD -XX0010
54kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 55kV

Κυματομορφές Τάσης

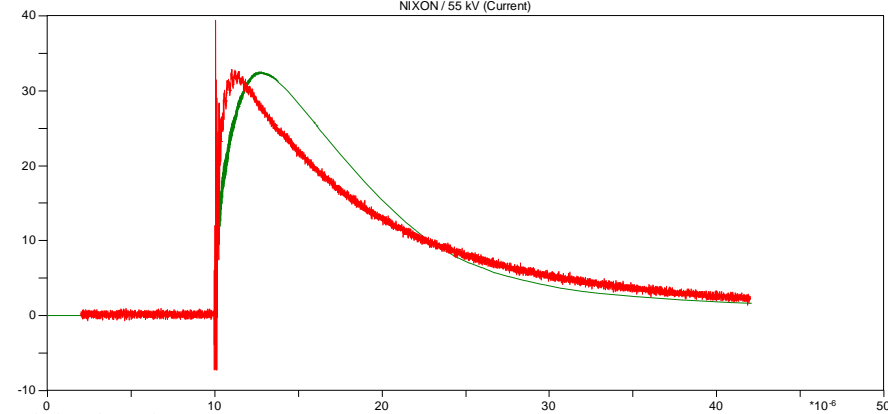
NIXON / 55 kV (Voltage)



NIXONROD_THEO,p4: v:VROD
55kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NIXON / 55 kV (Current)

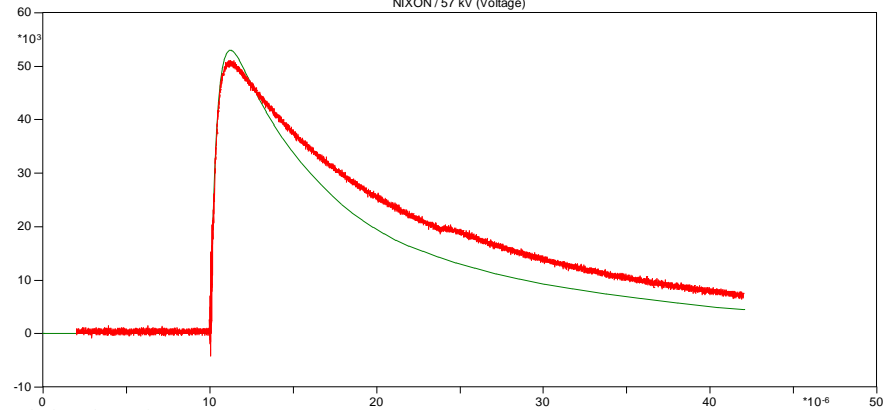


NIXONROD_THEO,p4: c:VROD -XX0010
55kV.adf: I

/Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 57kV

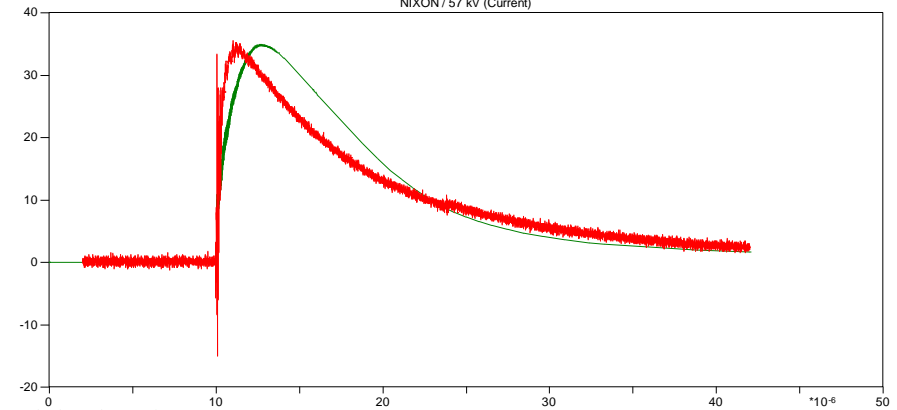
Κυματομορφές Τάσης

NIXON / 57 kV (Voltage)



Κυματομορφές Ρεύματος

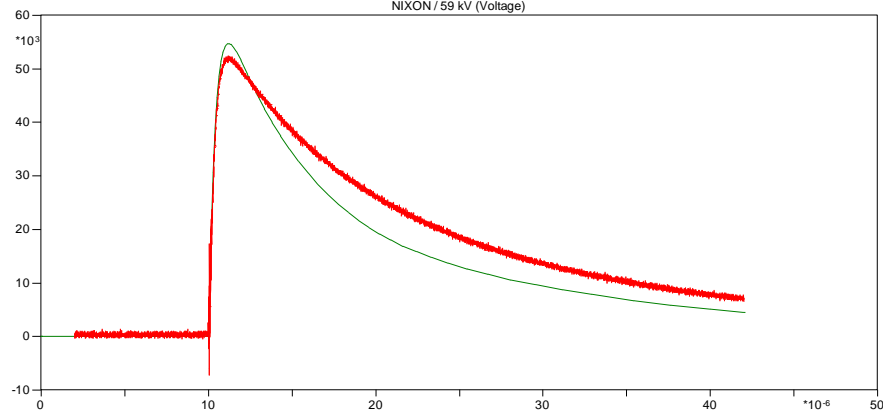
NIXON / 57 kV (Current)



Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 59kV

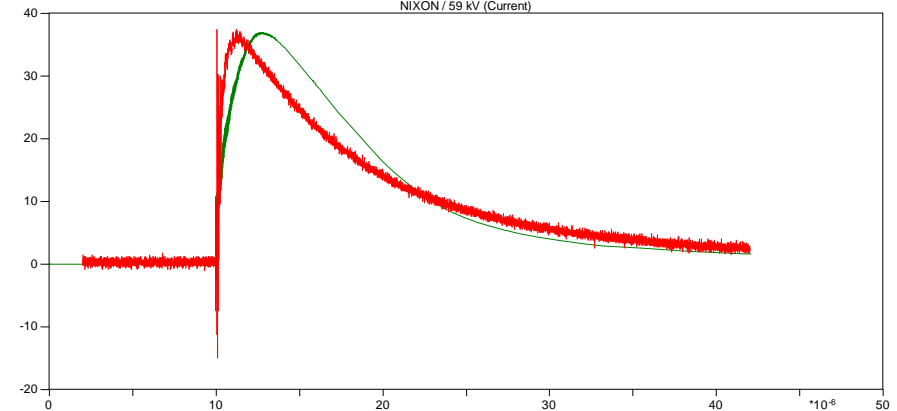
Κυματομορφές Τάσης

NIXON / 59 kV (Voltage)



Κυματομορφές Ρεύματος

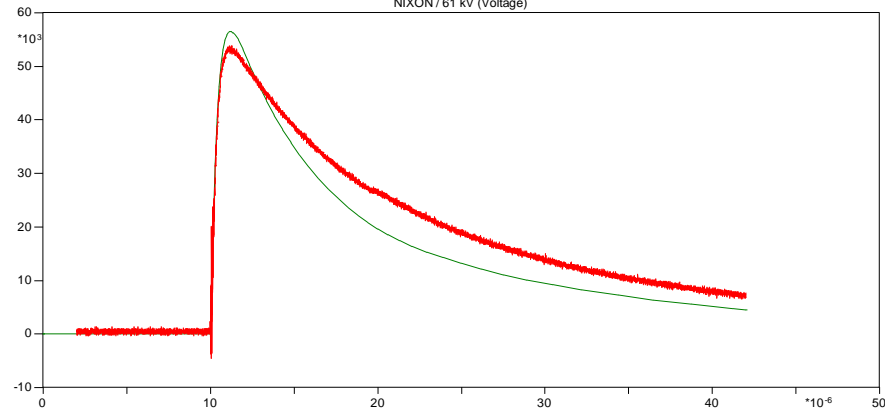
NIXON / 59 kV (Current)



Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 61kV

Κυματομορφές Τάσης

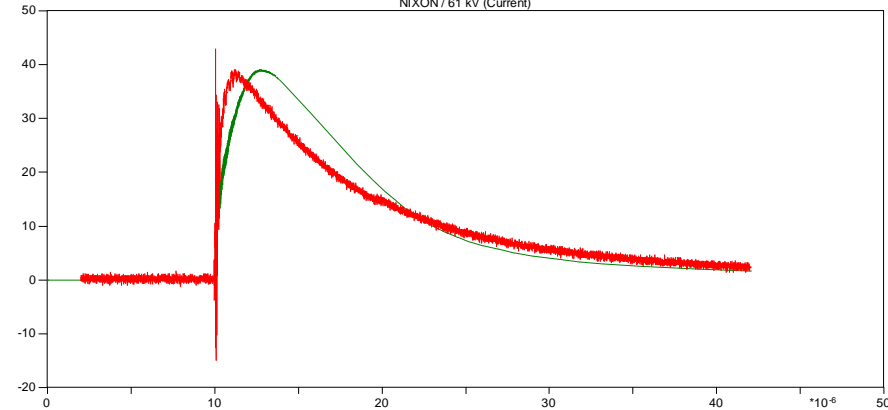
NIXON / 61 kV (Voltage)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
61kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NIXON / 61 kV (Current)

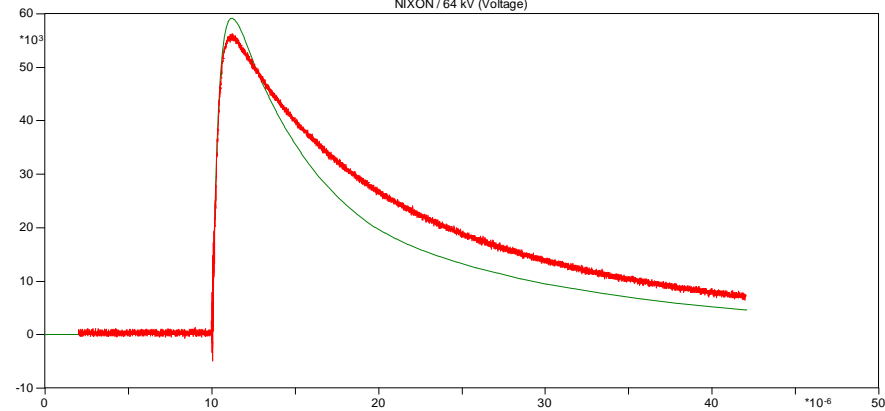


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
61kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 64kV

Κυματομορφές Τάσης

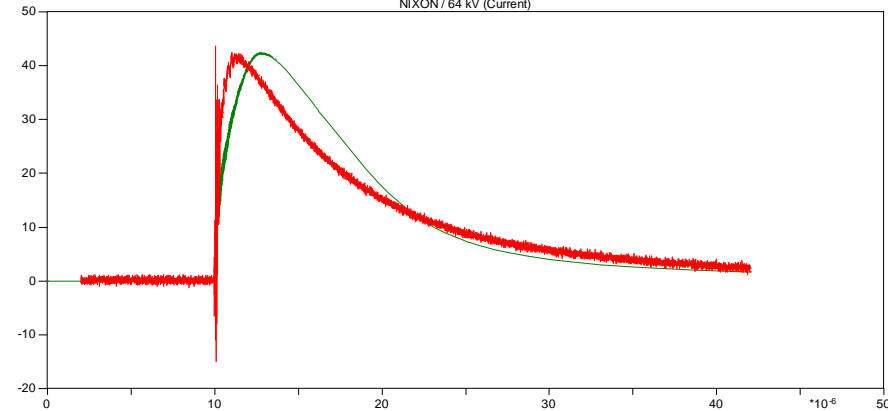
NIXON / 64 kV (Voltage)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
64kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NIXON / 64 kV (Current)

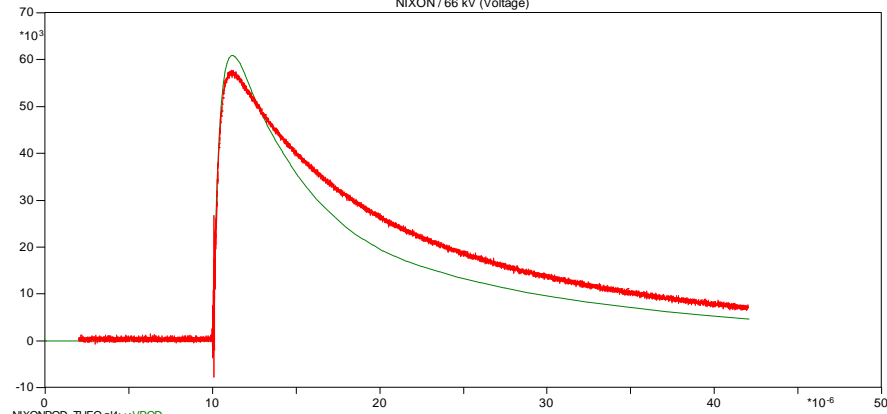


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
64kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 66kV

Κυματομορφές Τάσης

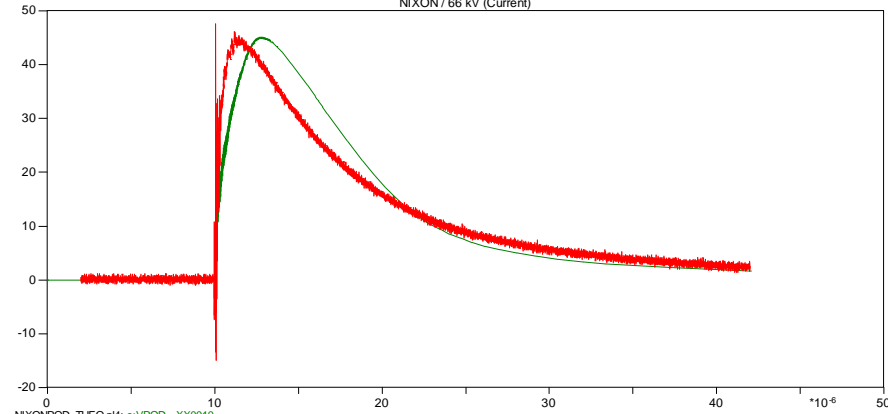
NIXON / 66 kV (Voltage)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
66kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

NIXON / 66 kV (Current)

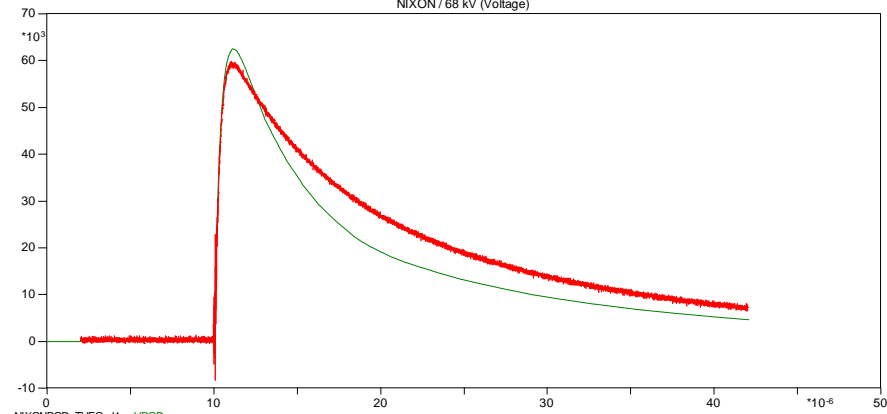


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
66kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νixon / Τάση Φόρτισης 68kV

Κυματομορφές Τάσης

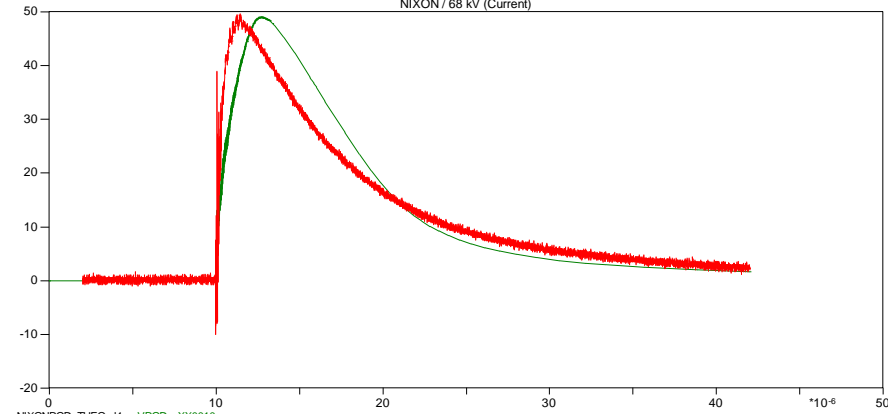
NIXON / 68 kV (Voltage)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
68kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

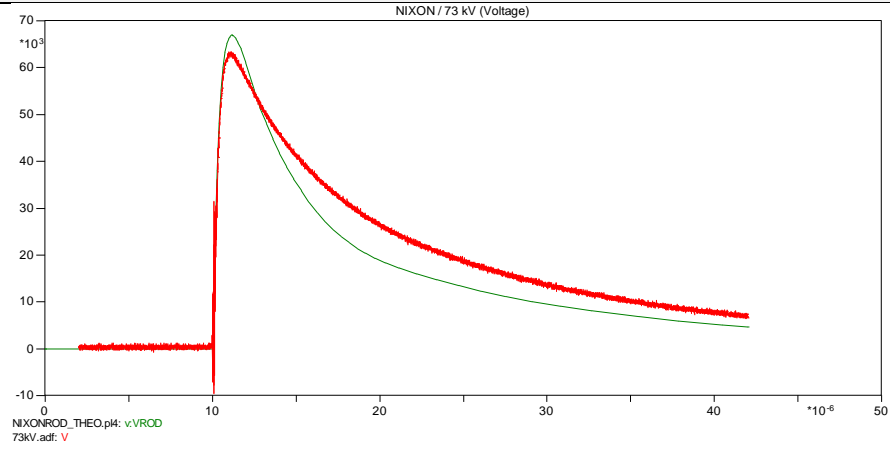
NIXON / 68 kV (Current)



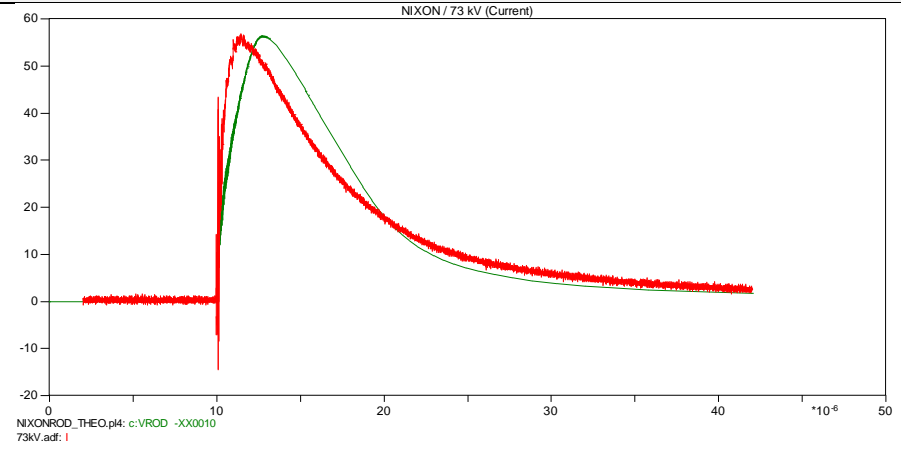
NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
68kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Μοντέλο Νίχον / Τάση Φόρτισης 73kV

Κυματομορφές Τάσης



Κυματομορφές Ρεύματος



4.4 Βιβλιογραφία

[1] *B. Φλέγκας, «Μελέτη και Εξομοίωση Συστημάτων Γείωσης», Διπλωματική Εργασία, Φεβρουάριος 2011, Πάτρα*

[2] *ATP-EMTP Help Contents*

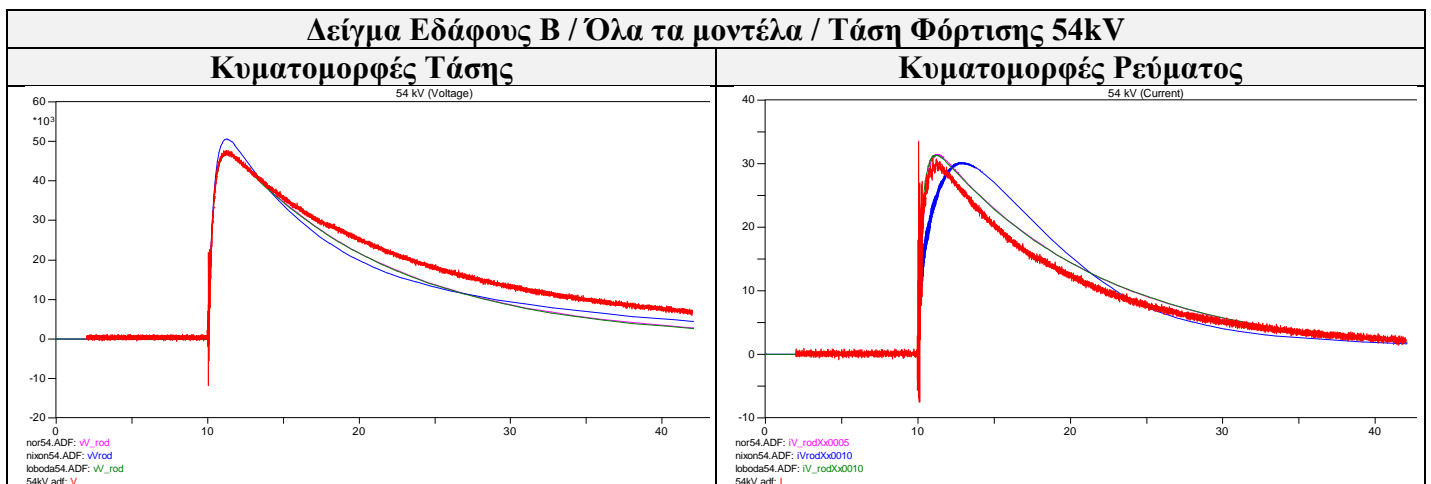
[3] *F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, I-V Curves for the Determination of the Ionization Voltage in Soil Samples, Proceedings of the 17th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2011), Hannover, Germany, August 22-26, 2011 (paper B-045)*

Παρατηρήσεις – Προτάσεις – Συμπεράσματα

5.1 Παρατηρήσεις

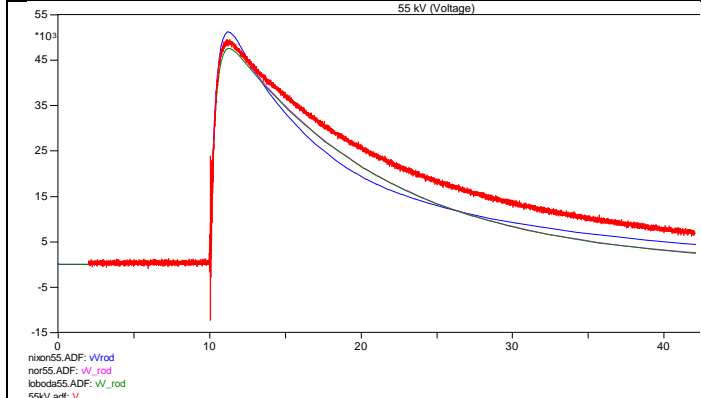
Στην *Ενότητα 4.3* υλοποιήθηκαν τα κυκλωματικά μοντέλα ιονισμού που προτάθηκαν από τους Nor et al., τους Kalat, Loboda et al. και τον Nixon και προσομοιώθηκε η κρουστική απόκριση της γείωσης υπό ιονισμό για το δείγμα εδάφους B (με 10% και θετική πολικότητα) με τη χρήση και των τριών κυκλωματικών μοντέλων. Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, λοιπόν, είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των τριών μοντέλων (στο κατά πόσο προσεγγίζουν τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος που κατεγράφησαν κατά τη 2^η σειρά μετρήσεων).

Στις ακόλουθες εικόνες αντιπαραβάλλονται οι καμπύλες που προκύπτουν από την προσομοίωση του δείγματος εδάφους B με τη χρήση του μοντέλου που προτάθηκε από τους Nor et al. (με ροζ χρώμα), με τη χρήση του μοντέλου που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al. (με πράσινο χρώμα) και με τη χρήση του μοντέλου που προτάθηκε από τον Nixon, καθώς και οι καμπύλες που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών για διάφορες τάσεις φόρτισης (με κόκκινο χρώμα). Αριστερά φαίνονται οι καμπύλες της τάσης (σε kV) και δεξιά οι καμπύλες του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε μς.

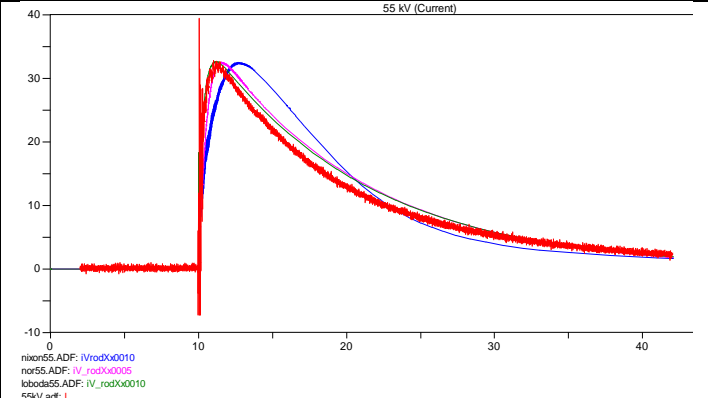


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 55kV

Κυματομορφές Τάσης

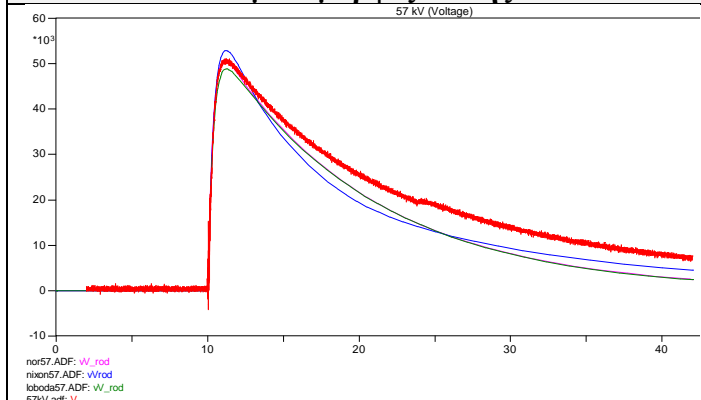


Κυματομορφές Ρεύματος

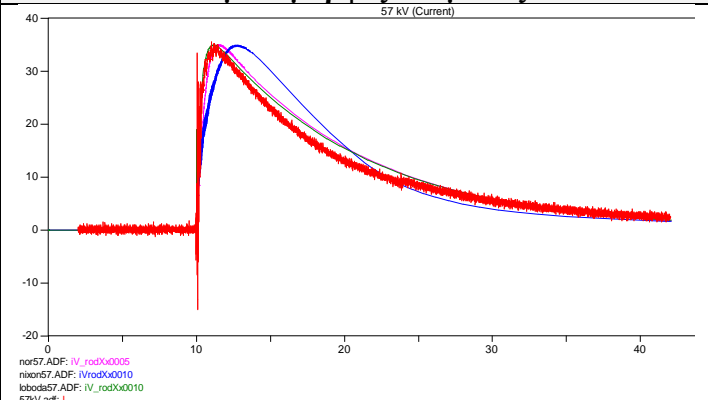


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 57kV

Κυματομορφές Τάσης

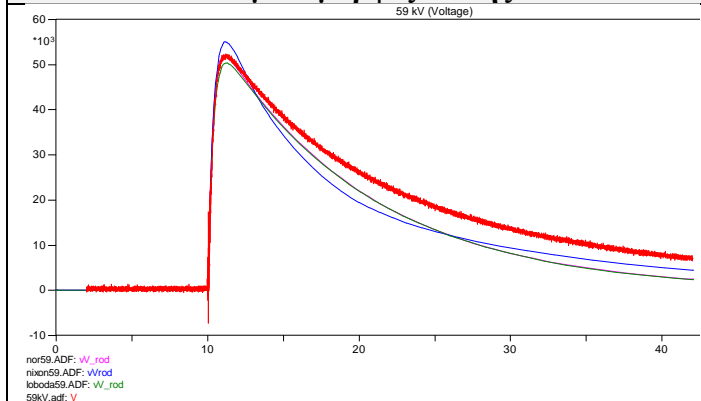


Κυματομορφές Ρεύματος

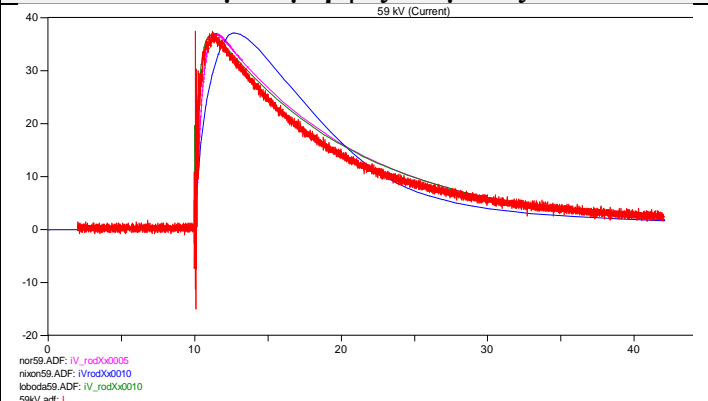


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 59kV

Κυματομορφές Τάσης

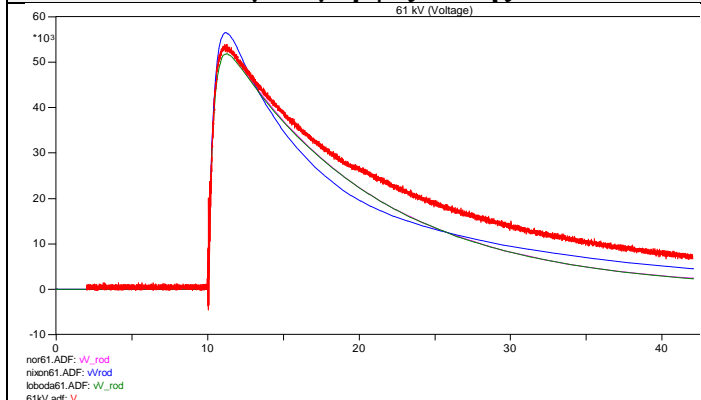


Κυματομορφές Ρεύματος

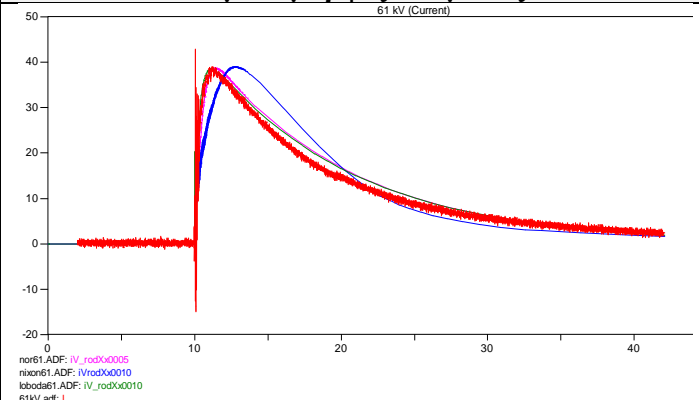


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 61kV

Κυματομορφές Τάσης

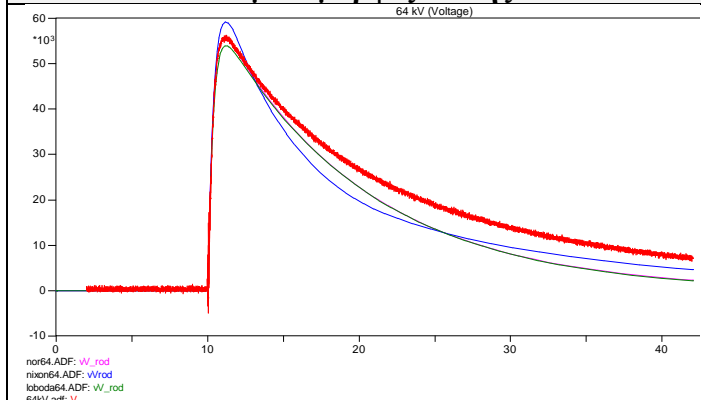


Κυματομορφές Ρεύματος

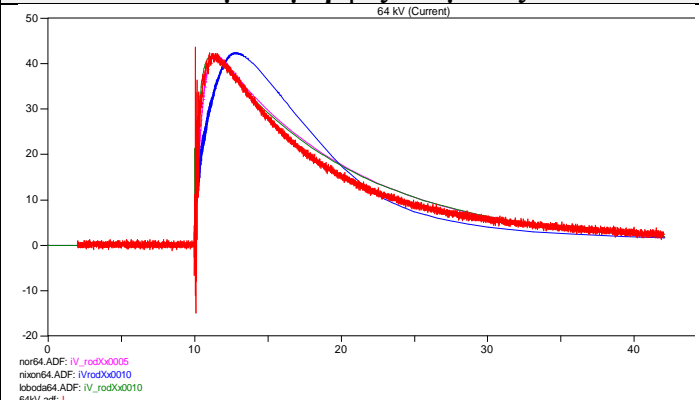


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 64kV

Κυματομορφές Τάσης

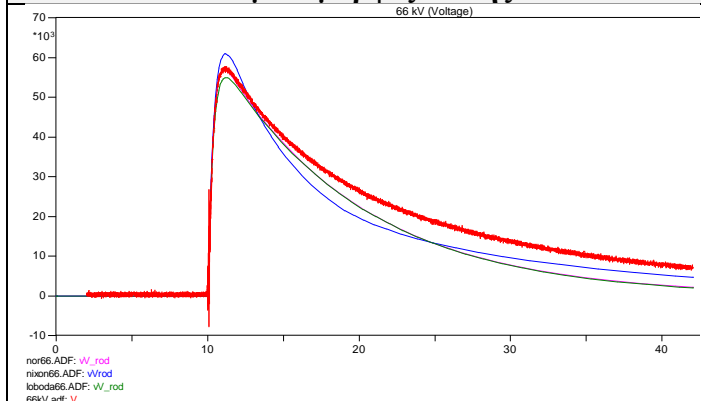


Κυματομορφές Ρεύματος

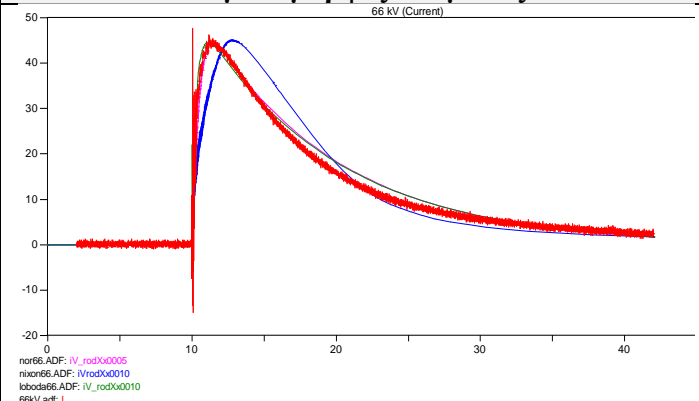


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 66kV

Κυματομορφές Τάσης

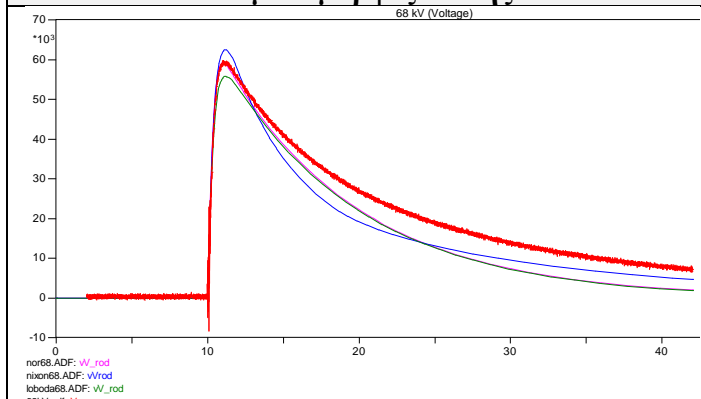


Κυματομορφές Ρεύματος

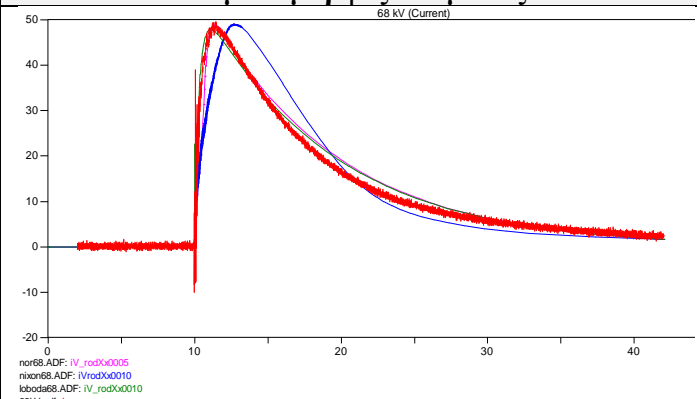


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 68kV

Κυματομορφές Τάσης

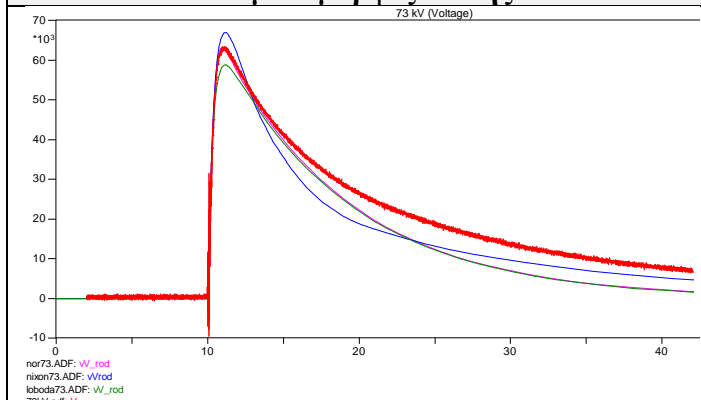


Κυματομορφές Ρεύματος

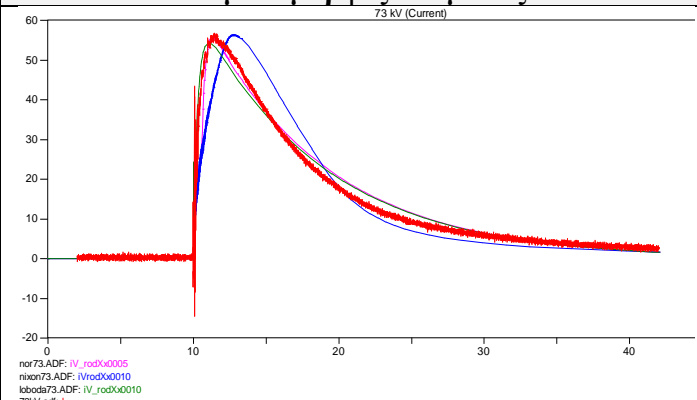


Δείγμα Εδάφους Β / Όλα τα μοντέλα / Τάση Φόρτισης 73kV

Κυματομορφές Τάσης



Κυματομορφές Ρεύματος



Από τις παραπάνω εικόνες, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι τιμές των κορυφών των καμπυλών τάσης και ρεύματος προσεγγίζονται καλύτερα από το μοντέλο που προτάθηκε από τους Nor et al. με την απλοποίηση που έγινε για καμπύλες ρεύματος με μία κορυφή (βλ. Ενότητα 4.3.2).
- Τα μοντέλα που προτάθηκαν από τους Nor et al. και τους Kalat, Loboda et al. προσεγγίζουν πολύ καλά το χρόνο εμφάνισης των μεγίστων τάσης και ρεύματος.
- Οι τιμές του μεγίστων της τάσης που προκύπτουν με τη χρήση των μοντέλων των Kalat, Loboda et al. και του Nixon αποκλίνουν από την τιμές των μεγίστων της τάσης που προκύπτουν από τις πειραματικές δοκιμές (για το πρώτο μοντέλο είναι μικρότερες και για το δεύτερο μεγαλύτερες).

- Οι κορυφές των καμπυλών του ρεύματος που προκύπτουν με τη χρήση του μοντέλου του Νίχον εμφανίζονται χρονικά μετατοπισμένες προς τα δεξιά σε σχέση με τις κορυφές των πειραματικών καμπυλών ρεύματος.
- Εν αντιθέσει με τις ουρές των καμπυλών της τάσης, οι ουρές των καμπυλών του ρεύματος (φάση απιονισμού) που προκύπτουν με τη χρήση και των τριών μοντέλων προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τις ουρές των αντίστοιχων πειραματικών καμπυλών.

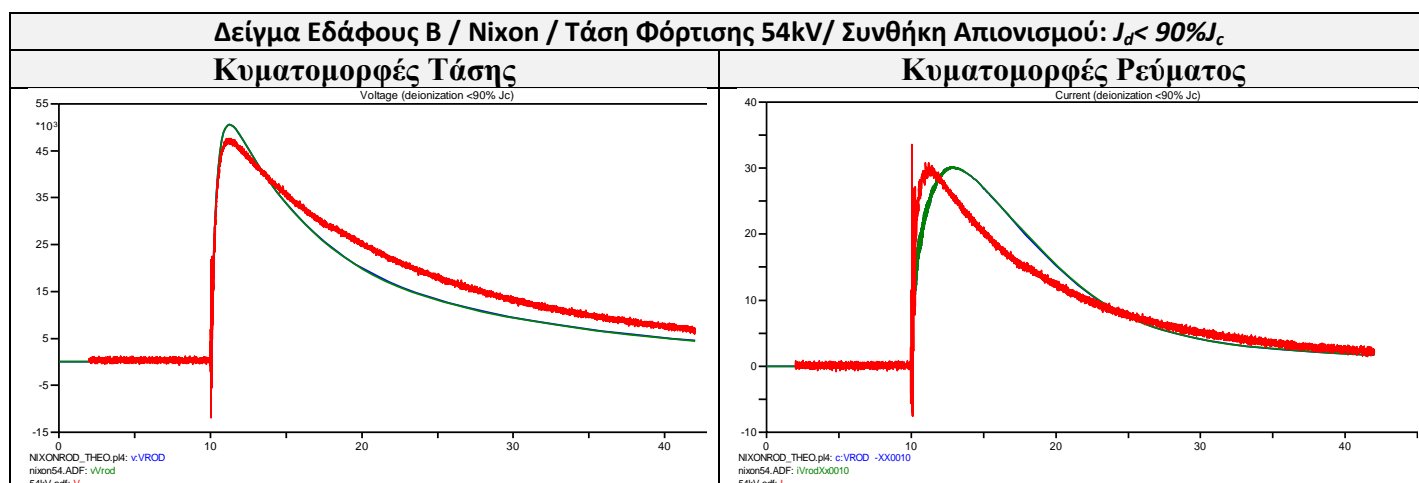
Λόγω των παραπάνω συμπερασμάτων και ειδικά για το μοντέλο που προτάθηκε από τον Νίχον (το οποίο παρουσίασε τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα πειραματικά αποτελέσματα), στην ακόλουθη ενότητα γίνεται περαιτέρω διερεύνηση για τη βελτίωση αυτού του μοντέλου.

5.2 Διερεύνηση Δυνατοτήτων Βελτίωσης του Μοντέλου Νίχον

5.2.1 Διερεύνηση της Μεταβολής των Κυματομορφών Τάσης-Ρεύματος του Μοντέλου Νίχον με τη Μεταβολή της Συνθήκης Απιονισμού

Κρατώντας ίδιες όλες τις παραμέτρους του στοιχείου MODEL «nixonrod» για τις διάφορες τάσεις φόρτισης, διερευνήθηκε η μεταβολή των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, οι οποίες προκύπτουν από την προσομοίωση των κρουστικών δοκιμών με τη χρήση του μοντέλου που προτάθηκε από τον Νίχον (για το δείγμα εδάφους Β με υγρασία 10%), αν μεταβληθεί η συνθήκη απιονισμού, η οποία στον αρχικό αλγόριθμο του μοντέλου είναι η εξής: $J_d < 80\%J_c$ (βλέπε Ενότητα 2.2.3.2)

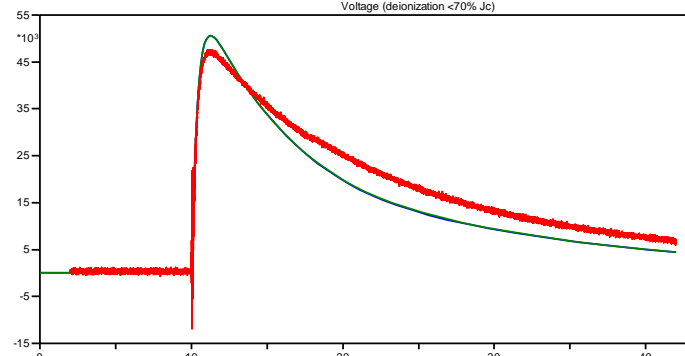
Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται οι νέες κυματομορφές τάσης και ρεύματος με μεταβολή της συνθήκης απιονισμού ($J_d < 70\%J_c$ και $J_d < 90\%J_c$ / με μπλε χρώμα), οι αρχικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος (με την αρχική συνθήκη απιονισμού, $J_d < 80\%J_c$ / με πράσινο χρώμα) καθώς και οι κυματομορφές, οι οποίες προέκυψαν από τα καταγεγραμμένα κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών παλμογραφήματα (με κόκκινο χρώμα). Αριστερά φαίνονται οι καμπύλες της τάσης (σε kV) και δεξιά οι καμπύλες του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε ms.



Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

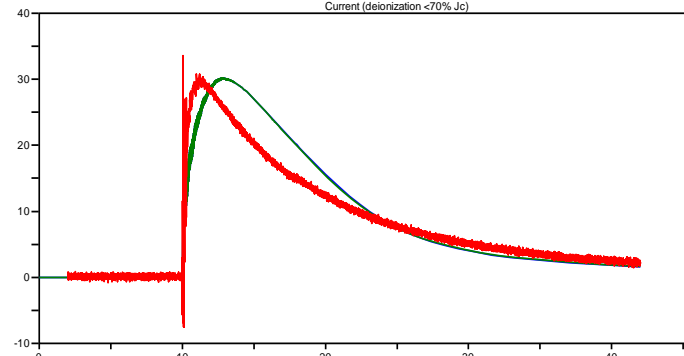
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon54.ADF: v:Vrod
54kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <70% Jc)

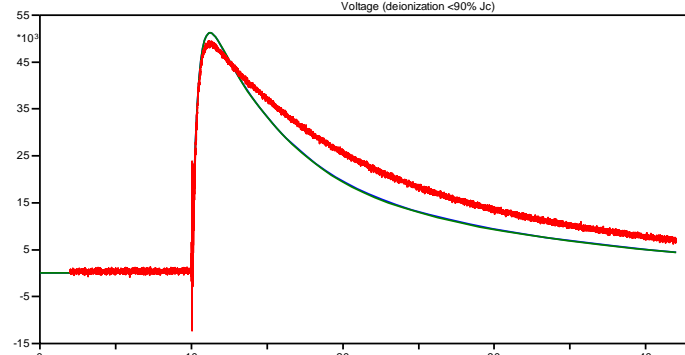


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon54.ADF: i:VrodX0010
54kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 55kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

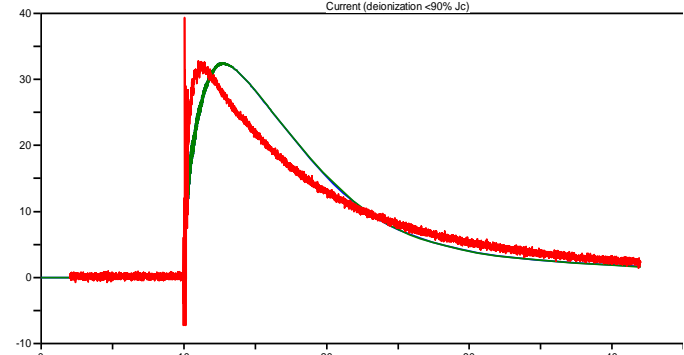
Voltage (deionization <90% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon55.ADF: v:Vrod
55kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <90% Jc)

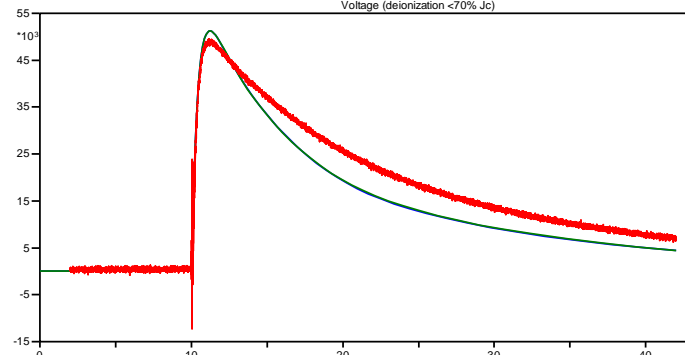


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon55.ADF: i:VrodX0010
55kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 55kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

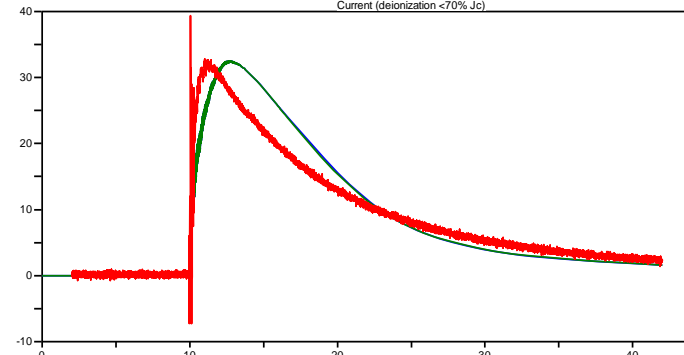
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon55.ADF: v:Vrod
55kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <70% Jc)

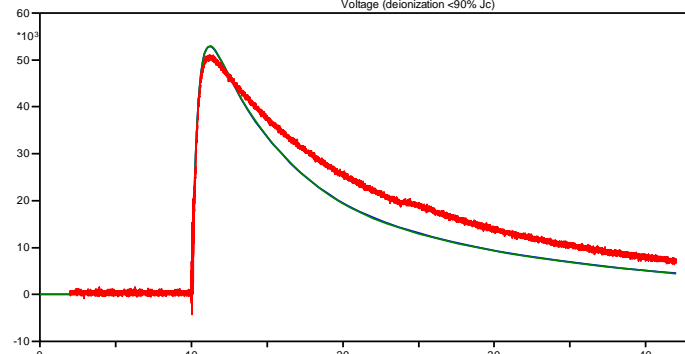


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon55.ADF: i:VrodX0010
55kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 57kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

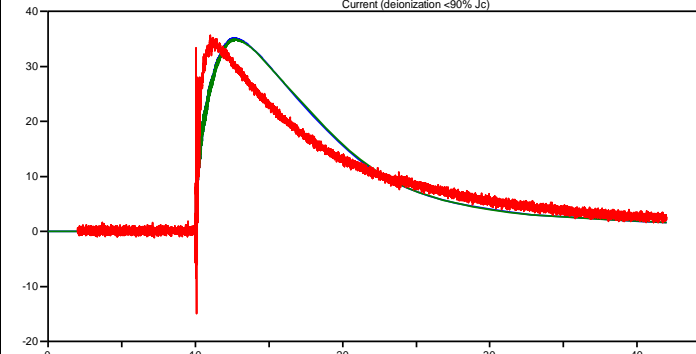
Voltage (deionization <90% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon57.ADF: v:Vrod
57kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <90% Jc)

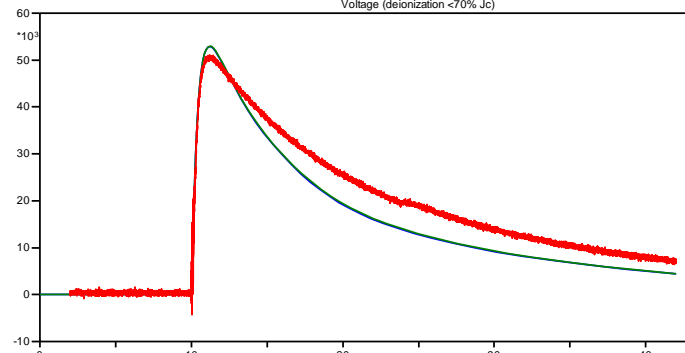


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon57.ADF: i:VrodXX0010
57kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 57kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

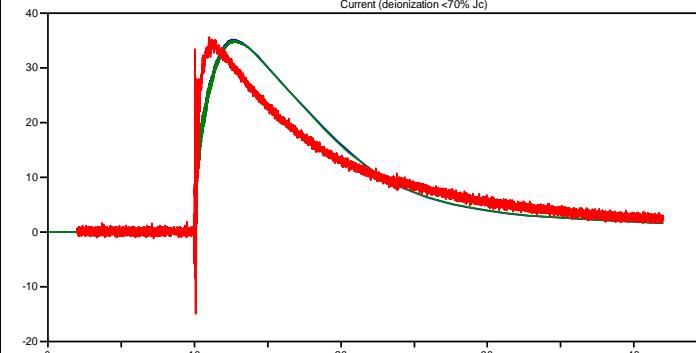
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon57.ADF: v:Vrod
57kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <70% Jc)

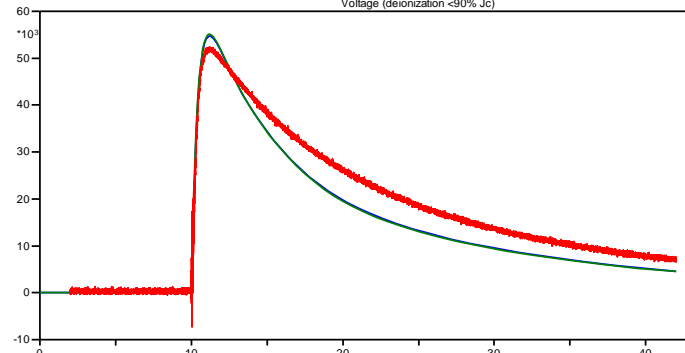


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon57.ADF: i:VrodXX0010
57kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 59kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

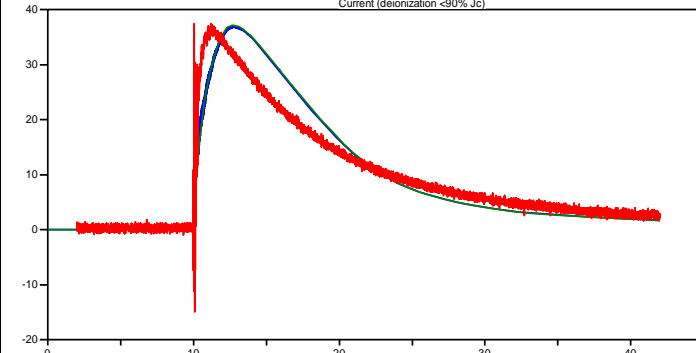
Voltage (deionization <90% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon59.ADF: v:Vrod
59kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <90% Jc)

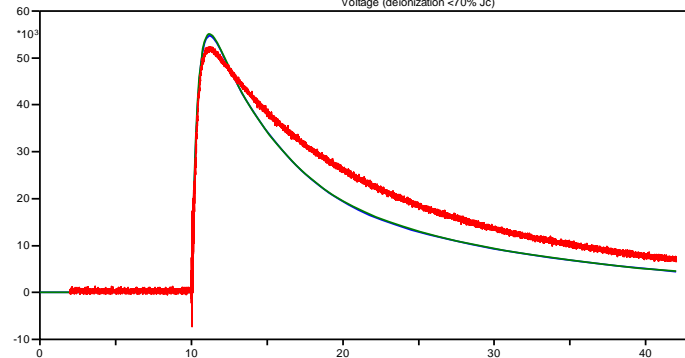


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon59.ADF: i:VrodXX0010
59kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 59kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

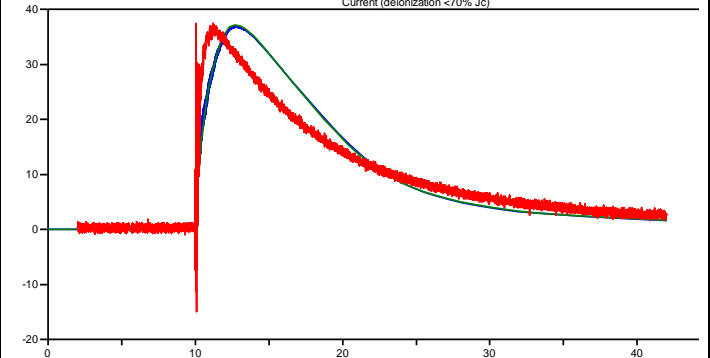
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.pH: v:VROD
nixon59.ADF: v:Vrod
59kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <70% Jc)

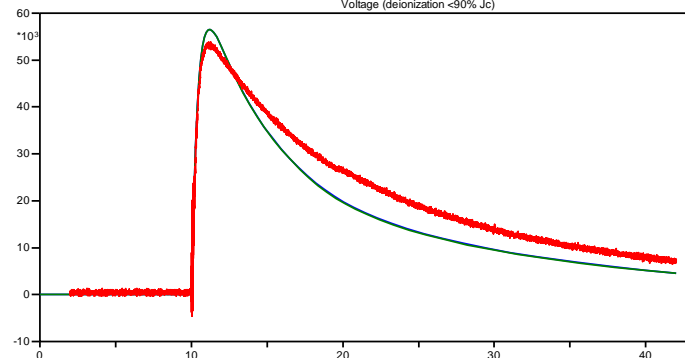


NIXONROD_THEO.pH: e:VROD -XX0010
nixon59.ADF: i:VrodX00010
59kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 61kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

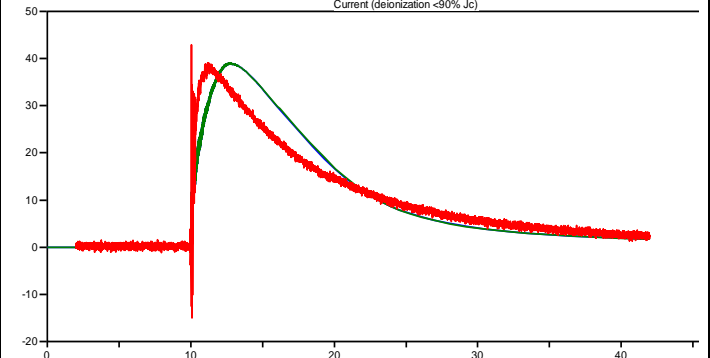
Voltage (deionization <90% Jc)



NIXONROD_THEO.pH: v:VROD
nixon61.ADF: v:Vrod
61kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <90% Jc)

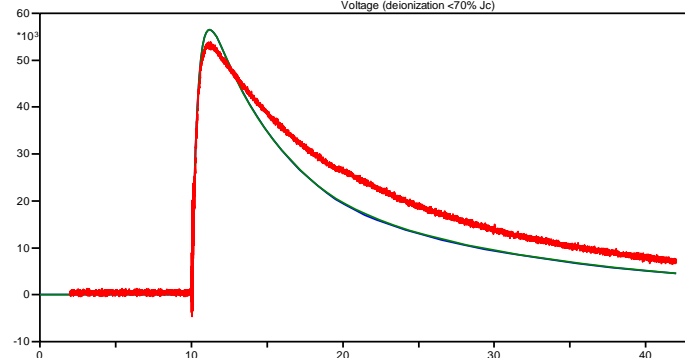


NIXONROD_THEO.pH: e:VROD -XX0010
nixon61.ADF: i:VrodX00010
61kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 61kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

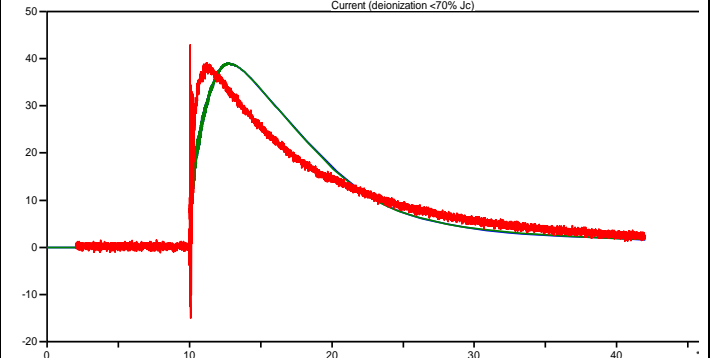
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.pH: v:VROD
nixon61.ADF: v:Vrod
61kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <70% Jc)

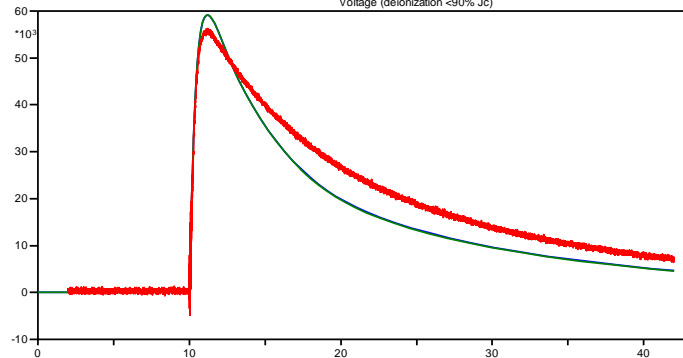


NIXONROD_THEO.pH: e:VROD -XX0010
nixon61.ADF: i:VrodX00010
61kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 64kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

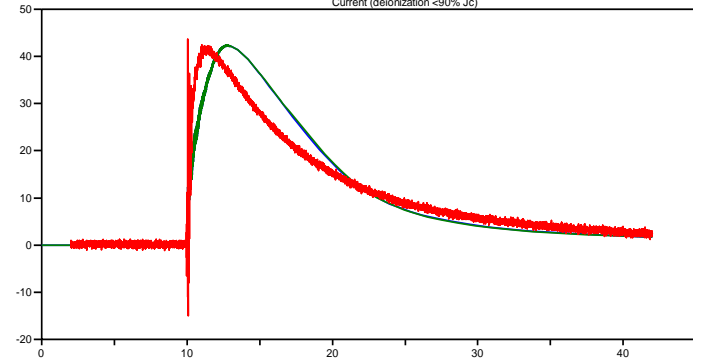
Voltage (deionization <90% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon64.ADF: v:Vrod
64kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <90% Jc)

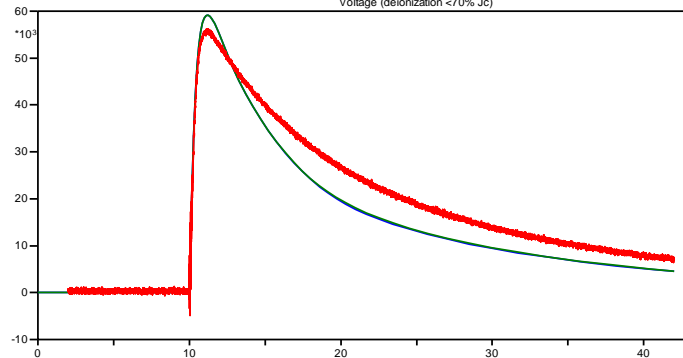


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon64.ADF: i:VrodX0010
64kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 64kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

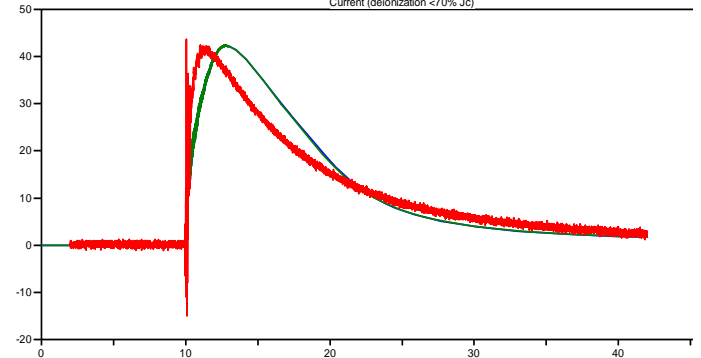
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon64.ADF: v:Vrod
64kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <70% Jc)

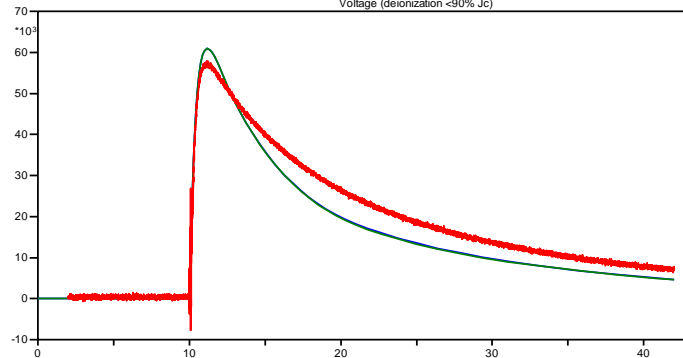


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon64.ADF: i:VrodX0010
64kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 66kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

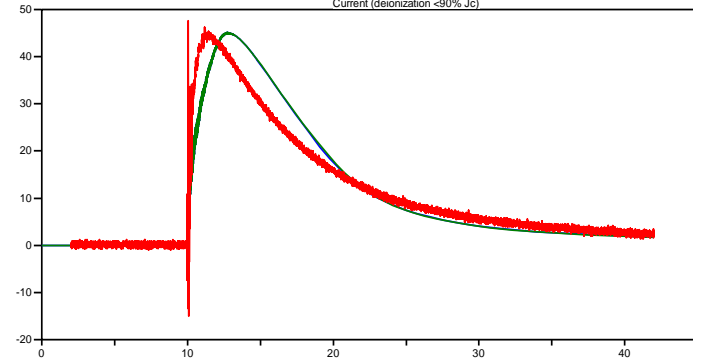
Voltage (deionization <90% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: v:VROD
nixon66.ADF: v:Vrod
66kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <90% Jc)

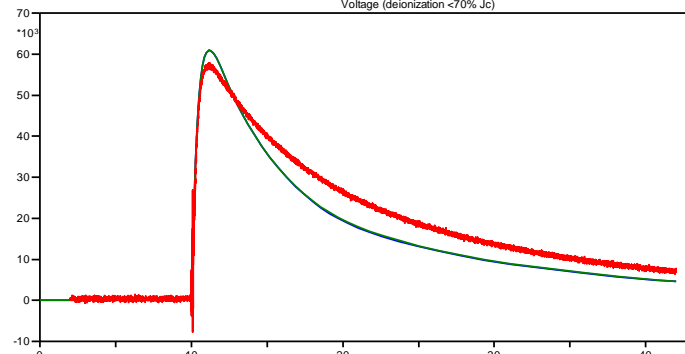


NIXONROD_THEO.p4: c:VROD -XX0010
nixon66.ADF: i:VrodX0010
66kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 66kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

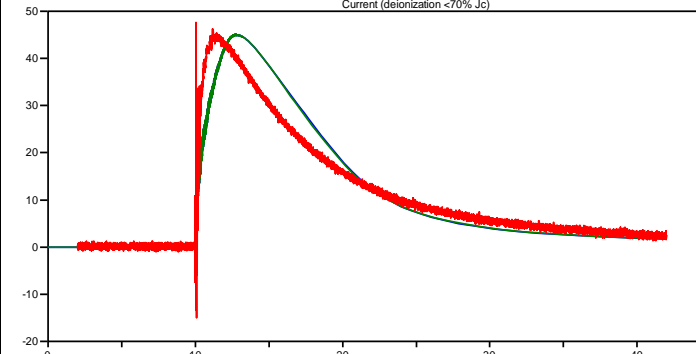
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: vVROD
nixon66.ADF: vVrod
66kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <70% Jc)

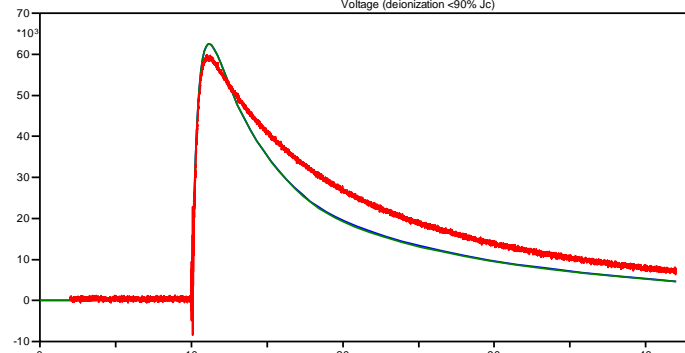


NIXONROD_THEO.p4: cVROD -XX0010
nixon66.ADF: iVrodXx0010
66kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 68kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

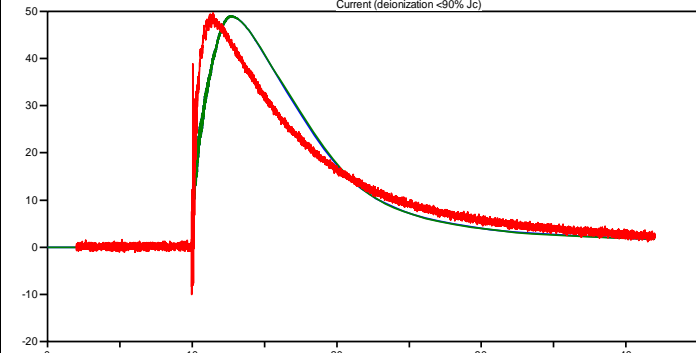
Voltage (deionization <90% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: vVROD
nixon68.ADF: vVrod
68kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <90% Jc)

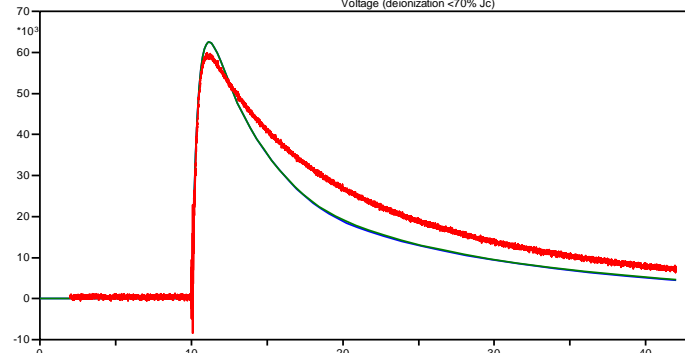


NIXONROD_THEO.p4: cVROD -XX0010
nixon68.ADF: iVrodXx0010
68kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 68kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

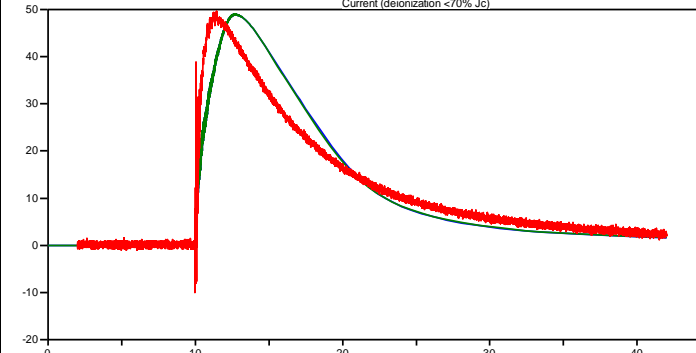
Voltage (deionization <70% Jc)



NIXONROD_THEO.p4: vVROD
nixon68.ADF: vVrod
68kV.adf: V

Κυματομορφές Ρεύματος

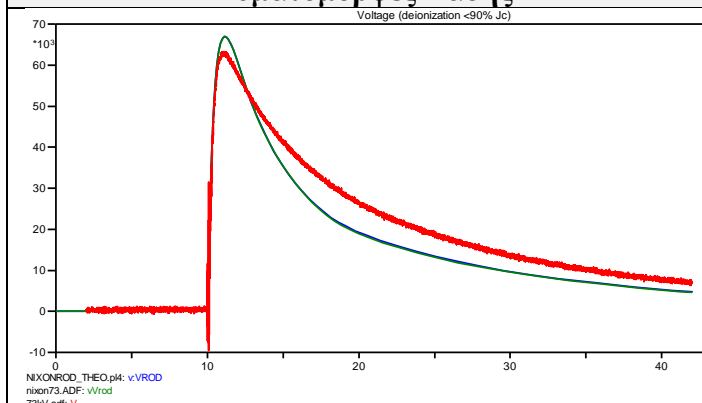
Current (deionization <70% Jc)



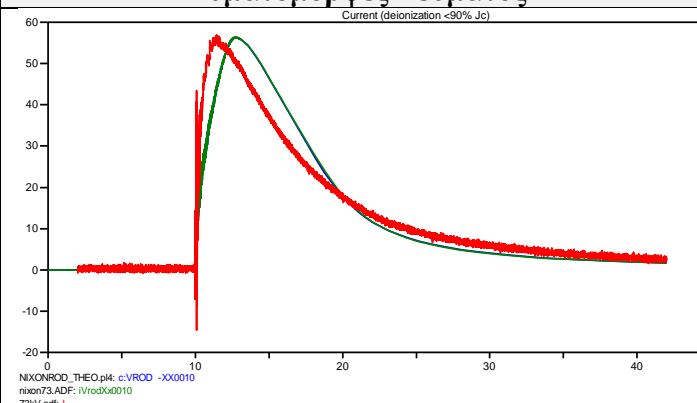
NIXONROD_THEO.p4: cVROD -XX0010
nixon68.ADF: iVrodXx0010
68kV.adf: I

Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 73kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

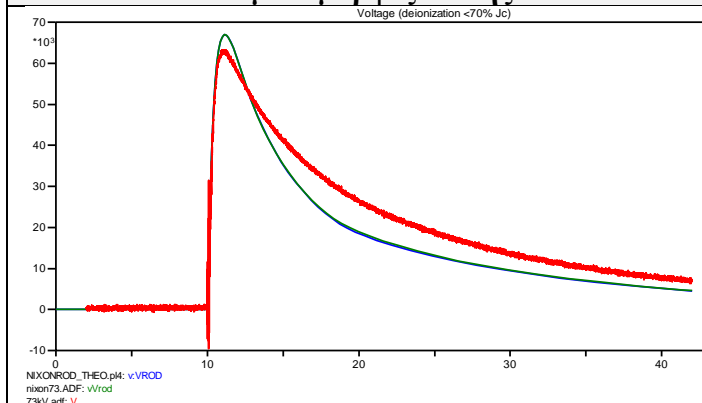


Κυματομορφές Ρεύματος

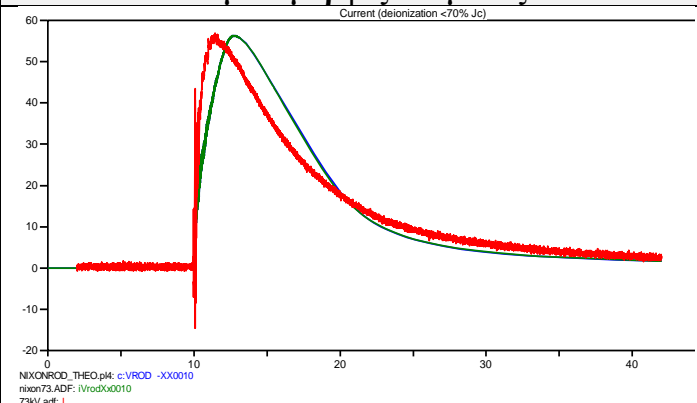


Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 73kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης



Κυματομορφές Ρεύματος



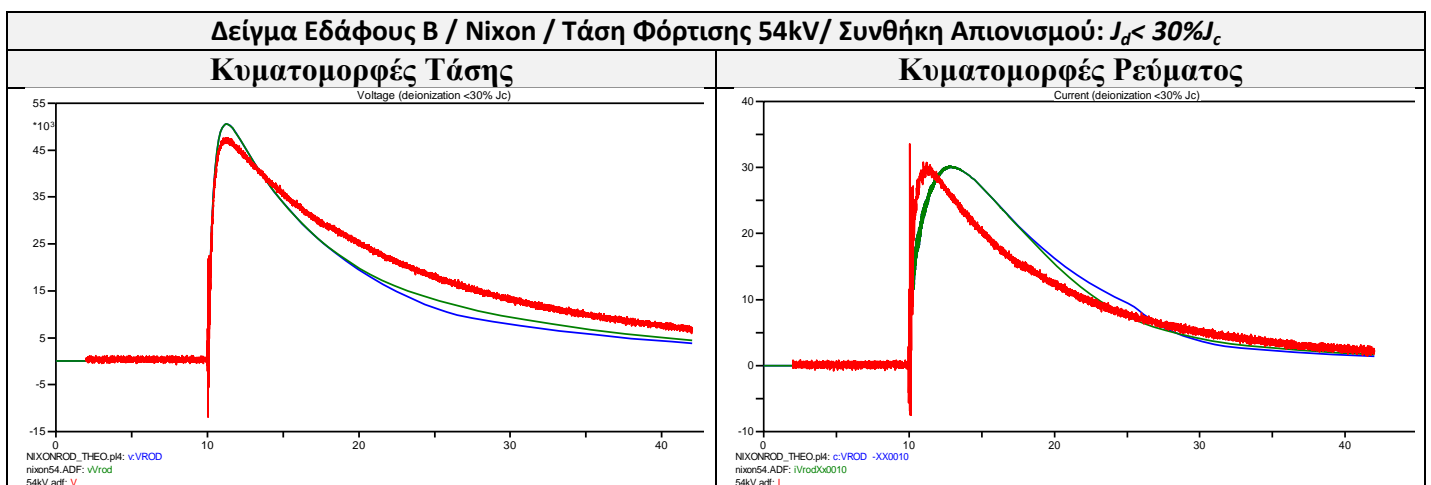
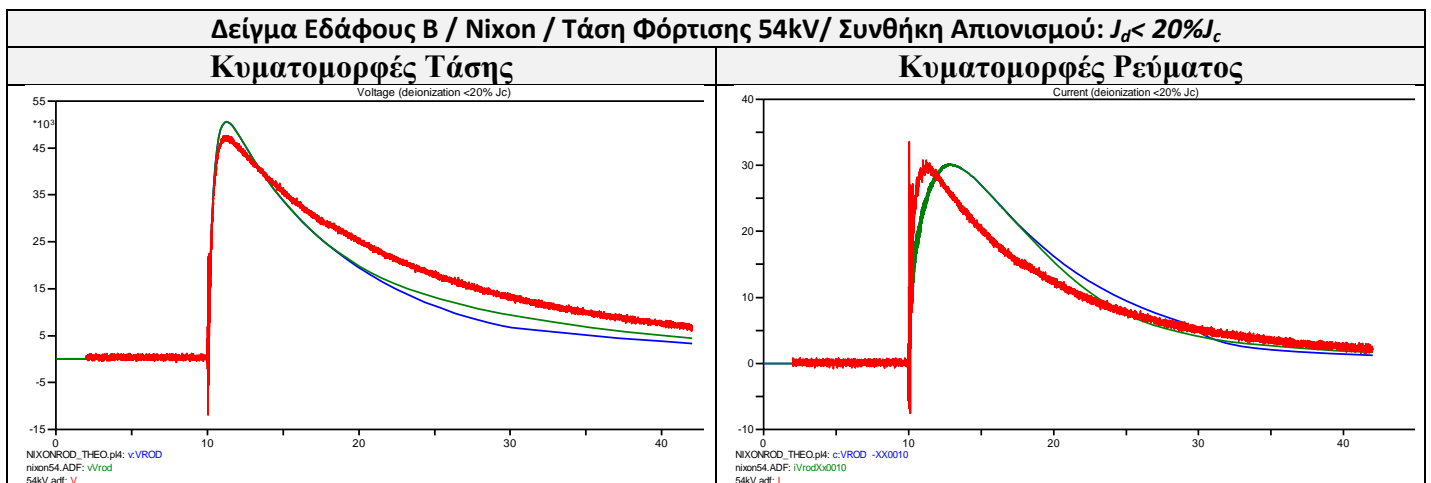
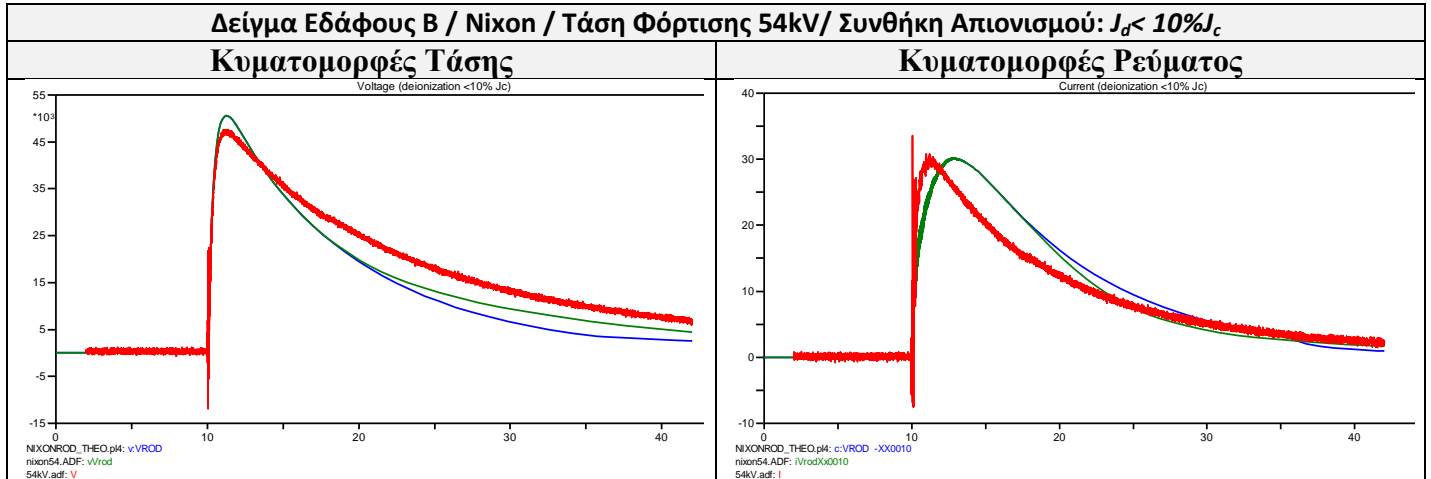
Παρατηρήσεις

Από την παρατήρηση των προηγούμενων εικόνων, διαπιστώνουμε ότι, για όλες τις τάσεις φόρτισης και για τις δύο νέες συνθήκες απιονισμού, παρατηρείται αμελητέα μεταβολή των καμπυλών τάσης και ρεύματος. Δηλαδή οι νέες κυματομορφές σχεδόν ταυτίζονται με τις αρχικές, χωρίς να βελτιώνονται ως προς τα χαρακτηριστικά τους που αποκλίνουν από τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών.

Περαιτέρω Διερεύνηση – Παρατηρήσεις

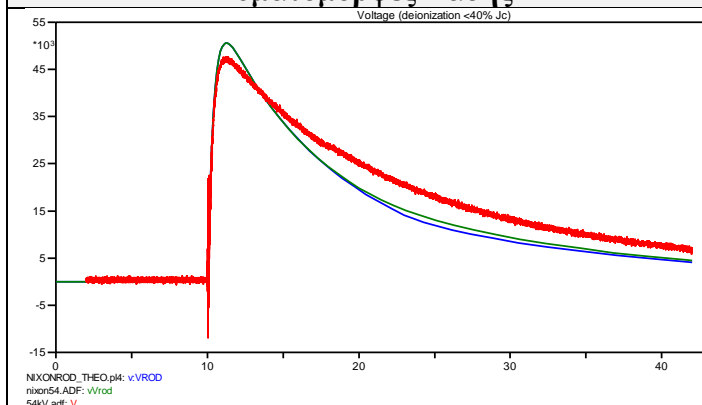
Καθώς για τις παραπάνω μικρές μεταβολές της συνθήκης απιονισμού δεν μπορούσαν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τον τρόπο επίδρασης αυτών των μεταβολών στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος, διερευνήθηκε για μια συγκεκριμένη τάση φόρτισης (54 kV) και για διάφορες συνθήκες απιονισμού (από $J_d < 10\%J_c$ μέχρι $J_d < 100\%J_c$) η μεταβολή των καμπυλών σε σχέση με τις αρχικές καμπύλες (για $J_d < 80\%J_c$). Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι νέες κυματομορφές (με μπλε χρώμα), οι αρχικές

κυματομορφές (για $J_d < 80\%J_c$ / με πράσινο χρώμα) και αυτές που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή της κρουστικής δοκιμής με τάση φόρτισης 54 kV (με κόκκινο χρώμα). Αριστερά φαίνονται οι καμπύλες της τάσης (σε kV) και δεξιά οι καμπύλες του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε μs.

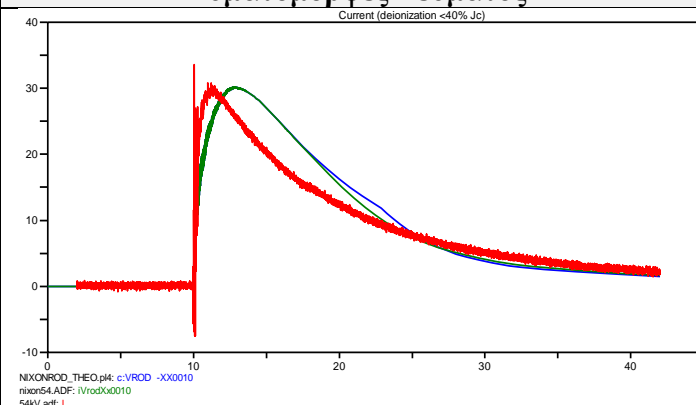


Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 40\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

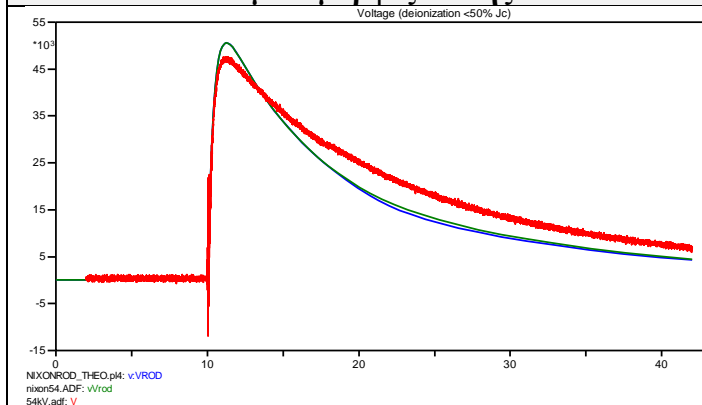


Κυματομορφές Ρεύματος

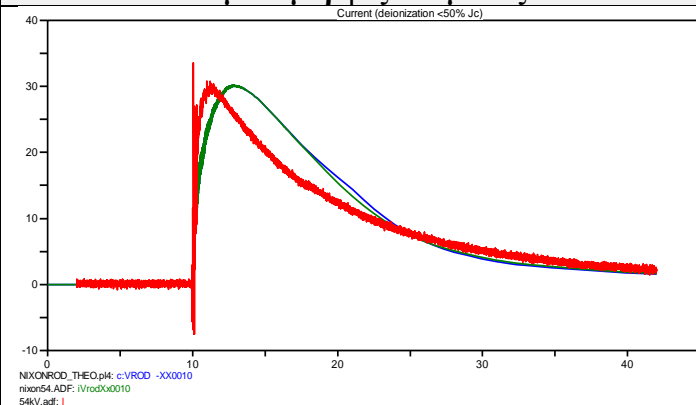


Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 50\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης

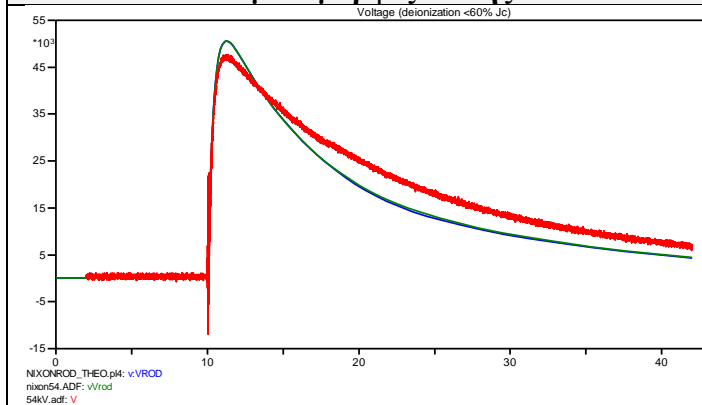


Κυματομορφές Ρεύματος

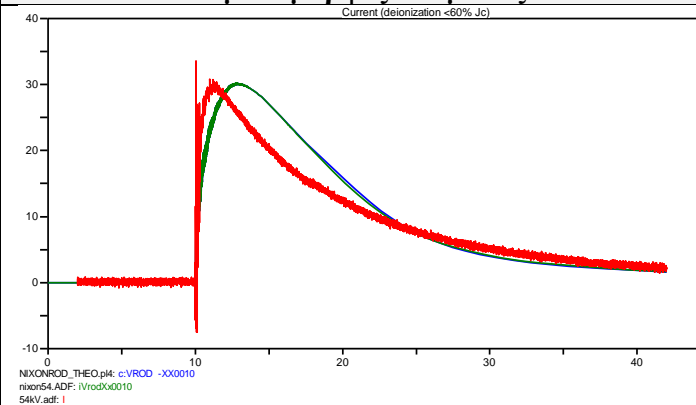


Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 60\%J_c$

Κυματομορφές Τάσης



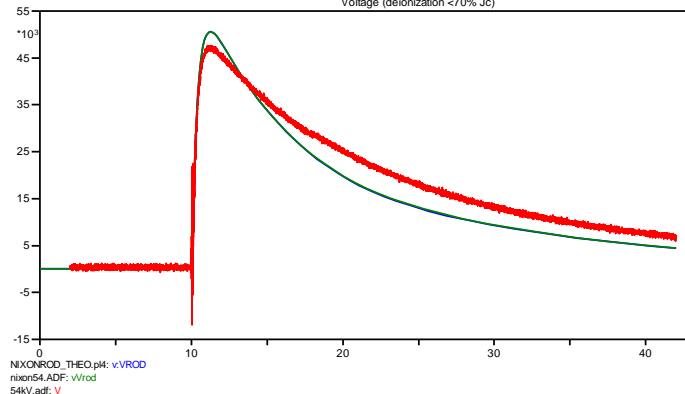
Κυματομορφές Ρεύματος



Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 70\%J_c$

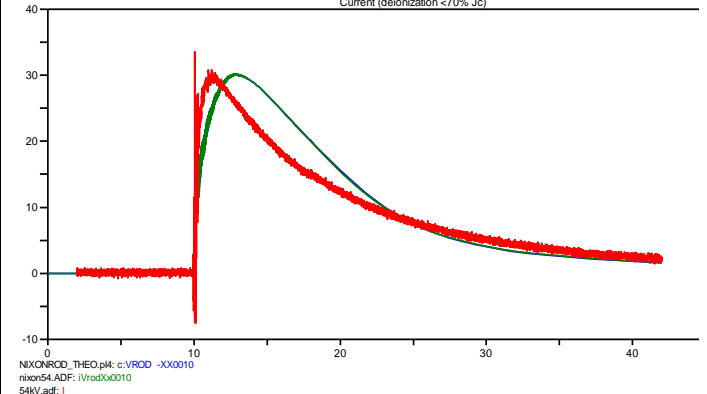
Κυματομορφές Τάσης

Voltage (deionization <70% Jc)



Κυματομορφές Ρεύματος

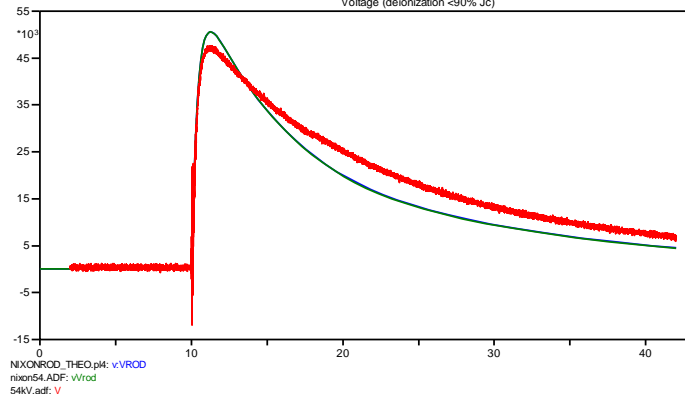
Current (deionization <70% Jc)



Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 90\%J_c$

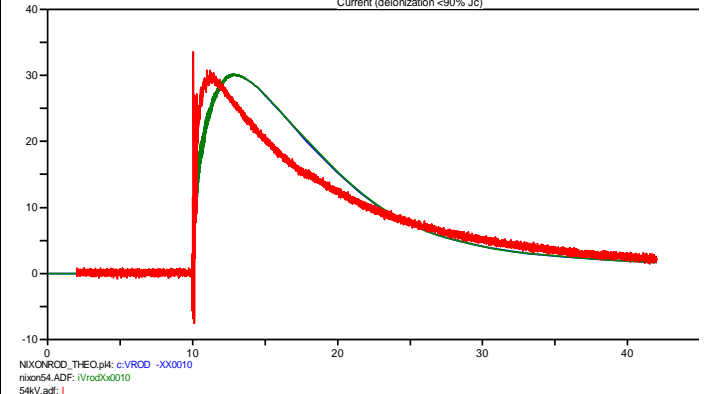
Κυματομορφές Τάσης

Voltage (deionization <90% Jc)



Κυματομορφές Ρεύματος

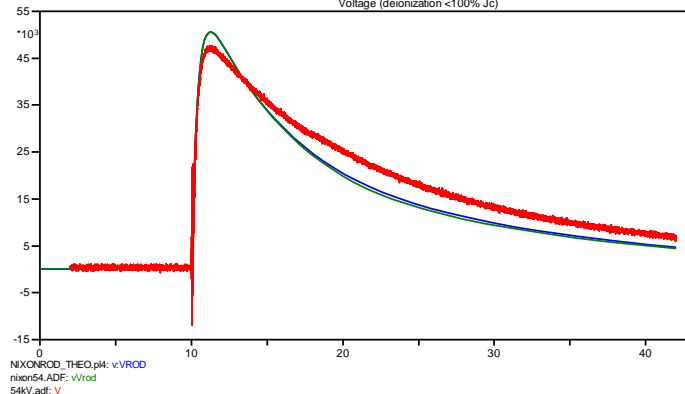
Current (deionization <90% Jc)



Δείγμα Εδάφους Β / Νixon / Τάση Φόρτισης 54kV/ Συνθήκη Απιονισμού: $J_d < 100\%J_c$

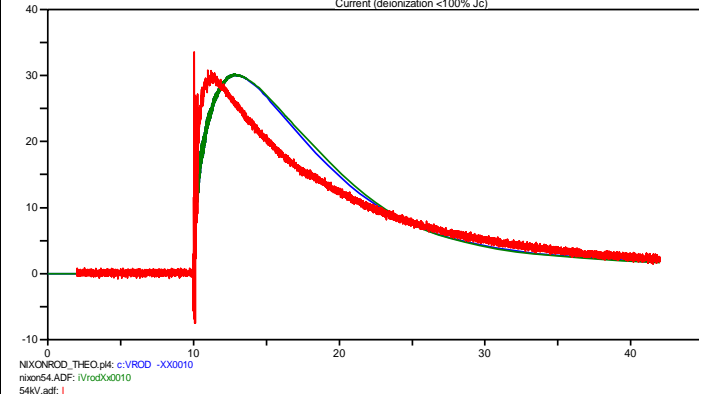
Κυματομορφές Τάσης

Voltage (deionization <100% Jc)



Κυματομορφές Ρεύματος

Current (deionization <100% Jc)

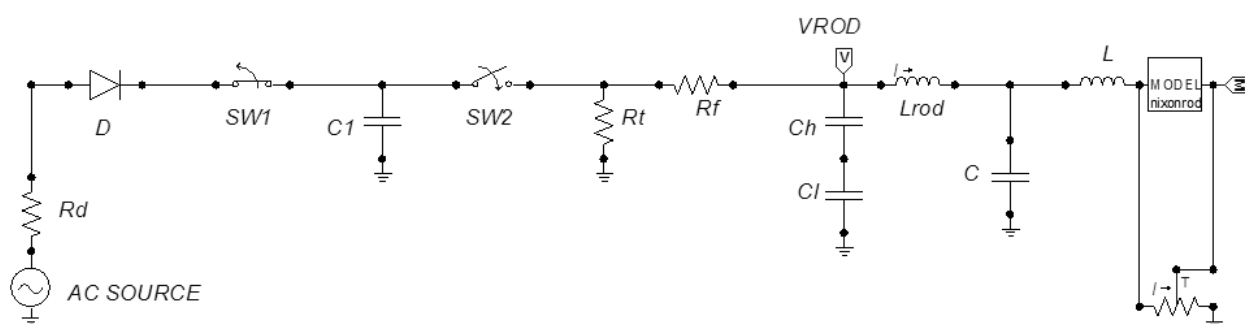


Όπως προκύπτει από την παρατήρηση αυτών των κυματομορφών και όπως αναμενόταν, τα μέγιστα των καμπυλών τάσης και ρεύματος ούτε μεταβάλλονται ως προς την τιμή τους ούτε μετατοπίζονται χρονικά. Η μόνη ουσιαστική επίδραση που έχει η σημαντική μεταβολή της συνθήκης απιονισμού (δηλαδή η σημαντική μείωση της τιμής της πυκνότητας του ρεύματος κάτω από την οποία λαμβάνει χώρα ο απιονισμός) είναι η περαιτέρω απόκλιση της ουράς των κυματομορφών τάσης και ρεύματος από τις αντίστοιχες κυματομορφές που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών.

5.2.2 Διερεύνηση της Μεταβολής των Κυματομορφών Τάσης-Ρεύματος του Μοντέλου Nixon με την Προσθήκη εν Σειρά Αυτεπαγωγής L

Κρατώντας ίδιες όλες τις παραμέτρους του στοιχείου MODEL «nixonrod» για τις διάφορες τάσεις φόρτισης, διερευνήθηκε η μεταβολή των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, οι οποίες προκύπτουν από την προσομοίωση των κρουστικών δοκιμών με τη χρήση του μοντέλου που προτάθηκε από τον Nixon, αν προστεθεί εν σειρά μια αυτεπαγωγή.

Στην ακόλουθη εικόνα, φαίνεται το νέο ισοδύναμο κύκλωμα μετά την προσθήκη της εν σειρά αυτεπαγωγής L .



Εικόνα 5.1: Νέο ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου του Nixon με την προσθήκη εν σειρά αυτεπαγωγής L

Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται με μπλε χρώμα οι νέες κυματομορφές τάσης και ρεύματος μετά την προσθήκη της εν σειρά αυτεπαγωγής L , με πράσινο χρώμα οι αρχικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος και με κόκκινο χρώμα οι κυματομορφές, οι οποίες προέκυψαν από τα καταγεγραμμένα κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών παλμογραφήματα. Αριστερά φαίνονται οι καμπύλες της τάσης (σε kV) και δεξιά οι καμπύλες του ρεύματος (σε A). Ο άξονας του χρόνου είναι σε μs .

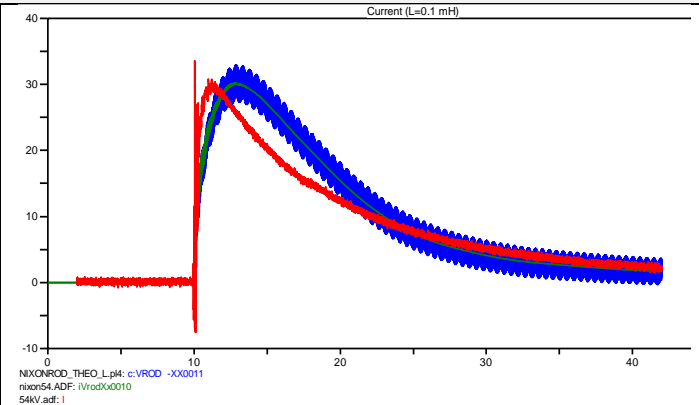
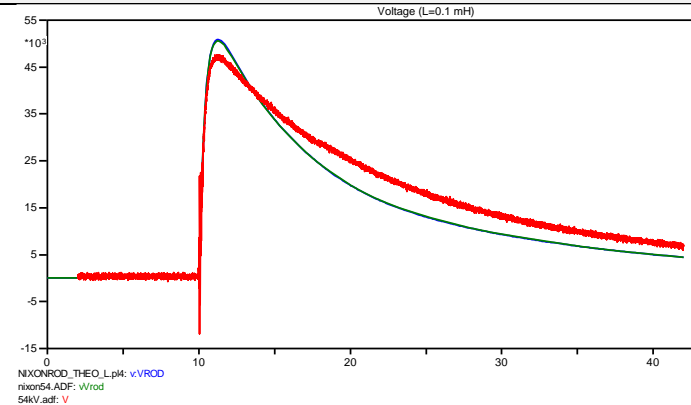
Επίσης, διερευνάται η μεταβολή των κυματομορφών για τέσσερις τυχαίες τιμές της αυτεπαγωγής L : 0,1 mH, 0,5 mH, 1 mH και 5 mH.

Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 54kV

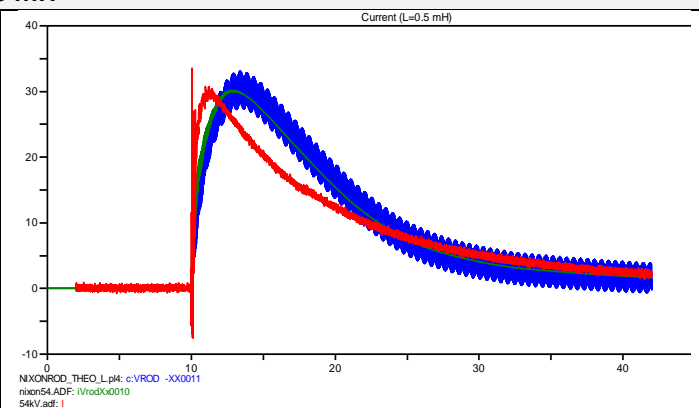
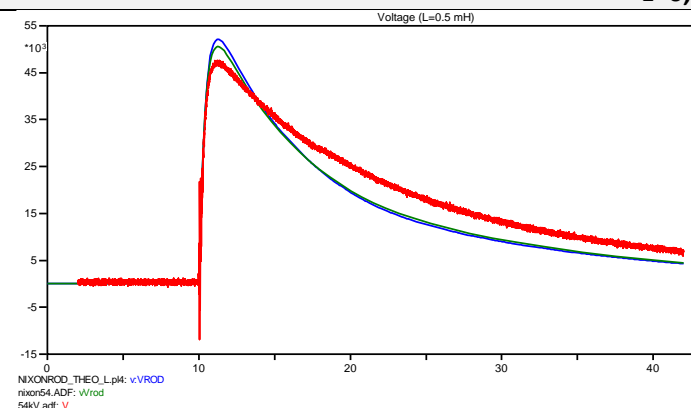
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

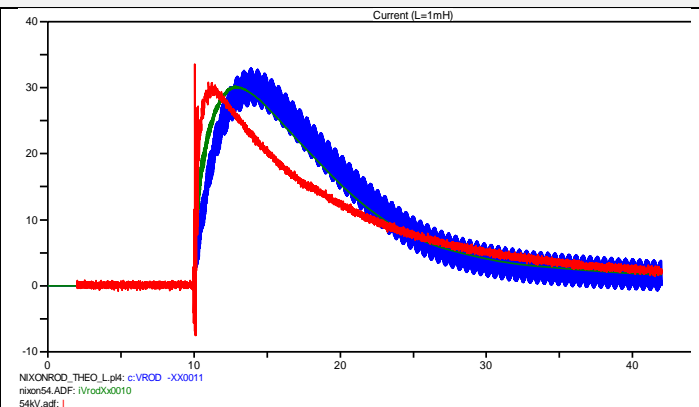
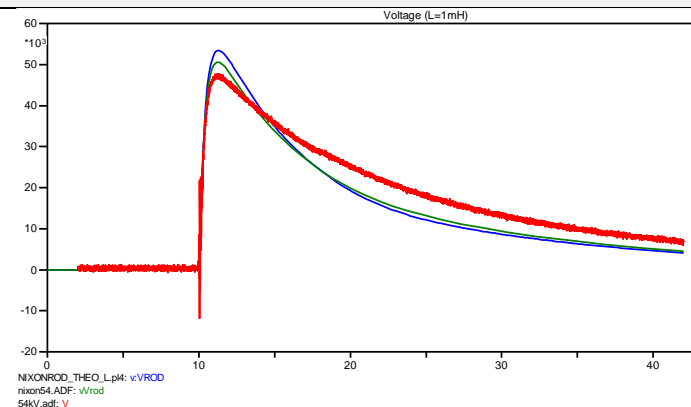
L=0,1 mH



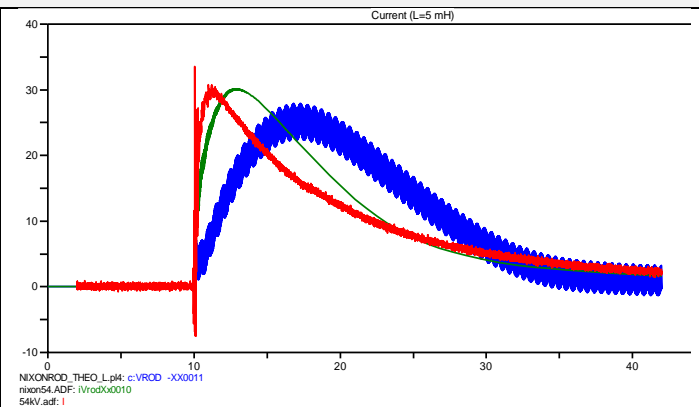
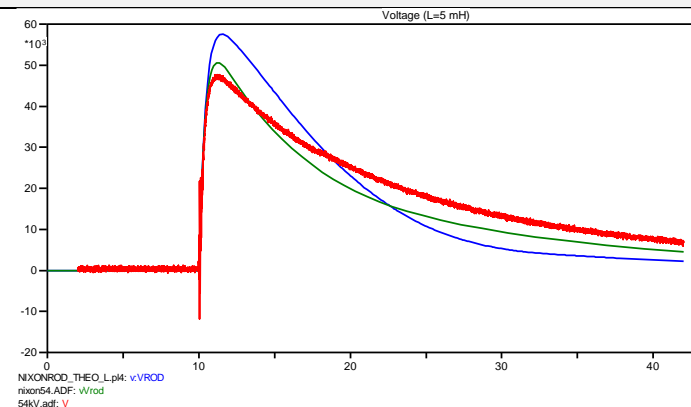
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

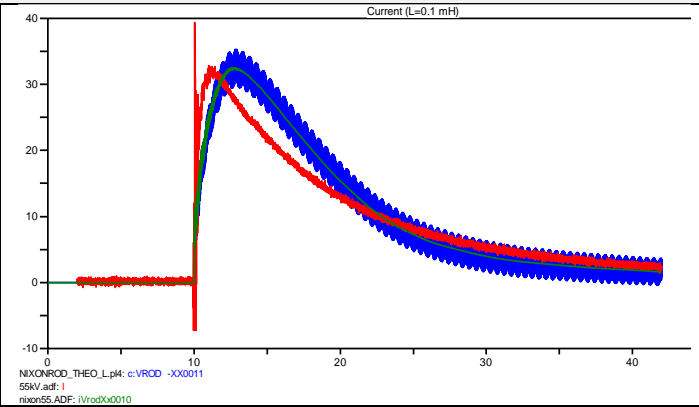
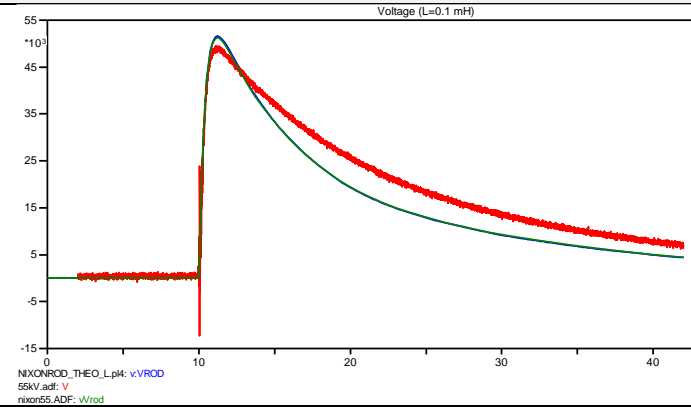


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 55kV

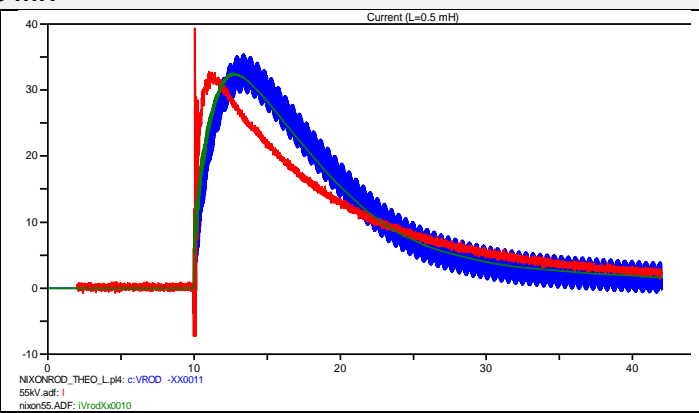
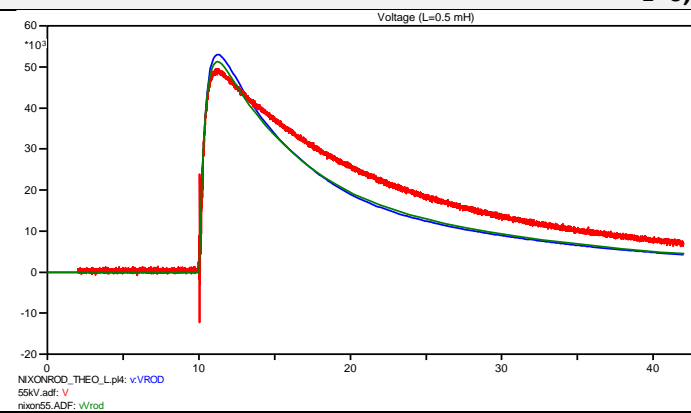
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

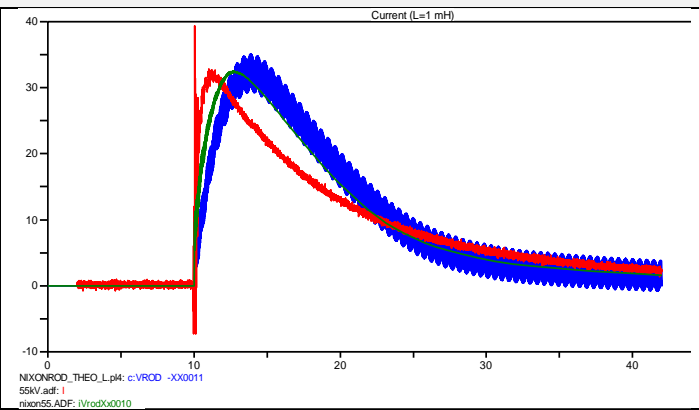
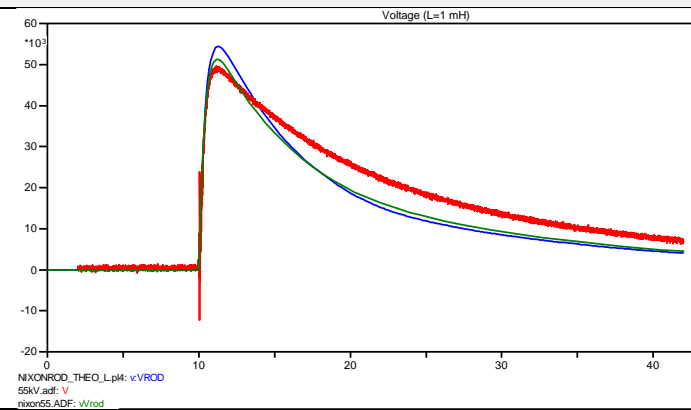
L=0,1 mH



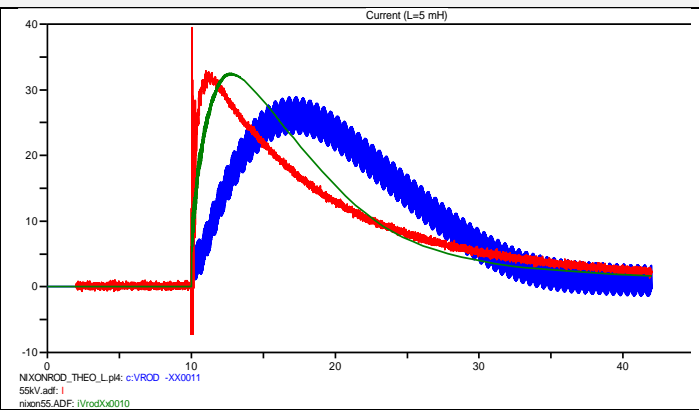
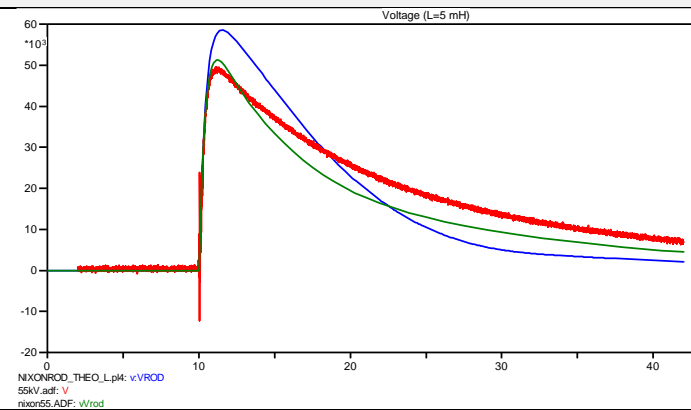
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

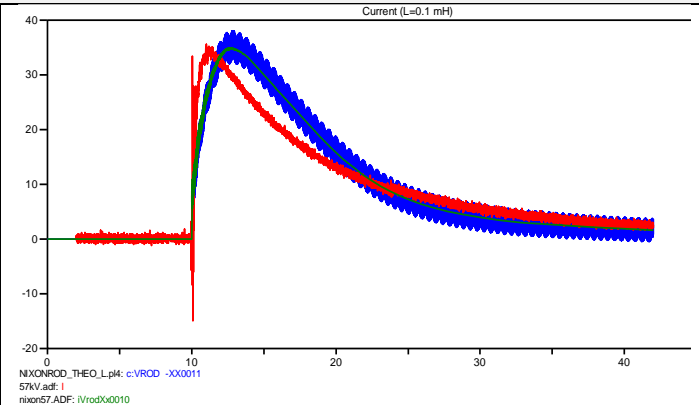
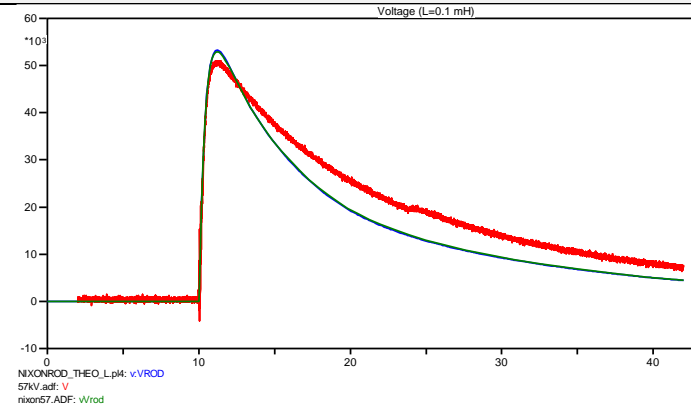


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 57kV

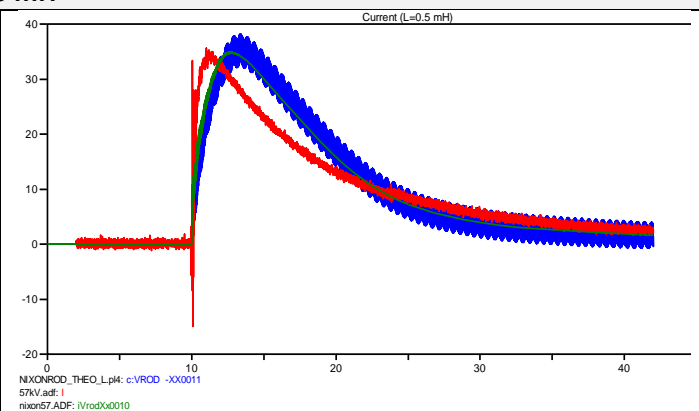
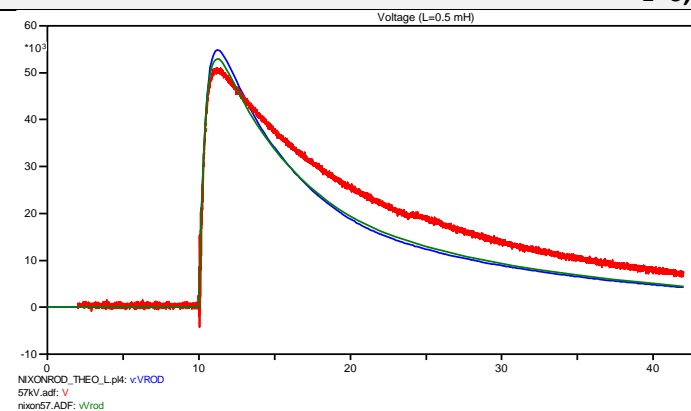
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

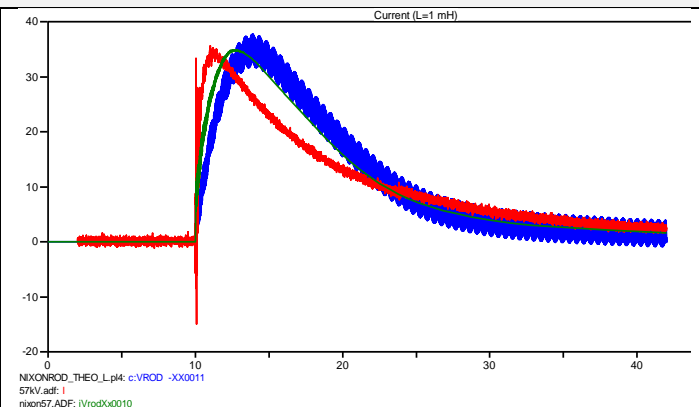
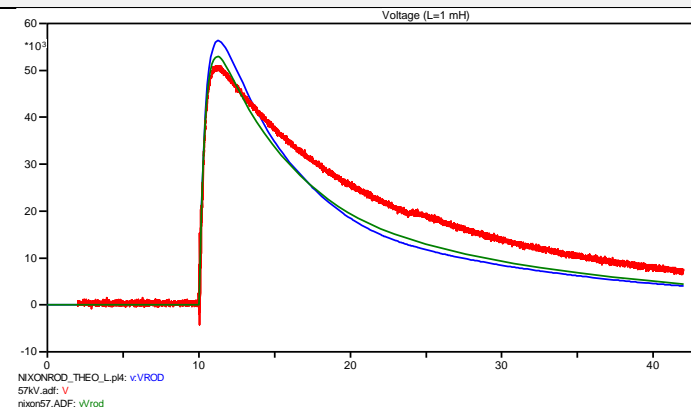
L=0,1 mH



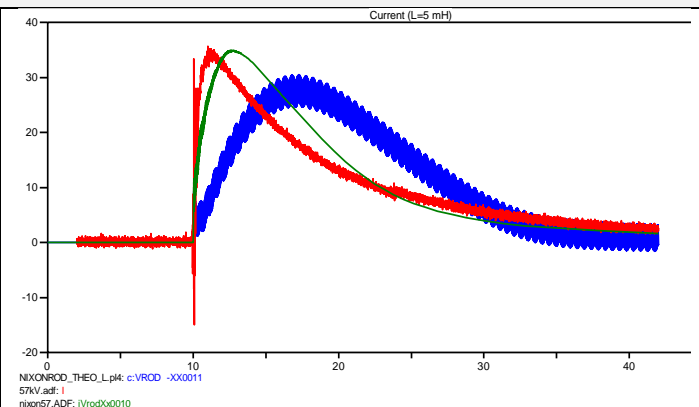
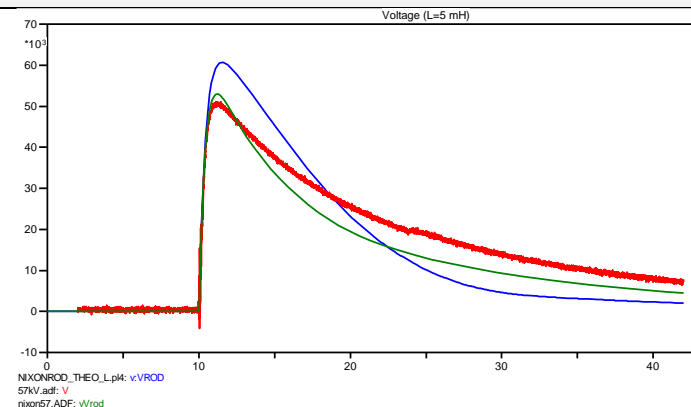
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

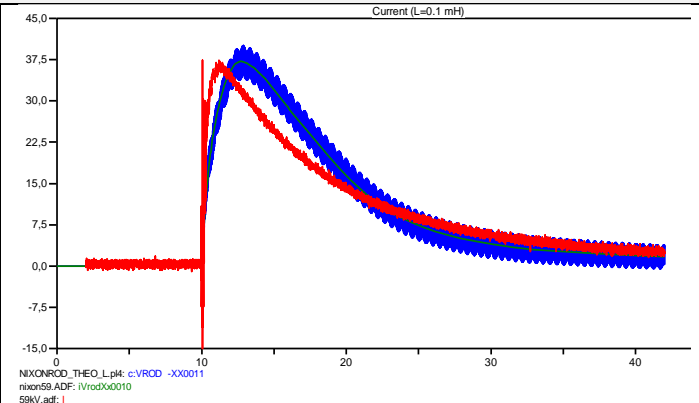
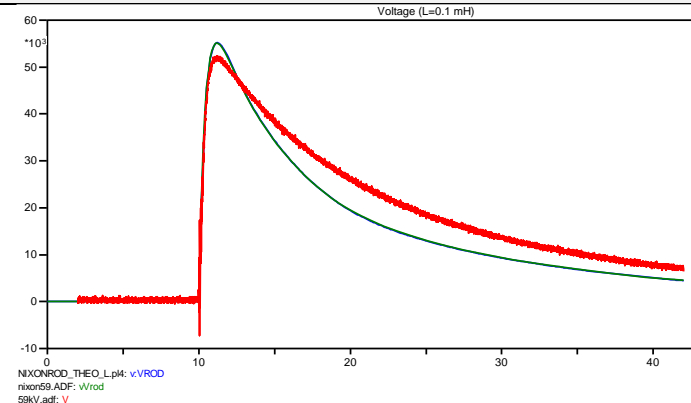


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 59kV

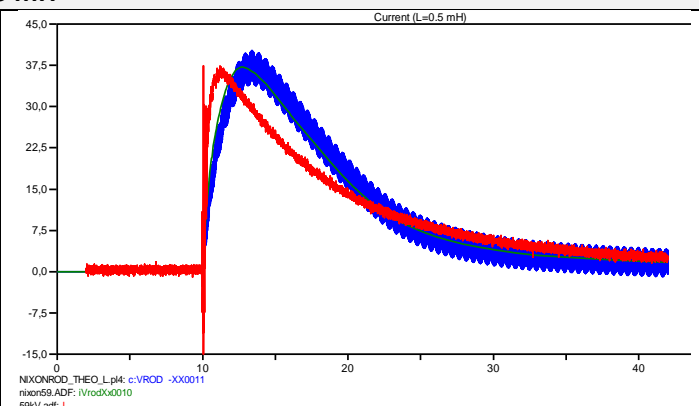
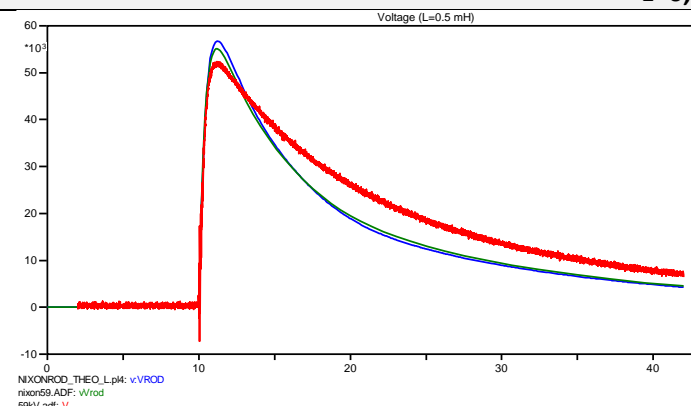
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

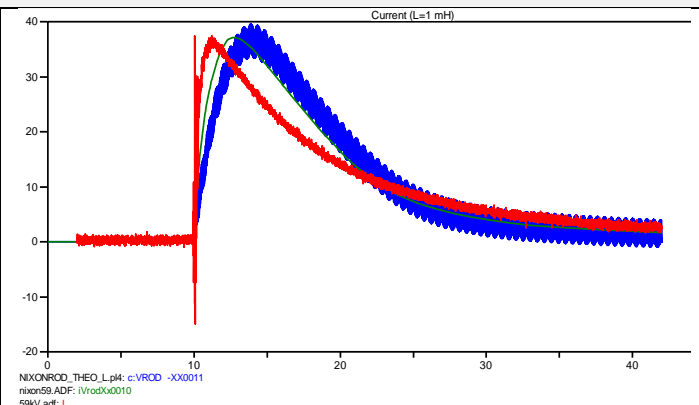
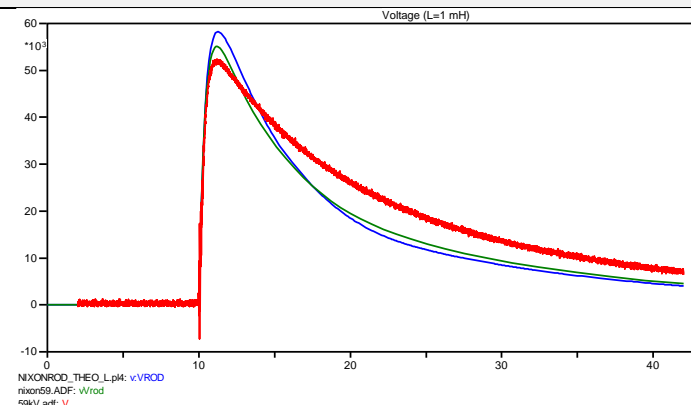
L=0,1 mH



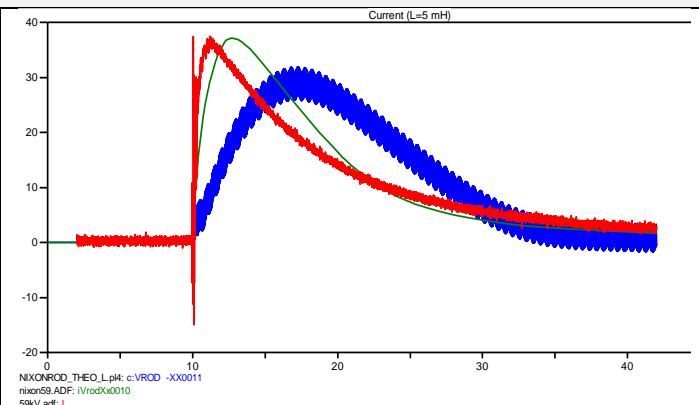
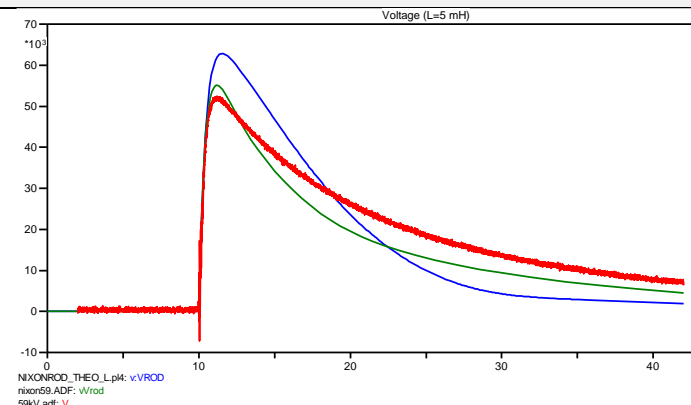
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

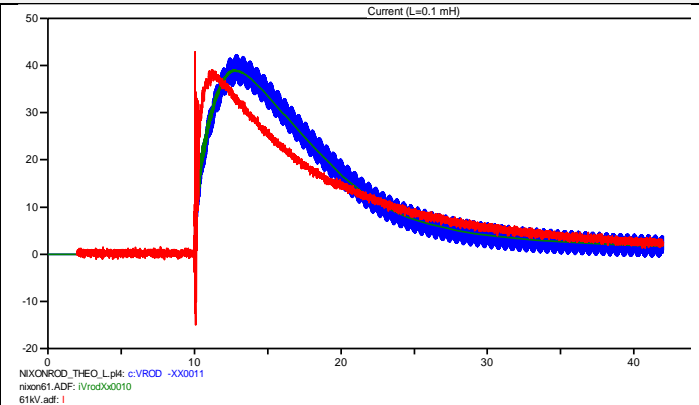
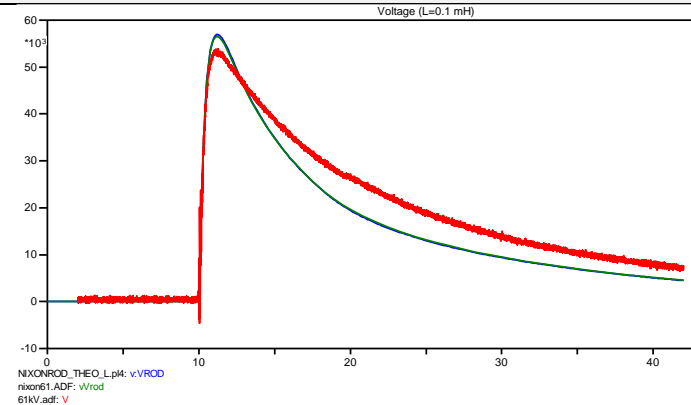


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 61kV

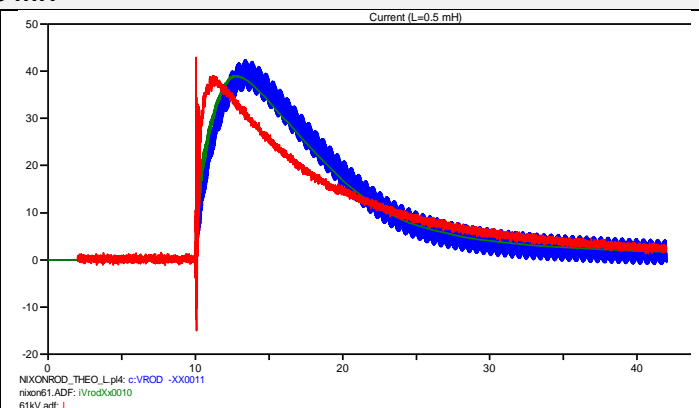
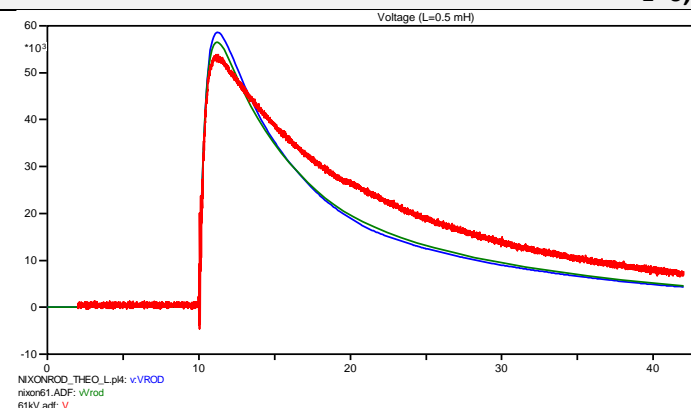
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

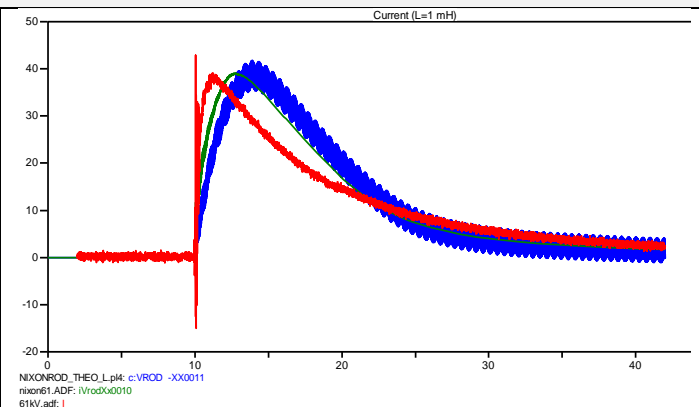
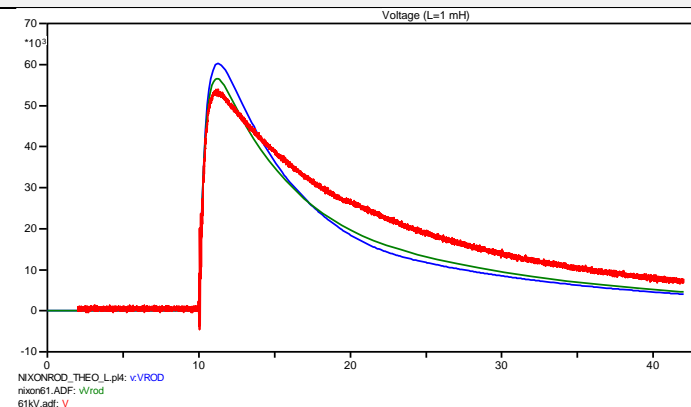
L=0,1 mH



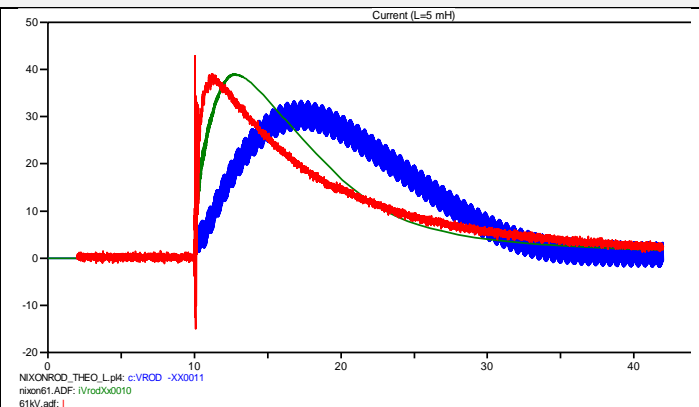
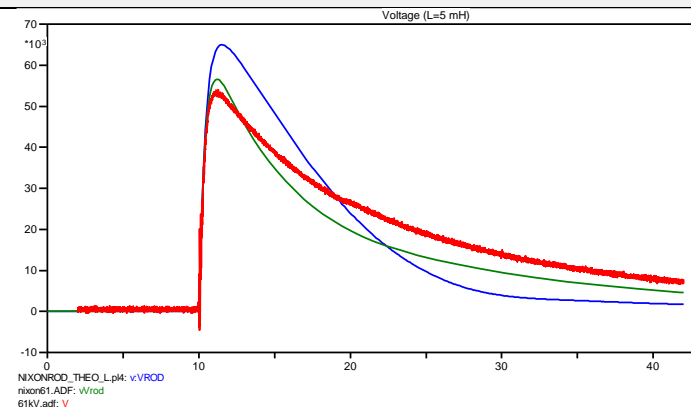
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

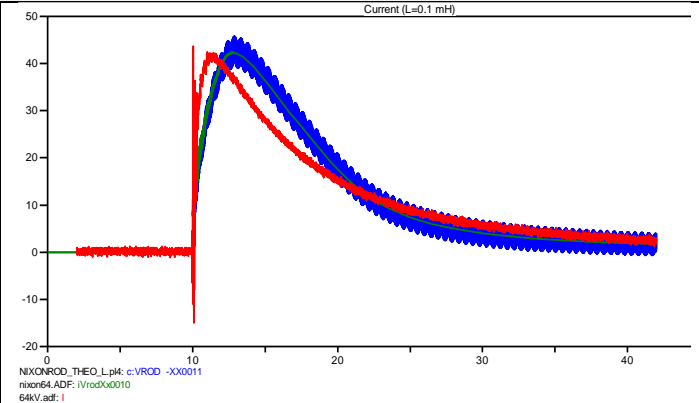
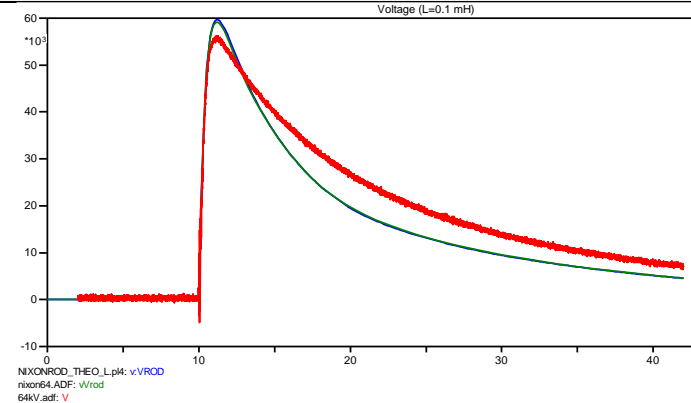


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 64kV

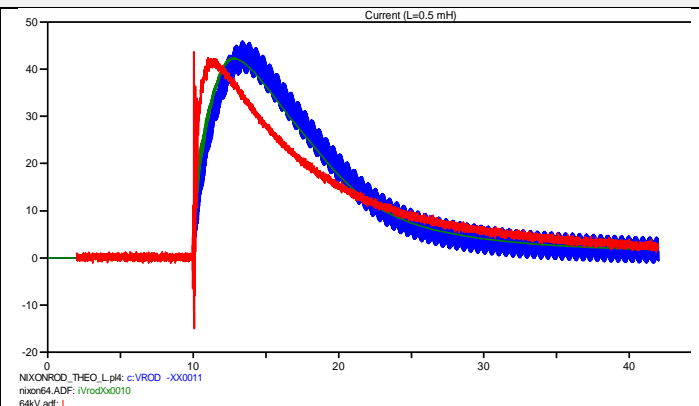
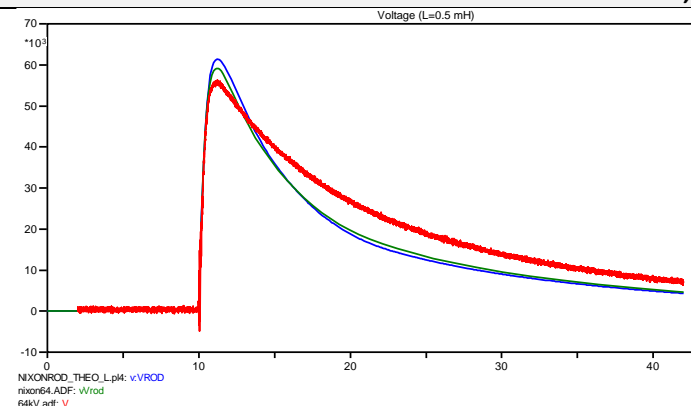
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

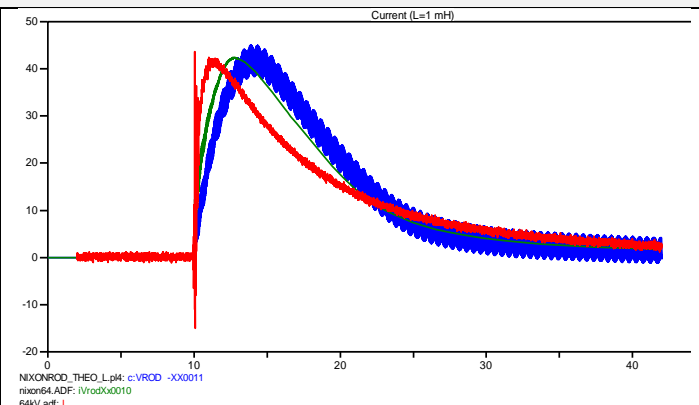
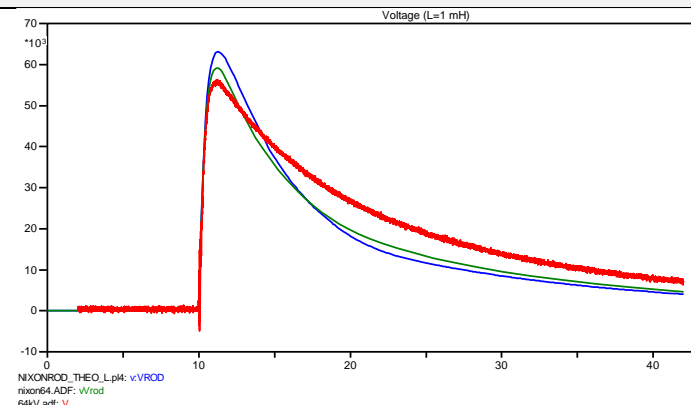
L=0,1 mH



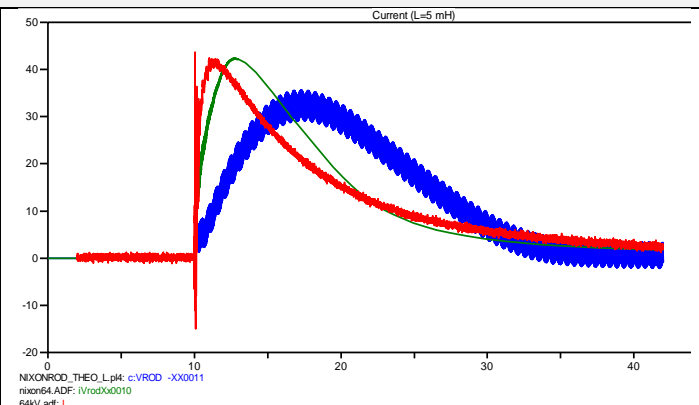
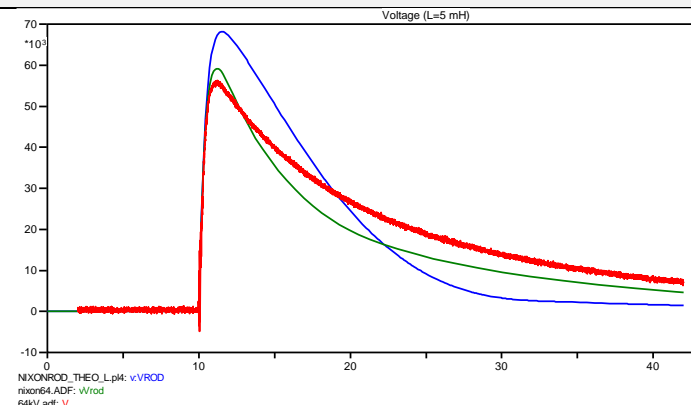
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

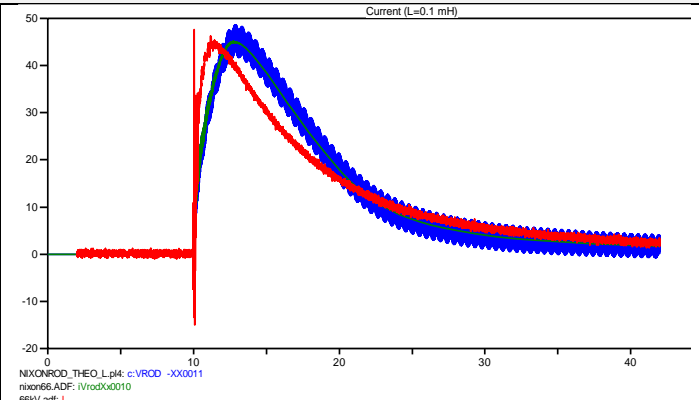
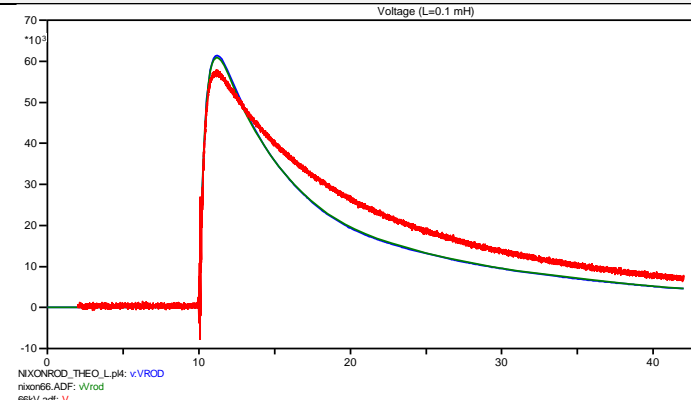


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 66kV

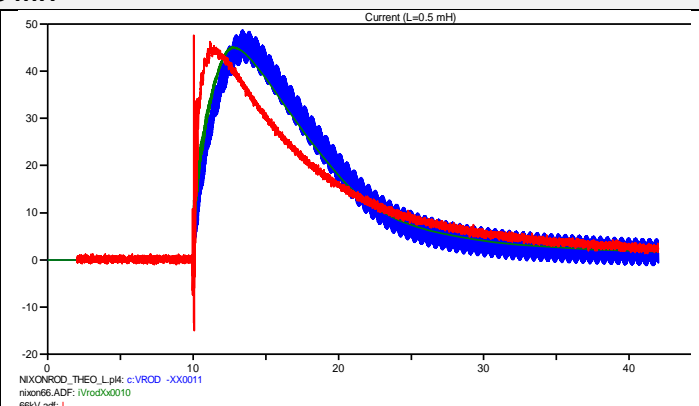
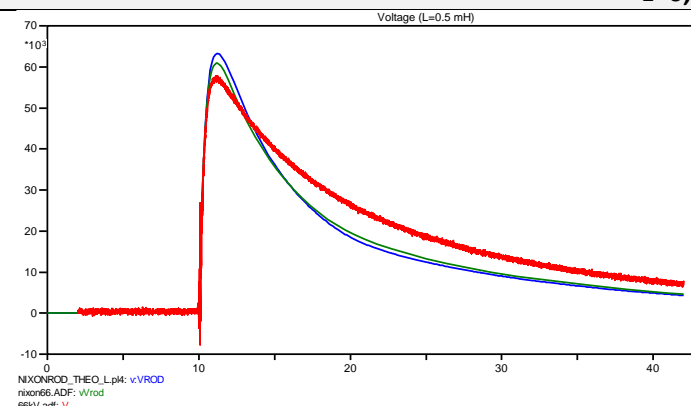
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

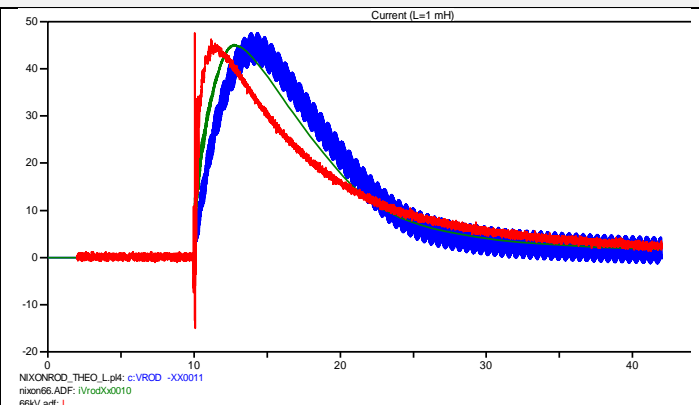
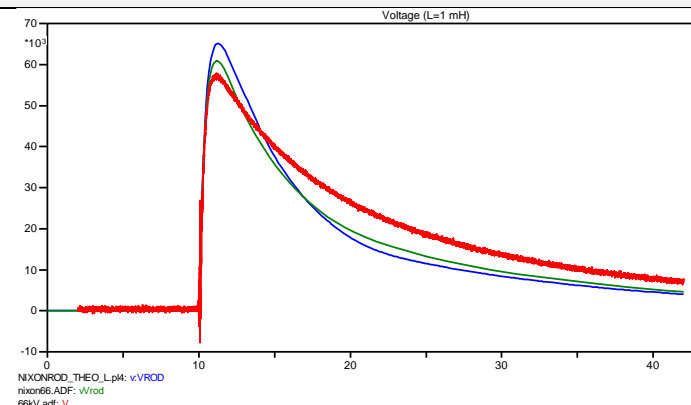
L=0,1 mH



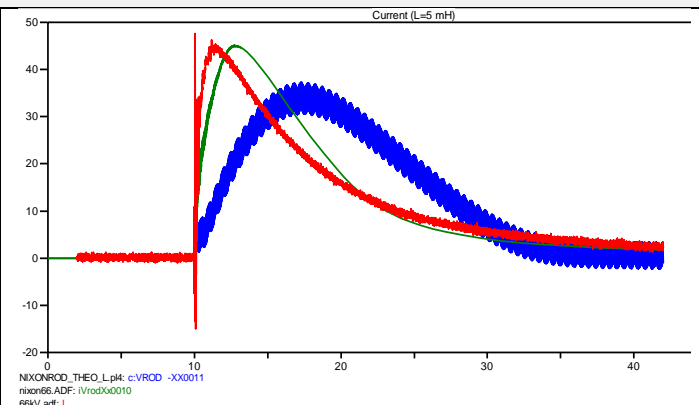
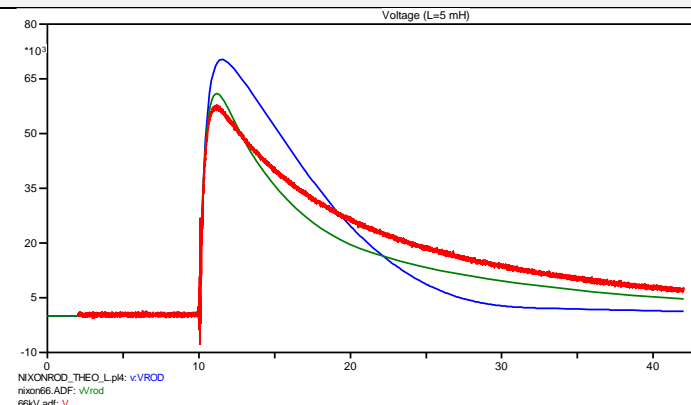
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

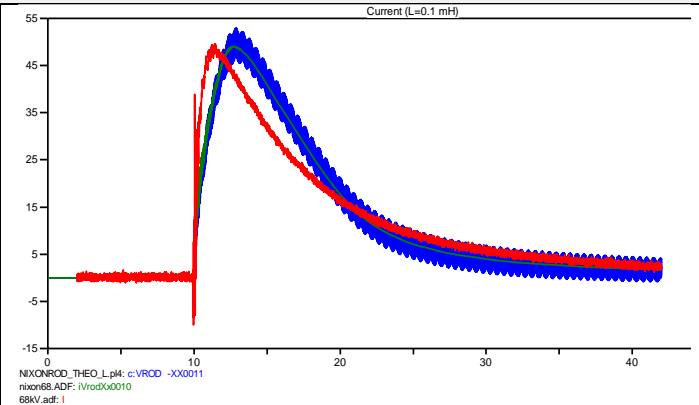
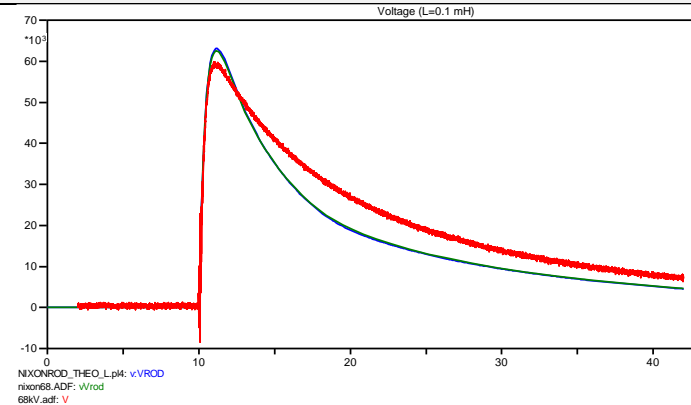


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 68kV

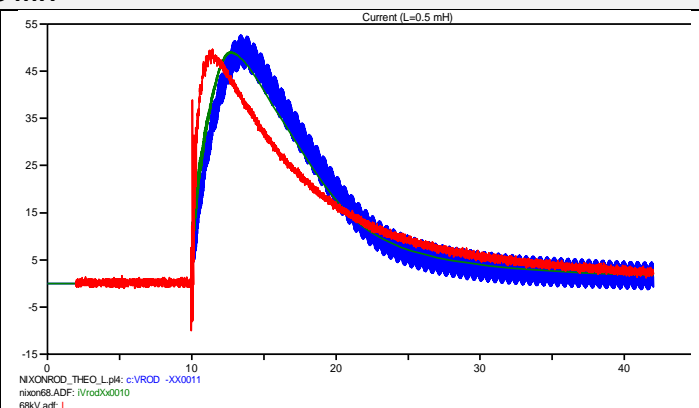
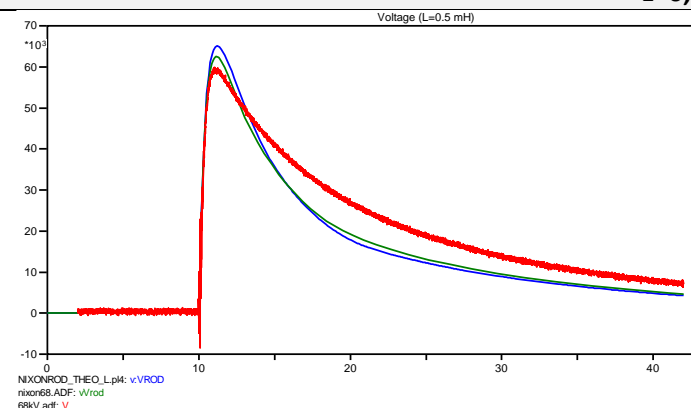
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

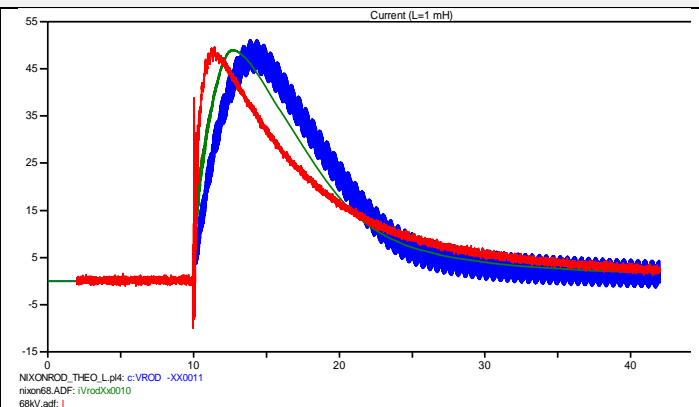
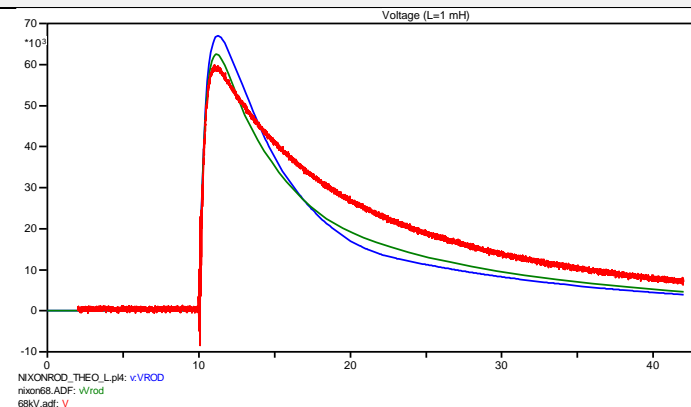
L=0,1 mH



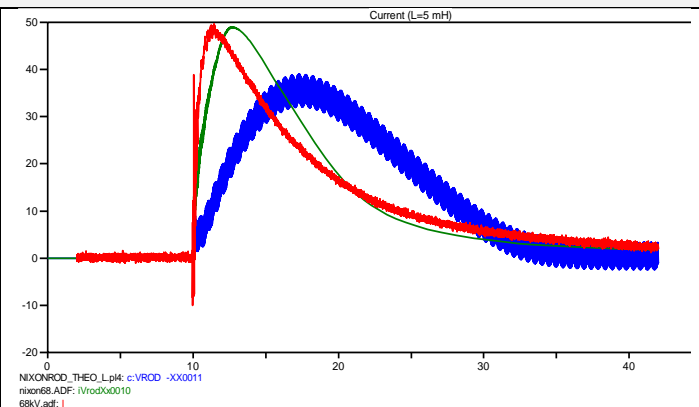
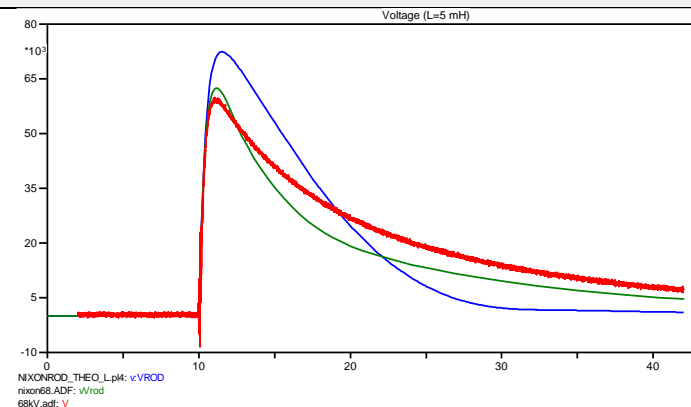
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH

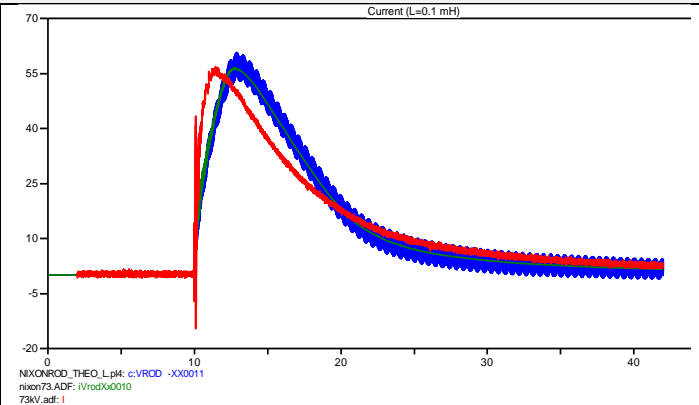
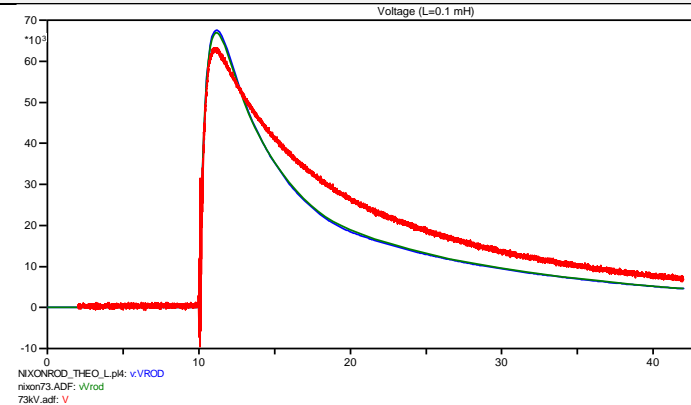


Δείγμα Εδάφους Β / Νίχον με προσθήκη εν σειρά L / Τάση Φόρτισης 73kV

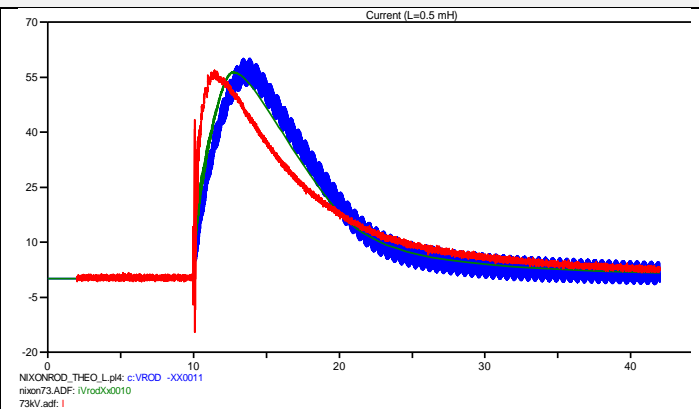
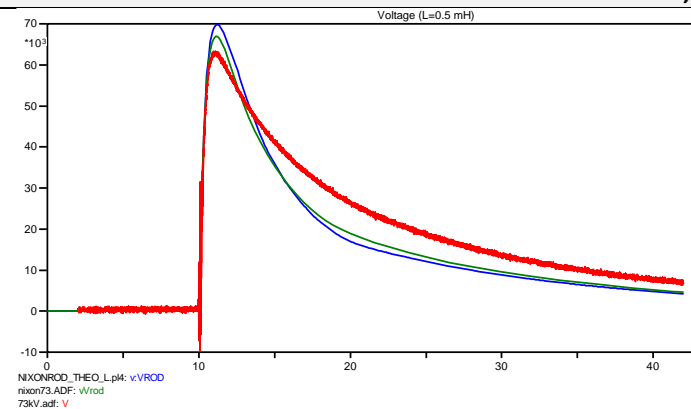
Κυματομορφές Τάσης

Κυματομορφές Ρεύματος

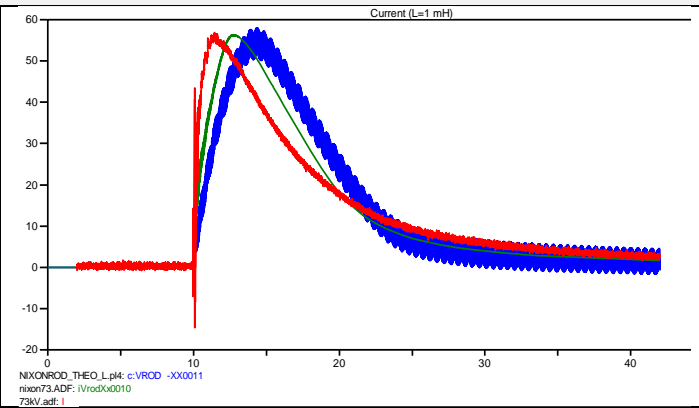
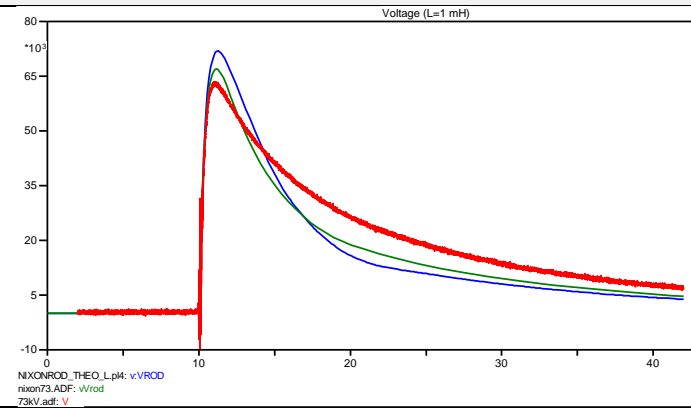
L=0,1 mH



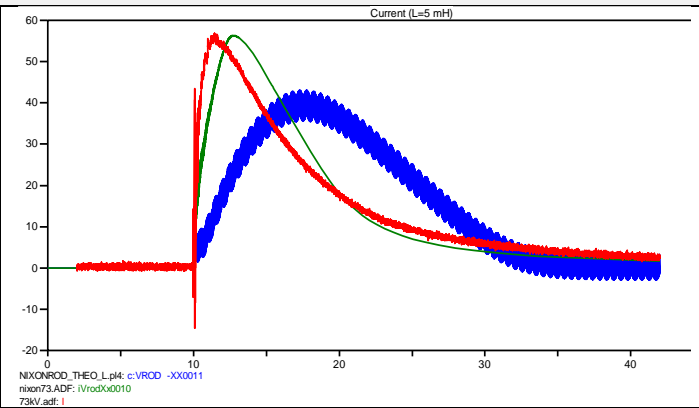
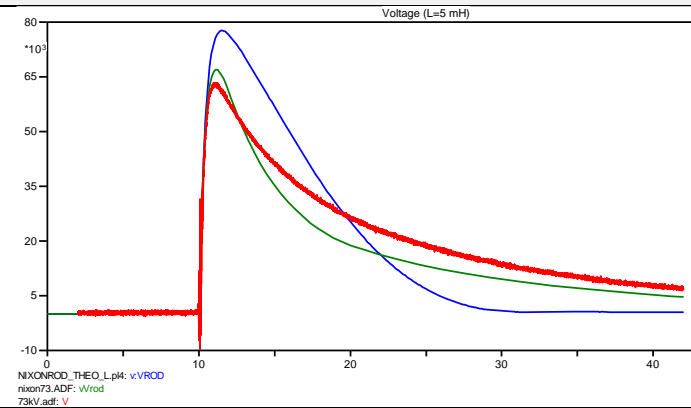
L=0,5 mH



L=1 mH



L=5 mH



Παρατηρήσεις

Από την παρατήρηση των παραπάνω εικόνων, διαπιστώνουμε τα εξής:

- Για όλες τις τάσεις φόρτισης και για πολύ μικρές τιμές της αυτεπαγωγής (εν προκειμένω $L=0,1$ mH), οι νέες καμπύλες της τάσης και ρεύματος σχεδόν ταυτίζονται (ως προς την τιμή του μεγίστου σημείου, τη χρονική στιγμή του μεγίστου και την ουρά) με τις αρχικές αντίστοιχες καμπύλες (χωρίς την αυτεπαγωγή L). Παρόλ' αυτά, η καμπύλη του ρεύματος παρουσιάζει έντονη κυμάτωση.
- Όσο αυξάνουμε την τιμή της αυτεπαγωγής, τόσο αποκλίνουν οι νέες καμπύλες τάσης και ρεύματος από τις αντίστοιχες αρχικές αλλά και από αυτές που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται η τιμή του μεγίστου της τάσης με την ουρά της καμπύλης της τάσης να προσεγγίζει όλο και περισσότερο μηδενικές τιμές, ενώ η τιμή του μεγίστου του ρεύματος μειώνεται με παράλληλη μετατόπιση του μεγίστου προς τα δεξιά (δηλαδή αυξάνεται ο χρόνος εμφάνισης του μεγίστου του ρεύματος, t_{max}).

Επομένως, η προσθήκη εν σειρά αυτεπαγωγής L δε βελτιώνει τα αποτελέσματα.

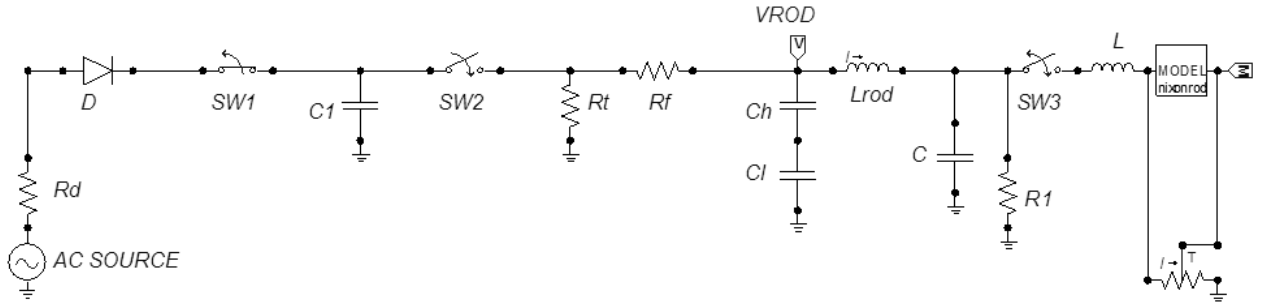
5.3 Πρόταση για Συνδυαστικό Μοντέλο Κυκλωματικής Προσέγγισης του Ιονισμού του Εδάφους

Η καταγραφή κυματομορφών ρεύματος με δύο κορυφές οδήγησε τους Nor et al. στην πρόταση του μοντέλου με τις δύο παράλληλες αντιστάσεις (για την αναπαράσταση των προ του ιονισμού και μετά του ιονισμού αντιστάσεων γείωσης), εκ των οποίων η δεύτερη αντίσταση συνδέεται με το υπόλοιπο ισοδύναμο κύκλωμα μέσω ενός διακόπτη, ο οποίος βραχυκυκλώνεται σε χρόνο που συμπίπτει με τα χρόνο έναρξης του ιονισμού του εδάφους.

Για την 1^η σειρά μετρήσεων, όπου οι κυματομορφές ρεύματος παρουσίασαν δύο κορυφές (δηλ. δύο τοπικά μέγιστα), το μοντέλο που πρότειναν οι Nor et al. κρίθηκε κατάλληλο για να προσεγγίσει αυτές τις δύο κορυφές. Όμως, οι καμπύλες που προέκυψαν κατά την προσομοίωση των δοκιμών (βλ. *Ενότητα 4.3.1*), ενώ δείχνουν μια πολύ καλή προσέγγιση της πρώτης κορυφής και μια προσέγγιση της δεύτερης κορυφής ως προς την τιμή της, αποκλίνουν σημαντικά ως προς τη χρονική στιγμή εμφάνισης του δεύτερου μεγίστου (εμφανίζεται ταχύτερα από ότι στα πειραματικά αποτελέσματα / δηλαδή η δεύτερη κορυφή είναι χρονικά μετατοπισμένη προς τα αριστερά) και την ουρά της καμπύλης. Δηλαδή δεν προσομοιώνεται επιτυχώς η φάση του απιονισμού.

Αντιθέτως, μια πολύ καλύτερη προσέγγιση της ουράς των καμπυλών ρεύματος με μία κορυφή γίνεται από το μοντέλο που προτάθηκε από τον Nixon (βλ. *Ενότητα 4.3.4*).

Γι' αυτόν το λόγο, προτείνεται ένα συνδυαστικό μοντέλο κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού του εδάφους που θα έχει στην κυκλωματική του υλοποίηση τη μορφή του μοντέλου που πρότειναν η Nor et al., αλλά αντί της δεύτερης παράλληλης αντίστασης (R_2) θα υπάρχει ένα στοιχείο MODEL με κώδικα βασισμένο στον αλγόριθμο του μοντέλου που προτάθηκε από τον Nixon. Το ισοδύναμο κύκλωμα του προτεινόμενου μοντέλου φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.2: Ισοδύναμο κύκλωμα του προτεινόμενου μοντέλου κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού του εδάφους.

Για να ελεγχθεί κατά πόσο το προτεινόμενο μοντέλο προσεγγίζει τις καταγεγραμμένες κυματομορφές ρεύματος με δύο κορυφές, θα χρησιμοποιηθούν οι καμπύλες που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή της 2^{ης} σειράς δοκιμών για το δείγμα εδάφους A με υγρασία 5%.

Οι παράμετροι του κυκλώματος και του στοιχείου MODEL «nixonrod» παίρνουν τις τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

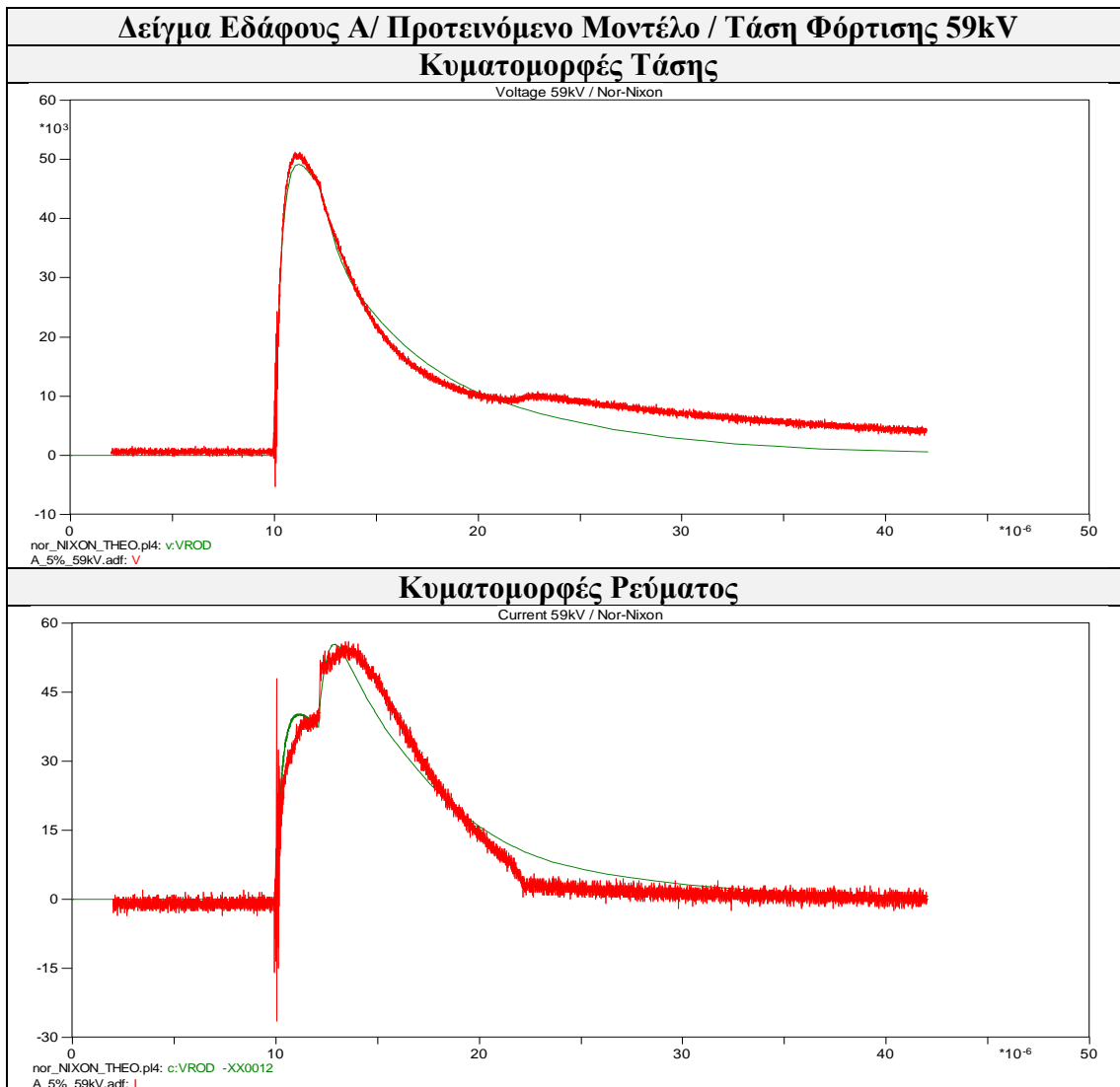
Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων για την προσομοίωση με το προτεινόμενο μοντέλο.

R_d (Ω)	T_{open_SW1}	T_{close_SW2} (μsec)	T_{close_SW3} (μsec)	R_t ($k\Omega$)	R_f (Ω)	C_1 (nF)	C_h (nF)	C_l (nF)	L_{rod} (nH)
100	0	10	12,1	9,5	416	6	1,2	504	191

r_{rod} (cm)	l_{rod} (cm)	r_{out} (cm)	E_o (kV/cm)	R_o (Ω)	ρ (Ωm)	C (pF)	R_1 (Ω)	L (mH)	τ_i (μsec)	τ_d (μsec)
0,25	19	12,5	8	3113	950	32,42	1225	0,43	0,1	1

Σημείωση: Η τιμή της κρίσιμης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, E_o , είναι ο μέσος όρος των τιμών της E_o , οι οποίες προσδιορίστηκαν με διάφορες μεθόδους για το δείγμα εδάφους A με 5% υγρασία [2].

Στην παρακάτω εικόνα, φαίνονται οι καμπύλες τάσης και ρεύματος (με πράσινο χρώμα), οι οποίες προκύπτουν από την προσομοίωση με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου, καθώς και οι καμπύλες τάσης και ρεύματος που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών για το έδαφος A με υγρασία 5% και τάση φόρτισης 59 kV (με κόκκινο χρώμα).



Παρατηρήσεις

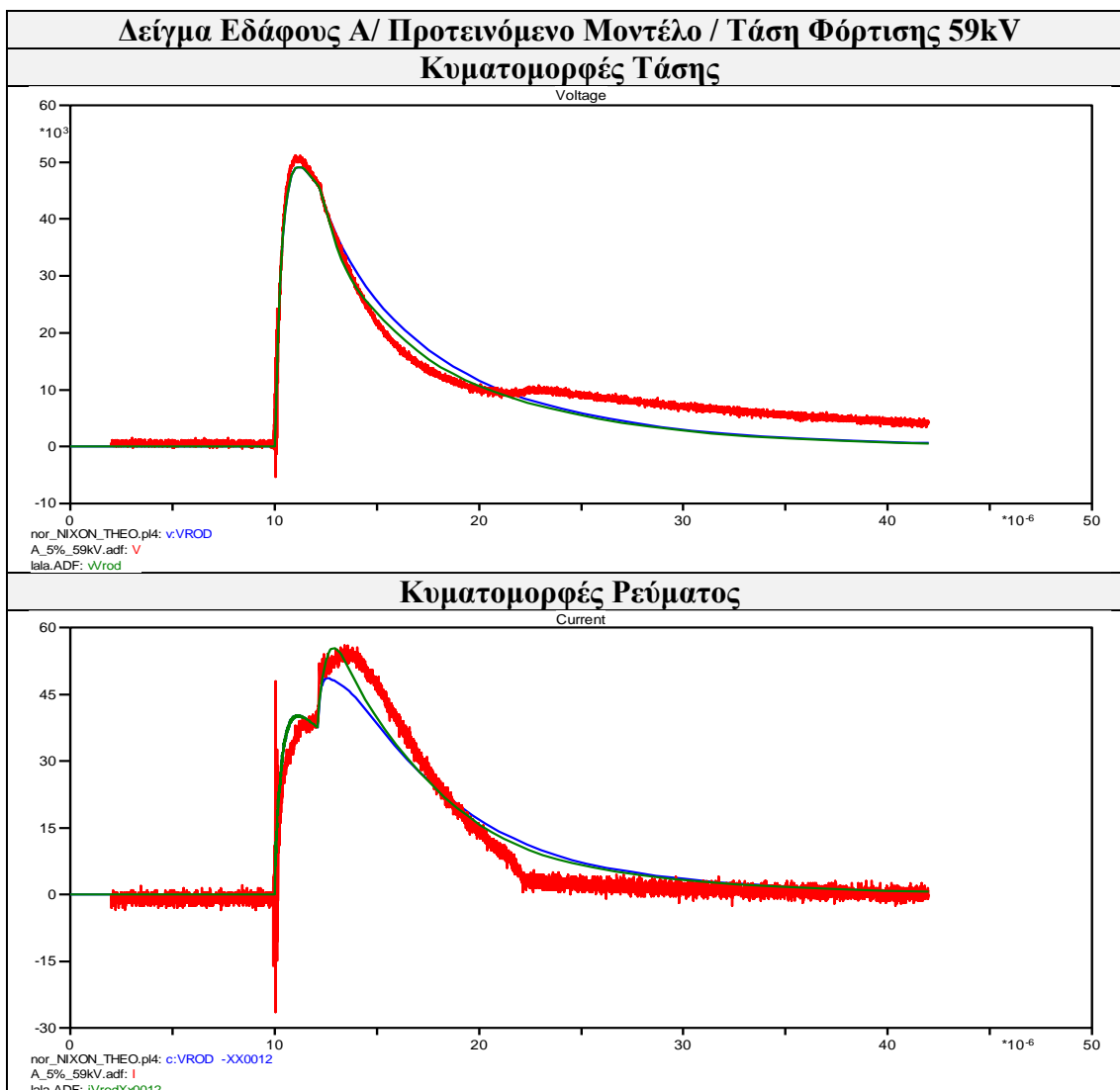
- Σε σχέση με το μοντέλο που προτάθηκε από τους Nor et al., το προτεινόμενο μοντέλο αποδίδει καλύτερα την ουρά τόσο της καμπύλης της τάσης όσο και της καμπύλης του ρεύματος (φάση απιονισμού).
- Παρόλο που η προσέγγιση της έναρξης της δεύτερης κορυφής της καμπύλης του ρεύματος αλλά και της τιμής του δεύτερου μεγίστου του ρεύματος είναι πολύ καλύτερη από το μοντέλο των Nor et al., η χρονική στιγμή του μεγίστου (t_{Imax}) είναι και πάλι μικρότερη της αντίστοιχης πειραματικής (δηλαδή η δεύτερη κορυφή είναι χρονικά μετατοπισμένη προς τα αριστερά). Βέβαια, αυτή η χρονική μετατόπιση είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη που παρατηρείται στις προσομοιώσεις με το μοντέλο των Nor et al.
- Η μέγιστη τιμή της τάσης είναι ελαφρώς μικρότερη από την πειραματική.

Περαιτέρω Διερεύνηση – Παρατηρήσεις

Για να διαπιστωθεί αν οι παραπάνω καμπύλες τάσης και ρεύματος που προέκυψαν είναι οι βέλτιστες, ελέγχουμε αν η μεταβολή των τιμών ορισμένων παραμέτρων ή

συνθηκών στον κώδικα του στοιχείου MODEL, βελτιώνει τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος.

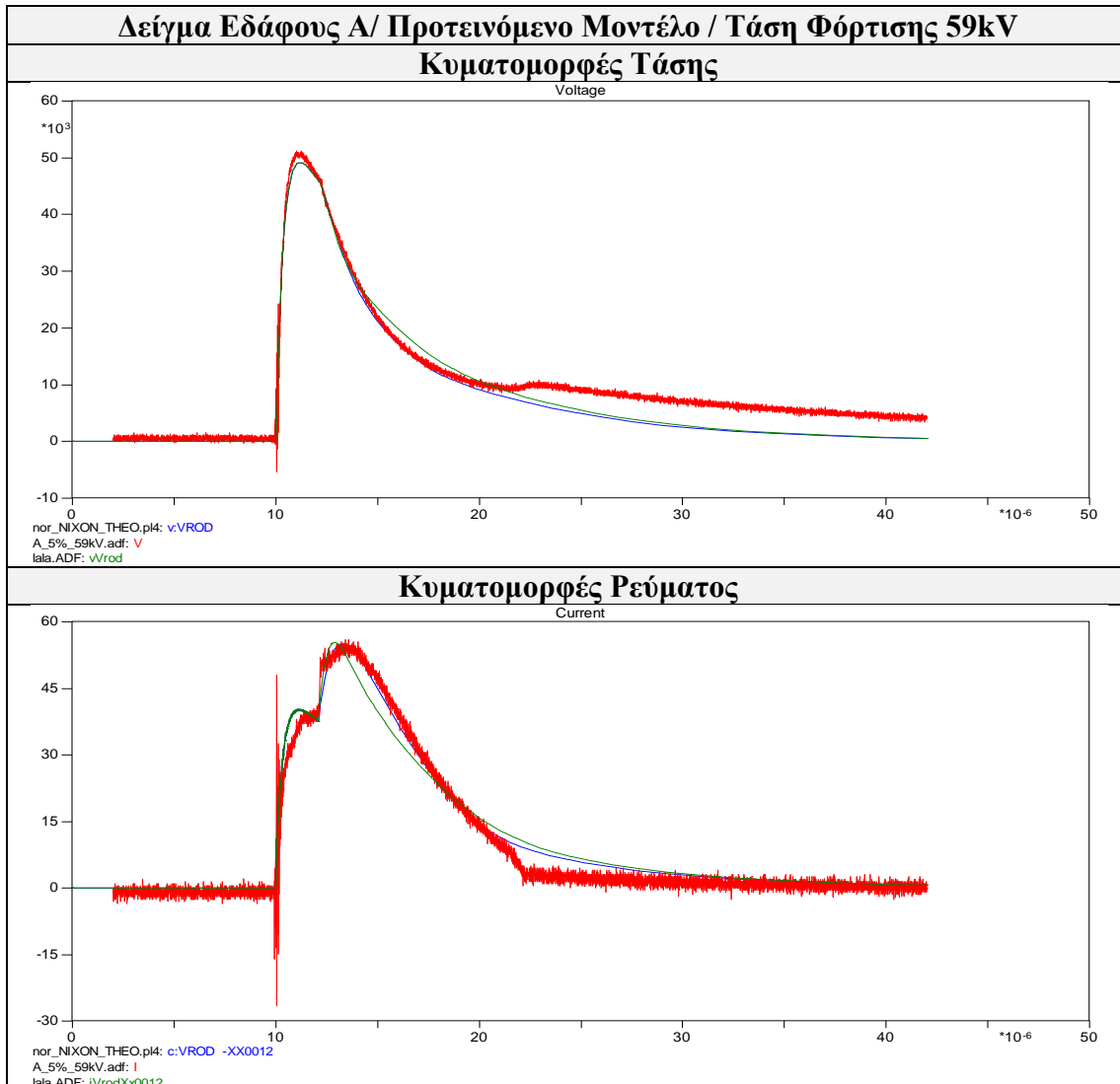
(α) Η αύξηση της παραμέτρου τ_i έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω απόκλιση των καμπυλών τάσης και ρεύματος από τις πειραματικές καμπύλες. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για $\tau_i=0,7$ μsec (με μπλε χρώμα) σε σχέση με τις αντίστοιχες κυματομορφές για $\tau_i=0,1$ μsec (με πράσινο χρώμα) και αυτές που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις (με κόκκινο χρώμα).



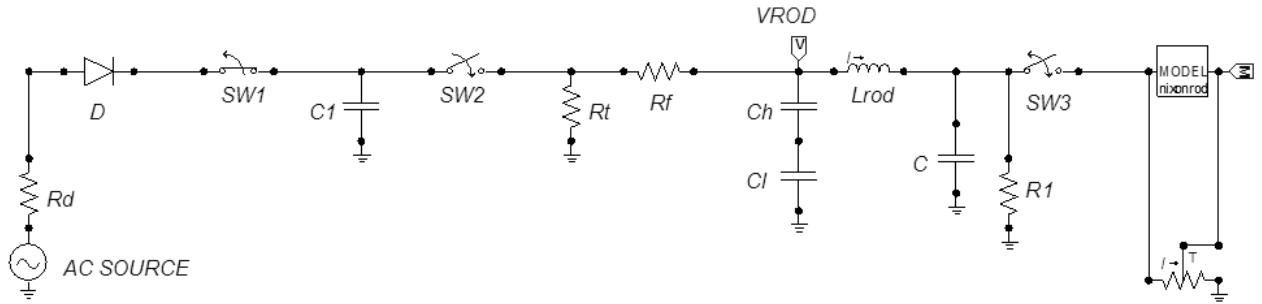
(β) Η μείωση του τ_i και η μεταβολή του τ_d δεν επιφέρουν ουσιαστικές μεταβολές στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος.

(γ) Η μεταβολή της συνθήκης απιονισμού στον κώδικα του στοιχείου MODEL έχει αμελητέες επιπτώσεις στις καμπύλες τάσης και ρεύματος, ενώ δε μετατοπίζει προς τα δεξιά τη δεύτερη κορυφή της καμπύλης του ρεύματος.

(δ) Η μόνη μεταβολή σε παράμετρο του στοιχείου MODEL «nixonrod» που μπορεί να μετατοπίσει τη δεύτερη κορυφή της καμπύλης του ρεύματος προς τα δεξιά είναι η μείωση της E_o . Αυτό είναι αξιοσημείωτο, αν λάβει κανείς υπόψη ότι η τιμή αυτού του μεγέθους, εν αντιθέσει με τις τιμές των παραμέτρων τ_i και τ_d , δεν έχει ορισθεί αυθαίρετα, αλλά έχει υπολογισθεί με συγκεκριμένη μέθοδο για το εν λόγω δείγμα εδάφους [2]. Για παράδειγμα, για $E_o=6kV/cm$ και $L=0,7mH$ προκύπτουν οι καμπύλες τάσης και ρεύματος που φαίνονται στις επόμενες εικόνες με μπλε χρώμα. Με πράσινο χρώμα φαίνονται οι καμπύλες τάσης και ρεύματος για $E_o=8kV/cm$ και $L=0,43mH$ και με κόκκινο χρώμα οι πειραματικές καμπύλες.

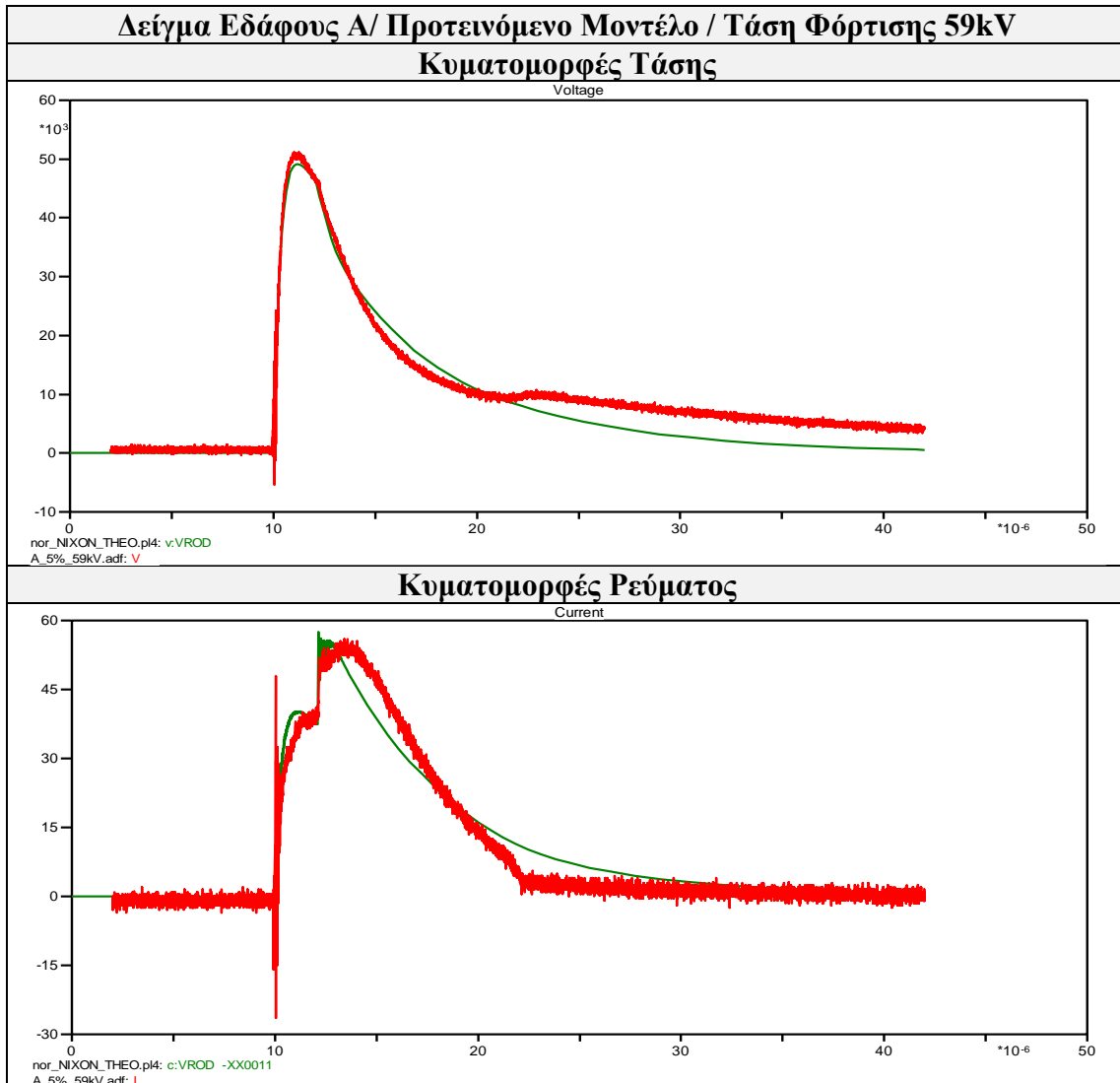


(ε) Η απαλοιφή της αυτεπαγωγής L (βλ. *Εικόνα 2.3*), η οποία είναι συνδεδεμένη εν σειρά με το στοιχείο MODEL «nixonrod», δίνει παρόμοιες καμπύλες τάσης και ρεύματος με τη διαφορά ότι η κορυφή της καμπύλης του ρεύματος παρουσιάζει κυμάτωση.



Εικόνα 5.3: Ισοδύναμο κύκλωμα του προτεινόμενου μοντέλου μετά την απαλοιφή της αυτεπαγωγής L .

Στις παρακάτω εικόνες, φαίνονται με πράσινο χρώμα οι νέες καμπύλες τάσης και ρεύματος που προκύπτουν μετά την απαλοιφή της αυτεπαγωγής L και με κόκκινο χρώμα οι καταγεγραμμένες κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών κυματομορφές.



5.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιήθηκαν τρία μοντέλα κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης ηλεκτροδίων γείωσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, οι οποίες διεξήχθησαν με τη χρήση τριών δειγμάτων εδάφους και διάφορες διατάξεις συστημάτων γείωσης (συστοιχίες ράβδων και απλά ραβδοειδή ηλεκτρόδια γείωσης).

Από αυτές τις συγκρίσεις προκύπτουν τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

(1) Για το μοντέλο κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού του εδάφους που προτάθηκε από τους Nor et al.:

Οι κυματομορφές ρεύματος που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών για τα δείγματα εδάφους 1 και 3 εμφάνισαν δύο κορυφές, ενώ οι κυματομορφές ρεύματος που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών για το δείγμα εδάφους Β εμφάνισαν μία κορυφή. Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία (βλ. *Κεφάλαιο 1*), δύο κορυφές στις κυματομορφές του ρεύματος εμφανίζουν τα εδάφη με μικρότερη αγωγιμότητα, ενώ μία κορυφή εμφανίζουν τα εδάφη με μεγάλη αγωγιμότητα (δηλαδή εδάφη με μεγάλα ποσοστά υγρασίας ή εδάφη που εμπεριέχουν άλατα).

Το μοντέλο που προτάθηκε από τους Nor et al. αποτελείται από τις δύο παράλληλες αντιστάσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την προ του ιονισμού και τη μετά τον ιονισμό αντίσταση. Με τη χρήση ενός διακόπτη που απομονώνει τη δεύτερη αντίσταση μέχρι την έναρξη του ιονισμού του εδάφους, μπορεί και αποδίδει αυτές τις δύο κορυφές στις κυματομορφές του ρεύματος. Επομένως, αυτό το μοντέλο είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη των κυματομορφών ρεύματος με τις δύο κορυφές. Παρόλ' αυτά, με κατάλληλη απλοποίηση (βλ. *Ενότητα 4.3.2*), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης εδαφών με μεγάλη αγωγιμότητα (δηλαδή με μία κορυφή στην κυματομορφή ρεύματος).

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος που κατεγράφησαν κατά τη διεξαγωγή των κρουστικών δοκιμών για όλα τα εδάφη, φαίνεται ότι το μοντέλο που προτάθηκε από τους Nor et al. μπορεί να αποδώσει πολύ καλά τις τιμές των κορυφών τόσο των κυματομορφών της τάσης όσο και των κυματομορφών του ρεύματος. Αυτό το γεγονός οφείλεται στον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος βάσει των κυματομορφών που προκύπτουν από τις πειραματικές δοκιμές (και συγκεκριμένα από τις τιμές των μεγίστων του ρεύματος και τις αντίστοιχες τιμές των τάσεων καθώς και από τη χρονική στιγμή έναρξης της δεύτερης κορυφής της καμπύλης του ρεύματος).

Από την άλλη μεριά, τη φάση του απιονισμού (η οποία εντοπίζεται στις ουρές των κυματομορφών) δεν μπορεί να την αποδώσει ικανοποιητικά αυτό το

μοντέλο, καθώς οι κυματομορφές των προσομοιώσεων για τα δείγματα εδάφους 1 και 3 εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις καταγεγραμμένες κυματομορφές. Μεταξύ των μειονεκτημάτων αυτού του κυκλωματικού μοντέλου, είναι και το γεγονός ότι οι χρόνοι ανοιχτοκύκλωσης και βραχυκύκλωσης του διακόπτη απομόνωσης του δευτέρου κλάδου του ισοδύναμου κυκλώματος (χρόνοι έναρξης και λήξης του ιονισμού) δεν υπολογίζονται από το μοντέλο, αλλά επιλέγονται αυθαίρετα ώστε να προσεγγίζονται οι κυματομορφές ρεύματος των πειραματικών δοκιμών. Αντίστοιχα, η τιμή της αυτεπαγωγής L προσδιορίζεται, επίσης, με κατάλληλες αυξομειώσεις, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων.

(2) Για το μοντέλο κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού του εδάφους που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al.:

Το μοντέλο που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al. χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης υπό ιονισμό μόνο για το έδαφος B, καθώς μπορεί να αποδώσει κυματομορφές ρεύματος με μόνο μία κορυφή.

Με τη χρήση αυτού του μοντέλου, προσεγγίστηκαν επαρκώς οι κυματομορφές του ρεύματος, ενώ οι κυματομορφές της τάσης απέκλιναν από τις πειραματικές ελαφρώς ως προς τις τιμές των κορυφών και περισσότερο όσον αφορά τη φάση του απιονισμού (ουρά των κυματομορφών τάσης). Η σχετικά καλή προσέγγιση που επετεύχθη με τη χρήση του μοντέλου που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al. οφείλεται τόσο στο γεγονός ότι οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος προσδιορίζονται από τις πειραματικές καμπύλες τάσης και ρεύματος, όσο και στην κατάλληλη αυξομείωση των παραμέτρων a και T .

Βέβαια, ένα από τα μειονεκτήματα του μοντέλου αυτού είναι το γεγονός ότι το ισοδύναμο κύκλωμα ποικίλει ανάλογα με το είδος του εδάφους. Επομένως, η επιλογή του κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος προϋποθέτει την προκαταρκτική ανάλυση του δείγματος του εδάφους, ώστε να καθοριστούν τα συστατικά του.

(3) Για το μοντέλο κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού του εδάφους που προτάθηκε από τον Nixon:

Το μοντέλο που προτάθηκε από τον Nixon χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης μόνο για το έδαφος B, καθώς και αυτό το μοντέλο (όπως και το μοντέλο που προτάθηκε από τους Kalat, Loboda et al.) μπορεί να αποδώσει κυματομορφές ρεύματος με μόνο μία κορυφή.

Αυτό το μοντέλο, παρόλο που προσέγγισε ικανοποιητικά τις τιμές των μεγίστων του ρεύματος, παρουσίασε μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες, όσον αφορά το χρόνο εμφάνισης των μεγίστων του ρεύματος ($t_{I_{max}}$). Αυτή η απόκλιση μπορεί να οφείλεται στο

γεγονός ότι οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος δεν προσδιορίζονται από τα χαρακτηριστικά των πειραματικών κυματομορφών τάσης και ρεύματος, αλλά από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τις διαστάσεις του ηλεκτροδίου γείωσης. Επίσης, στο κυκλωματικό μοντέλο που προτάθηκε από τον Nixon, θεωρείται ότι το έδαφος έχει μόνο ωμική συμπεριφορά και γι' αυτό αγνοούνται οι χωρητικότητες και οι αυτεπαγωγές του εδάφους. Οι δε χρονικές σταθερές τ_i και τ_d , οι οποίες περιγράφουν τη μεταβαλλόμενη ειδική αντίσταση στο περιβάλλον έδαφος υπό κρουστικές συνθήκες, προσδιορίζονται με αυξομειώσεις ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών δοκιμών.

Το εν λόγω μοντέλο παρουσίασε αντίστοιχη απόκλιση και όσον αφορά τις τιμές των μεγίστων της τάσης (μεγαλύτερες των πειραματικά καταγεγραμμένων αντίστοιχων τιμών) καθώς και τις ουρές των κυματομορφών τάσης (φάση απιονισμού).

Για τους παραπάνω λόγους, διερευνήθηκε στην *Ενότητα 5.2* κατά πόσο η μεταβολή ορισμένων παραμέτρων μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του μοντέλου που προτάθηκε από τον Nixon. Από τη διερεύνηση αυτή, αποδείχθηκε πως ούτε η μεταβολή της συνθήκης απιονισμού ούτε η προσθήκη εν σειρά με το στοιχείο MODEL «*nixonrod*» αυτεπαγωγής L βελτιώνουν σημαντικά την προσέγγιση με τα πειραματικά δεδομένα που επιτυγχάνεται με τη χρήση αυτού του μοντέλου κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού.

Τέλος, αποδείχτηκε κατά τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων ότι η μεταβολή της χρονικής παραμέτρου τ_d δε μεταβάλλει σημαντικά τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος.

Εξαιτίας της αδυναμίας των μοντέλων κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού που προτάθηκαν από τους Kalat, Loboda et al. και Nixon να αποδώσουν δύο κορυφές στις κυματομορφές ρεύματος και του αντίστοιχου μοντέλου που προτάθηκε από τους Nor et al. να αποδώσει ικανοποιητικά τη φάση του απιονισμού για τις κυματομορφές ρεύματος με δύο κορυφές, προτάθηκε στην *Ενότητα 5.3* ένα συνδυαστικό μοντέλο το οποίο βασίζεται ουσιαστικά στο μοντέλο των Nor et al. (ώστε να αποδοθούν οι δύο κορυφές στην κυματομορφή του ρεύματος) αλλά στο δεύτερο κλάδο (ο οποίος αντιπροσωπεύει τη φάση του ιονισμού) η αντίσταση αντικαθίσταται από ένα στοιχείο MODEL με κώδικα που περιγράφει το μοντέλο που προτάθηκε από τον Nixon (ώστε να αποδοθεί καλύτερα η φάση του απιονισμού). Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, υλοποιήθηκε αυτό το μοντέλο με τη χρήση του λογισμικού ATP-EMTP και τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα για το δείγμα εδάφους A (για το οποίο προκύπτουν κυματομορφές ρεύματος με δύο κορυφές).

Από την παραπάνω σύγκριση, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με το προτεινόμενο συνδυαστικό μοντέλο, αποδίδεται καλύτερα σε σχέση με το μοντέλο που προτάθηκε από τους Nor et al. η έναρξη του φαινομένου του

ιονισμού (δηλαδή η έναρξη της δεύτερης καμπύλης της κυματομορφής του ρεύματος).

- Το μέγιστο της κυματομορφής του ρεύματος προσεγγίζεται ελαφρώς ταχύτερα από ότι στην καταγεγραμμένη κατά τη διεξαγωγή της κρουστικής δοκιμής κυματομορφής ρεύματος.
- Η φάση του απιονισμού (ουρές των καμπυλών τάσης και ρεύματος) αποδίδεται πιο ικανοποιητικά σε σχέση με τα μοντέλα των Nor et al. και Nixon.

Σε γενικές γραμμές, συμπεραίνουμε ότι και τα τέσσερα μοντέλα κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού του εδάφους (τα τρία που έχουν ήδη προταθεί και το προτεινόμενο συνδυαστικό μοντέλο), όταν υλοποιούνται, παρουσιάζουν και πλεονεκτήματα και ορισμένες αδυναμίες στην προσομοίωση των κρουστικών αποκρίσεων της γείωσης υπό ιονισμό διαφόρων δειγμάτων εδαφών. Γι' αυτό, η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου για την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος γείωσης θα πρέπει να γίνεται ανάλογα με το είδος του εδάφους και τη μορφή των πειραματικών δεδομένων. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων μοντέλων.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά των μοντέλων κυκλωματικής προσέγγισης του ιονισμού

	Μοντέλο Nor et al.	Μοντέλο Kalat, Loboda et al.	Μοντέλο Nixon	Προτεινόμενο Συνδυαστικό Μοντέλο
Χρήση για εδάφη με χαμηλή αγωγιμότητα (δύο κορυφές ρεύματος)	X			X
Χρήση για εδάφη με υψηλή αγωγιμότητα (μία κορυφή ρεύματος)	X	X	X	?
Σχετικά καλή απόδοση της φάσης απιονισμού		X	X	X
Προσδιορισμός παραμέτρων βάσει των χαρακτηριστικών του εδάφους		X	X	X
Προσδιορισμός παραμέτρων βάσει των διαστάσεων του ηλεκτροδίου		X	X	X
Προσδιορισμός παραμέτρων από τα χαρακτηριστικά των πειραματικών καμπυλών	X	X		X

5.5 Επόμενη Μέρα

Στην *Ενότητα 5.3* της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προτάθηκε ένα νέο συνδυαστικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κρουστικής απόκρισης κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου γείωσης σε δείγμα εδάφους χαμηλής αγωγιμότητας (δηλαδή με δύο κορυφές στην κυματομορφή του ρεύματος). Επειδή, όμως, το ζητούμενο είναι ένα κυκλωματικό μοντέλο που θα προσομοιώνει την κρουστική απόκριση γείωσης για οποιαδήποτε γεωμετρία/διάταξη ηλεκτροδίων και για οποιοδήποτε δείγμα εδάφους, χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης τα εξής δύο ζητήματα, όσον αφορά το προτεινόμενο συνδυαστικό μοντέλο:

(α) Ο τρόπος έκφρασης των αντιστάσεων των ζωνών ιονισμού και απιονισμού καθώς και της ζώνης με τη σταθερή ειδική αντίσταση (R_i , R_d και R_n / βλ. *Ενότητα 2.2.3*) που προτείνονται από το μοντέλο του Nixon για οποιαδήποτε γεωμετρία του προς εξέταση συστήματος γείωσης.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν από την ομάδα της Nor κατά τη διεξαγωγή της 1^{ης} σειράς μετρήσεων, θα πρέπει να διερευνηθεί αν τα ηλεκτρόδια μπορούν να θεωρηθούν απλώς παράλληλα (ώστε οι τιμές των ισοδύναμων αντιστάσεων των τριών ζωνών να ισούνται με το $1/\nu$ των τιμών των αντιστάσεων του κάθε ηλεκτροδίου ξεχωριστά, όπου ν ο αριθμός των παράλληλων κυλινδρικών ηλεκτροδίων) ή αν θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ένας συντελεστής, ο οποίος θα προβλέπει την αλληλεπίδραση των παραλλήλων κυλινδρικών ηλεκτροδίων ανάλογα με την εγγύτητα και τις διαστάσεις τους (π.χ. όσον αφορά την αλληλεπικάλυψη των ζωνών ιονισμού των ηλεκτροδίων).

(β) Η δυνατότητα χρήσης ή/και προσαρμογής του προτεινόμενου συνδυαστικού μοντέλου για δείγματα εδάφους με υψηλή αγωγιμότητα (δηλαδή με κυματομορφές ρεύματος με μία κορυφή / π.χ. για το δείγμα εδάφους B).

Η περαιτέρω διερεύνηση των δύο παραπάνω ζητημάτων στο μέλλον μπορεί να μας βοηθήσει να διαμορφώσουμε ένα γενικευμένο μοντέλο, το οποίο θα αποδίδει καλά τόσο τις κορυφές των κυματομορφών τάσης και ρεύματος όσο και τις ουρές των αντίστοιχων καμπυλών και, με αυτόν τον τρόπο, θα μας επιτρέπει να προβλέψουμε την κρουστική συμπεριφορά οποιουδήποτε συστήματος γείωσης που είναι εγκατεστημένο σε οποιοδήποτε τύπο εδάφους. Έτσι, θα καθίσταται εφικτός ο σχεδιασμός των κατάλληλων συστημάτων γείωσης για τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις ισχύος με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

5.6 Βιβλιογραφία

[1] E. P. Nicolopoulou, F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, «Comparison of Circuit Models for the Simulation of Soil Ionization», *Electric Power Systems Research*, Volume 113, (2014) 180-187

[2] F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, *I-V Curves for the Determination of the Ionization Voltage in Soil Samples*, *Proceedings of the 17th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2011)*, Hannover, Germany, August 22-26, 2011 (paper B-045)