



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

Συμβολή στη μελέτη της μεταβατικής αντίστασης γείωσης μέσω πειραμάτων σε μοντέλα υπό κλίμακα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτήριος Ν. Βασιλόπουλος

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



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

Συμβολή στη μελέτη της μεταβατικής αντίστασης γείωσης μέσω πειραμάτων σε μοντέλα υπό κλίμακα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σωτήριος Ν. Βασιλόπουλος

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Φεβρουαρίου 2014

.....
Ιωάννης
Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος
Ι. Τσεκούρας
Λέκτορας ΣΝΔ

.....
Ιωάννης
Φ. Γκόνος
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

.....
Σωτήριος Ν. Βασιλόπουλος

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

Copyright © Σωτήριος Ν. Βασιλόπουλος, 2014

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η συμβολή στην διερεύνηση της μεταβατικής συμπεριφοράς ηλεκτροδίων γείωσης, και πιο συγκεκριμένα της αντίστασής τους, σε υδάτινο περιβάλλον χρησιμοποιώντας μοντέλα κλίμακας. Για το λόγο αυτό και σαν συνέχεια προηγούμενων πειραμάτων, τοποθετήθηκαν τέσσερις μεταλλικές ταινίες διαφορετικών μεγεθών στο εσωτερικό μιας ηλεκτρολυτικής δεξαμενής και κατεγράφησαν σε δύο νέες και διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας, οι κυματομορφές του εγχεόμενου κρουστικού ρεύματος και της τάσης του ηλεκτροδίου. Οι πειραματικοί λόγοι κλίμακας της μεταβατικής αντίστασης για τα διάφορα μεγέθη ηλεκτροδίων και για τις παλιές και νέες τιμές αγωγιμοτήτων, συγκρίθηκαν με τους θεωρητικά αναμενόμενους λόγους κλίμακας που υπαγορεύονται από τη Διαστατική Ανάλυση, που αποτελεί μία μέθοδο εφαρμογής της Θεωρίας της Ομοιότητας. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνέβαλλαν να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητα της συγκεκριμένης θεωρητικής μεθόδου για τον σχεδιασμό πειραμάτων κλίμακας, με σκοπό την μελέτη της απόκρισης σε κεραυνικά πλήγματα.

Λέξεις κλειδιά

ηλεκτρόδιο γείωσης, μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίου, αντίσταση γείωσης, θεωρία της ομοιότητας, διαστατική ανάλυση, πειράματα υπό κλίμακα, μοντέλα κλίμακας, ηλεκτρολυτική δεξαμενή

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is to further contribute to the investigation of the transient behavior of grounding electrodes, and more particularly their resistance in an aquatic environment using scale models. For this reason and as a continuation of previous experiments, strip electrodes of four different sizes were placed in an electrolytic tank and were subjected to impulse current pulses in two new and different conductivity values and the respective measurements were taken. The experimental scale factors of the impulse resistances for different electrode dimensions and both old and new conductivity values, were compared to the theoretically expected scale factors that arise from the application method of the Similarity Theory, called Dimensional Analysis. The validity of the Similarity Theory for the construction of scaled experiments that investigate the response to lightning strikes is verified.

Keywords

grounding electrode, transient behavior, grounding resistance, similarity theory, dimensional analysis, scale model experiments, scale models, electrolytic tank

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες της Θεωρίας της Ομοιότητας. Στη συνέχεια περιγράφονται οι δύο βασικές μέθοδοι εφαρμογής της Θεωρίας της Ομοιότητας, οι Νόμοι υπό κλίμακα και η Διαστατική Ανάλυση. Ειδικά για τη Διαστατική Ανάλυση γίνεται λεπτομερής ανάλυση των αξιωμάτων της και διατυπώνεται το κεντρικό της θεώρημα, που είναι το Θεώρημα Π.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται αρχικά συνοπτική αναφορά σε θέματα γειώσεων και ορίζονται κάποιες συναφείς έννοιες. Επίσης, εξετάζεται το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι προσδιορισμού της κρίσιμης έντασης έναρξης ιονισμού E_0 . Στη συνέχεια μελετάται η μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίου και γίνεται η εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης στον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης ορισμένων τυπικών γεωμετριών ηλεκτροδίων.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρατίθεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, από ήδη υπάρχουσες δημοσιευμένες εργασίες, που αφορούν τη χρήση των μεθόδων της Θεωρίας της Ομοιότητας σε υπό κλίμακα πειράματα.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και τα όργανα που την αποτελούν. Επίσης περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε για τη λήψη των μετρήσεων.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων. Έπειτα αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν και γίνονται κάποιες βασικές παρατηρήσεις. Τέλος γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Στο **Παράρτημα** παρατίθενται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία, τα παλμογραφήματα ρεύματος και τάσης που καταγράψαμε και οι καμπύλες $V-I$ και $Z(t)$ που σχεδιάσαμε, για την διερεύνηση της επίδρασης της παραμέτρου E_0 .

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να απευθύνω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής και συγκεκριμένα:

Τον καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Τσεκούρα και κ. Γκόνο.

Την κ. Ελένη Π. Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη καθοδήγηση και υποστήριξη της και για την ουσιαστική και διαρκή βοήθεια που μου παρείχε πρόθυμα και ακούραστα καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για το φιλικό και ευχάριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Την κ. Βασιλική Κονταργύρη για τις πολύτιμες συμβουλές και τη βοήθεια που μου προσέφερε όποτε της ζητήθηκε.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα τους κ. κ. Χρήστο Ηλία, Ιωάννη Ζτούπη και Αριστείδη Γιάννακα για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Τον συμφοιτητή μου Δημήτρη Αναγνωστόπουλο, για τις συμβουλές του, που προήλθαν από τη δικιά του εμπειρία κατά την εκπόνηση της διπλωματικής του εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω από την καρδιά μου όλους τους συμφοιτητές και φίλους μου, που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξαν πραγματικά και με βοήθησαν να γίνω καλύτερος.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και τον αδερφό μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Βασιλόπουλος Σωτήρης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	i
Πρόλογος.....	iii
Ευχαριστίες.....	iv
Περιεχόμενα	v
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: Θεωρία Ομοιότητας - Διαστατική Ανάλυση	4
1.1. Βασικές έννοιες της Θεωρία της Ομοιότητας	4
1.2. Νόμοι υπό κλίμακα.....	5
1.3. Διαστατική Ανάλυση.....	8
1.3.1. Αξιώματα Διαστατικής Ανάλυσης	9
1.3.2. Το Θεώρημα Π των Vaschy και Buckingham.....	11
1.3.3. Η κατασκευή του φυσικού μοντέλου	11
1.3.4. Η εφαρμογή του Θεωρήματος Π.....	12
Κεφάλαιο 2: Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης	14
2.1. Γενικά περί γειώσεων.....	14
2.2. Προστασία ανθρώπων - Ηλεκτροπληξία	15
2.3. Ηλεκτρόδια γείωσης - Αντίσταση γείωσης.....	16
2.4. Ειδική αντίσταση εδάφους.....	18
2.5. Διάσπαση του εδάφους	19
2.5.1. Μοντέλα ιονισμού	20
2.5.2. Επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην E_0	22
2.5.3. Χρήση V-I χαρακτηριστικών για τον προσδιορισμό της E_0	24
2.5.4. Μελέτη του ιονισμού του εδάφους των Lima - Visacro.....	26
2.6. Μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης.....	28
2.6.1. Ιονισμός του εδάφους.....	29
2.6.2. Ενεργό μήκος ηλεκτροδίου	29
2.7. Αντίσταση γείωσης υπό κρουστικό ρεύμα	31
2.8. Υπολογισμός μεταβατικής αντίστασης γείωσης.....	34
2.8.1. Οριζόντιο ηλεκτρόδιο γείωσης	36
2.8.2. Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο γείωσης	38
2.8.3. Ταινία γείωσης.....	40
2.8.4. Λόγοι κλίμακας ηλεκτροδίων γείωσης.....	42

Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για υπό κλίμακα πειράματα	43
3.1. Η Θεωρία της Ομοιότητας στις τηλεπικοινωνίες	43
3.1.1. Ηλεκτρομαγνητικά συστήματα με απώλειες	43
3.1.2. Υπολογισμός RCS	46
3.2. Η Θεωρία της Ομοιότητας στον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης.....	48
3.2.1. Το μοντέλο του Korsuncen	48
3.2.2. Μεταβατική αντίσταση πλεγμάτων γείωσης	54
3.3. Πειράματα σε υπό κλίμακα μοντέλα πλοίων	56
3.3.1. Ελλειπτικό μοντέλο για την εκτίμηση της ζώνης προστασίας πλοίου.....	56
3.3.2. Μελέτη του φαινομένου Corona του Saint Elmo.....	61
Κεφάλαιο 4: Πειραματική Διαδικασία	63
4.1. Εξοπλισμός.....	63
4.2. Περιγραφή πειραματικής διάταξης	63
4.2.1. Κρουστική γεννήτρια ρεύματος	64
4.2.2. Παλμογράφος	66
4.2.3. Ομοαξονικά καλώδια.....	67
4.2.4. Αγωγιμόμετρο - Διάλυμα βαθμονόμησης.....	67
4.2.5. Βαρόμετρο και Θερμόμετρο - Υγρόμετρο	69
4.2.6. Αγωγοί για τη σύνδεση των δοκιμίων και της δεξαμενής με τη γεννήτρια	70
4.2.7. Δεξαμενή.....	70
4.2.8. Δοκίμια	70
4.3. Διαδικασία μετρήσεων	71
4.3.1. Προετοιμασία.....	71
4.3.2. Λήψη μετρήσεων	74
4.3.3. Σχεδίαση καμπυλών V-I και Z(t).....	78
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	79
5.1. Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων	80
5.1.1. Για $\sigma=0,08$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$	80
5.1.2. Για $\sigma=0,08$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	81
5.1.3. Για $\sigma=4$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$	83
5.1.4. Για $\sigma=4$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	85
5.2. Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων	87
5.2.1. Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$	87
5.2.2. Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=1$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$	88

5.2.3. Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	88
5.2.4. Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=1$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	89
5.2.5. Σύγκριση $\sigma=2$ S/m με $\sigma=0,08$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	91
5.3. Συμπεράσματα	93
5.3.1. Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων	93
5.3.2. Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων	95
5.3.3. Παρατηρήσεις - Σχόλια	97
5.3.4. Προτάσεις	102
Βιβλιογραφία	105
Παράρτημα	107

Το φαινόμενο του κεραυνού προκαλείται όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ θετικών και αρνητικών φορτίων γίνει αρκετά μεγάλη, ώστε να υπερνικήσει την αντίσταση του μονωτικού ατμοσφαιρικού αέρα και να δημιουργήσει αγώγιμο δρόμο μεταξύ των αντιθέτων φορτίων. Η τιμή της διαφοράς δυναμικού που απαιτείται μπορεί να φτάσει μέχρι και 100 εκατομμύρια Volts, ανάλογα με την απόσταση έναυσης του κεραυνού. Οι κεραυνοί εκδηλώνονται ως ροή ηλεκτρικού ρεύματος είτε εντός του ίδιου νέφους, είτε μεταξύ δύο νεφών ή το πιο επικίνδυνο μεταξύ νέφους και γης [1].

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ νέφους και γης, στην πλειοψηφία τους, μεταφέρουν αρνητικά φορτία στη γη και είναι γνωστές στη διεθνή ορολογία ως αρνητικοί κεραυνοί. Χαρακτηρίζονται δε από κρουστικά ρεύματα με μικρό χρόνο μετώπου της τάξης των ns και μέγιστη τιμή της έντασης περίπου 30 kA κατά μέσο όρο. Αντιθέτως οι κεραυνοί που μεταφέρουν θετικά φορτία στη γη ονομάζονται θετικοί κεραυνοί και σχετίζονται με ρεύματα με μεγάλο χρόνο μετώπου της τάξης των μs και αρκετά μεγαλύτερα πλάτη. Αυτές οι κυματομορφές ρεύματος που συνδέονται με το φαινόμενο του κεραυνού περιλαμβάνουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων έως και μερικών MHz και αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό εντός των κατασκευών που πλήττουν [2,3].

Στην περίπτωση ενός κεραυνικού πλήγματος ο κεραυνός θα χτυπήσει πιθανότατα το υψηλότερο σημείο της επικείμενης περιοχής. Όταν όμως η περιοχή που πλήγεται είναι η επιφάνεια της θάλασσας, τότε το πιο υψηλό σημείο μπορεί να είναι ένα θαλάσσιο σκάφος. Το ηλεκτρικό φορτίο τότε θα ακολουθήσει την πιο άμεση διαδρομή προς το νερό, όπου και θα διοχετευθεί προς όλες τις κατευθύνσεις [1].

Τονίζεται ότι το θαλασσινό νερό συμπεριφέρεται σαν αγωγός, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούνται από ένα άμεσο ή έμμεσο κεραυνικό πλήγμα να διαδίδονται στο νερό με εξασθένηση πλάτους πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη που θα προκαλούσε η διάδοση στη ξηρά. Αυτό καθιστά τα ηλεκτρονικά συστήματα που διαθέτουν τα σύγχρονα πλοία ιδιαίτερα ευάλωτα στα επαγόμενα από τον κεραυνό ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα πλοία πλήττονται πολύ συχνά από έμμεσα κεραυνικά χτυπήματα, τα οποία ακόμα και από αρκετά μεγάλη απόσταση μπορεί να επάγουν ισχυρά πεδία και να προκαλέσουν ανεπανόρθωτες βλάβες στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό τους [2].

Αντιλαμβάνεται κανείς τη σημασία ύπαρξης αντικεραυνικών συστημάτων προστασίας πλοίων. Όμως ένα τυπικό θαλάσσιο σκάφος περιέχει πολλούς παράγοντες κινδύνου όπως το μέγεθος και το υλικό κατασκευής του, η εγγύτητα των μικροηλεκτρονικών συστημάτων του και η παρουσία ανθρώπων. Παράγοντες που καθιστούν την αξιόπιστη προστασία του μια πρόκληση [4].

Ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας δεν μπορεί να αποτρέψει ένα πλοίο από το να δεχτεί ένα κεραυνικό πλήγμα. Μπορεί ωστόσο να κατευθύνει τη διοχέτευση του στο νερό με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά το δυνατό να περιορισθούν τα επαγόμενα πεδία αποτρέποντας έτσι καταστροφή του ηλεκτρονικού εξοπλισμού του, αλλά και φυσικά να εξαλειφθεί η πιθανότητα θανάσιμου τραυματισμού των επιβατών. Στην περίπτωση άμεσου κεραυνικού πλήγματος το κατάρτι του πλοίου είναι αυτό που πιθανότατα έλκει το κεραυνό, καθώς βρίσκεται σε υψηλότερο επίπεδο από το υπόλοιπο κατάστρωμα. Το πρόβλημα της προστασίας πλοίων είναι αρκετά σύνθετο, καθώς σε περιπτώσεις τέτοιων ρευμάτων οι έννοιες των απλών κυκλωμάτων έχουν περιορισμένη ισχύ. Έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι, οι οποίες εξαρτώνται από τις γεωμετρικές διαστάσεις και το υλικό κατασκευής του εκάστοτε πλοίου [5].

Μπορούν να διακριθούν δύο ξεχωριστές περιπτώσεις ανάλογα με το υλικό κατασκευής του πλοίου [1,5]:

- ο Μικρότερα σκάφη, όπως σκάφη αναψυχής ή ιστιοφόρα, κατασκευάζονται συνήθως από **πλαστικά πολυμερή ή ξύλο**. Τα υλικά αυτά δεν προσφέρουν τη δυνατότητα άμεσης γείωσης του σκάφους μέσω της γάστρας του. Συνεπώς, στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος υπάρχει κίνδυνος το ηλεκτρικό ρεύμα να βρει διαφυγή προς την ιδανική γη (νερό) μέσω του ανθρώπινου σώματος που είναι καλός αγωγός. Ιδιαίτερα τα σύγχρονα ιστιοφόρα είναι περισσότερα ευάλωτα στους κεραυνούς, καθώς τα ιστία τους συμπεριφέρονται σαν εν δυνάμει αλεξικέραυνα. Αυτά τα πλοία χρήζουν εγκατάστασης κατάλληλα σχεδιασμένων συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας, τα οποία γενικά αποτελούνται από ένα σύνολο αλεξικέραυνων, καθοδικών αγωγών προστασίας, ισοδυναμικών συνδέσεων μεταξύ των αγωγών του πλοίου και ηλεκτροδίων γείωσης τοποθετημένων μέσα, αλλά και έξω από το νερό.
- ο Τα **μεταλλικά** πλοία πλήττονται πιο συχνά, αλλά η υψηλή αγωγιμότητα του μεταλλικού σκελετού τους, προκαλεί ταχεία διοχέτευση του ηλεκτρικού φορτίου στο νερό. Ως εκ τούτου σε αυτά τα πλοία παρατηρούνται πιο σπάνια υλικές καταστροφές, τραυματισμοί ή θάνατοι, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι εξαλείφεται ο κίνδυνος διαταραχής λόγω επαγόμενων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων.

Επομένως, στο επίπεδο της έρευνας, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη της συμπεριφοράς του σκελετού των μεταλλικών πλοίων ως ηλεκτρόδιο γείωσης, το οποίο χρησιμοποιείται για την έγχυση του κρουστικού ρεύματος στο νερό.

Για τη μελέτη αυτού του φαινομένου, μπορεί να οδηγηθεί κανείς στη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων σε εργαστήρια υψηλών τάσεων. Ωστόσο λόγω πρακτικών περιορισμών, η ακριβής αναπαράσταση του φυσικού φαινομένου (πρωτότυπο) καθίσταται αδύνατη. Οπότε αναγκαία γίνεται η στροφή προς τη δημιουργία υπό κλίμακα μοντέλων και προσομοιώνονται:

1. η επιφάνεια της θάλασσας με μια πεπερασμένη δεξαμενή με θαλασσινό νερό,
2. ο σκελετός του πλοίου με μεταλλικά ηλεκτρόδια,
3. ο κεραυνός με κρουστικές κυματομορφές που παράγονται από κρουστικές γεννήτριες καθορισμένων χαρακτηριστικών.

Πραγματοποιούνται έτσι πειράματα υπό κλίμακα στο φυσικό μοντέλο που κατασκευάσαμε, το οποίο έχει πολλαπλάσια μικρότερες διαστάσεις από το πρωτότυπο. Στη περίπτωση αυτή, τα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το μοντέλο είναι επιθυμητό να προσδιορίζονται από την κλίμακα που έχει επιλεγεί. Για να μπορέσει να επιτευχθεί αυτή η ομοιότητα, τόσο των γεωμετρικών όσο και των φυσικών μεγεθών μεταξύ πρωτοτύπου και μοντέλου, γίνεται χρήση της Θεωρίας της Ομοιότητας, η οποία θα παρουσιαστεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Στη παρούσα εργασία περιγράφεται η πειραματική διαδικασία έγχυσης κρουστικού ρεύματος σε ηλεκτρόδια γείωσης τοποθετημένα εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής. Λαμβάνονται μετρήσεις, για διάφορες διαστάσεις ηλεκτροδίων, σε διάφορες τιμές αγωγιμότητας του νερού και για διάφορες τιμές εγχέομένου κρουστικού ρεύματος. Από τη σύγκριση των μετρήσεων τόσο μεταξύ τους, όσο και με μετρήσεις προηγούμενων πειραμάτων, σκοπός είναι η συμβολή στην αξιολόγηση της Θεωρίας της Ομοιότητας ως ακριβές εργαλείο υπολογισμού της μεταβατικής αντίστασης γείωσης.

ΘΕΩΡΙΑ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ - ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ανάγκη του ανθρώπου να ερευνήσει περίπλοκα φυσικά φαινόμενα, των οποίων η αναλυτική μαθηματική επίλυση αποδείχτηκε ιδιαίτερα δύσκολη, τον έστρεψε αρκετά νωρίς στην αναπαράσταση των φυσικών φαινομένων από φυσικά μοντέλα. Το φυσικό μοντέλο είναι μια προσπάθεια αναπαράστασης ενός φυσικού φαινομένου (ή **πρωτότυπου**) από ένα άλλο φυσικό φαινόμενο (**φυσικό μοντέλο** ή **πρότυπο**) με σκοπό την πρόβλεψη των συμβαινόντων στο πρωτότυπο από μετρήσεις στο μοντέλο. Βέβαια ένα φυσικό μοντέλο δε μπορεί να διατηρεί όλες τις ιδιότητες του πρωτότυπου, διότι τότε θα συνέπιπτε με το πρωτότυπο. Θα πρέπει τα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του μοντέλου να είναι σταθερά πολλαπλάσια των αντιστοιχών μεγεθών του πρωτότυπου, να επιτευχθεί δηλαδή αυτό που ονομάζουμε φυσική ομοιότητα [6].

Η Θεωρία της Ομοιότητας είναι η θεωρία που μας βοηθάει να πετύχουμε τη φυσική ομοιότητα για τη μετατροπή των πειραματικών αποτελεσμάτων από το μοντέλο στο πρωτότυπο. Πρόκειται για μία εφαρμοσμένη επιστημονική μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως στην πειραματική ανάλυση υπό κλίμακα μοντέλων. Επιπλέον βρίσκει εφαρμογή στην ανάλυση της αντικεραυνικής προστασίας, όπως στην περίπτωση του πειράματος της παρούσας εργασίας που επιθυμούμε να προσομοιώσουμε το φαινόμενο κεραυνικού πλήγματος σε πλοίο με ένα υπό κλίμακα φυσικό μοντέλο. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αρχικά κάποιες βασικές έννοιες της Θεωρίας της Ομοιότητας και στη συνέχεια θα αναπτύξουμε τις δύο βασικές μεθόδους εφαρμογής της, τους *Νόμους υπό κλίμακα* και τη *Διαστατική Ανάλυση* (Θεώρημα Π) [7].

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ

Έστω δύο φυσικά συστήματα, που η κατάστασή τους καθορίζεται από μεγέθη που είναι συναρτήσεις του χώρου (x, y, z) και του χρόνου t . Λέμε ότι τα δύο συστήματα είναι **ομόλογα**, εάν σε κάθε σημείο (x, y, z, t) του πρώτου συστήματος αντιστοιχεί ένα σημείο (x', y', z', t') του δεύτερου συστήματος έτσι που η αντιστοιχία $(x, y, z, t) \rightarrow (x', y', z', t')$ να είναι ένα προς ένα και συνεχής.

Κάθε ζεύγος αντιστοιχούντων σημείων στο χωροχρόνο ονομάζεται **ομόλογο ζεύγος** σημείων. Λέμε ότι υπάρχει **μη γραμμική φυσική ομοιότητα** ως προς κάποιο φυσικό μέγεθος, μεταξύ ομολόγων συστημάτων, αν υπάρχει αμφιμονοσήμαντη συνεχής αντιστοιχία μεταξύ των αριθμητικών τιμών των φυσικών μεγεθών ομολόγων σημείων. Εμείς ωστόσο στη συνέχεια θα περιορίσουμε τη συζήτηση μας στην περίπτωση της **γραμμικής φυσικής ομοιότητας** ή απλώς **φυσικής ομοιότητας**, δηλαδή της ειδικής αντιστοιχίας, όπου ο λόγος των αριθμητικών τιμών των φυσικών μεγεθών μεταξύ ομολόγων σημείων είναι σταθερός, ανεξάρτητος του σημείου. Ο σταθερός λόγος αυτός ονομάζεται **λόγος κλίμακας** του συγκεκριμένου φυσικού μεγέθους. Λέμε ότι έχουμε **πλήρη ομοιότητα** μεταξύ ομολόγων συστημάτων, αν έχουμε φυσική ομοιότητα για όλα τα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του φυσικού συστήματος. Λέμε ότι έχουμε **μερική ομοιότητα** μεταξύ ομολόγων συστημάτων, αν έχουμε φυσική ομοιότητα για μέρος από τα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του φυσικού συστήματος [6].

Μερικές ειδικές μορφές της φυσικής ομοιότητας σε ζητήματα κλασικής μηχανικής και μηχανικής των ρευστών, είναι οι παρακάτω [6]:

- **Ομοιότητα ως προς το μήκος L (γεωμετρική ομοιότητα)**
- **Ομοιότητα ως προς τη μάζα M**
- **Ομοιότητα ως προς το χρόνο T (χρονική ομοιότητα)**
- **Κινηματική ομοιότητα**
- **Δυναμική ομοιότητα**

1.2 ΝΟΜΟΙ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ

Με χρήση της Θεωρίας της Ομοιότητας και των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο μπορούμε να προσδιορίσουμε *Νόμους υπό κλίμακα*, χωρίς να χρειαστεί επίλυση των εξισώσεων. Συγκεκριμένα, παρακάτω θα προσδιορίσουμε *Νόμους υπό κλίμακα* από τις ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις που περιγράφουν τα μεταβατικά φαινόμενα που επάγονται κατά την εκδήλωση κεραυνών. Τέτοια φαινόμενα αναπτύσσονται συχνά στα αντικεραυνικά συστήματα προστασίας και στις εγκαταστάσεις που πλήττονται από κεραυνούς και οι εξισώσεις που τα περιγράφουν παρουσιάζονται στο **Πίνακα 1.1** [7].

Πίνακας 1.1: Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητισμού που περιγράφουν τα επαγόμενα από κεραυνούς μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα [7]

Νόμος του Ampère	Νόμος του Faraday
$\oint_C Hdl = I + \frac{d}{dt} \int_A DdA$	$\oint_C Edl = -\frac{d}{dt} \int_A BdA$
Ηλεκτρομαγνητική ροή	Ρεύμα
$\int_A BdA = \Phi$ $\int_A DdA = \Psi$	$\int_A JdA = I$
Τύποι για ρεύματα και τάσεις	Τύποι για τάση, μαγνητική ροή και φορτία
$u = iR$ $u = \frac{1}{C} \int i dt$ $u = L \frac{di}{dt}$	$\frac{U}{I} = R$ $\frac{U}{Q} = \frac{1}{C}$ $\frac{V}{\Phi} = R_m$
Τύποι για πυκνότητες και εντάσεις πεδίων	Διαστατικές εξισώσεις σε ομογενή πεδία
$J = \kappa E$ $D = \varepsilon E$ $B = \mu H$	$R = \frac{1}{\kappa A}$ $\frac{1}{C} = \frac{l}{\varepsilon A}$ $R_m = \frac{l}{\mu A}$

Οι Νόμοι υπό κλίμακα προκύπτουν μέσω απλών μετασχηματισμών αυτών των εξισώσεων. Προϋπόθεση είναι το μοντέλο να υποβληθεί σε παρόμοιες φυσικές διαδικασίες με το πρωτότυπο. Τα συστήματα εξισώσεων για το πρωτότυπο και το μοντέλο είναι ίδια και διαφέρουν μόνο στο δείκτη των ποσοτήτων των φυσικών μεγεθών - ο δείκτης **F (Full scale)** συμβολίζει το πρωτότυπο, ενώ ο δείκτης **M (Model)** το μοντέλο. Όλες οι ομόλογες τιμές του πρωτότυπου και του μοντέλου πρέπει, για κάθε μέγεθος, να παραμένουν σε μια σταθερή αναλογία μεταξύ τους. Άρα εν γένει, για ένα μέγεθος k θα ισχύει [7]:

$$\frac{x_{kF}}{x_{kM}} = const = f_k \quad \text{για όλα τα } k, \quad (1.1)$$

όπου: x_{kF} η ποσότητα του μεγέθους k για το πρωτότυπο
 x_{kM} η ποσότητα του μεγέθους k για το μοντέλο
 f_k ο λόγος κλίμακας για το μέγεθος k .

Δηλαδή σύμφωνα με την εξίσωση (1.1), οποιαδήποτε ποσότητα του φυσικού μεγέθους k του πρωτότυπου μπορεί να εκφραστεί στην αντίστοιχη ποσότητα του μοντέλου μέσω του λόγου κλίμακας f_k . Για παράδειγμα η εξίσωση που περιγράφει το Νόμο του Ampère στον **Πίνακα 1.1** μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως με χρήση των λόγων κλίμακας [7]:

$$\oint_C H_F dl_F = I_F + \frac{d}{dt} \int_A D_F dA_F \Leftrightarrow \oint_C (f_H H_M) d(f_l l_M) = (f_I I_M) + \frac{d}{d(f_t t_M)} \int_A (f_D D_M) d(f_l^2 A_M) \quad (1.2)$$

και μεταφέροντας τους λόγους κλίμακας f εκτός του ολοκληρώματος, επειδή είναι σταθερές, προκύπτει η σχέση:

$$f_H f_l \oint_C H_M dl_M = f_I I_M + \frac{f_D f_l^2}{f_t} \int_A D_M dA_M \quad (1.3)$$

Η φυσική ομοιότητα συνεπάγεται την προϋπόθεση ότι οι εξισώσεις για το πρωτότυπο και το μοντέλο διαφέρουν μόνο κατά ένα σταθερό παράγοντα. Αυτό σημαίνει ότι στην εξίσωση (1.3) το γινόμενο των λόγων κλίμακας του πρώτου μέλους θα πρέπει να ισούται με το γινόμενο των λόγων κλίμακας για καθένα από τους δύο όρους του δεύτερου μέλους. Αυτό εκφράζεται ως εξής [7]:

$$f_H f_l = f_I \text{ και } f_H f_l = \frac{f_D f_l^2}{f_t}, \text{ άρα θα είναι και } f_I = \frac{f_D f_l^2}{f_t} \quad (1.4)$$

Μετασχηματίζοντας και τις υπόλοιπες εξισώσεις του **Πίνακα 1.1** με όμοιο τρόπο, προκύπτουν παρόμοιες σχέσεις που συνδέουν τους λόγους κλίμακας όλων των φυσικών ποσοτήτων. Οι λύσεις αυτών των εξισώσεων δίνουν τους *Νόμους υπό κλίμακα* που διέπουν τις σχέσεις μεταξύ των λόγων κλίμακας για όλες τις φυσικές ποσότητες. Εν τούτοις, η ύπαρξη λύσης του παραπάνω συστήματος εξισώσεων προϋποθέτει πολλές φορές να λάβουμε παραδοχές, οι οποίες όμως δεν είναι δυνατό να ισχύουν για κάθε περίπτωση. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, για παράδειγμα, μια παραδοχή που πρέπει να κάνουμε, για να προκύψει λύση είναι ότι, τόσο η επιτρεπτικότητα όσο και η διηλεκτρική σταθερά του υλικού είναι η ίδια για το πρωτότυπο και το μοντέλο ($f_\mu = f_\epsilon = 1$). Αυτό ισχύει ικανοποιητικά στο κενό και για παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά. Δεν ισχύει όμως και για τα φερρομαγνητικά υλικά που παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά.

Θεωρώντας τώρα το μήκος και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ως ανεξάρτητες μεταβλητές, με αντίστοιχους λόγους κλίμακας f_l και f_I , προκύπτουν μετά από μετασχηματισμούς οι παρακάτω λόγοι κλίμακας των υπόλοιπων φυσικών ποσοτήτων του προβλήματος (**Πίνακας 1.2**) [7].

Πίνακας 1.2: Λόγοι κλίμακας όλων των φυσικών ποσοτήτων του προβλήματος, συναρτήσει των λόγων κλίμακας μήκους και ρεύματος [7]

Πεδιακή ένταση		Ηλεκτρικό φορτίο/ ροή	
$f_H = f_E = \frac{f_l}{f_l}$		$f_Q = f_\Phi = f_\Psi = f_l f_l$	
Τάση	Χρόνος	Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά υλικού
$f_U = f_V = f_l$	$f_t = f_l$	$f_A = f_l^2$	$f_\kappa = \frac{1}{f_l}$
Πυκνότητες		Παράμετροι	
$f_J = \frac{f_l}{f_l^2}$		$f_L = f_C = f_l$	
$f_B = f_D = \frac{f_l}{f_l}$		$f_R = 1$	
		$f_{R_m} = \frac{1}{f_l}$	

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε ότι από τη στιγμή που χρειάστηκαν να γίνουν παραδοχές για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων, η εγκυρότητα των *Νόμων υπό κλίμακα* που προέκυψαν είναι αντίστοιχα περιορισμένη. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυτή η ανάγκη λήψης παραδοχών, αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου των *Νόμων υπό κλίμακα*. Οδηγούμαστε αναπόφευκτα στη χρήση της άλλης μεθόδου εφαρμογής της Θεωρίας της Ομοιότητας που είναι η *Διαστατική Ανάλυση*, η οποία όπως θα δούμε και παρακάτω έχει ορισμένα χρήσιμα πλεονεκτήματα.

1.3 ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε την εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης και θα περιγράψουμε το Θεώρημα Π που απορρέει από αυτήν. Η Διαστατική Ανάλυση είναι ο κλάδος της γνώσης που εξετάζει τα επακόλουθα της εφαρμογής της αρχής της "διαστατικής ομοιογένειας" στη μαθηματική μορφή των φυσικών νόμων. Η Διαστατική Ανάλυση δίνει τη δυνατότητα παραγωγής αδιάστατων μορφών για τους φυσικούς νόμους, γεγονός που μας διευκολύνει να παράγουμε φυσικά μοντέλα. Αυτό συμβαίνει, διότι όπως θα δούμε και παρακάτω, η φυσική ομοιότητα μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου συνεπάγεται την ταυτότητα των αδιάστατων μεγεθών τους και αντιστρόφως [6].

1.3.1 Αξιώματα Διαστατικής Ανάλυσης

Μεταξύ των μεγεθών της φύσης υπάρχουν αιτιακές σχέσεις (φυσικοί νόμοι), οι οποίες μπορούν να εκφραστούν από μαθηματικό τύπο. Υπάρχουν δύο ειδών φυσικά μεγέθη τα **θεμελιώδη** και τα **παραγόμενα**. Μια θεμελιώδης ομάδα μεγεθών μπορεί να προκύψει από μία αφαιρετική διαδικασία εξέτασης του "σύμπαντος" μεγεθών και είναι η ελάχιστη υποομάδα του "σύμπαντος" που κανένα μέγεθος της δεν μπορεί να οριστεί από κάποιο νόμο αιτιότητας. Η θεμελιώδης ομάδα μεγεθών ορίζει τις **διαστάσεις** του σύμπαντος. Τα παραγόμενα μεγέθη προκύπτουν από τα θεμελιώδη και τους νόμους αιτιότητας. Για παράδειγμα το "σύμπαν" της Μηχανικής δέχεται την ύπαρξη τριών θεμελιωδών μεγεθών, από τα οποία συντίθενται και τα υπόλοιπα παραγόμενα μεγέθη. Θεμελιώδη μεγέθη είναι τα: **Μήκος L**, **Μάζα M** και **Χρόνος T**. Θεμελιώδεις μονάδες μέτρησης στο μετρικό σύστημα είναι τα m, kg, s. Έστω τώρα ότι συμβολίζεται με q_i ένα φυσικό μέγεθος, τότε μπορεί να οριστούν τρεις τελεστές για το μέγεθος [6]:

- ο τελεστής [] που εξάγει τις διαστάσεις του μεγέθους, π.χ. $[8 s] = [M^0 L^0 T^1] = (0, 0, 1)$
- ο τελεστής ($\tilde{\quad}$) που εξάγει τη μονάδα μέτρησης, π.χ. $(\tilde{8 s}) = s$
- ο τελεστής ($\underline{\quad}$) που εξάγει την αριθμητική τιμή του, π.χ. $(\underline{8 s}) = 8$

Ο G. Birkhoff στο σύγγραμμά του "*Hydrodynamics*" θεμελιώνει αξιωματικά τη Διαστατική Ανάλυση ως ακολούθως [6]:

- Υπάρχουν **θεμελιώδη** μεγέθη $q_i, i = 1, \dots, m$ που σε αλλαγές συστήματος μονάδων μέτρησης, συμπεριφέρονται ως:

$$\frac{q_i'}{q_i} = a_i, a_i > 0 \quad \forall i \quad (1.5)$$

όπου με ($'$) συμβολίζεται το μέγεθος στο νέο σύστημα μονάδων και $a_i = \frac{\tilde{q}_i}{\tilde{q}_i'}$ είναι ο λόγος των μονάδων μέτρησης.

- Υπάρχουν **παραγόμενα** μεγέθη $Q_j, j = 1, \dots, r$, που σε αλλαγή συστήματος μονάδων μέτρησης συμπεριφέρονται ως:

$$\frac{Q_j'}{Q_j} = a_1^{b_{j1}} a_2^{b_{j2}} \dots a_m^{b_{jm}} = \mathbf{a}^{b_j} \quad (1.6)$$

όπου ορίζονται ως: $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, $\mathbf{b}_j = (b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jm})$ και ισχύει $\mathbf{a}^{b_j} \stackrel{\text{def}}{=} a_1^{b_{j1}} a_2^{b_{j2}} \dots a_m^{b_{jm}}$. Τα $b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jm}$ ονομάζονται **διαστάσεις** του Q_j . Αν $b_{j1} = b_{j2} = \dots = b_{jm} = 0$, τότε το Q_j ονομάζεται **αδιάστατο**.

- Υπάρχουν φυσικοί νόμοι υπό μορφή μαθηματικών τύπων:

$$f(\underline{Q}_1, \underline{Q}_2, \dots, \underline{Q}_r) = 0 \quad (1.7)$$

4. Η σχέση του 3^{ου} αξιώματος (δηλαδή η μορφή Φ του φυσικού νόμου) είναι ανεξάρτητη του συστήματος μονάδων μέτρησης (unit free):

$$f(\underline{Q}_1, \underline{Q}_2, \dots, \underline{Q}_r) = 0 \Leftrightarrow f(\underline{Q}'_1, \underline{Q}'_2, \dots, \underline{Q}'_r) = 0 \quad (1.8)$$

δηλαδή οποιοδήποτε σύστημα μονάδων και να χρησιμοποιήσουμε θα καταλήξουμε στην ίδια μαθηματική μορφή για το φυσικό νόμο.

Με βάση όσα αναφέραμε παραπάνω, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.3** όλα τα θεμελιώδη μεγέθη και οι μονάδες μέτρησής τους στο σύστημα S.I. (Système International). Παρομοίως στον **Πίνακα 1.4** καταγράφονται ορισμένα παραγόμενα μεγέθη και φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο παράγονται από τα θεμελιώδη [8]:

Πίνακας 1.3: Πλήρες σύνολο θεμελιωδών μεγεθών και οι μονάδες μέτρησης κατά SI [8]

<i>Μέγεθος</i>	<i>Μονάδα Μέτρησης SI</i>	<i>Σύμβολο SI</i>
Μήκος, L	Μέτρο	m
Χρόνος, t	Δευτερόλεπτο	s
Μάζα, M	Χιλιόγραμμα	kg
Θερμοκρασία, T	Κέλβιν	K
Ένταση ρεύματος, I	Αμπέρ	A
Αριθμός στοιχειωδών σωματιδίων	Μολ	mol
Ένταση φωτεινής πηγής	Καντέλα	cd

Πίνακας 1.4: Παραγόμενα μεγέθη, η μαθηματική και διαστατική περιγραφή τους [8]

<i>Μέγεθος</i>	<i>Μαθηματικός τύπος</i>	<i>Διάσταση</i>	<i>Διαστατικό σύμβολο</i>	<i>Μονάδα μέτρησης</i>
Εμβαδό	$A = \int dx dy$	L^2	m^2	---
Όγκος	$V = \int dx dy dz$	L^3	m^3	---
Συχνότητα	$f = 1/\tau$	t^{-1}	s^{-1}	Hertz (Hz)
Ταχύτητα	$v = dx/dt$	Lt^{-1}	$m s^{-1}$	---
Επιτάχυνση	$a = d^2x/dt^2$	Lt^{-2}	$m s^{-2}$	---
Ποκνότητα	$\rho = M/V$	ML^{-3}	$kg m^{-3}$	---
Δύναμη	$F = M \cdot a$	MLt^{-2}	$kg m s^{-2}$	Newton (N)
Πίεση	$p = F/A$	$ML^{-1}t^{-2}$	$N m^{-2} = kg m^{-1}s^{-2}$	Pascal (Pa)
Έργο/Ενέργεια	$W = \int F dx$	ML^2t^{-2}	$N m = kg m^2 s^{-2}$	Joule (J)
Ροπή	$T = F \cdot l$	ML^2t^{-2}	$N m = kg m^2 s^{-2}$	---
Ισχύς	$P = dW/dt$	ML^2t^{-3}	$J s^{-1} = kg m^2 s^{-3}$	Watt (W)
Φορτίο	$Q = \int I dt$	It	$A s$	Coulomb (C)

1.3.2 Το Θεώρημα Π των Vaschy και Buckingham

Κεντρικό θεώρημα της διαστατικής ανάλυσης είναι το **Θεώρημα Π**. Το θεώρημα Π είναι συνεπαγωγή των αξιωμάτων 1 έως 4, η δε διατύπωσή του όπως δίνεται στο σύγγραμμα του G. Birkhoff "Hydrodynamics" είναι [6]:

Έστω οι θετικές μεταβλητές Q_1, Q_2, \dots, Q_r μετασχηματίζονται μετά από αλλαγή συστήματος θεμελιωδών μονάδων μέτρησης σύμφωνα με το Αξίωμα 2 (τα Q_j συμβολίζουν εδώ την αριθμητική τιμή, δηλαδή παραλείπεται η κάτω μπάρα για ευκολία). Έστω επίσης $n \leq m$ ο βαθμός (rank) της μήτρας b_{jk} (Μήτρα Διαστάσεων, Αξίωμα 2). Τότε οποιοσδήποτε φυσικός νόμος της μορφής $f(Q_1, Q_2, \dots, Q_r) = 0$ που υπακούει στο Αξίωμα 4 (unit free) είναι ισοδύναμος με έναν τύπο της μορφής:

$$\Phi(P_1, P_2, \dots, P_{r-n}) = 0 \quad (1.9)$$

όπου P_1, P_2, \dots, P_{r-n} είναι $k = r - n$ αδιάστατα μονώνυμα που παράγονται από τις μεταβλητές Q_j .

1.3.3 Η κατασκευή του φυσικού μοντέλου

Η χρήση φυσικού μοντέλου για την πρόβλεψη, μέσω πειραμάτων, των χαρακτηριστικών του πρωτότυπου απαιτεί τον προσδιορισμό δύο στοιχείων [6]:

- ο των χαρακτηριστικών του μοντέλου ή ισοδύναμα εάν η κατάσταση του πρωτότυπου χαρακτηρίζεται μονοσήμαντα από τα μεγέθη $Q_{F_2}, Q_{F_3}, \dots, Q_{F_r}$ (ανεξάρτητες μεταβλητές), τον προσδιορισμό των ανεξάρτητων μεταβλητών $Q_{M_2}, Q_{M_3}, \dots, Q_{M_r}$ που χαρακτηρίζουν την κατάσταση ενός "πλήρως όμοιου" μοντέλου του,
- του κανόνα για τη μεταφορά των μετρήσεων του μοντέλου στο πρωτότυπο, ή ισοδύναμα εάν από τις μετρήσεις στο μοντέλο προέκυψε η τιμή Q_{M_1} (εξαρτημένη μεταβλητή), τον προσδιορισμό της τιμής Q_{F_1} για το πρωτότυπο.

Στον προσδιορισμό τους θα βοηθήσει το Θεώρημα Π, σύμφωνα με το οποίο, η σχέση που εκφράζει την εξαρτημένη μεταβλητή συναρτήσει των ανεξάρτητων (φυσικός νόμος) [6]:

$$Q_{F_1} = f(Q_{F_2}, Q_{F_3}, \dots, Q_{F_r}) \quad (1.10)$$

μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$P_{F_1} = \Phi(P_{F_2}, P_{F_3}, \dots, P_{F_{r-n}}) \quad (1.11)$$

Είναι γνωστό όμως ότι, εάν τα δύο φαινόμενα είναι όμοια ως προς την εξαρτημένη μεταβλητή Q_{F_1} , τότε η αδιαστατοποιημένη εξαρτημένη μεταβλητή είναι αναλλοίωτη σε αλλαγή κλίμακας, δηλαδή $\Pi_{F_1} \equiv \Pi_{M_1}$.

Αρα, η παραπάνω ισότητα με χρήση της (1.11) γράφεται:

$$\Phi(\Pi_{F_2}, \Pi_{F_3}, \dots, \Pi_{F_{r-n}}) \equiv \Phi(\Pi_{M_2}, \Pi_{M_3}, \dots, \Pi_{M_{r-n}}) \quad (1.12)$$

Και για να ισχύει η (1.12) θα πρέπει:

$$\Pi_{F_2} = \Pi_{M_2}, \Pi_{F_3} = \Pi_{M_3}, \dots, \Pi_{F_{r-n}} = \Pi_{M_{r-n}} \quad (1.13)$$

Δηλαδή για να ικανοποιείται η φυσική ομοιότητα ως προς τα εξαρτημένα μεγέθη, θα πρέπει οι Π παράμετροι που ορίζονται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές στο πρωτότυπο (δείκτης F) και στο μοντέλο (δείκτης M) να είναι ίδιες.

Η δυνατότητα κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου εξαρτάται από το κατά πόσον υπάρχει λύση $Q_{M_2}, Q_{M_3}, \dots, Q_{M_r}$ που να είναι φυσικά υλοποιήσιμη ή ισοδύναμα από το αν οι σχέσεις των Π παραμέτρων των ανεξάρτητων μεταβλητών μπορεί να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Εάν αυτό είναι δυνατό, τότε πρόκειται για **μοντέλα υπό συνθήκες πλήρους ομοιότητας**.

Δυστυχώς όμως, μοντέλα υπό συνθήκες πλήρους ομοιότητας δεν είναι πάντα εφικτό να γίνουν λόγω αδυναμίας ικανοποίησης όλων των συνθηκών του προβλήματος για το μοντέλο και το πρωτότυπο. Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να γίνει **ευρηματική διαδικασία** όπου γίνεται πρόβλεψη των μεγεθών του πρωτοτύπου από μετρήσεις στο μοντέλο, συνήθως μέσω εμπειρικών υποθέσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει **μερική ομοιότητα** [6].

Είναι κατανοητό πλέον ότι το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου της Διαστατικής Ανάλυσης είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται η ακριβής γνώση των εξισώσεων που περιγράφουν και συνδέουν τα μεγέθη, ούτε φυσικά και η επίλυσή τους. Αρκεί η καταγραφή και ο διαχωρισμός των μεγεθών που συμμετέχουν σε ένα πρόβλημα, σε θεμελιώδη και παραγόμενα για την εφαρμογή του Θεωρήματος Π και τη δημιουργία των αδιάστατων Π παραμέτρων που χρειάζονται για την επίλυση του προβλήματος.

1.3.4 Η εφαρμογή του Θεωρήματος Π

Για να εφαρμόσουμε το Θεώρημα Π , ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

1. Φαινομενολογία. Δηλαδή παρατήρηση του φαινομένου και προσδιορισμός των φυσικών μεγεθών που συμμετέχουν, καθώς και της σχέσης που τα συνδέει.
2. Διαχωρισμός των φυσικών μεγεθών σε **ανεξάρτητες μεταβλητές** (βρίσκονται στο δεύτερο μέλος της σχέσης), και μια **εξαρτημένη μεταβλητή** (βρίσκεται στο πρώτο μέλος της σχέσης).

3. Περιγραφή των διαστάσεων όλων των φυσικών μεγεθών του προβλήματος με τη βοήθεια των θεμελιωδών μεγεθών (π.χ.: μάζα M , μήκος L , χρόνος T). Για παράδειγμα η πυκνότητα ρ θα περιγραφόταν ως εξής:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow [\rho] = [M^1 L^{-3} T^0] = (1, -3, 0)$$

4. Κατασκευή της μήτρας διαστάσεων. Ο βαθμός (rank) n της μήτρας διαστάσεων προσδιορίζει από πόσα μεγέθη θα αποτελείται η **διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα** που θα επιλέξουμε. Η διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα εκλέγεται μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών έτσι, ώστε ο αδιάστατος φυσικός νόμος που θα προκύψει να μην περιέχει πεπλεγμένα την εξαρτημένη μεταβλητή.
5. Προσδιορισμός των Π παραμέτρων. **Ο αριθμός των Π παραμέτρων** που καθορίζουν το φαινόμενο, προκύπτει αν αφαιρέσουμε το βαθμό της μήτρας διαστάσεων από το συνολικό αριθμό μεγεθών του προβλήματος. Χρειαζόμαστε τόσες Π παραμέτρους όσα και τα μεγέθη που δεν συμπεριλάβαμε στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.
6. Υπολογισμός των Π παραμέτρων. Με βάση το Θεώρημα Π , οι διαστάσεις των Π παραμέτρων πρέπει να είναι ίσες με 0. Για να ισχύει αυτό, υψώνουμε σε "άγνωστους" εκθέτες τα μεγέθη της διαστατικά ανεξάρτητης ομάδας έτσι, ώστε το γινόμενο τους επί το μέγεθος που προσδιορίζει η παράμετρος Π να δίνει έναν αδιάστατο αριθμό. Έτσι προκύπτει ένα σύστημα n εξισώσεων (όπου n ο βαθμός της μήτρας διαστάσεων) με n αγνώστους, τους "άγνωστους" εκθέτες. Επιλύοντας το σύστημα, υπολογίζουμε τους εκθέτες και κατ' επέκταση το συνολικό γινόμενο που δίνει την αντίστοιχη Π παράμετρο.

Καταλήγοντας, τρία είναι τα διαδοχικά στάδια για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου από εκτέλεση πειραμάτων σε μοντέλο [6]:

- Φαινομενολογική έρευνα και διαστατική ανάλυση του φαινομένου με σκοπό τον καθορισμό των αδιάστατων ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών και των αντίστοιχων ανεξάρτητων και εξαρτημένων Π παραμέτρων.
- Εξίσωση των ανεξάρτητων Π παραμέτρων στο μοντέλο και το πρωτότυπο και υπολογισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του μοντέλου. Έλεγχος εφικτότητας των συνθηκών εκτέλεσης των πειραμάτων υπό κλίμακα.
- Εκτέλεση πειραμάτων στο μοντέλο και μέτρηση της τιμής των εξαρτημένων διαστατών παραμέτρων. Υπολογισμός της τιμής των εξαρτημένων διαστατών παραμέτρων για το πρωτότυπο με χρήση των Π παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η μεταφορά των μετρήσεων του μοντέλου στις αντίστοιχες τιμές του πρωτοτύπου.

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύντομη βιβλιογραφική αναφορά σε θέματα γειώσεων και στο ρόλο που επιτελούν. Στη συνέχεια θα ορίσουμε τις έννοιες της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους και θα εξετάσουμε το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους. Τέλος θα μελετήσουμε τη μεταβατική συμπεριφορά της αντίστασης γείωσης και θα υπολογίσουμε την κρουστική αντίσταση γείωσης με εφαρμογή της μεθόδου της Διαστατικής Ανάλυσης.

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΓΕΙΩΣΕΩΝ

Ως γνωστόν το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Ωστόσο η ροή του ρεύματος στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας παράλληλα την αξιοπιστία του συστήματος και σε όλες τις περιπτώσεις την ελάχιστη πτώση δυναμικού. Εδώ υπεισέρχεται η έννοια της γείωσης. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει τις πιθανότητες ανάπτυξης βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς. Συνεπώς, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα [9]:

1. Προστασία του ανθρώπου από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.
2. Προστασία της κατασκευής και του εξοπλισμού από κεραυνοπληξίες ή ρεύματα σφαλμάτων.
3. Μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και περιορισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

Ένας σωστός ορισμός της γείωσης θα ήταν ο παρακάτω [10]:

Γείωση είναι η ένωση ενός σημείου ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή ενός μεταλλικού αντικειμένου με μία εγκατάσταση γείωσης. Εγκατάσταση γείωσης είναι ένα ή περισσότερα συνδεδεμένα ηλεκτρόδια γείωσης.

Κάθε γείωση διακρίνεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά [11]:

- Από το σκοπό για τον οποίο γίνεται
- Από την αντίσταση γείωσης
- Από το τρόπο κατασκευής της

Στις συνήθεις κτιριακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις διακρίνει κανείς τρεις ξεχωριστές γειώσεις ανάλογα με το σκοπό κατασκευής τους: τη **γείωση λειτουργίας**, τη **γείωση προστασίας** (ή γείωση μεταλλικών) και τη **γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας** [12].

2.2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΝΘΡΩΠΩΝ - ΗΛΕΚΤΡΟΠΛΗΞΙΑ

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η εγκατάσταση συστημάτων γείωσης για τη προστασία των ανθρώπων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η αντίσταση του ανθρώπου έχει βρεθεί ότι αποτελείται από δύο μέρη [12]:

- ο Τον πυρήνα, με αντίσταση περίπου 500 Ω
- ο Το δέρμα, με αντίσταση που κυμαίνεται από 1 έως 100 kΩ ανάλογα με την υγρασία του.

Έτσι όταν δεν υπάρχει γείωση προστασίας σε μια εγκατάσταση, ή η τιμή της αντίστασης γείωσης είναι μεγάλη, ή η αντίσταση του ανθρώπου είναι μικρή, τότε υπάρχουν κίνδυνοι για τον άνθρωπο, που έρχεται σε επαφή με τα μεταλλικά περιβλήματα των διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών. Στη περίπτωση αυτή το αποτέλεσμα της ηλεκτροπληξίας εξαρτάται κυρίως από τη τιμή του ρεύματος. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν είναι: η τιμή της τάσης, η συχνότητα, η χρονική διάρκεια της ηλεκτροπληξίας, η κατάσταση του εδάφους κ.τ.λ. Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας τιμών εναλλασσομένου ρεύματος 50 Hz (**Πίνακας 2.1**) για το αποτέλεσμα της ηλεκτροπληξίας στον άνθρωπο.

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα του εναλλασσόμενου ρεύματος 50 Hz στον άνθρωπο [12]

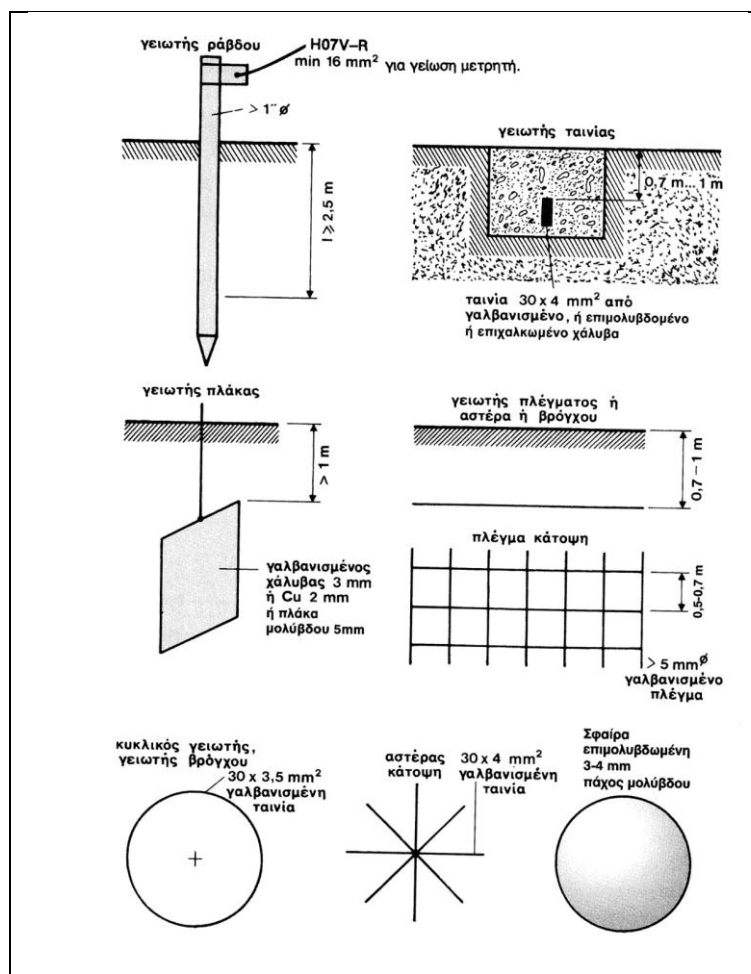
<i>Ένταση ρεύματος</i>	<i>Αποτελέσματα</i>
1 mA	όριο που γίνεται αντιληπτό
16 mA	σύσπαση μυών
50 mA	σε ορισμένες περιπτώσεις απώλεια των αισθήσεων - τραυματισμός
100...300 mA	κοιλιακός ινιδισμός (ταχύτερες συσπάσεις του μυοκαρδίου οι οποίες είναι ανεπαρκείς για την άντληση του αίματος)
5 A	κοιλιακός ινιδισμός, διακοπή της αναπνοής κατά διαστήματα, εγκαύματα
πάνω από 100mA	επικίνδυνη τιμή ρεύματος για ασθενείς σε μονάδες επείγουσας ιατρικής (π.χ. ΜΕΘ)

2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΓΕΙΩΣΗΣ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ

Οι γειώσεις γίνονται σε αγώγιμο έδαφος με τη χρήση κατάλληλων ηλεκτροδίων, δηλαδή αγωγών θαμμένων στη γη που διαχέουν το ρεύμα στη γη. Τα είδη των *ηλεκτροδίων γείωσης* που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι [11]:


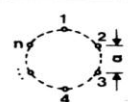
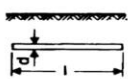
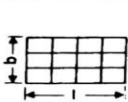
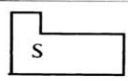
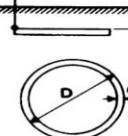
- Γειωτής ράβδου
- Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινο
- Γειωτής πλάκας
- Γειωτής με σιδηροσωλήνες (πασσάλους)
- Γειωτής ακτινικός
- Γειωτής πλέγματος
- Θεμελιακή γείωση
- Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές
- Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης

Στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζονται σχηματικά ορισμένα από τα είδη των ηλεκτροδίων γείωσης.



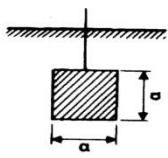
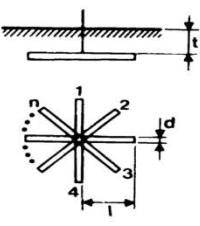
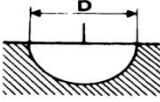
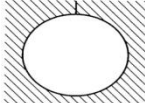
Σχήμα 2.1: Ηλεκτρόδια γείωσης [10]

Αντίσταση γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός πιο μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή $R = \frac{V}{I}$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι για το λόγο αυτό μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [9]. Η αντίσταση γείωσης, η οποία μετράται σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους, και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Για το λόγο αυτό το υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης είναι κατά κανόνα χαλκός, επικασσιτερωμένος, για την αποφυγή οξείδωσης. Η αντίσταση γείωσης R_g είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως R_δ . Παρακάτω δίνονται μερικά είδη γειωτών και οι τύποι υπολογισμού της αντίστασης γείωσης τους στη μόνιμη κατάσταση.

ΓΕΙΩΤΗΣ		ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	
1		Πάσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2\pi l_{eff}} \cdot \ln \frac{4l_{eff}}{d}$ $l_{eff} \approx 1-0,5 \text{ m}$	$R_A \approx \frac{\rho}{l_{eff}}$
2		Πολύγωνο πασσάλων $a \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \frac{1}{n} R_{A1}$ $a/l=3: n=5: k \approx 1,2$ R_{A1} = αντίσταση ενός πασσάλου	μπορεί να τεθεί $k=(1 \dots 1,5)$, ειδικά για $n=10: k \approx 1,25$
3		Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$R_A \approx \frac{2\rho}{l}$
4		Πλέγμα σε βάθος $0,5-1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4b \cdot l}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{lg}$ lg = συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$
5		Θεμελιακή γείωση, $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$	—	$R_A = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$
6		κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \cdot \ln \frac{8D}{d} \cdot \left(1 + \frac{\ln(2D)/t}{\ln(8D/d)}\right)$	$R_A = \frac{2\rho}{\pi D}$ ¹⁾

1) Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος $D=0,33 \cdot U$, όπου U = μήκος αγωγού.

Σχήμα 2.2: Τύποι υπολογισμού για αντιστάσεις γειωτών [10]

ΓΕΙΩΤΗΣ		ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	
7		γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m ²]	$R = \frac{\rho}{4,5a}$ ²⁾	
8		n = 5	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,27td}$	—
		n = 4	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,25td}$	—
		n = 3	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,22td}$	—
		n = 2	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,09td}$	—
9		ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D}$ ³⁾	—
10		σφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	—
<p>2) Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $a = \sqrt{S}$, όπου S = επιφάνεια. 3) Για ένα γειωτή όγκου V, ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D=1,57 \sqrt[3]{V}$.</p>				

Σχήμα 2.3: Τύποι υπολογισμού για αντιστάσεις γειωτών (συνέχεια του σχήματος 2.2) [10]

2.4 ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του [9]. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και συνεπώς ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων ή αγωγιμοτήτων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του, ρ , η οποία μετράται συνήθως σε $\Omega \cdot m$. Η ειδική αντίσταση του εδάφους θα μπορούσε να καθορισθεί από την ποσότητα του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, καθώς και από την ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Με άλλα λόγια η αγωγιμότητα δια μέσω του εδάφους γίνεται αγωγιμότητα μέσω του νερού που κατακρατείται στο έδαφος και έτσι η αγωγιμότητα είναι ηλεκτρολυτική. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γείωσης και μη γραμμική. Η ειδική αντίσταση του εδάφους ορίζεται ως η αντίσταση του υλικού του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση είναι οι εξής [9]:

- i. Ο τύπος του εδάφους
- ii. Επίδραση μεγέθους κόκκων εδάφους
- iii. Περιεκτικότητα εδάφους σε υγρασία
- iv. Επίδραση διαλυμένων αλάτων στο νερό
- v. Επίδραση θερμοκρασίας και πίεσης
- vi. Επίδραση της έντασης του πεδίου
- vii. Επίδραση της μορφής της τάσης

Στον ακόλουθο **Πίνακα 2.2** παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

Πίνακας 2.2: Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους [9]

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

2.5 ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Όπως είναι γνωστό, το έδαφος σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιομορφα αγωγίμα σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα, ή αέρας. Στο νερό και τα διαλυμένα σε αυτό άλατα οφείλεται κατά κύριο λόγο η αγωγιμότητα του εδάφους, ενώ το μέγεθος των διακένων μεταξύ των κόκκων του εδάφους επηρεάζει την αναπτυσσόμενη σε αυτά ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, εξαιτίας της επιβαλλόμενης τάσης. Παρόλο, που οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί, και η συμπεριφορά τους είναι πλήρως 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 [13].

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

Μέχρι σήμερα δύο είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την περιγραφή του μηχανισμού διάσπασης του εδάφους: ο ένας είναι ο **θερμικός μηχανισμός** και ο άλλος είναι ο **ιονισμός του εδάφους** [9].

Καθώς ο θερμικός μηχανισμός βασίζεται σε απλουστευτικές θεωρήσεις, η παρούσα εργασία εστιάζεται στο δεύτερο μηχανισμό που είναι ο ιονισμός του εδάφους και προτάθηκε από τους Leadon et al. Τονίζεται ότι, πειραματικά αποτελέσματα των Oettle, Petropoulos και Liew et al. υποστηρίζουν το μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω ιονισμού.

Ο **ιονισμός του εδάφους** είναι ηλεκτρική διαδικασία και προκαλείται μέσω της ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου στα κενά αέρος εντός του εδάφους και στις διεπιφάνειες με το ηλεκτρόδιο γείωσης. Οπότε ενισχύεται τοπικά το πεδίο, δημιουργούνται τοπικά τόξα και μειώνεται η αντίσταση του εδάφους. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται ισχυρά από τη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους και την εφαρμοζόμενη τάση [13].

Όμοια και στη περίπτωση του νερού (ή του αέρα), όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει υψηλές τιμές (περίπου 100 kV/cm), οι δυνάμεις στα μεμονωμένα μόρια του νερού (ή του αέρα) γίνονται αρκετά ισχυρές, ώστε να διαχωρίσουν τα ηλεκτρόνια, τα οποία στη συνέχεια είναι ελεύθερα να κινηθούν στη κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και επέρχεται με αυτό το τρόπο διηλεκτρική κατάρρευση του νερού (ή του αέρα) [5].

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας, το έδαφος είναι ουσιαστικά το θαλασσινό νερό, μέσα στο οποίο βρίσκεται βυθισμένο το ηλεκτρόδιο γείωσης. Δεδομένου ότι αντίστοιχα υπό κλίμακα πειράματα στη βιβλιογραφία για τη μελέτη συστημάτων γείωσης έχουν γίνει σε ηλεκτρολυτικές δεξαμενές θεωρώντας ότι το νερό προσομοιώνει το έδαφος, η ανάλυση η οποία θα πραγματοποιηθεί στις επόμενες ενότητες, γίνεται με αφητηρία έννοιες και μοντέλα του ιονισμού του εδάφους.

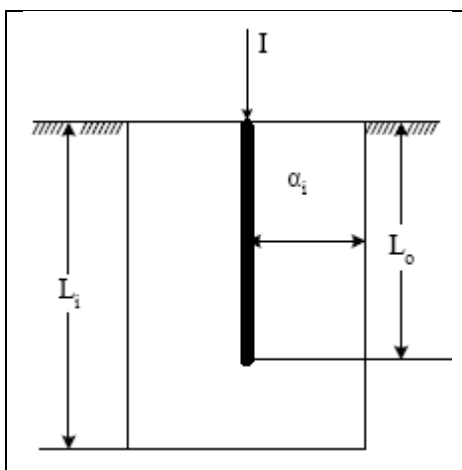
2.5.1 Μοντέλα Ιονισμού

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους. Τα **μοντέλα ιονισμού** μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες και παρουσιάζονται εν συντομία παρακάτω [13]:

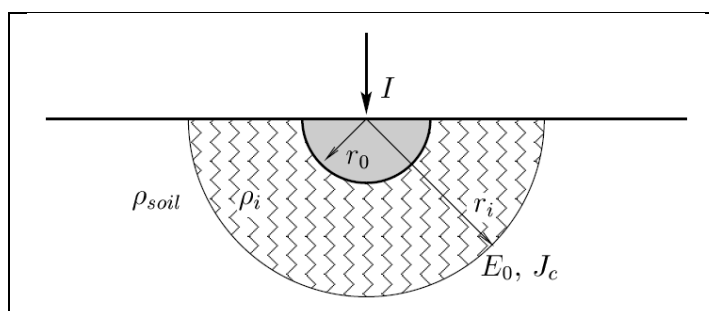
ο *Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων*

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

Ειδικότερα ο Bellaschi σε εργασία του συνέκρινε τη συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης σε μόνιμη κατάσταση με τη συμπεριφορά τους σε μεταβατική κατάσταση. Ο Petropoulos σε άρθρο του αναφέρει ότι, η αντίσταση των γειώσεων υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων παίρνει τιμές κατά πολύ μικρότερες από εκείνες που μετρώνται με μεθόδους διέλευσης ασθενών εναλλασσομένων ρευμάτων. Τα μοντέλα των Bellaschi και Petropoulos φαίνονται παρακάτω.



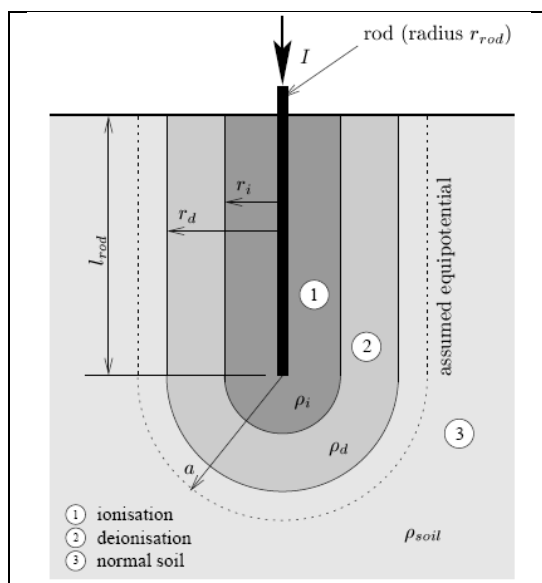
Σχήμα 2.4: Μοντέλο Bellaschi [13]



Σχήμα 2.5: Μοντέλο Petropoulos [13]

ο Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

Σε αυτό το μοντέλο, η μείωση της αντίστασης του ηλεκτροδίου ερμηνεύεται ως μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ_{soil}) στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, εξαιτίας του φαινομένου του ιονισμού. Το 1974 οι Liew και Darveniza πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων ειδών χώματος σε κρουστικά ρεύματα, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ιστροπικό, δηλαδή η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Το μοντέλο τους φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 2.6: Μοντέλο Liew και Darveniza [13]

ο Μοντέλο Διατήρησης Ενέργειας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του ιονισμού έχει προταθεί από τους Sekioka et al. που βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας, εφόσον η ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με τις εκφορτίσεις στον αέρα.

2.5.2 Επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην E_0

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν εξαρτάται μόνο από τον τύπο του εδάφους, αλλά και από την υγρασία, τη θερμοκρασία, το περιεχόμενο σε άλατα και από το πόσο συμπαγές είναι. Σε αυτή την ενότητα, θα εξετάσουμε πώς επιδρούν οι παραπάνω παράγοντες στην τιμή της κρίσιμης έντασης έναρξης ιονισμού E_0 .

Η κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού E_0 είναι η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, στην οποία ξεκινάει ο μηχανισμός του ιονισμού. Διάφορες μελέτες που έχουν δημοσιευθεί, παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος τιμών της E_0 , από 1,3kV/cm έως 20kV/cm.

Ωστόσο, δεν έχει προταθεί στη βιβλιογραφία κάποια συγκεκριμένη μέθοδος για το προσδιορισμό της E_0 του εδάφους. Η N. Mohamand Nor, στα πειράματα της προσδιόρισε την E_0 , όταν εμφανιζόταν η δεύτερη κορυφή στη κυματομορφή του ρεύματος. Θεώρησε ότι η εμφάνιση της δεύτερης κορυφής στο ρεύμα οφειλόταν στην έναρξη του ιονισμού [24].

Έτσι οδηγήθηκε στα παρακάτω συμπεράσματα, ανάλογα με το δοκίμιο που χρησιμοποίησε [13]:

Άμμος με μεταβαλλόμενα ποσοστά νερού

- Για ημισφαιρική διάταξη και θετική πολικότητα κρουστικής τάσης, βρέθηκε ότι η τάση έναρξης ιονισμού είναι 15kV, που αντιστοιχεί σε ένταση έναρξης ιονισμού 5,5kV/cm και είναι ανεξάρτητη από το περιεχόμενο της υγρασίας, για υγρασία από 1% έως 10%. Επίσης παρατηρήθηκε ότι, η E_0 είναι ανεξάρτητη του μεγέθους των κόκκων για χαμηλή αντίσταση εδάφους.
- Ωστόσο είναι αξιοσημείωτο ότι για δοκίμια εδάφους υψηλής υγρασίας (υγρασία 15%) δεν ήταν δυνατό να παρατηρηθεί δεύτερη κορυφή στην κυματομορφή του ρεύματος, και συνεπώς δεν μπορούσε να προσδιοριστεί η E_0 . Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή αγωγιμότητα του δοκιμίου. Για άμμο με υψηλή υγρασία είναι πιθανό να μη συμβαίνει ιονισμός για σχετικά χαμηλά επίπεδα ρεύματος, καθώς τα κενά αέρα μέσα στο έδαφος γεμίζουν με νερό, για την εξάτμιση του οποίου απαιτείται υψηλή ενέργεια.

Άμμος αναμεμιγμένη με ποσοστά αλατιού και νερού

- Παρατηρήθηκε μια καθαρή μείωση της αντίστασης με το περιεχόμενο του νερού και του αλατιού. Ωστόσο το περιεχόμενο του νερού είχε σημαντικότερη επίδραση στη μείωση της αντίστασης του εδάφους σε σχέση με το ποσοστό του αλατιού.
- Και εδώ έγινε προσπάθεια να προσδιοριστεί η E_0 από την εμφάνιση της δεύτερης κορυφής του ρεύματος. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση μειγμάτων χώματος με υγρασία 15% δεν γινόταν να παρατηρηθεί η δεύτερη κορυφή, οπότε δε μπορούσε να εξαχθεί η E_0 . Αυτό οφείλεται στη χαμηλή αντίσταση που έχουν τα μείγματα αλατιού, νερού και χώματος, οπότε οι εκφορτίσεις γίνονται σαν σε ένα συμπαγές υλικό.
- Αν και δεν παρατηρήθηκε η E_0 για μείγματα υψηλής αγωγιμότητας, βρέθηκε ότι τα επίπεδα της αντίστασης μειώνονται για υψηλά επίπεδα ρευμάτων, το οποίο μπορεί να αποδοθεί στον υψηλό ιονισμό του εδάφους.

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω συμπεράσματα, παρατηρείται ότι η δεύτερη κορυφή του ρεύματος και άρα και η E_0 μπορούσε να παρατηρηθεί μόνο για δοκίμια υψηλής αντίστασης (υγρασία από 1% έως 10%) και όχι για δοκίμια χαμηλής αντίστασης (υγρασία 15%).

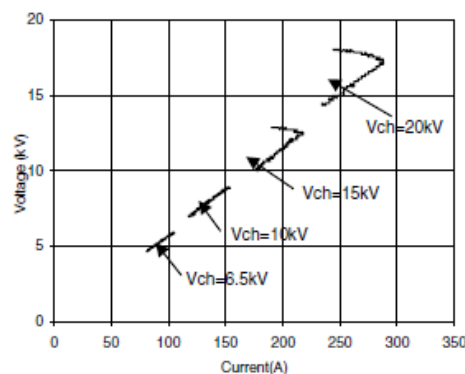
2.5.3 Χρήση V-I χαρακτηριστικών για τον προσδιορισμό της E_0

Στη συνέχεια η Nor για να μπορέσει να προσδιορίσει την τιμή της E_0 στα δοκίμια χαμηλής αντίστασης, χρησιμοποίησε τις V-I χαρακτηριστικές. Σύμφωνα με διάφορες μελέτες η τιμή της E_0 μπορεί να προσδιοριστεί τη στιγμή που η V-I χαρακτηριστική αρχίζει να γίνεται μη γραμμική, το οποίο συμβαίνει όταν η καμπύλη αρχίζει να σχηματίζει βρόχο [24].

Επομένως, ανάλογα με το δοκίμιο διαπιστώθηκαν [13,24]:

Ωμικό υγρό μέσο

Οι δοκιμές αυτές έγιναν για να μελετηθεί ένα ωμικό μέσο (αλατιού με νερό) που υποτίθεται ότι έχει γραμμική συμπεριφορά για όλα τα επίπεδα του ρεύματος. Παρατηρήθηκε ότι η κυματομορφή της κρουστικής τάσης είχε γρηγορότερο ρυθμό ανόδου από την κυματομορφή του ρεύματος. Επίσης ο χρόνος ανόδου του ρεύματος βρέθηκε ότι αυξάνει με το πλάτος του ρεύματος, το οποίο μπορεί να αποδοθεί σε θερμικά και επαγωγικά φαινόμενα. Από τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος ήταν δύσκολο να διαπιστωθεί πότε ακριβώς άρχιζε η μη γραμμικότητα. Εξαιτίας αυτού σχεδιάστηκαν οι V-I χαρακτηριστικές για διαφορετικά επίπεδα τάσης (**Σχήμα 2.7**). Σε χαμηλά επίπεδα τάσης το ρεύμα αυξανόταν γραμμικά με τη τάση, το οποίο δείχνει γραμμική συμπεριφορά του δείγματος σε χαμηλά επίπεδα αγωγιμότητας. Από την άλλη, σε υψηλά επίπεδα τάσης άρχιζε να δημιουργείται βρόχος. Συγκεκριμένα βρόχοι άρχιζαν να εμφανίζονται για τάση 15kV, η οποία θεωρήθηκε και τάση κατωφλίου. Δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκε κυλινδρική διάταξη, η κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού προσδιορίστηκε από τη σχέση $E_0 = \frac{V}{r_i^2 \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_o} \right)} = 5,5kV/cm$, όπου r_i και r_o οι ακτίνες του εσωτερικού και εξωτερικού ηλεκτροδίου αντίστοιχα και V η εφαρμοζόμενη τάση.



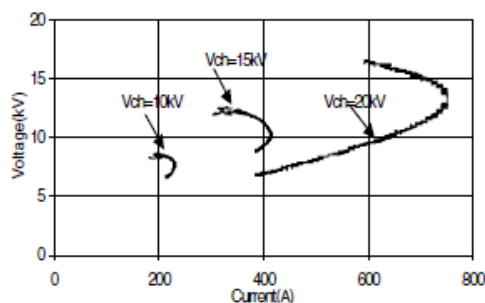
Σχήμα 2.7: Καμπύλες V-I για υγρό μέσο από τη γραμμική έως τη μη γραμμική περιοχή [24]

Διάλυμα αλατιού

Κυματομορφές V-I για αλάτι αναμειγμένο με υγρασία 5% φαίνονται στο **Σχήμα 2.8**. Ο βρόχος αρχίζει να εμφανίζεται για τάση 8,2kV, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν τάση κατωφλίου. Όμοια τιμή της τάσης κατωφλίου παρατηρήθηκε για άμμο με υγρασία 10% και 15%.

Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε $E_0 = 9,8kV/cm$. Ωστόσο η E_0 του διαλύματος αλατιού είναι 40% υψηλότερη από αυτή της άμμου με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας και του υγρού μέσου.

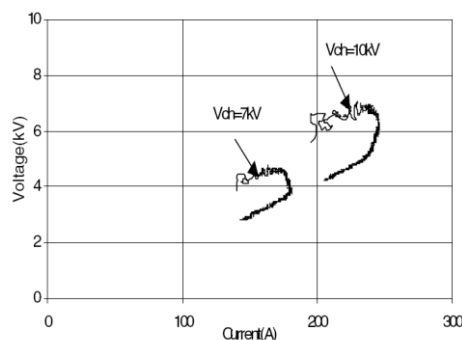
Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το χαμηλότερο επίπεδο τάσης που μπορούσε να παράγει η γεννήτρια ήταν 8,5kV και έτσι δεν μπόρεσε να παρατηρηθεί η μετάβαση από τη γραμμική στη μη γραμμική περιοχή.



Σχήμα 2.8: Καμπύλες V-I για αλάτι με υγρασία 5% σε διαφορετικά επίπεδα τάσης [24]

Μείγμα άμμου και αλατιού

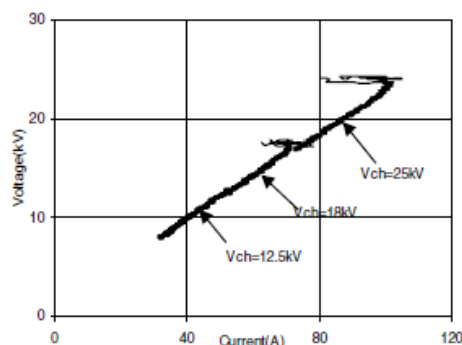
Στο **Σχήμα 2.9** φαίνονται οι καμπύλες V-I μείγματος άμμου με 10% αλάτι και 5% νερό. Παρατηρείται ότι ο βρόχος αρχίζει να εμφανίζεται για τάση 5kV που αντιστοιχεί σε $E_0 = 1,84kV/cm$. Ωστόσο είναι πιθανό η τιμή αυτή της E_0 να μην είναι πολύ ακριβής, αφού όπως αναφέραμε και παραπάνω η χαμηλότερη τάση φόρτισης της γεννήτριας είναι 8,5kV και δεν μπορεί έτσι να προσδιορισθεί η περιοχή μετάβασης από τη γραμμική στη μη γραμμική περιοχή.



Σχήμα 2.9: Καμπύλες V-I για μείγμα άμμου με 10% αλάτι και 5% νερό [24]

Άμμος με υψηλά ποσοστά νερού (15%)

Το **Σχήμα 2.10** δείχνει τις καμπύλες V-I για άμμο μεσαίου μεγέθους κόκκων και υγρασίας 15%. Φαίνεται ότι η V-I χαρακτηριστική αρχίζει να σχηματίζει βρόχο για εφαρμοζόμενη τάση 18kV που αντιστοιχεί σε $E_0 = 6,6kV/cm$. Ωστόσο για ίδια άμμο μεσαίου μεγέθους κόκκων, η τιμή της E_0 για άμμο με υγρασία 15% είναι περίπου 20% υψηλότερη από άμμο με υγρασία 1% έως 10%. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην υψηλή αγωγιμότητα της άμμου με υγρασία 15%, οπότε απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για να εξατμιστεί το νερό. Συνεπώς αναμένεται και μεγαλύτερη τιμή για την E_0 .



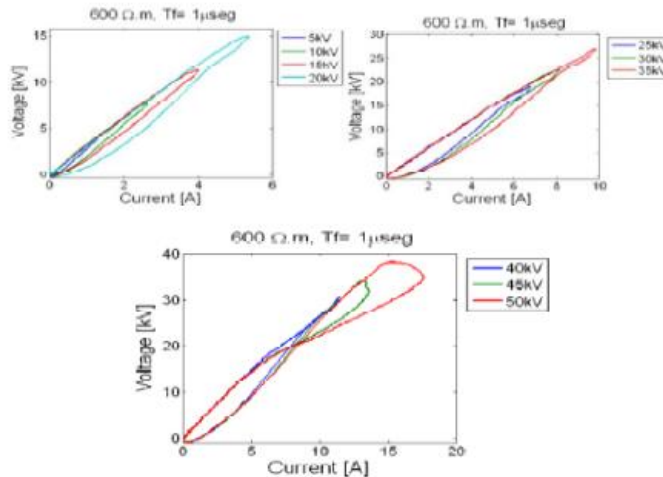
Σχήμα 2.10: Καμπύλες V-I για άμμο με υγρασία 15% [24]

2.5.4 Μελέτη του ιονισμού του εδάφους των Lima - Visacro

Στα πειράματα τους για τη μελέτη του ιονισμού του εδάφους, οι Lima-Visacro χρησιμοποίησαν δύο είδη δοκιμίων, παράλληλες πλάκες και κυλινδρική διάταξη, ώστε να επιτευχθεί ομογενές και ανομοιογενές πεδίο αντίστοιχα.

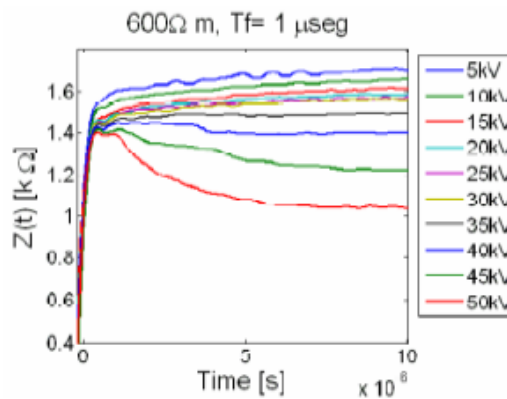
Το κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο σε **ομογενές πεδίο** καθορίστηκε απευθείας από το ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης. Παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπου συμβαίνει διάσπαση από 3,9 σε 14,4kV/cm ανάλογα με το τύπο του εδάφους και την αντίσταση. Ωστόσο, η μέση τιμή είναι μεγάλη γύρω στο 7,4kV/cm και 7,1kV/cm για χρόνους μετώπου 1 και 3μs αντίστοιχα και όλες οι τιμές είναι πάνω από 5kV/cm. Τιμές κάτω από αυτό το σημείο βρέθηκαν μόνο υπό συνθήκες όπου το έδαφος ήταν τελείως υγρό. Ένα άλλο αποτέλεσμα για τα ομοιόμορφα ηλεκτρικά πεδία είναι η ισχυρή εξάρτηση του κρίσιμου ηλεκτρικού πεδίου από την αντίσταση του εδάφους [13].

Για **ανομοιογενές πεδίο**, μία ανάλυση που επιτρέπει την αναγνώριση της έντασης του φαινομένου του ιονισμού μπορεί να φανεί μέσω των βρόχων των γραφικών V-I του Σχήματος 2.11. Αρχικά οι βρόχοι αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου έχοντας μια εικόνα V-I παρόμοια ενός κυκλώματος παράλληλων RC με σταθερές παραμέτρους. Η συμπεριφορά αυτή δείχνει τη μη ύπαρξη ιονισμού ή ότι εκδηλώνεται σε μικρό βαθμό. Καθώς η ένταση του πεδίου αυξάνεται, η επίδραση του φαινομένου γίνεται πιο αξιοπρόσεκτη και η πάνω άκρη του βρόχου γίνεται πιο οξεία. Οι αύξουσες και φθίνουσες καμπύλες τείνουν να αλληλοκαλύπτονται δείχνοντας το φαινόμενο ιονισμού. Τέλος καθώς το φαινόμενο του ιονισμού γίνεται πιο έντονο σχηματίζεται ένα "8". Αυτά τα ποιοτικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα του Visacro, όπου η διακύμανση της κλίσης της καμπύλης, εξαιτίας του ιονισμού, χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του φαινομένου ως μια ισοδύναμη αύξηση της ακτίνας του εσωτερικού ηλεκτροδίου και μετά τον υπολογισμό της μείωσης της κρουστικής αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης [13].



Σχήμα 2.11: Καμπύλες V-I [13]

Μια δεύτερη ανάλυση αναπτύχθηκε βασισμένη στην αποτύπωση των καμπυλών της κρουστικής αντίστασης συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12: Καμπύλες κρουστικής αντίστασης για δείγμα εδάφους, για διάφορες τάσεις [13]

Το φαινόμενο του ιονισμού μοντελοποιήθηκε ως η επέκταση του εσωτερικού ηλεκτροδίου. Η επεκταθείσα ακτίνα υπολογίστηκε από τη μείωση της κρουστικής αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης. Τα αποτελέσματα επέτρεψαν να διαπιστωθεί ότι ο ιονισμός έχει μη ομοιόμορφη κατανομή και αποτελείται κυρίως από πολλά κανάλια ιονισμού, που αναπτύσσονται από το εσωτερικό ηλεκτρόδιο εντός του δοκιμίου [13].

Από μακροσκοπική πλευρά, είναι λογικό να υποτεθεί ότι η επεκταθείσα ακτίνα αντιστοιχεί στο μέσο σύνορο της υψηλά ιονισμένης περιοχής του εδάφους και γι' αυτό το ηλεκτρικό πεδίο που υπολογίζεται στο σύνορο αυτό αντιστοιχεί στο κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο. Με αυτήν την υπόθεση και αφού χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπολογισμένη επεκταθείσα ακτίνα, προέκυψαν οι τιμές της κρίσιμης έντασης συναρτήσει της ακτίνας ιονισμού [13].

Με τη μέθοδο που εφάρμοσε ο Lima οδηγήθηκε στα παρακάτω συμπεράσματα [13]:

- Οι τιμές E_0 που προέκυψαν συμφωνούν με τις τιμές που υπάρχουν στη γενικότερη βιβλιογραφία. Η κρίσιμη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ομογενές πεδίο ήταν 3 με 4 φορές υψηλότερη.
- Ακόμα αποδείχτηκε ότι αυξανόμενη της αντίστασης του εδάφους σε ομογενές πεδίο αυξάνεται και η τιμή του E_0 . Όμως, αυτή η συμπεριφορά δεν παρατηρήθηκε σε ανομοιογενές πεδίο όπου κύριος παράγοντας έναρξης του ιονισμού είναι η ενίσχυση της έντασης του πεδίου κοντά στο ηλεκτρόδιο.
- Ένα άλλο συμπέρασμα ήταν ότι ο χρόνος διάσπασης, ο οποίος είναι μια παράμετρος που αναφέρεται στην έναρξη του ιονισμού, σε πολλές περιπτώσεις βρέθηκε μικρότερος του 1μs.

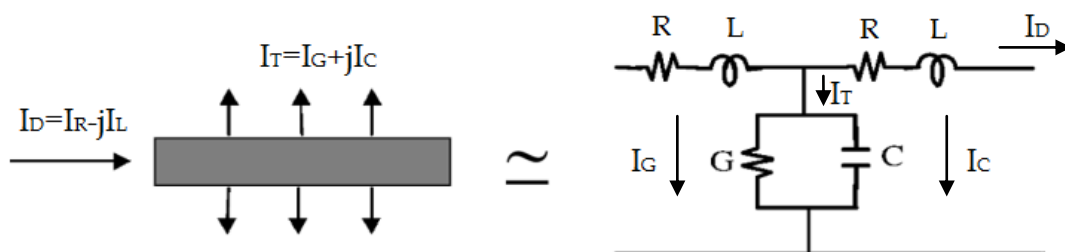
Παρατηρείται λοιπόν ότι οι καμπύλες V-I μπορούν να αποδώσουν μια καλή ποιοτική συμπεριφορά του ιονισμού του εδάφους, οδηγώντας έτσι σε μια αναθεώρηση σχετικά με τη μέθοδο υπολογισμού του κρίσιμου ηλεκτρικού πεδίου και προτείνοντας ότι πιο σημαντική είναι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του ηλεκτρικού πεδίου.

2.6 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

Κατά βάση, ένα σύστημα γείωσης απαρτίζεται από τρία μέρη: 1) τους μεταλλικούς αγωγούς που συνδέουν το σύστημα με τα ηλεκτρόδια γείωσης, 2) τα ηλεκτρόδια γείωσης, και 3) τη "γη" που περιβάλλει τα ηλεκτρόδια (έδαφος, νερό).

Για την καλύτερη κατανόηση των εννοιών που ακολουθούν, παρουσιάζεται αρχικά μια απλοποιημένη περιγραφή της συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων γείωσης, από κυκλωματικής άποψης.

Κάθε ρευματοφόρος τερματισμός στη γη παρουσιάζει ωμική, χωρητική και επαγωγική επίδραση. Οι επιδράσεις αυτές φαίνονται στο **Σχήμα 2.13**, που αναπαριστά ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός απλού συστήματος γείωσης, που αποτελείται από ένα μικρό μήκος ηλεκτρόδιο και τη "γη" που το περιβάλλει.



Σχήμα 2.13: Οι συνιστώσες του ρεύματος στο ηλεκτρόδιο και το έδαφος [14]

Το ρεύμα όπως φαίνεται έχει δύο συνιστώσες: το εγκάρσιο ρεύμα διαρροής I_T που διαχέεται μέσα στο έδαφος και το διαμήκες ρεύμα I_D που μεταφέρεται κατά μήκος του ηλεκτροδίου. Το διαμήκες ρεύμα παράγει εσωτερικές απώλειες στον αγωγό και εγκαθιστά ένα μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του ηλεκτροδίου και γύρω από αυτό (εν σειρά κλάδος RL στο κύκλωμα). Από την άλλη, το ρεύμα διαρροής εγκαθιστά ένα ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος, το οποίο καθορίζει τα χωρητικά και τα αγωγιμα ρεύματα που το διαρρέουν (εν παράλληλω κλάδος $G//C$ στο κύκλωμα) [14].

Όταν όμως τα ηλεκτρόδια γείωσης υποβάλλονται σε κεραυνικά ρεύματα, παρουσιάζουν μια πολύ ιδιαίτερη συμπεριφορά. Δύο είναι τα φαινόμενα που επηρεάζουν κυρίως τη δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτροδίων γείωσης σε συνθήκες κεραυνικού πλήγματος: 1) ο **ιονισμός του εδάφους** (χρονικά εξαρτώμενη μη γραμμική συμπεριφορά) και 2) τα φαινόμενα της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εξαρτώνται από τη συχνότητα (**ενεργό μήκος ηλεκτροδίου**) [15,16].

2.6.1 Ιονισμός του εδάφους

Όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 2.5, ο **ιονισμός του εδάφους** συμβαίνει όταν το ηλεκτρικό πεδίο στα διάκενα του εδάφους και στις διεπιφάνειες των ηλεκτροδίων γείωσης, ξεπεράσει το πεδίο ιονισμού του εδάφους. Τότε γύρω από το σημείο εγχύσεως του ρεύματος, όπου το πεδίο είναι τοπικά ενισχυμένο, δημιουργούνται τοπικές εκφορτίσεις και κατά συνέπεια μειώνεται η αντίσταση του εδάφους.

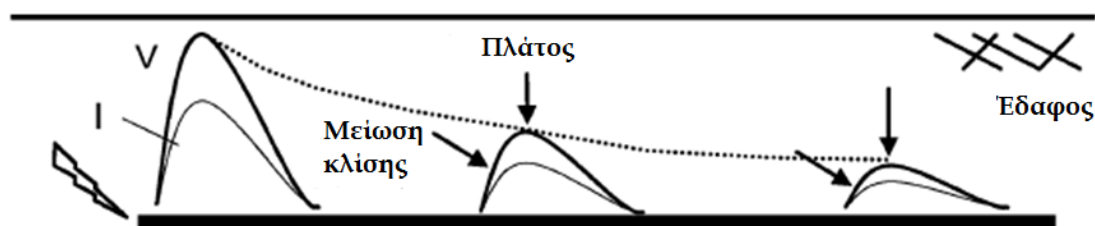
Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει την απόκριση των συστημάτων γείωσης. Έτσι, όταν κρουστικά ρεύματα οδηγούνται στη γη, η προσομοίωση του ιονισμού του εδάφους πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της μοντελοποίησης της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης.

Το φαινόμενο του ιονισμού προκαλεί μη γραμμική συμπεριφορά στα συστήματα γείωσης, η οποία είναι ιδιαίτερα δυσκολονόητη λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου. Συνήθως όμως, στις περιπτώσεις που λαμβάνεται υπόψη ο ιονισμός του εδάφους, γίνονται ορισμένες προσεγγίσεις.

2.6.2 Ενεργό μήκος ηλεκτροδίου

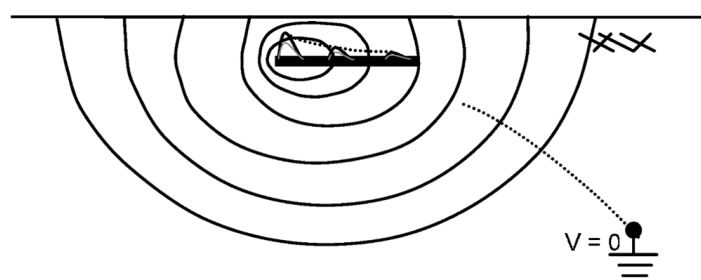
Όταν εφαρμόζονται ρεύματα ή τάσεις σε ένα επίμηκες, βυθισμένο στο έδαφος ηλεκτρόδιο, το πλάτος των αντίστοιχων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διαδίδονται κατά μήκος του ηλεκτροδίου αποσβένει και η κυματομορφή παραμορφώνεται, με μια μείωση της κλίσης του μετώπου του κύματος κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Αυτή η απόσβεση οφείλεται στις απώλειες ενέργειας που εμφανίζονται κατά τη διάδοση του ρεύματος κατά μήκος του ηλεκτροδίου, και συνεπώς, ο ρυθμός της αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας και της αγωγιμότητας του εδάφους, όπως ακριβώς αυξάνονται και οι απώλειες ενέργειας σε μια τέτοια περίπτωση.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το φαινόμενο της απόσβεσης των κυματομορφών ρεύματος και τάσης κατά μήκος ενός ηλεκτροδίου [14].



Σχήμα 2.14: Απόσβεση κυματομορφών ρεύματος, τάσης κατά μήκος του ηλεκτροδίου [14]

Καθώς το μήκος των ηλεκτροδίων είναι περιορισμένο, αυτή η συμπεριφορά θα πρέπει να υπερτεθεί σε μια άλλη συμπεριφορά, αυτή του αποκλίνοντος πεδίου, που συνδέεται με τη ροή ρεύματος από το ηλεκτρόδιο στην απομακρυσμένη γη. Για τα συγκεντρωμένα ηλεκτρόδια, αυτή η αποκλίνουσα συμπεριφορά του πεδίου επικρατεί. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η συγκεκριμένη αποκλίνουσα συμπεριφορά του πεδίου.



Σχήμα 2.15: Αποκλίνουσα συμπεριφορά του πεδίου [14]

Σαν αποτέλεσμα της απόσβεσης, το ρεύμα που διαχέεται στο έδαφος κατά μήκος του ηλεκτροδίου, παρουσιάζει μια ανομοιόμορφη κατανομή. Η γραμμική πυκνότητα ρεύματος (A/m) μειώνεται κατά μήκος του ηλεκτροδίου. Έτσι, εισάγεται η έννοια του **ενεργού μήκους** του ηλεκτροδίου (ή ενεργούς ακτίνας για πλέγματα), την οποία πρώτος εισήγαγε ο Gupta. Το ενεργό μήκος εκφράζει ένα όριο στο μήκος του ηλεκτροδίου πέρα από το οποίο δεν καθίσταται δυνατή η μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης γείωσης. Επομένως, ενώ είναι δυνατή η επέκταση του μήκους του ηλεκτροδίου, πρακτικά δεν έχει κάποιο αντίκρισμα, καθώς οι υψηλών συχνοτήτων συνιστώσες του ρεύματος παρουσιάζουν αμελητέο πλάτος και ουσιαστικά δε διαχέονται πλέον στο έδαφος.

Το ενεργό μήκος (*effective length, l_{eff}*) μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας και της αγωγιμότητας του εδάφους. Αυτό εξηγείται, καθώς και οι δύο αυτές παράμετροι, όπως αναφέραμε, είναι υπεύθυνες για την αύξηση των απωλειών ενέργειας και συνεπώς για την αύξηση της απόσβεσης των κυμάτων ρεύματος και τάσης που διαδίδονται κατά μήκος των ηλεκτροδίων. Η σταθερά απόσβεσης αντιστοιχεί στην πραγματική συνιστώσα της σταθεράς διάδοσης (λ), η οποία είναι [14]:

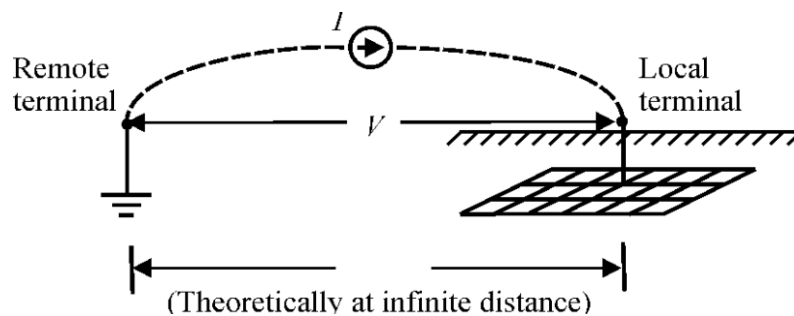
$$\lambda = \alpha + j\beta = [(R + j\omega L)(G + j\omega C)]^{1/2} \quad (2.1)$$

η οποία, όπως φαίνεται, αυξάνει με τη συχνότητα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στην παραπάνω σχέση είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του εδάφους.

Στο πεδίο της συχνότητας, η τιμή του ενεργού μήκους καθορίζεται διαφορετικά για κάθε συχνότητα και είναι διαφορετική για κρουστικά ρεύματα, καθώς αυτά περιλαμβάνουν ένα μεγάλο φάσμα συνιστωσών συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, ως ενεργό μήκος λαμβάνεται το μήκος του ηλεκτροδίου που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή κρουστικής αντίστασης.

2.7 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ

Κάθετα και οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης χρησιμοποιούνται παραδοσιακά σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, για να κατευθύνουν το κεραυνικό ρεύμα από τους καθοδικούς αγωγούς στη γη με μία ελάχιστη αύξηση του δυναμικού του υπέργειου τμήματος του συστήματος προστασίας. Τα κριτήρια ασφαλείας, τα οποία βασίζονται σε αυτή την ελάχιστη αύξηση του δυναμικού, λαμβάνονται από την ανάλυση των συστημάτων ενέργειας. Ωστόσο σε μια τέτοια περίπτωση, η συνήθης dc προσέγγιση οδηγεί σε αρκετά άμεσους υπολογισμούς. Στο **Σχήμα 2.16** φαίνεται ένα θεωρητικό κύκλωμα για την εκτίμηση της τάσης, που το υπέργειο τμήμα του συστήματος προστασίας, λαμβάνει σε σχέση με την απομακρυσμένη γη. Μια ιδανική πηγή dc ρεύματος I συνδέεται στο ένα άκρο με τα ηλεκτρόδια γείωσης και στο άλλο άκρο με την απομακρυσμένη γη, σε θεωρητικά άπειρη απόσταση [15].



Σχήμα 2.16: Θεωρητικό κύκλωμα για την εκτίμηση της DC αντίστασης γείωσης R [15]

Η τάση μεταξύ των δύο άκρων ορίζεται μοναδικά και είναι ίση με το ηλεκτρικό δυναμικό V των ηλεκτροδίων γείωσης με σημείο αναφοράς την απομακρυσμένη γη. Έτσι προκύπτει ο ορισμός της αντίστασης γείωσης R χαμηλής συχνότητας, η οποία δίνεται από τη σχέση [15]:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Συνεπώς, ο στόχος ελαχιστοποίησης της τάσης V επιτυγχάνεται μέσω μιας σχεδίασης που να ελαχιστοποιεί την αντίσταση R .

Ωστόσο, στην περίπτωση κεραυνού η κατάσταση είναι διαφορετική. Το ρεύμα που εγχέεται στα ηλεκτρόδια γείωσης, είναι ένας γρήγορα μεταβαλλόμενος ηλεκτρικός παλμός με υψηλότερες μέγιστες τιμές. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η δυναμική απόκριση των ηλεκτροδίων γείωσης, που υπόκεινται σε τέτοιους ηλεκτρικούς παλμούς, επηρεάζεται κυρίως από δύο φυσικές διαδικασίες, οι οποίες σχετίζονται με τις ακόλουθες ιδιότητες των κυματομορφών των παλμών αυτών [15]:

- 1) Ο **ιονισμός του εδάφους**, που βρίσκεται γύρω από το ηλεκτρόδιο, ο οποίος σχετίζεται με την ένταση του ηλεκτρικού παλμού. Αυτή η συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από το χρόνο και έχει μη γραμμικό χαρακτήρα. Στην περίπτωση παλμού με υψηλή τιμή μεγίστου, το ηλεκτρικό πεδίο στα ηλεκτρόδια γείωσης μπορεί να γίνει μεγαλύτερο από την ηλεκτρική αντοχή του εδάφους, οδηγώντας σε διηλεκτρική κατάρρευση και σπινθηρισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης γείωσης, ουσιαστικά λόγω αύξησης του μεγέθους του ηλεκτροδίου. *Συνεπώς έτσι βελτιώνεται η επίδοση της γείωσης σε σχέση με τις περιπτώσεις χαμηλών ρευμάτων.*
- 2) Η διάδοση του κεραυνικού παλμού κατά μήκος του ηλεκτροδίου, που σχετίζεται με το χρόνο μετώπου του παλμού, και έχει να κάνει με το **ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου**. Είναι ο παράγοντας που εξαρτάται από τη συχνότητα και εκδηλώνει την επαγωγική συμπεριφορά του εδάφους. Όταν ηλεκτρικοί παλμοί με μικρούς χρόνους μετώπου εγχέονται στο ηλεκτρόδιο, λόγω της περιορισμένης ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρικού παλμού κατά μήκος τους ηλεκτροδίου, μόνο ένα μικρό τμήμα του ηλεκτροδίου είναι αποτελεσματικό στην εκφόρτιση του ρεύματος προς τη γη, στις πρώτες στιγμές του παλμού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες τιμές διαρροής ρευμάτων και δυναμικών κοντά στο σημείο έγχυσης. *Στην περίπτωση αυτή, η επίδοση της γείωσης μπορεί να χειροτερεύσει σε σχέση με τις περιπτώσεις χαμηλών ρευμάτων.*

Μελετώντας τη διάδοση των δυναμικών κατά μήκος του ηλεκτροδίου (αγνοώντας τον ιονισμό), ως απόκριση σε ένα κρουστικό ηλεκτρικό παλμό που εγχέεται στο ένα άκρο του, διακρίνουμε δύο περιόδους [15]:

- 1) την "κρουστική" περίοδο - πριν ο παλμός φτάσει στο άλλο άκρο του ηλεκτροδίου, όπου μόνο ένα μέρος του ηλεκτροδίου συνεισφέρει αποτελεσματικά στην εκφόρτιση του ρεύματος στη γη και χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές και ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού.
- 2) την περίοδο μόνιμης κατάστασης - αμέσως μετά τη στιγμή που ο παλμός φτάνει στο άλλο άκρο του ηλεκτροδίου, όπου ολόκληρο το ηλεκτρόδιο συνεισφέρει αποτελεσματικά στην εκφόρτιση του ρεύματος στη γη και χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, να γίνει ανάλυση, ταυτόχρονα και των δύο αυτών "αντιτιθέμενων" φαινομένων (ιονισμός εδάφους και ενεργό μήκος ηλεκτροδίου), που επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση των ηλεκτροδίων γείωσης που υπόκεινται σε κρουστικά ρεύματα. Παρ' όλα αυτά οι περισσότερες σύγχρονες προσπάθειες μοντελοποίησης της μεταβατικής αντίστασης γείωσης, συνήθως αναλύουν ξεχωριστά την επίδραση των δύο προαναφερθέντων φαινομένων.

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε στο μοντέλο υπολογισμού της μεταβατικής αντίστασης γείωσης μια σχέση, η οποία λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα και τα δύο αυτά φαινόμενα, προκειμένου να διερευνήσουμε πώς αυτά τα μεγέθη μπορούν να ενσωματωθούν στη Διαστατική Ανάλυση.

2.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα μοντέλο υπολογισμού της μεταβατικής αντίστασης γείωσης, που περιλαμβάνει τόσο το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, όσο και τα φαινόμενα διάδοσης (ενεργό μήκος ηλεκτροδίου).

Θεωρείται αρχικά ένας παλμός ρεύματος $i(t)$ που εγχέεται στα ηλεκτρόδια γείωσης, και $v(t)$ το ηλεκτρικό δυναμικό στο σημείο έγχυσης με σημείο αναφοράς την απομακρυσμένη γη. Η κρουστική αντίσταση Z ορίζεται από τη σχέση [16]:

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.3)$$

όπου V_m είναι η μέγιστη τιμή της κυματομορφής $v(t)$ και I_m η μέγιστη τιμή της κυματομορφής $i(t)$.

Η κρουστική αντίσταση Z συνδέεται με την αντίσταση γείωσης χαμηλής συχνότητας R μέσω του αδιάστατου κρουστικού συντελεστή A μέσω της σχέσης [16]:

$$A = \frac{Z}{R} \quad (2.4)$$

Σε συνθήκες ρευμάτων χαμηλής συχνότητας και χαμηλής έντασης, ισχύει $Z = R$, και συνεπώς $A = 1$. Είναι ξεκάθαρο ότι για τιμές του A μεγαλύτερες της μονάδας υπάρχει χειρότερη κρουστική επίδοση, ενώ για τιμές μικρότερες της μονάδας υπάρχει βελτιωμένη κρουστική επίδοση σε σχέση με την επίδοση της γείωσης σε χαμηλές συχνότητες [15].

Σύγχρονες έρευνες έχουν καταλήξει στην υιοθέτηση ενός εμπειρικού τύπου για τον υπολογισμό του κρουστικού συντελεστή. Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός των συντελεστών a και β από τις σχέσεις [15,16]:

$$a = 0,025 + \exp [-0,82(\rho T_1)^{0,257}] \quad (2.5)$$

$$\beta = 0,17 + \exp [-0,22(\rho T_1)^{0,555}] \quad (2.6)$$

όπου, ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot m$ και T_1 ο χρόνος ανόδου της κυματομορφής του ρεύματος σε s . Οι συντελεστές a και β δεν έχουν καμία φυσική σημασία και έχουν προκύψει από αποτελέσματα προσομοίωσης σε υπολογιστή.

Στη συνέχεια το ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου l_{eff} σε m προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$l_{eff} = \frac{1-\beta}{\alpha} \quad (2.7)$$

Ο κρουστικός συντελεστής A χωρίς να ληφθεί υπόψη ο ιονισμός του εδάφους, υπολογίζεται ως εξής:

$$A = 1 \quad \text{για } (l \leq l_{eff}) \quad (2.8)$$

$$A = \alpha l + \beta \quad \text{για } (l \geq l_{eff}) \quad (2.9)$$

Τέλος έπειτα από μια σειρά υπολογισμών και προσεγγίσεων, ο κρουστικός συντελεστής A_i , λαμβάνοντας υπόψη τόσο το φαινόμενο του ιονισμού, όσο και την επίδραση του ενεργού μήκους, υπολογίζεται από το τύπο [15,16]:

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{1+I_m/I_g}} + A - 1, \quad I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R^2} \quad (2.10)$$

όπου I_m είναι η μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος του παλμού (σε A), E_0 η κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού σε V/m , A ο κρουστικός συντελεστής χωρίς να ληφθεί υπόψη ο ιονισμός και R η αντίσταση γείωσης μονίμου κατάστασης σε Ω .

Μία ερμηνεία των τιμών που μπορεί να πάρει ο κρουστικός συντελεστής A_i είναι [16]:

$A_i < 1$ η κρουστική επίδοση βελτιώνεται λόγω του ιονισμού
(έντονη μη γραμμική ωμική συμπεριφορά)

$A_i = 1$ η κρουστική επίδοση είναι ίδια με αυτή στη μόνιμη κατάσταση
(γραμμική ωμική συμπεριφορά)

$A_i > 1$ η κρουστική επίδοση χειροτερεύει λόγω επίδρασης l_{eff}
(έντονη επαγωγική συμπεριφορά)

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι ο τύπος (2.10) αμελεί τυχόν επιδράσεις του ιονισμού στη χωρητική συμπεριφορά. Ωστόσο αυτό μπορεί να θεωρηθεί μια ασφαλής και συντηρητική προσέγγιση, καθώς η χωρητική συμπεριφορά βελτιώνει την κρουστική επίδοση.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, υπάρχουν διάφοροι τύποι και γεωμετρίες ηλεκτροδίων. Μερικές από αυτές είναι το **οριζόντιο ηλεκτρόδιο**, το **κατακόρυφο ηλεκτρόδιο** και η **ταινία γείωσης**. Ο τύπος (2.10) μπορεί να εφαρμοστεί και στις τρεις αυτές γεωμετρίες ηλεκτροδίων. Στη συνέχεια, για τις γεωμετρίες αυτές θα επιχειρήσουμε να εφαρμόσουμε το Θεώρημα Π της Διαστατικής Ανάλυσης, για την εύρεση των λόγων κλίμακας των φυσικών μεγεθών που αφορούν στα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα, εκμεταλλευόμενοι τις σχέσεις που είναι γνωστές.

2.8.1 Οριζόντιο ηλεκτρόδιο γείωσης

Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας, χαμηλής έντασης ρεύματος, ο τύπος που δίνει την αντίσταση γείωσης R σύμφωνα με τον Sunde είναι [15]:

$$R (\sigma \varepsilon \Omega) = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (σε $\Omega \cdot m$), l το μήκος του ηλεκτροδίου γείωσης (σε m), a η ακτίνα του ηλεκτροδίου (σε m) και d το βάθος εγκατάστασης του οριζόντιου ηλεκτροδίου (σε m), θεωρώντας ότι ισχύει $l \gg a, d$.

Οπότε είναι γνωστό από ποιες μεταβλητές εξαρτάται η αντίσταση γείωσης R . Η μεταβατική αντίσταση γείωσης Z όμως, εξαρτάται και από τον κρουστικό συντελεστή A_i . Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω σχέσεις συμπεραίνουμε ότι η μεταβατική αντίσταση γείωσης Z μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των εξής μεγεθών:

$$Z = f(a, d, l, \rho, I_m, E_0, T_1) \quad (2.12)$$

Σε αυτό το φυσικό νόμο, που συνδέει τα 8 φυσικά μεγέθη που εμπλέκονται στην παραπάνω συνάρτηση, θα εφαρμόσουμε το Θεώρημα Π της Διαστατικής Ανάλυσης.

Τα μεγέθη $a, d, l, \rho, I_m, E_0, T_1$ είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, ενώ η μεταβατική αντίσταση Z η εξαρτημένη μεταβλητή (συνολικά $r = 8$).

Το σύστημα μονάδων το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε είναι το $[M L T I]$, όπου M η μάζα, L το μήκος, T ο χρόνος και I το ρεύμα, καθώς από όλα τα μεγέθη που εμφανίζονται στο πρόβλημα, αυτά είναι τα μόνα θεμελιώδη.

Συνεπώς, οι διαστάσεις των φυσικών μεγεθών είναι:

- $[Z] = [R] = \Omega = V/A = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
 $\Rightarrow [Z] = [M^1 L^2 T^{-3} A^{-2}] = (1, 2, -3, -2)$
- $[a] = [d] = [l] = m \Rightarrow [a] = [d] = [l] = [M^0 L^1 T^0 A^0] = (0, 1, 0, 0)$
- $[\rho] = \Omega \cdot m = kg \cdot m^3 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2} \Rightarrow [\rho] = [M^1 L^3 T^{-3} A^{-2}] = (1, 3, -3, -2)$
- $[I_m] = A \Rightarrow [I_m] = [M^0 L^0 T^0 A^1] = (0, 0, 0, 1)$
- $[E_0] = V/m = kg \cdot m \cdot s^{-3} \cdot A^{-1} \Rightarrow [E_0] = [M^1 L^1 T^{-3} A^{-1}] = (1, 1, -3, -1)$
- $[T_1] = s \Rightarrow [T_1] = [M^0 L^0 T^1 A^0] = (0, 0, 1, 0)$

Οπότε η μήτρα των διαστάσεων είναι:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & -3 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & -3 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ο βαθμός (rank) της μήτρας των διαστάσεων είναι 4 ($\Rightarrow n = 4$ διαστατικά ανεξάρτητα μεγέθη).

Επομένως, οι Π παράμετροι που θα πρέπει να υπολογιστούν είναι:

$$k = r - n = 8 - 4 = 4 \text{ } \Pi \text{ παράμετροι}$$

Επιλέγουμε διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα την $[\rho, I_m, l, T_1]$ μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ακολούθως, θα υπολογίσουμε την Π παράμετρο για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.

❖ 1^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος Z):

$$\begin{aligned} [Z \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] &= \\ &= [M^1 L^2 T^{-3} A^{-2}] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ &= [M^{X+1} L^{2+3X+Z} T^{-3-3X+W} A^{-2-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X + 1 = 0 \\ 2 + 3X + Z = 0 \\ -3 - 3X + W = 0 \\ -2 - 2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = -1 \\ Z = 1 \\ W = 0 \\ Y = 0 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \Pi_1 = Z \cdot \rho^{-1} \cdot l^1 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \quad (2.13)$$

❖ 2^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος a):

$$\begin{aligned} [\alpha \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] &= \\ &= [M^0 L^1 T^0 A^0] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ &= [M^X L^{3X+Z} T^{-3X+W} A^{-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X = 0 \\ 1 + 3X + Z = 0 \\ -3X + W = 0 \\ -2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = 0 \\ Z = -1 \\ W = 0 \\ Y = 0 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \Pi_2 = \alpha \cdot l^{-1} = \frac{\alpha}{l} \quad (2.14)$$

❖ 3^η Παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος \mathbf{d}):

$$\begin{aligned} & [d \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] = \\ & = [M^0 L^1 T^0 A^0] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ & [M^X L^{3X+Z} T^{-3X+W} A^{-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X = 0 \\ 1 + 3X + Z = 0 \\ -3X + W = 0 \\ -2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = 0 \\ Z = -1 \\ W = 0 \\ Y = 0 \end{array}$$

$$\text{Οπότε: } \mathbf{\Pi}_3 = \mathbf{d} \cdot \mathbf{l}^{-1} = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{l}} \quad (2.15)$$

❖ 4^η Παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος \mathbf{E}_0):

$$\begin{aligned} & [E_0 \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] = \\ & = [M^1 L^1 T^{-3} A^{-1}] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ & [M^{X+1} L^{1+3X+Z} T^{-3-3X+W} A^{-1-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X + 1 = 0 \\ 1 + 3X + Z = 0 \\ -3 - 3X + W = 0 \\ -1 - 2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = -1 \\ Z = 2 \\ W = 0 \\ Y = -1 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \mathbf{\Pi}_4 = \mathbf{E}_0 \cdot \rho^{-1} \cdot \mathbf{I}_m^{-1} \cdot \mathbf{l}^2 = \frac{\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{l}^2}{\rho \cdot \mathbf{I}_m} \quad (2.16)$$

2.8.2 Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο γείωσης

Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας, χαμηλής έντασης ρεύματος, ο τύπος που δίνει την αντίσταση γείωσης R σύμφωνα με τον Dwight είναι [15]:

$$R(\sigma \varepsilon \Omega) = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (σε $\Omega \cdot m$), l το μήκος του ηλεκτροδίου γείωσης (σε m) και a η ακτίνα του ηλεκτροδίου (σε m). Οπότε είναι γνωστό από ποιες μεταβλητές εξαρτάται η αντίσταση γείωσης R .

Επομένως, η μεταβατική αντίσταση γείωσης Z μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των εξής μεγεθών:

$$Z = f(a, l, \rho, I_m, E_0, T_1) \quad (2.18)$$

Τα μεγέθη $\mathbf{a}, \mathbf{l}, \rho, \mathbf{I}_m, \mathbf{E}_0, \mathbf{T}_1$ είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, ενώ η μεταβατική αντίσταση Z η εξαρτημένη μεταβλητή (συνολικά $r = 7$).

Οι διαστάσεις των φυσικών μεγεθών που εμφανίζονται εδώ, έχουν ήδη αναλυθεί στη προηγούμενη περίπτωση.

Οπότε η μήτρα των διαστάσεων είναι:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & -3 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & -3 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ο βαθμός (rank) της μήτρας των διαστάσεων είναι 4 ($\Rightarrow n = 4$ διαστατικά ανεξάρτητα μεγέθη).

Επομένως, οι Π παράμετροι που θα πρέπει να υπολογιστούν είναι:

$$k = r - n = 7 - 4 = 3 \text{ } \Pi \text{ παράμετροι}$$

Επιλέγουμε διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα την $[\rho, I_m, l, T_1]$ μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ακολουθώντας, θα υπολογίσουμε την Π παράμετρο για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.

❖ 1^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος Z):

$$\begin{aligned} [Z \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] &= \\ &= [M^1 L^2 T^{-3} A^{-2}] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ &= [M^{X+1} L^{2+3X+Z} T^{-3-3X+W} A^{-2-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X + 1 = 0 \\ 2 + 3X + Z = 0 \\ -3 - 3X + W = 0 \\ -2 - 2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = -1 \\ Z = 1 \\ W = 0 \\ Y = 0 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \Pi_1 = Z \cdot \rho^{-1} \cdot l^1 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \tag{2.19}$$

❖ 2^η Παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος α):

$$\begin{aligned} & [\alpha \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] = \\ & = [M^0 L^1 T^0 A^0] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ & [M^X L^{3X+Z} T^{-3X+W} A^{-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X = 0 \\ 1 + 3X + Z = 0 \\ -3X + W = 0 \\ -2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = 0 \\ Z = -1 \\ W = 0 \\ Y = 0 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \mathbf{\Pi}_2 = \alpha \cdot l^{-1} = \frac{\alpha}{l} \quad (2.20)$$

❖ 3^η Παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος E_0):

$$\begin{aligned} & [E_0 \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] = \\ & = [M^1 L^1 T^{-3} A^{-1}] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ & [M^{X+1} L^{1+3X+Z} T^{-3-3X+W} A^{-1-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X + 1 = 0 \\ 1 + 3X + Z = 0 \\ -3 - 3X + W = 0 \\ -1 - 2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = -1 \\ Z = 2 \\ W = 0 \\ Y = -1 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \mathbf{\Pi}_3 = E_0 \cdot \rho^{-1} \cdot I_m^{-1} \cdot l^2 = \frac{E_0 \cdot l^2}{\rho \cdot I_m} \quad (2.21)$$

2.8.3 Ταινία γείωσης

Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας, χαμηλής έντασης ρεύματος, ο τύπος που δίνει την αντίσταση γείωσης R για βάθος $h = 0,5 \div 1,0 \text{ m}$ είναι:

$$R (\sigma \varepsilon \Omega) = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left(\frac{2l}{d} \right) \quad (2.22)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (σε $\Omega \cdot m$), l το μήκος της ταινίας γείωσης (σε m) και d το πλάτος της ταινίας (σε m). Οπότε είναι γνωστό από ποιες μεταβλητές εξαρτάται η αντίσταση γείωσης R .

Επομένως η μεταβατική αντίσταση γείωσης Z μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των εξής μεγεθών:

$$Z = f(d, l, \rho, I_m, E_0, T_1) \quad (2.23)$$

Τα μεγέθη $d, l, \rho, I_m, E_0, T_1$ είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, ενώ η μεταβατική αντίσταση Z η εξαρτημένη μεταβλητή (συνολικά $r = 7$).

Οι διαστάσεις των φυσικών μεγεθών που εμφανίζονται εδώ, έχουν ήδη αναλυθεί.

Οπότε η μήτρα των διαστάσεων είναι:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & -3 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & -3 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ο βαθμός (rank) της μήτρας των διαστάσεων είναι 4 ($\Rightarrow n = 4$ διαστατικά ανεξάρτητα μεγέθη).

Επομένως, οι Π παράμετροι που θα πρέπει να υπολογιστούν είναι:

$$k = r - n = 7 - 4 = 3 \text{ } \Pi \text{ παράμετροι}$$

Επιλέγουμε διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα την $[\rho, I_m, l, T_1]$ μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ακολούθως, θα υπολογίσουμε την Π παράμετρο για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.

❖ 1^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος Z):

$$\begin{aligned} [Z \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] &= \\ &= [M^1 L^2 T^{-3} A^{-2}] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ &= [M^{X+1} L^{2+3X+Z} T^{-3-3X+W} A^{-2-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X + 1 = 0 \\ 2 + 3X + Z = 0 \\ -3 - 3X + W = 0 \\ -2 - 2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = -1 \\ Z = 1 \\ W = 0 \\ Y = 0 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \Pi_1 = Z \cdot \rho^{-1} \cdot l^1 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \quad (2.24)$$

❖ 2^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος d):

$$\begin{aligned} [d \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] &= \\ &= [M^0 L^1 T^0 A^0] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ &= [M^X L^{3X+Z} T^{-3X+W} A^{-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X = 0 \\ 1 + 3X + Z = 0 \\ -3X + W = 0 \\ -2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = 0 \\ Z = -1 \\ W = 0 \\ Y = 0 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \Pi_2 = d \cdot l^{-1} = \frac{d}{l} \quad (2.25)$$

❖ 3^η Παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος E_0):

$$\begin{aligned} & [E_0 \rho^X I_m^Y l^Z T_1^W] = \\ & = [M^1 L^1 T^{-3} A^{-1}] \cdot [M^X L^{3X} T^{-3X} A^{-2X}] \cdot [M^0 L^0 T^0 A^Y] \cdot [M^0 L^Z T^0 A^0] \cdot [M^0 L^0 T^W A^0] = \\ & [M^{X+1} L^{1+3X+Z} T^{-3-3X+W} A^{-1-2X+Y}] = (0,0,0,0) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} X + 1 = 0 \\ 1 + 3X + Z = 0 \\ -3 - 3X + W = 0 \\ -1 - 2X + Y = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X = -1 \\ Z = 2 \\ W = 0 \\ Y = -1 \end{array}$$

$$\text{Άρα: } \Pi_3 = E_0 \cdot \rho^{-1} \cdot I_m^{-1} \cdot l^2 = \frac{E_0 \cdot l^2}{\rho \cdot I_m} \quad (2.26)$$

2.8.4 Λόγοι κλίμακας ηλεκτροδίων γείωσης

Έχοντας υπολογίσει τις Π παραμέτρους, μπορούν πλέον να προσδιοριστούν οι λόγοι κλίμακας για τα φυσικά μεγέθη του προβλήματος. Για να ικανοποιηθεί η φυσική ομοιότητα, θα πρέπει οι Π παράμετροι να είναι ίσες για το μοντέλο και το πρωτότυπο. Συνεπώς, συμβολίζοντας με δείκτη \mathbf{M} (model) τα μεγέθη που αντιστοιχούν στο **μοντέλο** και με δείκτη \mathbf{F} (full scale) αυτά που αντιστοιχούν στο **πρωτότυπο**, πρέπει να ισχύουν:

$$\begin{aligned} \text{❖ } \Pi_{1F} = \Pi_{1M} & \Rightarrow \frac{Z_F \cdot l_F}{\rho_F} = \frac{Z_M \cdot l_M}{\rho_M} \Rightarrow \frac{Z_F}{Z_M} = \frac{\rho_F}{\rho_M} \cdot \frac{l_M}{l_F} \Rightarrow \\ & \Rightarrow K_Z = \frac{K_\rho}{K_l} \Rightarrow K_Z = \frac{1}{K_\sigma \cdot K_l} \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\text{❖ } \Pi_{2F} = \Pi_{2M} \Rightarrow \frac{a_F}{l_F} = \frac{a_M}{l_M} \Rightarrow \frac{a_F}{a_M} = \frac{l_F}{l_M} \Rightarrow K_a = K_l = K_d \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \text{❖ } \Pi_{3F} = \Pi_{3M} & \Rightarrow \frac{E_{0F} \cdot l_F^2}{\rho_F \cdot I_{mF}} = \frac{E_{0M} \cdot l_M^2}{\rho_M \cdot I_{mM}} \Rightarrow \frac{E_{0F}}{E_{0M}} \cdot \left(\frac{l_F}{l_M}\right)^2 = \frac{\rho_F}{\rho_M} \cdot \frac{l_{mF}}{l_{mM}} \Rightarrow \\ & \Rightarrow K_{E_0} K_l^2 = K_\rho K_{I_m} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Έτσι έχουν προσδιοριστεί οι λόγοι κλίμακας όλων των μεγεθών που χρειάζονται στο πείραμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΓΙΑ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση βιβλιογραφίας σχετικής με τη χρήση των μεθόδων της Θεωρίας της Ομοιότητας σε υπό κλίμακα πειράματα. Παρουσιάζονται σχετικές έρευνες για διάφορα προβλήματα της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού, αλλά γίνεται και πιο συγκεκριμένη αναφορά στα υπό κλίμακα πειράματα προσδιορισμού της μεταβατικής αντίστασης γείωσης κατά την προσομοίωση του κεραυνικού πλήγματος. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση επικεντρώνεται τόσο στις εργασίες παλαιών, αλλά και σύγχρονων ερευνητών που έχουν ασχοληθεί με σχετικά προβλήματα.

3.1 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν ορισμένες εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, οι οποίες κάνουν χρήση της Θεωρίας της Ομοιότητας και των μεθόδων της. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ευρέως μοντέλα ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων για το σχεδιασμό υπό κλίμακα πειραμάτων προκειμένου να μελετηθεί, η σκέδαση και η μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι παρακάτω εργασίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον και ως προς τον τρόπο εφαρμογής της Διαστατικής Ανάλυσης.

3.1.1 Ηλεκτρομαγνητικά συστήματα με απώλειες

Οι S. Zhendong, D. Chunsheng και C. Jiayu, στην εργασία τους "*Dimensional Analysis and Physical Similarity of Lossy Electromagnetic Systems*" [17], εφαρμόζουν τη Θεωρία της Ομοιότητας για τη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων σε υλικά μέσα που παρουσιάζουν απώλειες. Στόχος τους είναι να προσδιορίσουν διαστατικές σχέσεις, που θα χρησιμοποιηθούν για την επέκταση των μετρήσεων από το μοντέλο σε σύγχρονα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα. Η προσέγγιση τους περιγράφεται παρακάτω [17]:

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο \mathbf{E} και \mathbf{B} (αγνοώντας τη χρονική εξάρτηση) σε υλικά μέσα που παρουσιάζουν απώλειες, ικανοποιούν τις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} + \gamma\mathbf{E} \quad (3.1)$$

Σε αυτό το φαινόμενο, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία \mathbf{E} και \mathbf{B} εξαρτώνται όχι μόνο από τη κατανομή της μαγνητικής διαπερατότητας $\mu (= \mu' - j\mu'')$, της διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon (= \epsilon' - j\epsilon'')$ και ηλεκτρικής αγωγιμότητας γ του μέσου, αλλά και από τις συνοριακές συνθήκες της περιοχής, στις οποίες ισχύει για το μέσο:

$$\mathbf{E} - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) = \eta\mathbf{n} \times \mathbf{H} \quad (3.2)$$

όπου η είναι η επιφανειακή αντίσταση του συνόρου και \mathbf{n} το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια.

Για να προκύψει η ομοιότητα μεταξύ του μοντέλου και του πρωτοτύπου, εφαρμόζεται η μέθοδος της Διαστατικής Ανάλυσης. Αναζητούνται δηλαδή αδιάστατα γινόμενα που σχηματίζονται από τις αντιπροσωπευτικές τιμές των μεγεθών $l, \omega, \epsilon, \mu, \epsilon'', \mu'', \gamma, \mathbf{E}$ και \mathbf{H} , που εμφανίζονται στις ανωτέρω εξισώσεις, όπου l είναι το αντιπροσωπευτικό μήκος του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος.

Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται το Θεώρημα Π, προκειμένου να διαμορφωθεί ένας αδιάστατος παράγοντας Π ως μονωνυμικός συνδυασμός των εννέα ποσοτήτων που περιγράφουν το πρόβλημα. Εν γένει για τις διαστάσεις της ποσότητας Π ισχύουν [17]:

$$[\Pi] = [l^a \omega^b \epsilon^c \epsilon''^d \mu^e \mu''^f E^g \gamma^h H^i] \quad (3.3)$$

όπου οι δείκτες $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ πρέπει να προσδιοριστούν.

Αντικαθιστώντας κάθε ένα από τα παραπάνω ανεξάρτητα μεγέθη που βρίσκονται στο δεξιό μέλος, με τις διαστάσεις τους ως προς τα θεμελιώδη μεγέθη L, M, T, A ισχύουν:

$$[\Pi] = [L]^a [T^{-1}]^b [M^{-1} L^{-3} T^4 A^2]^c [M^{-1} L^{-3} T^4 A^2]^d [MLT^{-2} A^{-2}]^e [MLT^{-2} A^{-2}]^f [MLT^{-3} A^{-1}]^g [M^{-1} L^{-3} T^3 A^2]^h [L^{-1} A]^i \quad (3.4)$$

Θεωρώντας ότι η φυσική ποσότητα Π είναι αδιάστατη και εξισώνοντας τους δείκτες για κάθε ένα από τα θεμελιώδη μεγέθη στο αριστερό και δεξιό μέλος, λαμβάνεται το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\left. \begin{aligned} a - 3c - 3d + e + f + g - 3h - i &= 0 \\ -c - d + e + f + g - h &= 0 \\ -b + 4c + 4d - 2e - 2f - 3g + 3h &= 0 \\ 2c + 2d - 2e - 2f - g + 2h + i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Από την επίλυση του συστήματος προκύπτουν οι αδιάστατες Π παράμετροι του προβλήματος [17]:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= l\omega\acute{\epsilon}E/H, \quad \Pi_2 = l\omega\acute{\epsilon}E/H, \quad \Pi_3 = l\omega\acute{\mu}H/E, \quad \Pi_4 = l\omega\acute{\mu}H/E, \quad \Pi_5 = l\gamma E/H, \\ \Pi_6 &= (\gamma + \omega\acute{\epsilon})/\omega\acute{\epsilon}, \quad \Pi_7 = \acute{\mu}/\acute{\mu}, \quad \Pi_8 = \omega l(\acute{\epsilon}\acute{\mu})^{1/2}, \quad \Pi_9 = \frac{E}{H} / \left(\frac{\acute{\mu}}{\acute{\epsilon}}\right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Προφανώς, οι παράμετροι Π_6 και Π_7 αντιπροσωπεύουν τις σχετικές ηλεκτρικές και μαγνητικές απώλειες του μέσου, αντίστοιχα. Η παράμετρος Π_8 μπορεί να απλοποιηθεί και να γραφτεί συναρτήσει του μήκους κύματος λ και της ταχύτητας του φωτός c , ως εξής [17]:

$$\Pi_8 = 2\pi l/\lambda \quad (3.7)$$

Η παράμετρος Π_8 αντιπροσωπεύει το σχετικό μήκος του συστήματος. Ενώ η παράμετρος Π_9 αντιπροσωπεύει είτε τη σχετική εσωτερική αντίσταση του μέσου ή τη σχετική επιφανειακή αντίσταση του συνόρου.

Εφόσον η ποσότητα Π εξαρτάται από εννέα διαφορετικά μεγέθη, η σχέση που τα συνδέει θα είναι εν γένει της μορφής [17]:

$$F(\Pi, l, \omega, \acute{\epsilon}, \acute{\mu}, \acute{\epsilon}, \acute{\mu}, \gamma, \mathbf{E}, \mathbf{H}) = 0 \quad (3.8)$$

Με βάση όμως την αρχή της διαστατικής ομοιότητας, η σχέση αυτή μπορεί να πάρει την ακόλουθη γενικευμένη διαστατική μορφή:

$$\Pi = \varphi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) \quad (3.9)$$

Στη περίπτωση που το μέσο είναι ο αέρας και για το μοντέλο και για το πρωτότυπο, τότε ισχύει $\acute{\epsilon} = \epsilon_0$, $\acute{\epsilon} = 0$, $\acute{\mu} = \mu_0$, $\acute{\mu} = 0$ και $\gamma = 0$ και άρα $\Pi_2 = \Pi_4 = \Pi_5 = 0$ και $\Pi_6 = \Pi_7 = 0$.

Άλλωστε, επειδή η σχετική εσωτερική αντίσταση του αέρα είναι μια σταθερά,

$$\Pi_9 = \frac{\eta}{\left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2}} = 1 \quad (\text{στον αέρα}) \quad (3.10)$$

ενώ σε όρους της εξίσωσης (3.2), η σχετική επιφανειακή αντίσταση του συνόρου μπορεί να γραφτεί,

$$\Pi_9 = \frac{E_t/H_t}{\left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2}} = \frac{\eta}{\eta_0} = \eta_s \quad (\text{στο σύνορο}) \quad (3.11)$$

όπου E_t και H_t είναι οι εφαπτομενικές συνιστώσες των \mathbf{E} , \mathbf{H} στο σύνορο. Αντίστοιχα, μπορεί εν γένει να γραφεί η σχέση μεταξύ της αδιάστατης ποσότητας Π και των μεταβλητών αδιάστατων ποσοτήτων l/λ και η_s μέσω της σχέσης (3.9) ως εξής [17]:

$$\Pi = f\left(\frac{l}{\lambda}, \eta_s\right) \quad (3.12)$$

Παρόλο που η μέθοδος αυτή δεν προσδιορίζει ακριβώς τη μορφή της συνάρτησης f , η παραπάνω έκφραση (3.12) οδηγεί σε ένα σημαντικό συμπέρασμα. Αν θεωρηθεί ότι ο λόγος $\frac{l}{\lambda}$ και η σχετική επιφανειακή αντίσταση η_s στο σύνορο είναι ίδιες και για το πρωτότυπο και για το μοντέλο αντίστοιχα, τότε οι τιμές της $f\left(\frac{l}{\lambda}, \eta_s\right)$ θα είναι επίσης ίδιες και για τα δύο συστήματα. Ως εκ τούτου ίδια θα είναι και η τιμή του Π .

Εφόσον ολόκληρο το σύστημα έχει γενικά το ίδιο μήκος κύματος λ , η εξίσωση (3.7) υποδηλώνει ότι τα συστήματα που έχουν όμοια ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά, θα πρέπει πρώτα να είναι γεωμετρικά όμοια. Έπειτα, η εξίσωση (3.12) λέει ότι: για δύο γεωμετρικά όμοια συστήματα, όσο οι τιμές των $\frac{l}{\lambda}$ και η_s είναι οι ίδιες και στα δύο αντίστοιχα, τότε θα θεωρούνται επιπλέον ότι είναι φυσικά όμοια και συνεπώς οι πειραματικές τιμές του Π στο μοντέλο θα μπορούν να επεκταθούν και στο πρωτότυπο [17].

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εν λόγω εργασία δεν εφαρμόζεται αυστηρά η διαδικασία της Διαστατικής Ανάλυσης όπως περιγράφηκε στο 2^ο Κεφάλαιο με τον υπολογισμό του rank του πίνακα των διαστάσεων και την επιλογή διαστατικά ανεξάρτητης ομάδας και Π -παραμέτρων βάσει αυτού. Με αφετηρία τις εξισώσεις του Maxwell γίνεται μια απλή “αδιαστατοποίηση” του προβλήματος.

3.1.2 Υπολογισμός RCS

Η τιμή RCS (Radar cross-section) αποτελεί ένα μέτρο του πόσο ανιχνεύσιμο είναι ένα αντικείμενο (στόχος) από ένα σύστημα ραντάρ. Μεγάλη τιμή του RCS σημαίνει ότι το αντικείμενο είναι πιο εύκολα ανιχνεύσιμο. Γενικά, ένα αντικείμενο αντανακλά ένα ποσό της ακτινοβολίας που στέλνει το ραντάρ. Το ποσό αυτό της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που επιστρέφει στην πηγή (ραντάρ) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το υλικό κατασκευής του αντικειμένου, το απόλυτο μέγεθος του αντικειμένου, το σχετικό μέγεθος του αντικειμένου (μέγεθος σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας), τη γωνία πρόσπτωσης και τη γωνία ανάκλασης της ακτινοβολίας κ.α. Ο υπολογισμός της τιμής του RCS των υλικών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ανάπτυξης της λεγόμενης τεχνολογίας stealth, που βρίσκει εφαρμογή στη πολεμικά αεροσκάφη και τους βαλλιστικούς πυραύλους για την απόκρυψη τους από τα εχθρικά ραντάρ.

Στην εργασία τους, "*Physical Similarity of Lossy Scatterers*" [18], οι S. Zhendong και L.Hongwei εφαρμόζουν τη Θεωρία της Ομοιότητας σε ηλεκτρομαγνητικά συστήματα με απώλειες, για να αναλύσουν τη συμπεριφορά υλικών που σκεδάζουν την ακτινοβολία και παρουσιάζουν απώλειες.

Μοντέλα υπό κλίμακα των σκεδαστών (scatterers) χρησιμοποιούνται εκτενώς για πειράματα τα τελευταία χρόνια. Με αυτή τη μέθοδο, τόσο το μέγεθος του σκεδαστή, όσο και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πρέπει να μειωθούν αναλογικά με βάση την κλίμακα, έτσι, ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις της ομοιότητας του μοντέλου. Άλλωστε, για πειραματικές δοκιμές σε σκεδαστές, οι συστατικές παράμετροι των απορροφητικών υλικών πρέπει επίσης να ικανοποιούν τις απαιτήσεις για φυσική ομοιότητα [18].

Σε αυτό το πρόβλημα, οι Zhendong και Hongwei πρότειναν ότι η σχετική τιμή του RCS, σ/λ^2 , δηλαδή ο λόγος του RCS (σ) του σκεδαστή προς το τετράγωνο του μήκους κύματος (λ^2), για έναν ατελώς αγωγίμο σκεδαστή μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μια συνάρτηση του σχετικού μήκους $\frac{l}{\lambda}$ και της σχετικής επιφανειακής αντίστασης η_s στο όριο του σκεδαστή [18]:

$$\frac{\sigma}{\lambda^2} = f\left(\frac{l}{\lambda}, \eta_s\right) \quad (3.13)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή το πρωτότυπο και το μοντέλο του σκεδαστή, που έχουν την ίδια τιμή σ/λ^2 , πρέπει να είναι πρώτα γεωμετρικά όμοια. Έπειτα μόνο οι δύο αδιάστατες ποσότητες $\frac{l}{\lambda}$ και η_s είναι τα ορίσματα που επηρεάζουν τη τιμή του σ/λ^2 . Όσο οι τιμές των $\frac{l}{\lambda}$ και η_s είναι ίδιες αντίστοιχα και για το πρωτότυπο και για το μοντέλο, τότε θεωρείται ότι ισχύει η φυσική ομοιότητα μεταξύ τους και συνεπώς οι πειραματικές τιμές του σ/λ^2 στο μοντέλο θα μπορούν να επεκταθούν και στο πρωτότυπο. Αυτή είναι η ιδανική περίπτωση για το πείραμα υπό κλίμακα [18].

Όσοσο είναι πρακτικά δύσκολο να ικανοποιούνται ταυτόχρονα όλες οι απαιτήσεις για φυσική ομοιότητα, ειδικά για τις συστατικές παραμέτρους των απορροφητικών υλικών εξαιτίας της εξάρτησης τους από τη συχνότητα. Μερικές φορές, ο πειραματικός εξοπλισμός για το πρωτότυπο πρέπει να χρησιμοποιηθεί και στις μετρήσεις για το μοντέλο, λόγω έλλειψης του κατάλληλου εξοπλισμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, επομένως, πρέπει να ληφθούν υπόψη η επίδραση της διακύμανσης του μεγέθους του σκεδαστή ή του μήκους κύματος της ακτινοβολίας και η επίδραση λόγω μεταβολών στις ιδιότητες των απορροφητικών υλικών.

Με άλλα λόγια θα πρέπει, ανατρέχοντας στη θεωρητική μελέτη, να αναλυθεί η επίδραση στην τιμή του σ/λ^2 , λόγω της απόκλισης της ομοιότητας μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου. Για να περιγραφεί ποσοτικά αυτή η επίδραση, εισάγεται η έννοια του φυσικού παράγοντα κλίμακας q^2 , ο οποίος συνήθως ορίζεται ως ο λόγος του RCS του πρωτοτύπου σ_p προς το RCS του μοντέλου σ_m [18]:

$$q^2 = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \quad (3.14)$$

Παρόλο που η θεωρία της φυσικής ομοιότητας δεν προσδιορίζει τη συνάρτηση f στην εξίσωση (3.13), η διαστατική ανάλυση όμως λέει ότι η διαστατική συνάρτηση είναι πάντα ένα μονώνυμο. Οπότε η τιμή του σ/λ^2 για ένα σκεδαστή με απώλειες που έχει σχετική επιφανειακή αντίσταση η_s , μπορεί να γραφτεί ως εξής [18]:

$$\frac{\sigma}{\lambda^2} = \frac{\sigma_0}{\lambda^2} \left| \frac{1-\eta_s}{1+\eta_s} \right|^n \quad (3.15)$$

όπου σ_0 είναι η τιμή RCS πανομοιότυπου σκεδαστή, που η επιφάνεια του όμως είναι τέλεια αγωγίμη, και το n εξαρτάται από τη διαμόρφωση των σκεδαστών. Και η τιμή του σ_0 και η τιμή του η_s προκύπτουν από τις μετρήσεις στο μοντέλο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο φυσικός παράγοντας κλίμακας q^2 μεταξύ του RCS του πρωτοτύπου με σχετική επιφανειακή αντίσταση η_{sp} και του RCS του μοντέλου με σχετική επιφανειακή αντίσταση η_{sm} είναι [18]:

$$q^2 = \frac{\sigma_P}{\sigma_m} = p^2 \left| \frac{1-\eta_{sp}}{1+\eta_{sp}} \right|^n \left| \frac{1+\eta_{sm}}{1-\eta_{sm}} \right|^n, \text{ (για τις μεταβολές της επιφανειακής αντίστασης)} \quad (3.16)$$

όπου p είναι ο γεωμετρικός παράγοντας κλίμακας μεταξύ του πρωτοτύπου και του μοντέλου, δηλαδή ο λόγος μεταξύ αντιστοιχών μηκών των σκεδαστών.

3.2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ

3.2.1 Το μοντέλο του Korsuncev

Οι πρώτοι ερευνητές που επιχείρησαν να μοντελοποιήσουν τη δυναμική εμπέδηση ενός ηλεκτροδίου ήταν οι Bellaschi, Armington και Snowden το 1942. Περιέγραψαν τη σύνθετη αντίσταση ενός ηλεκτροδίου σε όρους μιας ομοιόμορφης ζώνης ιονισμού, η οποία περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, όποτε γινόταν υπέρβαση της κρίσιμης τιμής της έντασης διάσπασης του εδάφους, E_0 . Αυτή η αρχή υπήρξε από τότε η βάση για σχεδόν όλα τα μεταγενέστερα μοντέλα που επιχείρησαν να προβλέψουν την εμπέδηση ηλεκτροδίων σε έδαφος, όταν λαμβάνονταν υπόψη οι διαδικασίες εκφόρτισης και ιονισμού. Έτσι αναπτύχθηκαν εξισώσεις που περιγράφουν την κρουστική αντίσταση σφαιρικών ηλεκτροδίων και ηλεκτροδίων ράβδου και με το καιρό προτάθηκαν νέες βελτιώσεις για τις χρονικές σταθερές του φαινομένου του ιονισμού και του απιονισμού [19].

Το 1958 ο Korsuncev εφάρμοσε τη θεωρία της ομοιότητας για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών συγκεντρωμένων ηλεκτροδίων γείωσης κατά τη διάρκεια του κεραυνικού πλήγματος. Έτσι με χρήση του Θεωρήματος Π, περιέγραψε την κρουστική αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων με τη βοήθεια δύο αδιάστατων παραμέτρων, Π_1 και Π_2 , ως εξής [19,27]:

$$\blacksquare \quad \Pi_1 = \frac{Zs}{\rho} \quad (3.17)$$

$$\blacksquare \quad \Pi_2 = \frac{\rho l}{E_0 s^2} \quad (3.18)$$

$$\blacksquare \quad \Pi_1 = f(\Pi_2) \quad (3.19)$$

όπου: Z η κρουστική αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου, σε Ω ,
 s η χαρακτηριστική διάσταση του ηλεκτροδίου, σε m ,
 ρ η ειδική αντίσταση της γης, σε $\Omega \cdot m$,
 E_0 η κρίσιμη ένταση ιονισμού, σε V/m ,
 I η ένταση του κρουστικού ρεύματος, σε A ,
 f η συνάρτηση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ Π_1 και Π_2 (θα προσδιοριστεί πειραματικά).

Παρατηρούμε σε αυτό το σημείο ότι οι Π παράμετροι που προσδιορίζουν τη μεταβατική αντίσταση Z και την κρίσιμη ένταση ιονισμού E_0 είναι ίδιες με αυτές που υπολογίσαμε για το πείραμα της παρούσας διπλωματικής στο προηγούμενο κεφάλαιο, με μόνη διαφορά την αντικατάσταση του χαρακτηριστικού μεγέθους s από το μήκος l του ηλεκτροδίου. Τα υπόλοιπα δύο μεγέθη, η ακτίνα a και το βάθος εγκατάστασης d που δίνουν ανάλογα με το είδος του ηλεκτροδίου τη μία επιπλέον παράμετρο του προβλήματος εκφράζονται μέσω του s , όπως θα δούμε παρακάτω. Συνεπώς, προέκυψαν ουσιαστικά οι ίδιες αδιάστατες Π παράμετροι με αυτές του Korsuncev.

Ο Korsuncev, με βάση τις παραπάνω σχέσεις, δημοσίευσε μία συλλογή σημειακών δεδομένων, τα οποία δίνουν μια πειραματική καμπύλη, $f(\Pi_2)$.

Αυτή η καμπύλη παρείχε τη δυνατότητα εφαρμογής σε πολλά προβλήματα των μηχανικών, αλλά πρώτα έπρεπε να διευκρινιστούν ορισμένοι παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες ήταν:

- Ο προσδιορισμός της τιμής της E_0 .
- Ο προσδιορισμός της κρουστικής αντίστασης γείωσης, Z .
- Ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής διάστασης s .

Πρώτα ορίστηκε η μεταβατική αντίσταση ως:

$$z(t) = v(t)/i(t) \quad (3.20)$$

όπου $z(t)$, $v(t)$ και $i(t)$ οι χρονικές συναρτήσεις αντίστασης, τάσης και έντασης ρεύματος αντίστοιχα.

Υπάρχουν τέσσερις παράμετροι για την κρουστική αντίσταση γείωσης [19,23]:

$$\blacksquare Z_1 = \max(z(t)) \quad (3.21)$$

$$\blacksquare Z_2 = V_m/I_{vm} \quad (3.22)$$

$$\blacksquare Z_3 = V_m/I_m \quad (3.23)$$

$$\blacksquare Z_4 = V_{im}/I_m \quad (3.24)$$

όπου $\max(z(t))$ είναι η μέγιστη τιμή της μεταβατικής αντίστασης, V_m η μέγιστη τιμή τάσης, I_m η μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος, V_{im} η τάση στην οποία το ρεύμα γίνεται μέγιστο και I_{vm} η ένταση ρεύματος στην οποία η τάση γίνεται μέγιστη.

Οι δύο επικρατέστεροι ορισμοί, που χρησιμοποιούνται και σε αυτήν την εργασία, είναι οι:

$$Z_3 = V_m/I_m \quad (\text{κατά Bellaschi και Korsuncev}) \quad (3.25)$$

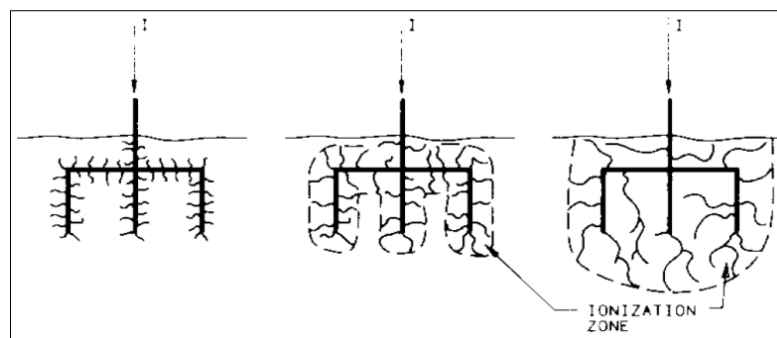
$$Z_4 = V_{im}/I_m \quad (\text{κατά Liew και Darveniza}) \quad (3.26)$$

Εφαρμόζοντας το κριτήριο της ομοιότητας, ο Korsuncev βάσισε το φυσικό του μοντέλο στην ιδέα μιας ομοιόμορφης ζώνης ιονισμού, τα όρια της οποίας καθορίζονται από την κρίσιμη ένταση ιονισμού, E_0 , του εδάφους. Μέσα σε αυτή τη ζώνη η αντίσταση θεωρείται μηδενική. Συνεπώς, στα όρια της ζώνης ιονισμού ισχύει [19]:

$$E = E_0 = \rho j \quad (3.27)$$

όπου: E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο έδαφος
 ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους
 j η πυκνότητα του ρεύματος

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ανάπτυξη μιας ομοιόμορφης ζώνης ιονισμού.



Σχήμα 3.1: Ανάπτυξη μιας ομοιόμορφης ζώνης ιονισμού [19]

Παρατηρείται ότι, καθώς το ρεύμα αυξάνει, τα όρια της ζώνης μεγαλώνουν και "αγκαλιάζουν" ολόκληρο το ηλεκτρόδιο. Οπότε πλέον το ακριβές σχήμα του ηλεκτροδίου δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, παρά μόνο οι "συνολικές" διαστάσεις της ζώνης ιονισμού. Έτσι ο Korsuncev εισήγαγε την ιδέα της χαρακτηριστικής διάστασης s , η οποία είναι μια ένδειξη των "συνολικών" διαστάσεων του ηλεκτροδίου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής διαμόρφωση του ηλεκτροδίου. Ο Korsuncev όρισε τη χαρακτηριστική διάσταση s , ως την απόσταση του γεωμετρικού κέντρου του ηλεκτροδίου από το πιο μακρινό σημείο του [19].

Η πυκνότητα του ρεύματος γύρω από το ηλεκτρόδιο θα ήταν ανάλογη του I/s^2 , ενώ το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το ηλεκτρόδιο θα μπορούσε να αναπαρασταθεί με $\rho I/s^2$. Ο ιονισμός του εδάφους θεωρήθηκε ότι αρχίζει μόλις αυτή η τιμή ξεπερνούσε την κρίσιμη αντοχή ιονισμού του εδάφους.

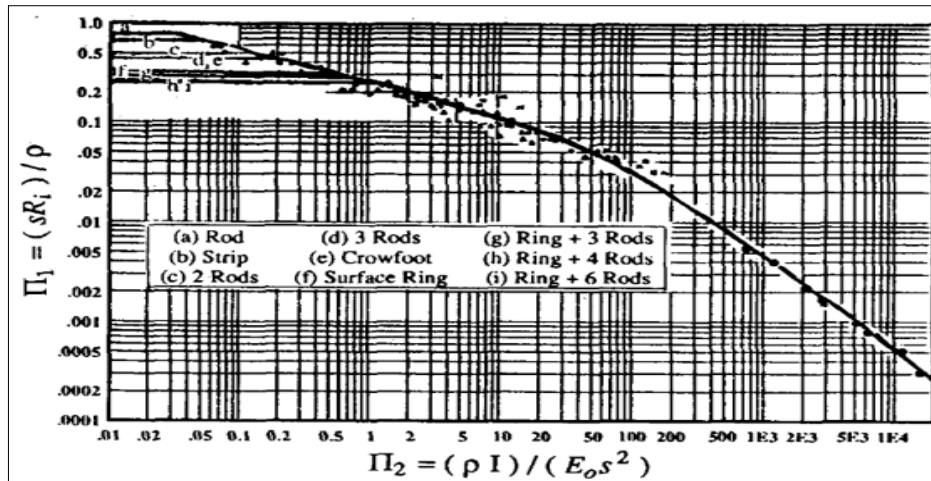
Κάνοντας ορισμένες απλοποιήσεις, αγνοώντας πιθανές χρονοεξαρτημένες επιδράσεις, η κρουστική αντίσταση ενός ηλεκτροδίου μπορούσε τότε να περιγραφεί με τη βοήθεια πέντε μεταβλητών: a, s, I, E_0 και ρ . Όλες αυτές οι μεταβλητές συνδέονται μεταξύ τους όπως φάνηκε με τις σχέσεις (3.17) και (3.18) και χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της Θεωρίας της Ομοιότητας, ώστε να μειωθούν τελικά σε δύο αδιάστατες ποσότητες, τις Π_1 και Π_2 [19].

Η Π_1 μπορεί να ερμηνευτεί ως μία κανονικοποιημένη εμπέδηση ή ως μια εμπέδηση ανά μονάδα ειδικής αντίστασης για μια μονάδα μήκους ηλεκτροδίου. Είναι δηλαδή μια αδιάστατη παράμετρος.

Η Π_2 περιγράφει το λόγο μεταξύ της θεωρητικής ηλεκτρικής έντασης πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, ($\rho I/s^2$) και της κρίσιμης σταθεράς ιονισμού του εδάφους, E_0 . Η Π_2 είναι και αυτή μια αδιάστατη παράμετρος.

Η κανονικοποιημένη εμπέδηση Π_1 αναμένεται να μειωθεί, καθώς το παρακείμενο στο ηλεκτρόδιο ηλεκτρικό πεδίο (και συνεπώς και η Π_2) αυξάνεται. Η συμπεριφορά διαφορετικών τύπων εδάφους λαμβάνεται υπόψη από την E_0 . Ένα έδαφος με χαμηλή τιμή E_0 θα είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές της παραμέτρου Π_2 , το οποίο με τη σειρά του θα οδηγούσε σε χαμηλότερες τιμές της Π_1 .

Πολύ αργότερα ο *Popolanský* συνέλεξε πειραματικά δεδομένα από διάφορες πηγές και τα εξέφρασε στις παραμέτρους Π_1 και Π_2 του Korsuncev, διαπιστώνοντας ότι ακολουθούν μια καμπύλη με χαμηλή διασπορά, όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 3.1** [20].



Διάγραμμα 3.1: Παράμετροι Π_1 ως προς Π_2 κατά Popolanský και Korsuncen [20]

Για κάθε γεωμετρία ηλεκτροδίου, καθορίζεται μια τιμή της παραμέτρου Π_1 σε όρους της αντίστασης της για χαμηλά ρεύματα και συχνότητες. Οι αντιστάσεις αρκετών γεωμετριών ηλεκτροδίων είναι γνωστές στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται έτσι για τον υπολογισμό των αντιστοιχών τιμών Π_1 .

Για παράδειγμα, η αντίσταση ως προς την απομακρυσμένη γη ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου σε ομογενές έδαφος δίνεται από τον Rudenberg σε όρους ειδικής αντίστασης εδάφους ρ και ακτίνας s από την παρακάτω εξίσωση [20,28]:

$$R_{\text{ημισφαιρικό}} = \frac{\rho}{2\pi s} \quad \text{άρα} \quad \Pi_1(\text{ημισφαιρικό}) = \frac{1}{2\pi} = 0,159 \quad (3.28)$$

Ομοίως, η αντίσταση μιας απλής ράβδου ως προς απέραντο ημιεπίπεδο, σε όρους μήκους ράβδου s , ακτίνας r και ειδικής αντίστασης ρ δίνεται από τον Rudenberg ως εξής [20,28]:

$$R_{\text{ράβδου}} = \frac{\rho}{2\pi s} \ln\left(\frac{2s}{r}\right) \quad (3.29)$$

Και άρα, για ένα εύρος τιμών του λόγου s/r από 75 έως 300 προκύπτει ότι:

$$\Pi_1(\text{ράβδου}) = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{r}\right) = 0,8 - 1,0 \quad (3.30)$$

Η προσέγγιση αυτή του Korsuncen δείχνει ότι, οι τιμές των Π_1 παραμέτρων βρίσκονται ανάμεσα στο 0,2 και το 0,8, με τα ημισφαιρικά ηλεκτρόδια να παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές και τις απλές ράβδους τις υψηλότερες.

Οι τιμές της παραμέτρου Π_1 μπορούν να προσεγγιστούν επίσης σε όρους της απόστασης s και της επιφάνειας A , η οποία ορίζεται ως το ισοδύναμο εμβαδό της περιοχής επαφής του ηλεκτροδίου, εάν ήταν τυλιγμένο σε χαρτί. Όταν η εξίσωση (3.27) εκφράζεται σε όρους χαρακτηριστικής απόστασης s και επιφάνειας επαφής $A = 2\pi r s$ για ένα ηλεκτρόδιο απλής ράβδου, η τιμή της παραμέτρου Π_1 προκύπτει [20]:

$$\Pi_1(\text{ράβδου}) = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{4\pi s^2}{A}\right) = 0,4028 + \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{s^2}{A}\right) \quad (3.31)$$

Στην περίπτωση του ημισφαιρικού ηλεκτροδίου είναι $A = 2\pi s^2$ και άρα ο λόγος s^2/A είναι σταθερός αριθμός. Οπότε, μετασχηματίζοντας την εξίσωση (3.31) για το συγκεκριμένο είδος ηλεκτροδίου προκύπτει [20]:

$$\Pi_1(\text{ημισφαιρικό}) = \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \ln e = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{2\pi s^2 e}{A}\right) = 0,4517 + \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{s^2}{A}\right) \quad (3.32)$$

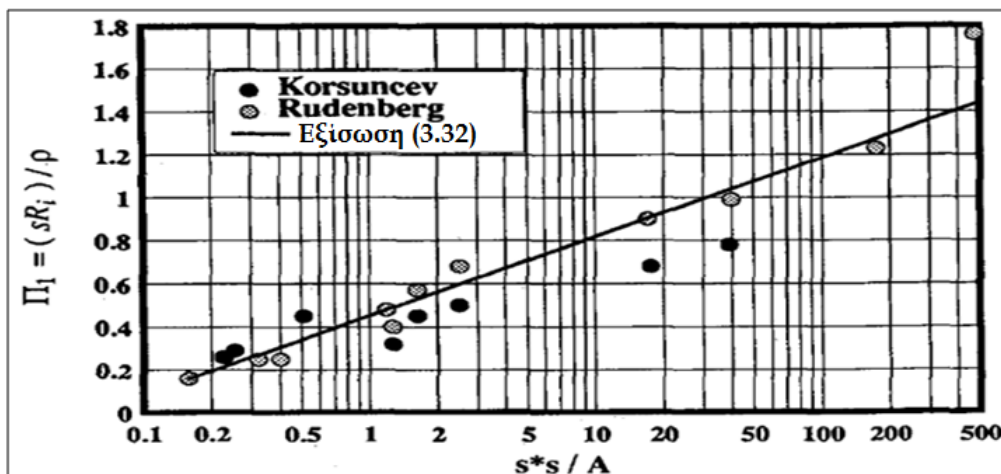
Η σύγκριση, μεταξύ των τιμών της παραμέτρου Π_1 για το ηλεκτρόδιο απλής ράβδου από τον Korsuncev και τον Rudenberg, φανερώνει μια αισθητή διαφορά περί το 20%. Ωστόσο, όταν η εξίσωση (3.32) για τα ημισφαιρικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιηθεί για τη ράβδο γείωσης, το σφάλμα στην εκτίμηση του Π_1 περιορίζεται αρκετά περίπου στο 6%. Από τα παραπάνω, προκύπτει μια απλή τεχνική για να ληφθεί η αρχική αντίσταση γείωσης οποιουδήποτε είδους ηλεκτροδίου. Η χαρακτηριστική απόσταση και η επιφάνεια του ηλεκτροδίου υπολογίζονται και η εξίσωση (3.32) δίνει την τιμή της παραμέτρου Π_1 .

Έπειτα χρησιμοποιείται η σχέση (3.17) και υπολογίζεται η αρχική αντίσταση R_{init} . Στον παρακάτω πίνακα γίνεται η εφαρμογή της απλής αυτής τεχνικής για διάφορα ηλεκτρόδια και γίνεται η σύγκριση με τα μοντέλα του Korsuncev και του Rudenberg [20].

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά αρχικής αντίστασης ηλεκτροδίου γείωσης.
Όλες οι ακτίνες των ράβδων είναι 0,01m, τα μήκη τους 2,5m, οι αποστάσεις 0,5m [20]

Διάταξη Ηλεκτροδίων	$\frac{s^2}{A}$	Π_1 K[27]	Π_1 R[28]	Π_1 Εξ. (3.32)
30-m Counterpoise	477	----	1.76	1.43
10-m Counterpoise	174	----	1.23	1.27
2.5-m Rod	40	0.78	0.99	1.04
3.5-m Strip	17	0.68	0.90	0.91
2 Rods, $R=.5$ m	2.5	0.50	0.68	0.60
3 Rods, $R=.5$ m	1.63	0.45	0.57	0.53
7-m Surface Ring	1.27	0.32	0.40	0.49
4 Rods, $R=.5$ m	1.19	----	0.48	0.48
Crowfoot	0.51	0.45	----	0.34
10-m Disk @ 10m	0.40	----	0.25	0.30
10-m Surface Disk	0.32	----	0.25	0.27
7-m Ring, 3 Rods	0.25	0.29	----	0.23
9-m Ring, 4 Rods	0.22	0.26	----	0.22
12-m Ring, 6 Rods	0.22	0.26	----	0.22
10-m Hemisphere	0.16	----	0.16	0.16

Στο **Διάγραμμα 3.2** παρουσιάζεται μια γραφική παράσταση των τιμών της Π_1 σε σχέση με το νεπέριο λογάριθμο του λόγου s^2/A . Τόσο τα σημεία που προέκυψαν από το μοντέλο του Korsuncev, όσο και από του Rudenberg, είναι διεσπαρμένα γύρω από ευθείες [20].



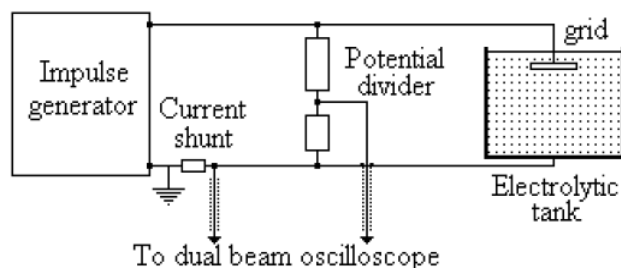
Διάγραμμα 3.2: Παράμετρος Π_1 ως προς s^2/A .
Σημειακά δεδομένα κατά Korsuncev και Rudenberg [20]

3.2.2 Μεταβατική αντίσταση πλεγμάτων γείωσης

Οι I.F. Gonos, F.V. Topalis και I.A. Stathopoulos στην εργασία τους “*Modelling of a Grounding Grid using an Electrolytic Tank*” [23] μελετούν τη μεταβατική αντίσταση πλεγμάτων γείωσης υπό την επίδραση κεραυνικών ρευμάτων, χρησιμοποιώντας υπό κλίμακα μοντέλα στο εσωτερικό ηλεκτρολυτικής δεξαμενής.

Σημειώνεται ότι, η τιμή της αντίστασης των συστημάτων γείωσης στη μόνιμη κατάσταση διαφέρει από την αντίστοιχη τιμή σε μεταβατικές συνθήκες. Αυτό το γεγονός είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αποφυγή καταστροφών στις υπό προστασία εγκαταστάσεις, λόγω υψηλής τιμής της αντίστασης γείωσης κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων (π.χ. κεραυνικό πλήγμα). Για αυτό το λόγο καθίσταται αναγκαία η μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης. Η συγκεκριμένη μελέτη είναι πρακτικά πιο εύκολο και οικονομικό να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας μοντέλα κλίμακας στο χώρο ενός εργαστηρίου υψηλών τάσεων.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.2: Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της μεταβατικής αντίστασης πλεγμάτων γείωσης [23]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα σημεία της πειραματικής διαδικασίας [23]:

- Χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων κυματομορφής $8/20\mu\text{s}$ με μέγιστη τιμή ρεύματος 25kA . Η καταγραφή των μετρήσεων έγινε μέσω παλμογράφου, ενώ ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών κρούσεων ήταν τουλάχιστον 1 min .
- Παρόλο που το ιδανικό σχήμα ηλεκτρολυτικής δεξαμενής για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι το ημισφαιρικό, πρακτικές δυσκολίες οδηγούν στη χρήση κυλινδρικής δεξαμενής. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ορθογώνια δεξαμενή με διαστάσεις $1,5 \times 1,5 \times 1,0\text{ m}^3$.
- Για την προσομοίωση του πολυστρωματικού από πλευράς ειδικής αντίστασης εδάφους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο δύο στρωμάτων. Το κάτω στρώμα αποτελείται από ένα gel χαμηλότερης ειδικής αντίστασης από το επάνω. Το επάνω στρώμα μπορεί να είναι κάποιο διάλυμα νερού. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μόνο διάλυμα νερού βρύσης με αλάτι (αντιπροσωπεύει την ομογενή γη). Η ειδική αντίσταση μπορούσε να μεταβληθεί μεταβάλλοντας την αλατότητα του νερού. Συγκεκριμένα, η αγωγιμότητα του νερού ρυθμίστηκε στα $2,5\text{ mS/cm}$.
- Ο λόγος κλίμακας που επιλέχτηκε, με βάση και τις διαστάσεις τις δεξαμενής, ήταν $1:100$. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τετραγωνικά, χάλκινα πλέγματα γείωσης, εκ των οποίων το ένα αποτελείτο εσωτερικά από 16 "τετράγωνα" και το άλλο από 4 "τετράγωνα". Και τα δύο πλέγματα είχαν εξωτερικές διαστάσεις $20 \times 20\text{ cm}^2$ και τοποθετήθηκαν στο κέντρο της δεξαμενής σε βάθος 2 cm . Η μηχανική υποστήριξη των πλεγμάτων έγινε με πετονιά, προκειμένου να επιτευχθεί η οριζόντια θέση του πλέγματος με τη μικρότερη δυνατή παραμόρφωση της διάταξής του.
- Σημειώνεται ότι, η μέγιστη διάσταση ενός πλέγματος (η διαγώνιος σε τετραγωνικό πλέγμα) πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 με 3 φορές μικρότερη από την ελάχιστη διάσταση της δεξαμενής. Το βάθος της δεξαμενής δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από το μισό της πλευρικής διάστασης της δεξαμενής.

Τέλος, ο υπολογισμός της μεταβατικής αντίστασης του πλέγματος έγινε μέσω των μετρήσεων που καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας τις τέσσερις παραμέτρους της κρουστικής αντίστασης γείωσης (παραμέτροι Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) που αναφέρθηκαν προηγουμένως (Εξισώσεις 3.21-3.24).

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν [23]:

- ✓ Οι μέσες τιμές των παραμέτρων αντίστασης Z_2, Z_3, Z_4 για το πλέγμα που αποτελείται από 4 "τετράγωνα" είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για το πλέγμα που αποτελείται από 16 "τετράγωνα". Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού το πλέγμα των 16 "τετραγώνων" έχει μικρότερη αντίσταση λόγω του μεγαλύτερου συνολικού μήκους αγωγών που διαθέτει.
- ✓ Οι μέσες τιμές των παραμέτρων αντίστασης Z_2, Z_3, Z_4 είχαν μεγαλύτερες τιμές στα εξωτερικά από ότι στα εσωτερικά σημεία των δύο πλεγμάτων. Αυτό συνεπάγεται ότι ένα σύστημα γείωσης είναι πιο αποτελεσματικό, αν οι καθοδικοί αγωγοί συνδεθούν στα εσωτερικά σημεία του πλέγματος γείωσης.

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΛΟΙΩΝ

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει εργασίες, οι οποίες περιγράφουν αναλυτικά τη διεξαγωγή πειραμάτων σε υπό κλίμακα μοντέλα πλοίων. Παρουσιάζονται η πειραματική διαδικασία, οι υπό μελέτη παράμετροι και τα συμπεράσματα των ερευνητών. Αξίζει να τονιστεί ότι στις συγκεκριμένες εργασίες επελέγησαν αυθαίρετα οι γεωμετρικοί λόγοι κλίμακας των αποστάσεων χωρίς να γίνει εφαρμογή κάποιας μεθόδου της Θεωρίας της Ομοιότητας.

3.3.1 Ελλειπτικό μοντέλο για την εκτίμηση της ζώνης προστασίας πλοίου

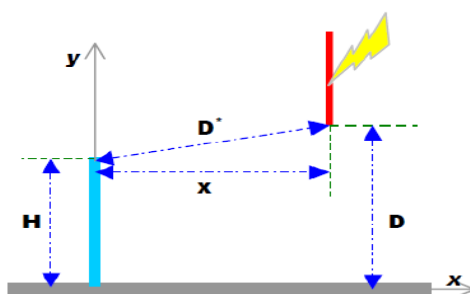
Το 2007 ο S. Grzybowski και η ομάδα του, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου της Πολιτείας του Μισσισιπι, παρουσίασαν ένα ελλειπτικό μοντέλο για την εκτίμηση της απόστασης διάσπασης μιας ράβδου Franklin και της ζώνης προστασίας που αυτή δημιουργεί σε ένα πλοίο. Η ζώνη προστασίας προσδιορίζεται από το ρεύμα του κεραυνού, το ύψος του αλεξικέρανου (ράβδος Franklin) και την πολικότητα του κεραυνού. Οι μετρήσεις τους έγιναν σε υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου.

Για τον υπολογισμό της απόστασης διάσπασης προτείνεται από τη βιβλιογραφία η εξίσωση $S = 10 \cdot (I_S)^{0.65}$, όπου S η απόσταση διάσπασης σε m και I_S το ρεύμα του κεραυνού σε kA .

Το επικρατέστερο μοντέλο που σχετίζεται με την παραπάνω σχέση και τη ζώνη προστασίας της ράβδου Franklin είναι το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας. Η γενική ιδέα αυτού του μοντέλου υποθέτει ότι: η απόσταση διάσπασης προς το έδαφος (D), αλλά και η απόσταση διάσπασης προς την κορυφή του αλεξικέραυνου (D^*) (Σχήμα 3.3), και για τις δύο περιπτώσεις πολικότητας του κεραυνού, έχουν το ίδιο μήκος. Η σχέση μεταξύ D και D^* είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της περιοχής προστασίας ενός αλεξικέραυνου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει και να προβλέψει το τελικό σημείο που πλήττουν οι κεραυνοί [21].

Εκτίμηση απόστασης διάσπασης

Για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ D και D^* χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.3: Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της απόστασης διάσπασης μιας ράβδου Franklin [21]

Για το συγκεκριμένο ύψος H της ράβδου και της απόστασης D μεταξύ του άκρου της ηλεκτρισμένης ράβδου και του εδάφους, μεταβάλλοντας την απόσταση X μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων αναπτύχθηκαν σπινθήρες είτε προς τη ράβδο, είτε και προς το έδαφος για το ίδιο επίπεδο κρουστικής τάσης ($1.2/50\mu s$). Στη διάταξη, η ηλεκτρισμένη ράβδος αντιπροσωπεύει τον κατερχόμενο οχετό, ένα αγώγιμο φύλλο το έδαφος και για αλεξικέραυνο χρησιμοποιείται μια ράβδος Franklin. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν τρεις παράγοντες που καθορίζουν την απόσταση διάσπασης: το ύψος της ράβδου H (σε cm), η απόσταση της πάνω ράβδου από το έδαφος D (σε cm) και η πολικότητα της κρουστικής τάσης. Οι εξισώσεις που πρόέκυψαν για τον υπολογισμό της απόστασης διάσπασης D^* (σε cm), για κεραυνό θετικής πολικότητας (εξίσωση 3.33) και αρνητικής πολικότητας (εξίσωση 3.34), είναι αντίστοιχα [21]:

$$D^* = D \cdot \left(1 + 0.24e^{-\left(\frac{H}{D}\right)} \right) \quad (3.33)$$

$$D^* = D \cdot \left(0.8e^{-\left(\frac{0.125H}{D}\right)} + 0.17 \right) \quad (3.34)$$

Στην εξίσωση (3.33), η απόσταση D^* είναι πάντα μεγαλύτερη από την D και αυξάνεται με την αύξηση της D . Στην εξίσωση (3.34), η απόσταση D^* είναι πάντα μικρότερη από την D και μειώνεται με τη μείωση της D με πιο αργό ρυθμό.

Ωστόσο, στην αρχική μελέτη η ένταση του ρεύματος κεραυνού δε λήφθηκε υπόψη. Επομένως, επειδή η απόσταση διάσπασης εξαρτάται και από το ύψος της ράβδου και από το ρεύμα του κεραυνού, το επόμενο βήμα της έρευνας ήταν να παρουσιαστεί μια διατύπωση της εξάρτησης της απόστασης διάσπασης από το ρεύμα του κεραυνού, το ύψος του γειωμένου αντικειμένου και την πολικότητα του κεραυνού.

Οι νέες εξισώσεις που προέκυψαν και περιλαμβάνουν και την εξάρτηση από το ρεύμα, για κεραυνό θετικής πολικότητας (εξίσωση 3.35) και αρνητικής πολικότητας (εξίσωση 3.36) είναι αντίστοιχα [21]:

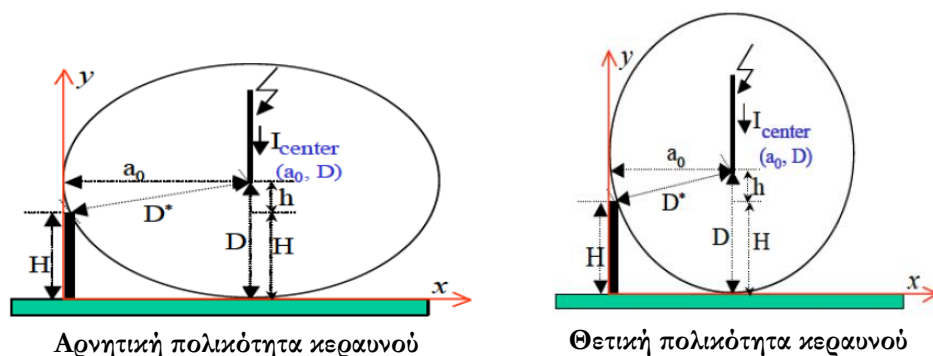
$$D^* = 9.8959 \cdot (I_S)^{0.7251} + 1.7872 \cdot (H)^{-0.6092} \quad (3.35)$$

$$D^* = 6.0519 \cdot (I_S)^{0.6228} + 0.0027 \cdot (H)^{0.7029} \quad (3.36)$$

Εκτίμηση της ζώνης προστασίας

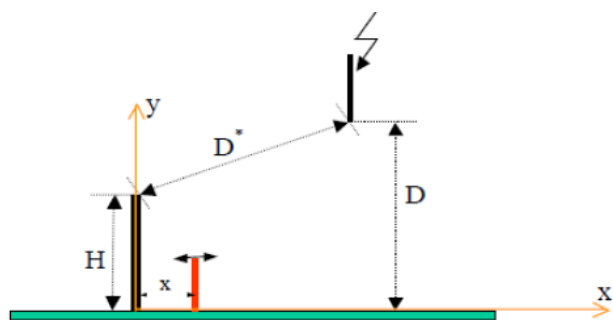
Δεδομένου ότι οι αποστάσεις διάσπασης προς τη ράβδο Franklin και προς το έδαφος είναι διαφορετικές, παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά για θετική και αρνητική πολικότητα του κεραυνού. Με βάση αυτή τη θεώρηση, καθιερώθηκε ένα ελλειπτικό μοντέλο για την αξιολόγηση της ζώνης προστασίας που δημιουργείται από μία ράβδο Franklin.

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει το ελλειπτικό μοντέλο για αρνητική και θετική πολικότητα κεραυνού. Αυτά τα δύο μοντέλα εξηγούν το λόγο για τον οποίο ένας κεραυνός χτυπάει αρκετά αντικείμενα, όταν η ζώνη προστασίας υπολογίζεται με βάση το μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας [21].



Σχήμα 3.4: Ελλειπτικό μοντέλο ζώνης προστασίας για αρνητική και θετική πολικότητα κεραυνού [21]

Η ζώνη προστασίας της ράβδου Franklin εξαρτάται από το δεδομένο ελλειπτικό μοντέλο. Το χαμηλότερο τμήμα της έλλειψης, το οποίο εφάπτεται στην κορυφή της ράβδου και στο έδαφος, είναι η ζώνη προστασίας. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.4**, η ζώνη προστασίας είναι μικρότερη για κεραυνό θετικής πολικότητας. Το ίδιο ισχύει και για το μήκος προστασίας κατά τον άξονα x . Η αποτελεσματικότητα των ελλειπτικών μοντέλων επαληθεύτηκε, κατόπιν διεξαγωγής πρόσθετων εργαστηριακών μετρήσεων, προσθέτοντας μία γειωμένη ράβδο δίπλα στην ήδη χρησιμοποιούμενη, όπως φαίνεται στη παρακάτω διάταξη. Μεταβάλλοντας τη θέση και το ύψος της επιπρόσθετης γειωμένης ράβδου, εκτιμήθηκε η ζώνη προστασίας μιας ράβδου Franklin [21].

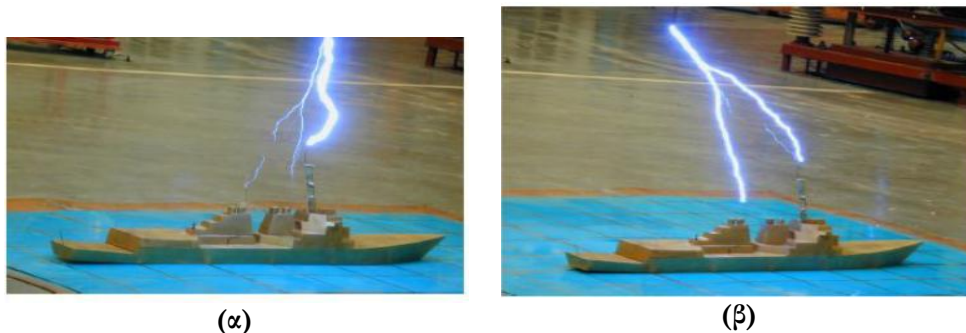


Σχήμα 3.5: Διάταξη για τη μελέτη της ζώνης προστασίας [21]

Μελέτη της ζώνης προστασίας του ελλειπτικού μοντέλου σε πλοίο

Για τη μελέτη της ζώνης προστασίας του ελλειπτικού μοντέλου, έγινε προσομοίωση κεραυνού με κρουστική τάση $1.2/50\mu\text{s}$ σε ένα μοντέλο πλοίου. Η απόσταση μεταξύ της άκρης της ηλεκτρισμένης ράβδου (που αντιπροσωπεύει τον καθοδικό οχετό) και του επιπέδου του νερού επιλέχθηκε 1m και 3m αντίστοιχα, η οποία σε κλίμακα 1:100 αντιπροσωπεύει την απόσταση διάσπασης μεταξύ του καθοδικού οχετού και του επιπέδου του νερού σε 100m και 300m αντίστοιχα.

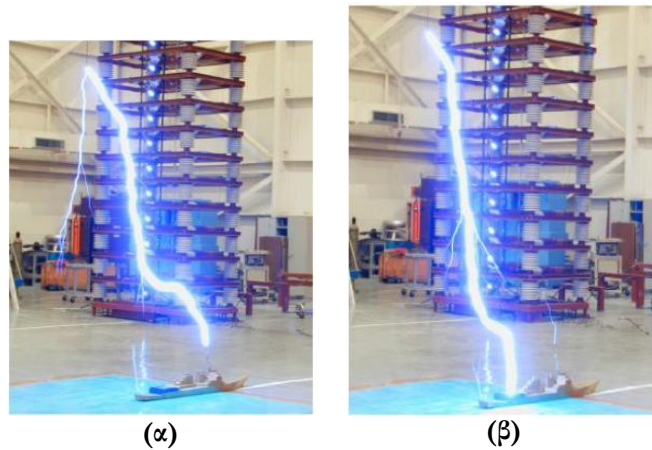
Στη περίπτωση κεραυνού τοποθετημένου 1m πάνω από την επιφάνεια του νερού, παρατηρήθηκε ότι: το αλεξικέραυνο συλλαμβάνει κεραυνικά πλήγματα θετικής και αρνητικής πολικότητας, όταν το άκρο του κεραυνού βρίσκεται πάνω απ' το αλεξικέραυνο και σε περιοχή γύρω απ' αυτό (**Εικόνα 3.1.α**). Μετακινώντας το άκρο του κεραυνού πιο πίσω ή στο πλάι του αλεξικέραυνου, αυτό συλλαμβάνει μόνο κάποια από τα πλήγματα. Οι κεραυνοί χτυπάνε διαφορετικά αντικείμενα με βάση τη θέση του άκρου τους. Με άλλα λόγια εξαρτάται από την απόσταση διάσπασης. Γενικά τα αντικείμενα πλήττονται μεμονωμένα, αλλά μερικές φορές δύο αντικείμενα μπορεί να χτυπηθούν ταυτόχρονα, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.1.β** [21].



Εικόνα 3.1: Κεραυνός καταλήγει (α) στο αλεξικέραυνο του μοντέλου πλοίου και (β) στο αλεξικέραυνο και σε προστατευόμενο αντικείμενο [21]

Στη περίπτωση κεραυνού τοποθετημένου 3m πάνω από την επιφάνεια του νερού, παρατηρήθηκε ότι ο κεραυνός κατέληγε με μεγαλύτερη πιθανότητα στο αλεξικέραυνο. Η ζώνη προστασίας για απόσταση διάσπασης 3m είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για 1m. Συγκρίνοντας τη ζώνη προστασίας για θετικούς και αρνητικούς κεραυνούς, παρατηρήθηκε ότι η ζώνη προστασίας είναι μικρότερη για θετική παρά για αρνητική πολικότητα κεραυνού. Τα περισσότερα από τα αρνητικά κεραυνικά χτυπήματα, πάνω από 3m από την επιφάνεια του νερού, κατέληξαν στο αλεξικέραυνο. Αυτά που παράχθηκαν αρκετά πίσω από το αλεξικέραυνο κατέληξαν στο αντικείμενο που βρισκόταν στην πίσω μεριά του πλοίου.

Για θετικό κεραυνό, όταν αυτός ήταν τοποθετημένος από την πλευρά του πλοίου και πίσω από αυτό, τα κεραυνικά χτυπήματα κάποιες φορές κατέληξαν στο αλεξικέραυνο (**Εικόνα 3.2.α**) και κάποιες άλλες σε διάφορα αντικείμενα (**Εικόνα 3.2.β**), ανάλογα με την πλευρά του πλοίου στην οποία είχε ξεκινήσει ο ανοδικός οχετός. Το σύνολο των θετικών κεραυνών παρουσίασαν πολλά παρακλάδια, που αναπτύχθηκαν προς διάφορα αντικείμενα. Επίσης στην περίπτωση των θετικών κεραυνών, αναπτύχθηκαν και κάποιοι δυνατοί ανοδικοί οχετοί από πολλά αντικείμενα. Αυτό φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Το σημείο όπου ο κεραυνός θα χτυπήσει αποφασίζεται από τον ανοδικό οχετό. Στην περίπτωση αρνητικού κεραυνού, ανοδικοί οχετοί παρατηρούνται μόνο από το αλεξικέραυνο, οι οποίοι όμως δεν είναι τόσο έντονοι και μακριοί όπως στη περίπτωση του θετικού κεραυνού [21].



Εικόνα 3.2: Θετικός κεραυνός καταλήγει (α) στο αλεξικέραυνο του μοντέλου πλοίου και (β) σε προστατευόμενο αντικείμενο. Ανάπτυξη ανοδικών οχετών από διάφορα αντικείμενα [21]

3.3.2 Μελέτη του φαινομένου Corona του Saint Elmo

Οι Κ. Tonmitr και Α. Kaewrawang, στην εργασία τους "*Saint Elmo's Fire Corona by using HVDC, HVAC and Tesla Coil*" [22], μελέτησαν τις τάσεις έναρξης του φαινομένου Corona του Saint Elmo σε μη ομοιόμορφο πεδίο χρησιμοποιώντας υψηλή DC τάση, υψηλή AC τάση και πηνίο Tesla. Έτσι αναπαρήγαγαν το φαινόμενο σε μοντέλο πλοίου, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου Khon Kaen της Ταϊλάνδης.

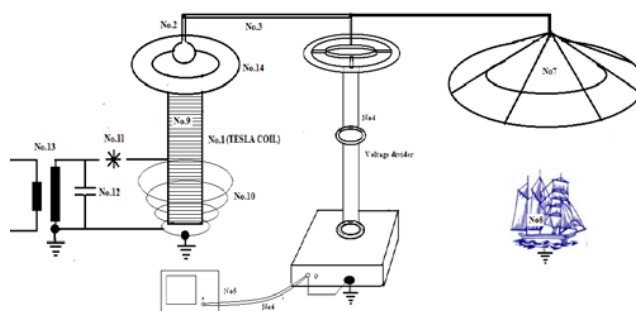
Η λεγόμενη και "Φωτιά του St. Elmo" είναι μια περίπτωση του φαινομένου Corona. Προκαλείται από τον ιονισμό του αέρα, όταν δημιουργούνται ισχυρά ηλεκτρικά πεδία με τιμή έντασης περίπου 3MV/m . Η "Φωτιά του St. Elmo" πήρε το όνομα της από τον Άγιο Εράσμιο της Φόρμια, που θεωρείτο προστάτης των ναυτικών. Η "Φωτιά του St. Elmo" εμφανιζόταν σαν μυστηριώδεις μπλε φλόγες, που έλαμπαν στα άκρα των καταρτιών των πλοίων, μετά από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ σύννεφου και των καταρτιών κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων [22].

Η πρώτη καταγραφή του φαινομένου έγινε από ναυτικούς στη Μεσόγειο, οι οποίοι το συνέδεαν με τη παρουσία του προστάτη τους και το θεωρούσαν καλό οίωνό, αφού το ερμήνευαν ως σημάδι ότι καταλαγιάζει η καταιγίδα.

Η εμφάνιση του οφειλόταν όπως αναφέρθηκε στον ιονισμό του αέρα γύρω από τα κατάρτια του πλοίου, λόγω των ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων που δημιουργούνταν κατά τη διάρκεια των καταιγίδων. Το φαινόμενο συνοδευόταν μερικές φορές από έναν απαλό ήχο σαν "σφύριγμα". Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που εκλυόταν από τον ιονισμό του αέρα προκαλούσε τη φωτεινή λάμψη, η οποία διαρκούσε για μερικά λεπτά προτού εξασθενίσει [22].

Στο πείραμα τους, οι Κ. Tonmitr και Α. Kaewrawang χρησιμοποιούν ένα μοντέλο ενός κλασσικού παλιού ιστιοφόρου σε κλίμακα 1:500. Το διάκενο μεταξύ του "τεχνητού σύννεφου" και του άκρου του καταρτιού του πλοίου (ηλεκτρόδιο) ποικίλει με τιμές από 50 έως 300mm. Το "τεχνητό σύννεφο" με το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο παράγεται όπως αναφέρθηκε με τρεις τρόπους, μέσω υψηλής DC τάσης (HVDC), υψηλής AC τάσης (HVAC) και πηνίου Tesla. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των θεωρητικών υπολογισμών. Για τιμή διακένου 30cm, το πλήγμα συμβαίνει στη τιμή τάσης των 110kV, 127kV και 55kV μέσω χρήσης HVDC, HVAC και του πηνίου Tesla αντίστοιχα. Για την περίπτωση από χαμηλό σε υψηλό διάκενο 50-300mm, το φαινόμενο εμφανίζεται μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το πηνίο Tesla [22].

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη με το πηνίο Tesla που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του φαινομένου.



Σχήμα 3.6: Διάταξη με πηνίο Tesla για τη μελέτη της "Φωτιάς του St. Elmo" [22]

Στην **Εικόνα 3.3** απεικονίζεται το φαινόμενο της "Φωτιάς του St. Elmo" στο μοντέλο πλοίου, με χρήση του πηνίου Tesla.



Εικόνα 3.3: Το φαινόμενο της "Φωτιάς του St. Elmo" σε μοντέλο πλοίου [22]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

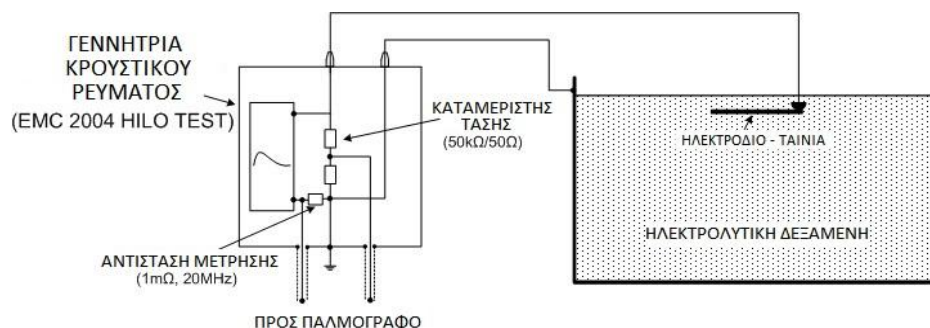
4.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- Κρουστική γεννήτρια ρεύματος **HILO-TEST:EMC-2004**
- Παλμογράφος **Tektronix TDS 2014C**
- Ομοαξονικά καλώδια
- Αγωγιμόμετρο **HANNA Instruments 8733** - Διάλυμα για τη βαθμονόμηση του αγωγιγομέτρου
- Βαρόμετρο **Testo 511**
- Θερμόμετρο-Υγρόμετρο **OMEGAETTE HH314**
- Αγωγοί για τη σύνδεση των δοκιμίων και της δεξαμενής με τη γεννήτρια
- Δεξαμενή
- Δοκίμια

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Στο **σχήμα 4.1** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.



Σχήμα 4.1: Πειραματική Διάταξη

Παρακάτω περιγράφεται καθένα από τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης και του εξοπλισμού.

4.2.1 Κρουστική Γεννήτρια Ρεύματος

Η κρουστική γεννήτρια HILO-TEST:EMC-2004 είναι μια κρουστική γεννήτρια ρεύματος, η οποία έχει σχεδιαστεί για διηλεκτρικές δοκιμές σε ηλεκτρικά εξαρτήματα, προστασίες από υπερτάσεις και ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η γεννήτρια παράγει κρουστικά ρεύματα με κυματομορφή 8/20 μ s και μέγιστη τιμή ρεύματος έως και 25 kA. Η γεννήτρια διαθέτει δύο εξόδους, οι οποίες μέσω ενός καταμεριστή με λόγο καταμερισμού 1000:1 και μιας αντίστασης μέτρησης 1m Ω δίνουν αντιστοίχως την τάση και το ρεύμα εξόδου υποβαθμισμένα σε επίπεδα κατάλληλα ώστε να μετρηθούν από τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης (παλμογράφος). Άρα, εάν για παράδειγμα η πραγματική τάση εξόδου είναι 1kV, τότε στην έξοδο της γεννήτριας και συνεπώς στον παλμογράφο θα ληφθεί 1V. Εάν πάλι το πραγματικό ρεύμα εξόδου είναι 10kA, στην έξοδο της γεννήτριας και συνεπώς στον παλμογράφο θα ληφθεί 10V \rightarrow 10A.

Η γεννήτρια HILO-TEST:EMC-2004 δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα εκτέλεσης αυτόματων διαδικασιών δοκιμών (Test Procedure), αλλά επιτρέπει και την εκτέλεση χειροκίνητων δοκιμών (Manual Test). Για το τρέχον πείραμα επιλέχθηκε το "Manual Test", καθώς ήταν επιθυμητό να ληφθούν συγκεκριμένες μετρήσεις, οι οποίες δεν εμφάνιζαν κάποια περιοδικότητα.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κρουστικής γεννήτριας ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά κρουστικής γεννήτριας ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004

LCD μονάδα ελεγχόμενη από μικροεπεξεργαστή	8*40 χαρακτήρες
Parallel printer interface for on-line documentation	25-way 'D' υποδοχή
Οπτικό interface για απομακρυσμένο έλεγχο της γεννήτριας	Ενσωματωμένο
Εξωτερική είσοδος ενεργοποίησης	10 V at 1 k Ω
Εξωτερική έξοδος ενεργοποίησης	10 V at 1 k Ω
Μέγιστη τιμή τάσης φόρτισης, ρυθμιζόμενη	0,2 - 10 kV, \pm 2%
Πολικότητα παλμού εξόδου	POS/NEG/ALT
Μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια	1500 J
Πυκνωτής αποθήκευσης ενέργειας, standard έκδοση	30 μ F/ 10 kV
Χρόνος φόρτισης	<20 sec
Υποδοχή για εξωτερικό safety interlock loop και εξωτερικές πράσινες και κόκκινες προειδοποιητικές λυχνίες σύμφωνα με VDE 0104	24 V = 230V, 60W
Κόρια παροχή	230 V, 50/60 Hz
Διαστάσεις πλαισίου W * H * D	556*470*600 mm ²
Βάρος	65 kg
Plug-in κρουστικού ρεύματος	8/20 μ s, 25 kA
Κρουστικό ρεύμα εξόδου, ρυθμιζόμενο μέσω της τάσης φόρτισης	2-25 kA \pm 5%
Κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος εξόδου, σύμφωνα με IEC 60	8 / 20 μ s \pm 20%
Κυμάτωση ("ringing")	< 30 %
Αντίσταση μέτρησης ρεύματος, ενσωματωμένη	1 m Ω , 20 MHz

Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται η κρουστική γεννήτρια ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνες 4.1-4.2: Κρουστική γεννήτρια ρεύματος HIL0-TEST:EMC-2004

Για την ενεργοποίηση της συσκευής, γυρνάμε το κλειδί που βρίσκεται στο κάτω αριστερό άκρο του πίνακα ελέγχου της γεννήτριας. Στην LCD οθόνη της γεννήτριας εμφανίζονται τέσσερις επιλογές, σχετικές με τον τρόπο με τον οποίο θέλουμε να διεξάγουμε τις δοκιμές (χειροκίνητα ή αυτόματα). Το σύστημα δεν βρίσκεται υπό τάση και γι' αυτό το λόγο είναι αναμμένη η πράσινη ένδειξη στον πίνακα ελέγχου της γεννήτριας (Εικόνα 4.3) και η πράσινη λυχνία στο επάνω μέρος της.



Εικόνα 4.3: Πρόσωση γεννήτριας - Πίνακας Ελέγχου Γεννήτριας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όλες οι δοκιμές έγιναν χειροκίνητα, δηλαδή επιλέξαμε το mode "Manual Test". Μόλις επιλεγθεί αυτό πατώντας το αντίστοιχο κουμπί, ανάβει η κόκκινη ένδειξη, γεγονός που υποδηλώνει πως οποιαδήποτε στιγμή το σύστημα μπορεί να τεθεί υπό τάση. Στην LCD οθόνη εμφανίζεται ένα νέο μενού, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει την εφαρμοζόμενη τάση και συνεπώς το αντίστοιχο ρεύμα σε συνθήκες βραχυκύκλωσης, την πολικότητα, το χρόνο μεταξύ των επαναλήψεων και τον αριθμό παλμών, καθώς και το είδος της κυματομορφής (8/20μs) (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Ρύθμιση τάσης φόρτισης της γεννήτριας υπό τάση

Οπότε ρυθμίζουμε την τάση φόρτισης μέσω της ροδέλας. Έπειτα πατάμε το κουμπί που αντιστοιχεί στην επιλογή Start και πραγματοποιείται η φόρτιση. Τέλος πατώντας την επιλογή Trigger γίνεται η έγχυση του κρουστικού ρεύματος στο ηλεκτρόδιο.

4.2.2 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος Tektronix TDS 2014C είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της εταιρίας Tektronix και διαθέτει 4 κανάλια, καθώς επίσης και θύρα USB για τη διασύνδεση με εκτυπωτή ή αποθηκευτικό μέσο (USB Flash Drive). Να σημειώσουμε εδώ ότι για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν τα κανάλια CH2 και CH3. Ο παλμογράφος απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.5**, ενώ στον **Πίνακα 4.2** παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 4.5: Παλμογράφος Tektronix TDS 2014C

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά παλμογράφου Tektronix TDS 2014C

Οθόνη (QVGA LCD)	TFT
Εύρος ζώνης	100 MHz
Κανάλια	4
Εξωτερική εισόδος ενεργοποίησης	Περιλαμβάνεται
Ρυθμός δειγματοληψίας σε κάθε κανάλι	2 GS/s
Μήκος εγγραφής	2.500 σημεία σε όλες τις βάσεις χρόνου
Κάθετη ανάλυση	8 Bits
Κάθετη ευαισθησία	2mV σε 5V/div σε όλα τα μοντέλα με βαθμονομημένη ρύθμιση
Κάθετη ακρίβεια DC	± 3% σε όλα τα μοντέλα
Κάθετη εστίαση (zoom)	Κάθετη ανάπτυξη ή σύμπτυξη σε τρέχουσα ή σταματημένη κυματομορφή
Μέγιστη τάση εισόδου	300 VRMS CATII, υποβαθμισμένη στα 20dB/dec πάνω από 100kHz έως 13V _{p-p} AC στα 3MHz
Εύρος θέσης	2mV σε 200mV/div+2V, >200mV σε 5V/div+50V
Όριο εύρους ζώνης	20 MHz για όλα τα μοντέλα
Σύζευξη εισόδου (coupling)	AC, DC, GND σε όλα τα μοντέλα
Σύνθετη αντίσταση εισόδου	1MΩ παράλληλα με 20pF
Εύρος βάσης χρόνου	2,5ns σε 50s/div
Ακρίβεια βάσης χρόνου	50ppm
Οριζόντια εστίαση (zoom)	Οριζόντια ανάπτυξη ή σύμπτυξη σε τρέχουσα ή σταματημένη κυματομορφή

4.2.3 Ομοαξονικά καλώδια

Για τη σύνδεση της πειραματικής διάταξης με τα κανάλια (CH2 και CH3), του παλμογράφου χρησιμοποιήθηκαν ομοαξονικά καλώδια, τα οποία συνόδευαν τη γεννήτρια εξαρχής.

4.2.4 Αγωγιμόμετρο-Διάλυμα βαθμονόμησης

Για την καταγραφή της αγωγιμότητας του διαλύματος νερού μέσα στη δεξαμενή, χρησιμοποιήθηκε το αγωγιμόμετρο HANNA Instruments 8733, το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 4.6**).



Εικόνα 4.6: Αγωγιμόμετρο HANNA Instruments 8733 και λειτουργική περιγραφή

Για τη σωστή ρύθμιση του αγωγιγομέτρου χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα διαλύματα βαθμονόμησης, τα οποία φαίνονται παρακάτω (**Εικόνα 4.7**).



Εικόνα 4.7: Διαλύματα βαθμονόμησης

Ανάλογα με το εύρος τιμών των αγωγιμοτήτων που είναι επιθυμητό να μετρηθεί και την κλίμακα του οργάνου που θα χρησιμοποιηθεί επιλέγεται το κατάλληλο διάλυμα βαθμονόμησης. Έτσι, για τις τιμές αγωγιμότητας στις οποίες διεξήχθη το πείραμά, το κατάλληλο διάλυμα βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το HI 7030 (12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στους 25°C).

Για τη χρησιμοποίηση του αγωγιμομέτρου, είναι απαραίτητη η διαδικασία της βαθμονόμησής του (calibration) πριν από κάθε χρήση. Η βαθμονόμηση γίνεται με τη βοήθεια των ειδικών διαλυμάτων βαθμονόμησης ως εξής:

- Καθαρισμός του probe του αγωγιμομέτρου με απεσταγμένο νερό και τοποθέτησή του μέσα στο δοχείο του ειδικού διαλύματος για μερικά λεπτά, μέχρι να επέλθει θερμική ισορροπία.
- Ενεργοποίηση του αγωγιμομέτρου και επιλογή της καταλληλότερης κλίμακας (μικρότερη δυνατή) ανάλογα με την ένδειξη της συσκευής. Ρύθμιση του συντελεστή αντιστάθμισης θερμοκρασίας στο 0, ώστε να μετράμε ουσιαστικά την πραγματική αγωγιμότητα του νερού (δεν πραγματοποιείται αναγωγή στη θερμοκρασία του διαλύματος).
- Έχοντας ήδη μετρήσει τη θερμοκρασία του διαλύματος με τη βοήθεια θερμομέτρου, εντοπίζουμε την αντίστοιχη τιμή της αγωγιμότητας για τη θερμοκρασία αυτή μέσω των πινάκων που αναγράφονται στο εξωτερικό του δοχείου του πρότυπου διαλύματος.
- Ρύθμιση του ποτενσιόμετρου (trimmer) που βρίσκεται στο πλαϊνό μέρος της συσκευής, ώστε η ένδειξη του αγωγιμομέτρου να σταθεροποιηθεί στην τιμή που βρήκαμε στο προηγούμενο βήμα.
- Εκ νέου καθαρισμός του probe του αγωγιμομέτρου και χρήση του.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αγωγιμομέτρου HI 8733.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά αγωγιμομέτρου HI 8733

Εύρος	0,0 ως 199,9 / 0 ως 1999μS/cm 0,00 ως 19,99 / 0,0 ως 199,9 mS/cm
Ανάλυση	0,1 / 1 μS/cm 0,01 / 0,1 mS/cm
Ακρίβεια (στους 20°C)	±1% σε πλήρη κλίμακα, εξαιρουμένου σφάλματος probe
Τυπική EMC απόκλιση	±2% σε πλήρη κλίμακα
Βαθμονόμηση (calibration)	Χειροκίνητη, 1 σημείου, μέσω trimmer
Αντιστάθμιση θερμοκρασίας	Αυτόματη, 0 ως 50°C με β ρυθμιζόμενο από 0 ως 2,5% ανά °C
Probe (περιλαμβάνεται)	HI 76302W ATC με καλώδιο 1m
Περιβάλλον	0 ως 50°C, RH max 100%
Τύπος μπαταρίας/ Διάρκεια ζωής	1 x 9V αλκαλική/ περί 100hrs συνεχούς χρήσης
Διαστάσεις	164 x 76 x 45 mm
Βάρος	250 g

4.2.5 Βαρόμετρο και Θερμόμετρο-Υγρόμετρο

Για την καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών υγρασίας, πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων γίνεται χρήση του βαρόμετρου Testo 511 και του θερμόμετρου-υγρόμετρου OMEGAETTE HH314. Για τη ρύθμιση του αγωγιμομέτρου σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράψαμε προηγουμένως, γίνεται χρήση του OMEGAETTE HH314. Στις **Εικόνες 4.8-4.9** παρουσιάζονται οι δύο συσκευές.



Εικόνες 4.8-4.9: Βαρόμετρο Testo 511 και θερμόμετρο-υγρόμετρο OMEGAETTE HH314

4.2.6 Αγωγοί για τη σύνδεση των δοκιμίων και της δεξαμενής με τη γεννήτρια

Για την έγχυση του κρουστικού ρεύματος από τη γεννήτρια στο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε αγωγός με διατομή 4mm^2 , ενώ στην επιστροφή συνδέθηκε το σώμα της δεξαμενής με τον άλλο δέκτη της γεννήτριας με αγωγό διατομής 50mm^2 .

4.2.7 Δεξαμενή

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μια μεταλλική δεξαμενή διαστάσεων $2\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$, μέσα στην οποία ήταν τοποθετημένο το ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Οι διαστάσεις αυτές εξυπηρετούν αφενός τη μετακίνηση και τοποθέτησή της στο χώρο του εργαστηρίου και αφετέρου επαρκούν για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε κατάλληλα δοκίμια. Το μέγεθος των δοκιμίων επιλέγεται βάσει των διαστάσεων της δεξαμενής, όπως θα εξηγηθεί πιο αναλυτικά παρακάτω.

4.2.8 Δοκίμια

Τα δοκίμια είναι τα ηλεκτρόδια εκείνα στα οποία εγχέονται τα κρουστικά ρεύματα της γεννήτριας και αποτελούν ουσιαστικά τα αντικείμενα των μετρήσεων. Το υλικό κατασκευής τους είναι ο χαλκός. Για τις ανάγκες του πειράματος ήταν αναγκαία η χρησιμοποίηση δοκιμίων διαφορετικών διαστάσεων, έτσι, ώστε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, να επιβεβαιωθούν ή όχι τα συμπεράσματα και οι τύποι στους οποίους καταλήξαμε μέσω της θεωρητικής μελέτης που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.

Για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια-ταινίες που οι διαστάσεις του θα ήταν "στρογγυλοί" αριθμοί και πολλαπλάσιοι μεταξύ τους. Έτσι επιλέχθηκαν τα εξής δοκίμια:

✚ 20cm x 2cm

✚ 30cm x 3cm

✚ 40cm x 4cm

✚ 60cm x 6cm

Στην **Εικόνα 4.10** παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια-ταινίες.



Εικόνα 4.10: Τα τέσσερα ηλεκτρόδια-ταινίες που χρησιμοποιήθηκαν

Σημειώνεται ότι, το ηλεκτρόδιο 60x6cm παρουσίασε προβλήματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, τα οποία θα περιγραφούν πιο αναλυτικά στη συνέχεια. Αυτό οφειλόταν στο μέγεθος του, σε σχέση με τις διαστάσεις της δεξαμενής (περιορισμός λόγω διαστάσεων δεξαμενής).

4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε αναλυτικά την πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε για την εκτέλεση των μετρήσεων και θα παρουσιάσουμε τους πίνακες με τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Οι πίνακες των μετρήσεων και τα παλμογραφήματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο τέλος, σε ειδικό παράρτημα.

4.3.1 Προετοιμασία

Αρχικά θα πρέπει να επιλεγούν οι αγωγιμότητες, για τις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι δοκιμές. Το θαλασσινό νερό έχει αγωγιμότητα περίπου 5 S/m (Siemens ανά μέτρο). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημάνουμε, ότι οι δοκιμές αποτελούν συνέχεια προηγούμενου πειράματος. Στο πείραμα αυτό, είχαν πραγματοποιηθεί μετρήσεις σε δύο σχετικά χαμηλές τιμές αγωγιμότητας, σε σχέση με τις κοινές τιμές του θαλασσινού νερού. Συγκεκριμένα είχαν γίνει μετρήσεις για αγωγιμότητες 1 S/m και 2 S/m, και είχαν επιβεβαιωθεί οι θεωρητικοί τύποι οι οποίοι προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 2.

Στις παρούσες δοκιμές, επιλέξαμε δύο διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα πραγματοποιήσαμε μετρήσεις για τις **αγωγιμότητες 0,08 S/m και 4 S/m**. Η τιμή 0,08 S/m είναι ιδιαίτερα μικρή και αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα του πόσιμου νερού βρύσης. Η τιμή 4 S/m είναι αρκετά μεγάλη και πλησιάζει τη περίπτωση του θαλασσινού νερού, ενώ είναι ιδανική και για τη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού, που είναι πιο έντονο σε τέτοιες μεγάλες αγωγιμότητες. Σκοπός ήταν να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για αυτές τις δύο τιμές αγωγιμότητας, τόσο μεταξύ τους, όσο και με τα αποτελέσματα των αγωγιμοτήτων 1 S/m και 2 S/m, και να ελέγξουμε αν εξακολουθούν να επιβεβαιώνονται οι θεωρητικοί τύποι στους οποίους καταλήξαμε.

Για λόγους ευκολίας θεωρήσαμε λογικό να εκτελέσουμε τις δοκιμές σε όλα τα ηλεκτρόδια κρατώντας σταθερή την αγωγιμότητα στην πρώτη τιμή (0,08 S/m) και έπειτα να επαναληφθούν για τη δεύτερη τιμή αγωγιμότητας (4 S/m), παρά να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις αλλάζοντας κάθε φορά την αγωγιμότητα για κάθε ηλεκτρόδιο. Ξεκινώντας πληρώθηκε η δεξαμενή με νερό βρύσης αγωγιμότητας 0,08 S/m, για να γίνουν οι πρώτες μετρήσεις. Έπειτα άδειασε η δεξαμενή και πληρώθηκε εκ νέου με διάλυμα νερού αγωγιμότητας 4 S/m, για τη συνέχεια των μετρήσεων. Για να το πετύχουμε αυτό, ακολουθήσαμε την εξής διαδικασία: Γεμίσαμε τη δεξαμενή με νερό βρύσης (έως τα 44cm από τα 50cm ύψους της δεξαμενής). Σε ένα δεύτερο μικρότερο δοχείο διαλύσαμε μερική ποσότητα ιωδιούχου αλατιού μέσα σε νερό και περιχύσαμε το διάλυμα στην δεξαμενή, αναδεύοντας εκ νέου το τελικό διάλυμα. Μετρώντας τη νέα αγωγιμότητα του συνολικού διαλύματος με το αγωγιμόμετρο -αφού πρώτα βαθμονομήθηκε το όργανο- επαναλάβαμε το τελευταίο βήμα όσες φορές ήταν αναγκαίο έως ότου το συνολικό διάλυμα της δεξαμενής να αποκτήσει αγωγιμότητα τιμής περί τα 4 S/m. Η ακριβής τιμή της αγωγιμότητας του διαλύματος καταγραφόταν σε κάθε μέτρηση, καθώς αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος προκαλούσαν ανεπαίσθητες αλλαγές και στην τιμή της αγωγιμότητας.

Σημαντικό βήμα της προετοιμασίας για την εκτέλεση του πειράματος αποτελεί το στήσιμο της πειραματικής διάταξης. Αρχικά συνδέουμε το ηλεκτρόδιο, για το οποίο είναι επιθυμητό να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, στο καλώδιο το οποίο το συνδέει με την κρουστική γεννήτρια. Για τη σύνδεση αυτή χρειάστηκε να δημιουργήσουμε μια οπή στην προεξοχή κάθε ηλεκτροδίου, πάνω στην οποία εφαρμόσαμε τη βίδα που κρατά το καλώδιο και το ηλεκτρόδιο σε επαφή. Στη συνέχεια θα έπρεπε να λύσουμε το πρόβλημα της μηχανικής στήριξης του ηλεκτροδίου στο κατάλληλο σημείο μέσα στη δεξαμενή (βάθος μέσα στο νερό ανάλογο με το μήκος του ηλεκτροδίου, ίση απόσταση από τα πλαϊνά τοιχώματα). Για να το επιτύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά μέσα:

- Για την τοποθέτηση του δοκιμίου στο κατάλληλο σημείο της δεξαμενής χρησιμοποιήσαμε πλαστικές ράβδους κατά πλάτος της δεξαμενής στο πάνω μέρος της, οι οποίες στερεώθηκαν με εσοχές στα δύο εκατέρωθεν τοιχώματα. Αυτές οι ράβδοι χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία στήριξης από τα οποία κρεμάσαμε, με τη βοήθεια νήματος, τα εκάστοτε ηλεκτρόδια. Προσαρμόζοντας το μήκος του νήματος μεταβάλλαμε το βάθος στο οποίο βρισκόταν το ηλεκτρόδιο, ενώ μετατοπίζοντας τις ράβδους μεταβάλλαμε την απόσταση του ηλεκτροδίου από τα τοιχώματα (**Εικόνα 4.11**).



Εικόνα 4.11: Μηχανισμός στήριξης ηλεκτροδίου μέσα στη δεξαμενή

Πρέπει να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο ότι, το βάθος του ηλεκτροδίου δεν υπεισέρχεται στους λόγους κλίμακας που προέκυψαν από τις θεωρητικές σχέσεις για την ταινία γείωσης. Ωστόσο εφαρμόσαμε το λόγο κλίμακας K_l του μήκους και του πλάτους και στο βάθος, ώστε να διατηρείται η γενικότερη γεωμετρική ομοιότητα μεταξύ των μοντέλων. Εξάλλου, το βάθος είναι ένας παράγοντας που υπεισέρχεται στους λόγους κλίμακας για το οριζόντιο ηλεκτρόδιο γείωσης (Εξίσωση 2.11).

- Για την ισορρόπηση του δοκιμίου σε θέση, ώστε να μην επηρεάζεται από το καλώδιο, χρησιμοποιήσαμε μια ξύλινη κατασκευή σε σχήμα μονόζυγου (**Εικόνα 4.12**). Αυτό επέτρεψε να κρεμάσουμε ουσιαστικά το καλώδιο ακριβώς πάνω από το σημείο σύνδεσης ηλεκτροδίου-καλωδίου, ώστε να μην υπεισέρχεται καμιά άλλη μηχανική επίδραση παρά το βάρος του ηλεκτροδίου. Προσαρμόζοντας μάλιστα κατάλληλα το καλώδιο μπορέσαμε να ρυθμίσουμε ευκολότερα το βάθος στο οποίο θα βρισκόταν το δοκίμιο.

Ο μηχανισμός μηχανικής στήριξης που περιγράψαμε παραπάνω και η συνολική σύνδεση της πειραματικής διάταξης φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνες 4.12-4.13**).



Εικόνες 4.12-4.13: Μηχανισμός στήριξης του καλωδίου τροφοδότησης και συνολική εικόνα της διάταξης

Έχοντας ολοκληρώσει το στήσιμο της πειραματικής διάταξης, το επόμενο βήμα είναι η καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών υγρασίας, πίεσης και θερμοκρασίας πριν την έναρξη των μετρήσεων. Επίσης, παρά τον πρότερο προσδιορισμό κατά τη δημιουργία του διαλύματος, κρίθηκε αναγκαίο να επαναλάβουμε τον έλεγχο για τον προσδιορισμό της τιμής της αγωγιμότητας του νερού. Η καταγραφή αυτών των στοιχείων επαναλαμβάνονταν πριν την έναρξη των μετρήσεων κάθε ημέρας. Εκτός από τον έλεγχο της τιμής της αγωγιμότητας του διαλύματος, πριν την έναρξη των μετρήσεων κάθε ημέρας, αλλά και σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκειά της, πραγματοποιούνταν και ανάδευση του διαλύματος για την επίτευξη ομοιογένειας, ακολουθούμενη από ένα μικρό διάστημα αναμονής, ώστε να επέλθει η επιθυμητή ισορροπία στο διάλυμα.

Τελευταίο βήμα πριν την έναρξη των μετρήσεων είναι η σύνδεση της γεννήτριας με τον παλμογράφο, καθώς και η σύνδεση και των δύο συσκευών στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, συνδέσαμε μέσω των ομοαξονικών καλωδίων που διαθέτουμε την έξοδο του ρεύματος της γεννήτριας με το κανάλι CH2 του παλμογράφου και την έξοδο τάσης με το κανάλι CH3. Στη συνέχεια θέτουμε σε λειτουργία τόσο τη γεννήτρια, όσο και τον παλμογράφο και είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων.

4.3.2 Λήψη μετρήσεων

Προτού παρουσιάσουμε τους πίνακες των αποτελεσμάτων, είναι σημαντικό να εξηγήσουμε τη λογική με την οποία επιλέξαμε να λάβουμε τις μετρήσεις για συγκεκριμένα ηλεκτρόδια σε συγκεκριμένες τιμές ρεύματος.

Η επιλογή των τιμών αυτών βασίστηκε προφανώς στους θεωρητικούς τύπους που επιθυμούμε να επιβεβαιώσουμε πειραματικά, και οι οποίοι σχετίζονται με τους λόγους κλίμακας των μεγεθών που υπεισέρχονται στο πρόβλημα.

Συγκεκριμένα, αποδείξαμε στο Κεφάλαιο 2 ότι:

$$K_{E_0} K_l^2 = K_\rho K_{I_m} \quad (4.1)$$

Με βάση αυτό τον τύπο, θα υλοποιήσουμε δύο σενάρια σύγκρισης για τα αποτελέσματα που λάβαμε: συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων για σταθερή αγωγιμότητα σ και συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων για σταθερό μήκος ηλεκτροδίου l .

1. Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων, για σταθερή αγωγιμότητα

Αρχικά θεωρούμε τη συγκεκριμένη τιμή **αγωγιμότητας $\sigma=4 \text{ S/m}$** . Με σταθερή αγωγιμότητα παραμένει σταθερή και η κρίσιμη ένταση ιονισμού, δηλαδή $K_{E_0} = K_\rho = 1$. Άρα η παραπάνω σχέση (4.1) παίρνει την απλούστερη μορφή $K_l^2 = K_{I_m}$. Συνεπώς, οι τιμές ρεύματος στις οποίες χρειάζεται να λάβουμε μετρήσεις προκειμένου να γίνουν οι συγκρίσεις εξαρτώνται αποκλειστικά από το λόγο των μηκών των δοκιμίων, και μάλιστα ο λόγος τους είναι ανάλογος του τετραγώνου των λόγων μηκών των δοκιμίων. Είναι φανερό ότι τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε για να βρούμε τις επιθυμητές τιμές μετρούμενου ρεύματος εξόδου, είναι τα ακόλουθα:

- Υπολογίζουμε για κάθε ηλεκτρόδιο το λόγο μήκους του ως προς τα υπόλοιπα. Προφανώς για κάθε ζεύγος ηλεκτροδίων γίνεται μία φορά η σύγκριση (μεγαλύτερο προς μικρότερο).
- Επιλέγουμε κάποιες τιμές ρεύματος I_m , ξεκινώντας από τα μικρότερα στο μέγεθος ηλεκτρόδια και πηγαίνοντας προς τα μεγαλύτερα. Συνήθως η πρώτη τιμή ρεύματος I_m , καθώς και το βήμα μεταξύ αυτών των τιμών επιλέχτηκε να είναι τα 100A, ωστόσο αυτό θα μπορούσε να αλλάξει ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε ηλεκτροδίου. Έτσι σε περιπτώσεις που δεν προέκυπταν επαρκείς μετρήσεις, το βήμα μειωνόταν στα 50A.
- Για καθεμία από τις αρχικές τιμές των I_m που επιλέξαμε στο προηγούμενο βήμα, προέκυπτε ένα αντίστοιχο I_m για τα άλλα ηλεκτρόδια από το λόγο K_{I_m} . Υπενθυμίζουμε ότι $K_{I_m} = K_l^2$.

Επαναλαμβάνοντας τα παραπάνω βήματα για κάθε δοκίμιο εκτός του 60x6cm, του οποίου οι απαιτούμενες τιμές προκύπτουν από τους λόγους K_{I_m} με τα προηγούμενα ηλεκτρόδια, λαμβάνουμε επαρκείς μετρήσεις, ώστε να είναι δυνατές οι συγκρίσεις μεταξύ όλων των ηλεκτροδίων μεταξύ τους.

Ωστόσο, για την περίπτωση της **αγωγιμότητας $\sigma=0,08 \text{ S/m}$** , η κατάσταση είναι λίγο διαφορετική. Στην αγωγιμότητα αυτή χρησιμοποιήσαμε μόνο τα δύο "ενδιάμεσα" ηλεκτρόδια $30 \times 3 \text{ cm}$ και $40 \times 4 \text{ cm}$. Όπως φαίνεται και στους πίνακες των αποτελεσμάτων, οι τιμές ρεύματος οι οποίες μετρήθηκαν δεν ακολουθούν τη λογική που εξηγήθηκε παραπάνω (πρώτη τιμή ρεύματος και βήμα 100 A). Η λογική με την οποία επιλέξαμε τις τιμές αυτές θα εξηγηθεί αναλυτικά παρακάτω, αφού παρουσιάσουμε και το δεύτερο σενάριο σύγκρισης.

2. Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων, για σταθερό μήκος ηλεκτροδίου

Για συγκρίσεις μεταξύ δύο αγωγιμοτήτων για το ίδιο ηλεκτρόδιο, θα ισχύει για το λόγο μηκών, $K_l = 1$. Επίσης πραγματοποιείται η παραδοχή ότι η κρίσιμη ένταση ιονισμού E_0 παραμένει σταθερή, δηλαδή $K_{E_0} = 1$. Άρα ο τύπος $K_{E_0} K_l^2 = K_\rho K_{I_m}$, παίρνει τη μορφή:

$$K_\rho K_{I_m} = 1 \xrightarrow{\sigma=1/\rho} K_\sigma = K_{I_m} \quad (4.2)$$

Συνεπώς, για διπλάσια τιμή αγωγιμότητας θα πρέπει να λάβουμε μετρήσεις στις διπλάσιες τιμές μετρούμενου ρεύματος για το ίδιο ηλεκτρόδιο και για τετραπλάσια τιμή αγωγιμότητας θα λάβουμε μετρήσεις στις τετραπλάσιες τιμές ρεύματος. Αυτός ο κανόνας εφαρμόστηκε για τη σύγκριση μεταξύ της αγωγιμότητας $\sigma=4 \text{ S/m}$ με τις αγωγιμότητες προηγούμενου πειράματος $\sigma=2 \text{ S/m}$ και $\sigma=1 \text{ S/m}$, αντιστοίχα. Δηλαδή, με βάση τις τιμές ρεύματος στις οποίες είχαν γίνει μετρήσεις σε κάθε ηλεκτρόδιο (ξεκινώντας από τις μικρότερες) για $\sigma=2 \text{ S/m}$, καταλήξαμε στις τιμές ρεύματος (διπλάσιες), που έπρεπε να λάβουμε μετρήσεις για $\sigma=4 \text{ S/m}$. Ομοίως με βάση τις τιμές ρεύματος στις οποίες είχαν γίνει μετρήσεις σε κάθε ηλεκτρόδιο για $\sigma=1 \text{ S/m}$, καταλήξαμε στις τιμές ρεύματος (τετραπλάσιες), που έπρεπε να λάβουμε μετρήσεις για $\sigma=4 \text{ S/m}$.

Επιλογή τιμών μετρούμενου ρεύματος για $\sigma=0,08 \text{ S/m}$

Θα πρέπει να εξηγήσουμε σε αυτό το σημείο τον τρόπο που έγινε η επιλογή των επιθυμητών τιμών των μετρούμενων ρευμάτων, ειδικά για την περίπτωση της **αγωγιμότητας $\sigma=0,08 \text{ S/m}$** . Όπως ήδη αναφέραμε σε αυτήν την αγωγιμότητα έγιναν μετρήσεις μόνο για τα ηλεκτρόδια $30 \times 3 \text{ cm}$ και $40 \times 4 \text{ cm}$. Τα βήματα που ακολουθήσαμε για να βρούμε τις τιμές των ρευμάτων, είναι τα ακόλουθα:

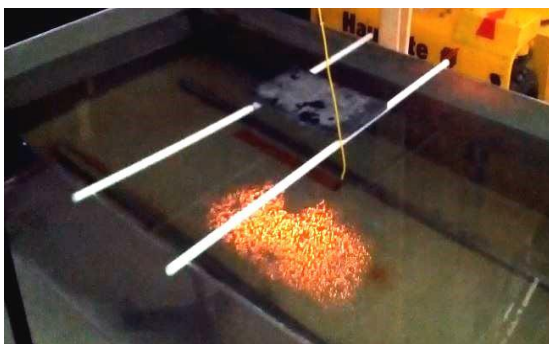
- Αρχικά χρησιμοποιήσαμε τις τιμές ρεύματος στις οποίες είχαν γίνει μετρήσεις για το ηλεκτρόδιο $30 \times 3 \text{ cm}$ για τις αγωγιμότητες $\sigma=1 \text{ S/m}$ και $\sigma=2 \text{ S/m}$ (προηγούμενο πείραμα) και καταλήξαμε στις τιμές ρεύματος που έπρεπε να λάβουμε μετρήσεις για το ίδιο ηλεκτρόδιο $30 \times 3 \text{ cm}$ για $\sigma=0,08 \text{ S/m}$.

Αυτό το πετύχαμε χρησιμοποιώντας τους λόγους $K_{I_m} = K_\sigma = \frac{1}{0,08} = 12,5$ και $K_{I_m} = K_\sigma = \frac{2}{0,08} = 25$, αντίστοιχα.

- Έπειτα με βάση τις τιμές ρεύματος που βρήκαμε στο προηγούμενο βήμα για το ηλεκτρόδιο 30x3cm, προέκυψαν οι τιμές για το άλλο ηλεκτρόδιο 40x4cm για την ίδια αγωγιμότητα $\sigma=0,08$ S/m, με χρήση του λόγου $K_{I_m} = K_i^2 = \frac{16}{9} \cong 1,778$, προκειμένου να μπορέσει να γίνει η σύγκριση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων σε αυτήν την αγωγιμότητα.
- Τέλος με βάση τις τιμές ρεύματος στις οποίες είχαν γίνει μετρήσεις για το ηλεκτρόδιο 40x4cm για τις αγωγιμότητες $\sigma=1$ S/m και $\sigma=2$ S/m, καταλήξαμε στις τιμές ρεύματος που έπρεπε να λάβουμε μετρήσεις για το ίδιο ηλεκτρόδιο 40x4cm για $\sigma=0,08$ S/m. Και εδώ $K_{I_m} = K_\sigma = 12,5$ και $K_{I_m} = K_\sigma = 25$, αντίστοιχα.
- Συνεπώς, έχοντας πλέον ως βάση τις τιμές ρεύματος για τα ηλεκτρόδια 30x3cm και 40x4cm για την αγωγιμότητα $\sigma=0,08$ S/m βρέθηκαν οι τιμές μετρούμενου ρεύματος για την αγωγιμότητα $\sigma=4$ S/m, με χρήση του λόγου $K_{I_m} = K_\sigma = \frac{4}{0,08} = 50$.

Εφαρμόζοντας όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω κατά τη λήψη των μετρήσεων, ολοκληρώσαμε την πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο. Προτού συνεχίσουμε όμως, πρέπει να γίνουν ορισμένες παρατηρήσεις:

- ✓ Το ρεύμα I_m είναι το μέγιστο του ρεύματος που διαρρέει το δοκίμιο. Έτσι, τα κρουστικά ρεύματα που αναγράφονται στην οθόνη της γεννήτριας, με τιμές 0,5-25kA και βήμα 100A, είναι στην πραγματικότητα τα ισοδύναμα ρεύματα βραχυκύκλωσης που αντιστοιχούν στην εκάστοτε τάση φόρτισης, καθώς υπάρχει μια σημαντική πτώση τάσης στο δοκίμιο. Άρα, στην ουσία το φάσμα των μετρούμενων κρουστικών ρευμάτων που είναι δυνατό να λάβουμε είναι αρκετά μικρότερο και διαφέρει ανάλογα με την αντίσταση του ηλεκτροδίου.
- ✓ Επίσης, για κάθε μετρούμενη τιμή ρεύματος που έπρεπε να λάβουμε, επαναλαμβάναμε τη μέτρηση 5 φορές και υπολογίζαμε το μέσο όρο των μετρήσεων ως την τελική μετρούμενη τιμή για λόγους επαναληψιμότητας και ακρίβειας.
- ✓ Ένα σημαντικό στοιχείο που θα περιορίζει τον αριθμό των δυνατών μετρήσεων, ήταν η ηλεκτρική διάσπαση μεταξύ των ηλεκτροδίων και της δεξαμενής στις πολύ υψηλές τιμές κρουστικών ρευμάτων. Το φαινόμενο εμφανίζεται ως πολλοί μικροί σπινθηρισμοί στον πυθμένα της δεξαμενής, καθώς και επάνω στο ηλεκτρόδιο στις αιχμές του. Πιθανή εμφάνιση του φαινομένου θα ανάγκαζε να σταματήσουν σε εκείνο το σημείο οι μετρήσεις, για το συγκεκριμένο δοκίμιο, προκειμένου να μην υπάρξει αλλοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ωστόσο, για τις δύο τιμές της αγωγιμότητας στις οποίες μετρήσαμε, δεν παρατηρήθηκε διάσπαση. Παρόλα αυτά, αυξήσαμε δοκιμαστικά το ρεύμα πέραν του ορίου που ήταν επιθυμητό να μετρήσουμε, μέχρις ότου να παρατηρήσουμε το φαινόμενο (**Εικόνα 4.14**).



Εικόνα 4.14: Ηλεκτρική διάσπαση μεταξύ ηλεκτροδίου-δεξαμενής

4.3.3 Σχεδίαση καμπυλών V-I και Z(t)

Εκτός από την υλοποίηση των δυο σεναρίων σύγκρισης και την παρουσίαση των πινάκων των αποτελεσμάτων, ένας δεύτερος στόχος κατά την επεξεργασία των μετρήσεων ήταν να μελετήσουμε τη συμβολή του φαινομένου του ιονισμού στις μετρήσεις, ειδικά για την αγωγιμότητα $\sigma=4$ S/m, στην οποία λόγω της μεγάλης τιμής της είναι μεγαλύτερα τα εγχεόμενα ρεύματα και συνεπώς αναμένουμε να είναι πιο έντονη η επίδραση του ιονισμού. Για να το πετύχουμε αυτό ακολουθήσαμε τη μέθοδο των V-I καμπυλών, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από τη Nor και τους Lima-Visacro. Χρησιμοποιώντας τις κυματομορφές V(t) και I(t) σχεδιάσαμε τις καμπύλες V-I, καθώς επίσης και τις καμπύλες της κρουστικής αντίστασης συναρτήσει του χρόνου Z(t).

Για τη σχεδίαση των καμπυλών χρησιμοποιήσαμε το προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Έγινε η εισαγωγή στο Matlab των αρχείων με τα σημεία των κυματομορφών V(t) και I(t), τα οποία αποθηκεύσαμε από τον παλμογράφο και έτσι ήταν δυνατό με χρήση απλών εντολών να υπολογίσουμε τις τιμές της κρουστικής αντίστασης για κάθε χρονική στιγμή και να σχεδιάσουμε τις καμπύλες V-I και Z(t).

Οι καμπύλες V-I και Z(t) παρουσιάζονται στο τέλος σε ειδικό παράρτημα. Σύμφωνα με τους Lima-Visacro, η έναρξη του ιονισμού υποδηλώνεται όταν παρατηρείται ότι δημιουργείται βρόχος στις καμπύλες V-I. Παράλληλα, παρατηρώντας τις καμπύλες Z(t), διαπιστώνουμε πως επηρεάζεται η κρουστική αντίσταση από το φαινόμενο του ιονισμού και συγκεκριμένα εάν εμφανίζεται μια μείωση της αντίστασης κατά τη διάρκεια της έγχυσης του κρουστικού ρεύματος.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Έπειτα γίνεται ερμηνεία των αποτελεσμάτων και παραθέτονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στους συγκεντρωτικούς πίνακες που ακολουθούν. Ξεχωρίζουν δύο περιπτώσεις σύγκρισης και έτσι στην πρώτη ενότητα παραθέτονται οι πίνακες σύγκρισης μεταξύ ηλεκτροδίων και στη δεύτερη ενότητα παραθέτονται οι πίνακες σύγκρισης μεταξύ αγωγιμοτήτων, εφαρμόζοντας κάθε φορά και τους δύο ορισμούς της μεταβατικής αντίστασης. Όλοι οι πίνακες παρουσιάζουν τις θεωρητικές και πειραματικές τιμές των λόγων κλίμακας ρευμάτων K_I και αντιστάσεων K_Z , καθώς και τα ποσοστά απόκλισης (%) μεταξύ των τιμών αυτών. Συγκεκριμένα στους πίνακες σύγκρισης ηλεκτροδίων αναφέρεται και ο λόγος μηκών K_l . Στο σημείο αυτό γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

- ✓ Στη περίπτωση σύγκρισης μεταξύ αγωγιμοτήτων, συγκρίνονται δύο αγωγιμότητες, οι οποίες μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία ($\sigma=0,08 \text{ S/m}$ και $\sigma=4 \text{ S/m}$), αλλά γίνεται και η σύγκριση αυτών με αγωγιμότητες που μετρήθηκαν σε προηγούμενα πειράματα ($\sigma=1 \text{ S/m}$ και $\sigma=2 \text{ S/m}$).
- ✓ Για τον υπολογισμό των λόγων αντιστάσεων K_Z θεωρούνται δύο περιπτώσεις. Στην (α) περίπτωση λαμβάνεται ο λόγος των δύο αγωγιμοτήτων K_σ ίσο με το θεωρητικά επιθυμητό και στη (β) περίπτωση υπολογίζεται από τις ακριβείς ενδείξεις του αγωγιμομέτρου που καταγράφηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Υπενθυμίζεται ότι $K_Z = \frac{1}{K_\sigma \cdot K_l}$.
- ✓ Όσον αφορά στο συμβολισμό, ο δείκτης των ρευμάτων I και των αντιστάσεων Z υποδηλώνει: για τις συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων, το μήκος του ηλεκτροδίου, το οποίο μετράται σε cm και για τις συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων, την αγωγιμότητα, η οποία μετράται σε S/m .

Για τον υπολογισμό της απόκλισης (%) των λόγων κλίμακας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$\Delta K(\%) = \frac{K_{\text{πειρ.}} - K_{\text{θεωρ.}}}{K_{\text{θεωρ.}}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

5.1 ΣΥΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

5.1.1 Για $\sigma=0,08$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

❖ 40x4 - 30x3 → $K_I = 1.333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
7,1	4	1,778	8,10	5,09	1,591	-10,495	0,750	0,750	24,9012	38,915	0,640	-14,682	-14,682
14,2	8	1,778	14,52	7,18	2,021	13,690	0,750	0,750	24,6832	38,864	0,635	-15,318	-15,318
16,0	9	1,778	16,28	9,47	1,719	-3,320	0,750	0,750	24,6683	37,627	0,656	-12,586	-12,586
21,3	12	1,778	22,32	12,16	1,836	3,248	0,750	0,750	25,5914	36,842	0,695	-7,384	-7,384
28,4	16	1,778	28,24	16,74	1,687	-5,108	0,750	0,750	26,1756	37,085	0,706	-5,889	-5,889
32,0	18	1,778	31,44	18,60	1,690	-4,919	0,750	0,750	26,5140	35,785	0,741	-1,210	-1,210
35,6	20	1,778	36,16	21,00	1,722	-3,143	0,750	0,750	26,5044	35,810	0,740	-1,313	-1,313
42,7	24	1,778	42,56	24,20	1,759	-1,074	0,750	0,750	26,6917	36,298	0,735	-1,952	-1,952
48,0	27	1,778	46,72	26,44	1,767	-0,605	0,750	0,750	27,0976	36,369	0,745	-0,657	-0,657
49,8	28	1,778	49,68	28,32	1,754	-1,324	0,750	0,750	27,2947	37,006	0,738	-1,656	-1,656
56,9	32	1,778	56,56	31,76	1,781	0,173	0,750	0,750	27,0509	37,343	0,724	-3,413	-3,413
64,0	36	1,778	64,32	36,40	1,767	-0,604	0,750	0,750	27,0211	37,143	0,727	-3,001	-3,001
71,1	40	1,778	70,40	40,00	1,760	-1,000	0,750	0,750	26,7614	37,000	0,723	-3,563	-3,563
78,2	44	1,778	78,40	42,80	1,832	3,037	0,750	0,750	26,7857	37,617	0,712	-5,058	-5,058
80,0	45	1,778	80,00	45,12	1,773	-0,266	0,750	0,750	26,6500	37,855	0,704	-6,132	-6,132
85,3	48	1,778	85,28	48,48	1,759	-1,052	0,750	0,750	26,5009	37,706	0,703	-6,290	-6,290
92,4	52	1,778	92,48	51,76	1,787	0,502	0,750	0,750	26,7734	37,867	0,707	-5,729	-5,729
96,0	54	1,778	96,32	53,84	1,789	0,632	0,750	0,750	26,8688	37,964	0,708	-5,635	-5,635
99,6	56	1,778	99,20	56,08	1,769	-0,499	0,750	0,750	26,9355	37,732	0,714	-4,818	-4,818
112,0	63	1,778	112,00	62,56	1,790	0,703	0,750	0,750	26,7857	38,171	0,702	-6,437	-6,437
113,8	64	1,778	114,00	63,84	1,786	0,446	0,750	0,750	26,9123	38,033	0,708	-5,652	-5,652
128,0	72	1,778	127,80	71,76	1,781	0,178	0,750	0,750	26,8232	38,294	0,700	-6,607	-6,607
142,2	80	1,778	142,20	81,92	1,736	-2,359	0,750	0,750	26,9761	38,037	0,709	-5,439	-5,439
156,4	88	1,778	155,80	88,00	1,770	-0,412	0,750	0,750	26,9320	38,091	0,707	-5,727	-5,727

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
170,7	96	1,778	171,20	95,84	1,786	0,480	0,750	0,750	26,9626	37,896	0,711	-5,136	-5,136
184,9	104	1,778	184,00	104,40	1,762	-0,862	0,750	0,750	26,9565	37,854	0,712	-5,052	-5,052
192,0	108	1,778	192,00	107,80	1,781	0,186	0,750	0,750	27,1250	37,848	0,717	-4,442	-4,442
224,0	126	1,778	224,00	126,00	1,778	0,000	0,750	0,750	26,6429	37,714	0,706	-5,808	-5,808
256,0	144	1,778	256,00	144,40	1,773	-0,277	0,750	0,750	26,5000	37,784	0,701	-6,486	-6,486
Μέσος Όρος					1,769	-0,484					0,708	-5,623	-5,623

5.1.2 Για $\sigma=0,08$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

❖ 40x4 - 30x3 → $K_I = 1,333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
7,1	4	1,778	7,70	4,74	1,624	-8,623	0,750	0,750	25,1429	40,0844	0,627	-16,367	-16,367
14,2	8	1,778	14,00	6,84	2,047	15,132	0,750	0,750	24,6286	38,1287	0,646	-13,876	-13,876
16,0	9	1,778	15,64	9,10	1,719	-3,324	0,750	0,750	24,8593	36,5714	0,680	-9,367	-9,367
21,3	12	1,778	21,80	11,76	1,854	4,273	0,750	0,750	25,1009	35,1701	0,714	-4,840	-4,840
28,4	16	1,778	27,68	16,88	1,640	-7,761	0,750	0,750	25,2890	34,1706	0,740	-1,323	-1,323
32,0	18	1,778	30,70	17,88	1,717	-3,419	0,750	0,750	25,6938	35,0783	0,732	-2,337	-2,337
35,6	20	1,778	35,46	20,32	1,745	-1,839	0,750	0,750	25,3582	35,1969	0,720	-3,938	-3,938
42,7	24	1,778	41,76	23,54	1,774	-0,212	0,750	0,750	25,3640	34,3246	0,739	-1,474	-1,474
48,0	27	1,778	46,12	25,66	1,797	1,101	0,750	0,750	25,8803	34,5440	0,749	-0,107	-0,107
49,8	28	1,778	49,14	27,70	1,774	-0,212	0,750	0,750	25,5271	35,1769	0,726	-3,243	-3,243
56,9	32	1,778	55,82	31,08	1,796	1,026	0,750	0,750	26,0265	35,4698	0,734	-2,164	-2,164
64,0	36	1,778	63,58	35,78	1,777	-0,045	0,750	0,750	25,7691	34,7904	0,741	-1,240	-1,240
71,1	40	1,778	69,48	39,26	1,770	-0,452	0,750	0,750	25,3886	34,4778	0,736	-1,817	-1,817
78,2	44	1,778	77,24	42,22	1,829	2,907	0,750	0,750	25,4272	35,1871	0,723	-3,649	-3,649
80,0	45	1,778	78,80	44,36	1,776	-0,079	0,750	0,750	25,1269	35,5275	0,707	-5,700	-5,700
85,3	48	1,778	84,02	47,88	1,755	-1,292	0,750	0,750	25,0417	35,2548	0,710	-5,293	-5,293

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
92,4	52	1,778	91,58	51,08	1,793	0,849	0,750	0,750	25,6825	35,6304	0,721	-3,893	-3,893
96,0	54	1,778	94,84	53,12	1,785	0,428	0,750	0,750	25,1371	35,3916	0,710	-5,299	-5,299
99,6	56	1,778	98,16	55,32	1,774	-0,190	0,750	0,750	25,2649	35,2856	0,716	-4,532	-4,532
112,0	63	1,778	111,00	61,84	1,795	0,948	0,750	0,750	25,1577	35,6404	0,706	-5,883	-5,883
113,8	64	1,778	113,00	62,96	1,794	0,939	0,750	0,750	25,2080	35,5781	0,709	-5,530	-5,530
128,0	72	1,778	126,90	70,94	1,789	0,654	0,750	0,750	25,1772	35,4666	0,710	-5,348	-5,348
142,2	80	1,778	141,40	80,88	1,748	-1,660	0,750	0,750	25,4314	35,4105	0,718	-4,242	-4,242
156,4	88	1,778	154,70	87,16	1,775	-0,162	0,750	0,750	25,3394	35,1537	0,721	-3,891	-3,891
170,7	96	1,778	169,20	95,02	1,781	0,163	0,750	0,750	25,4374	34,5190	0,737	-1,746	-1,746
184,9	104	1,778	182,30	103,40	1,764	-0,779	0,750	0,750	25,4498	34,9845	0,727	-3,006	-3,006
192,0	108	1,778	189,90	106,80	1,778	0,009	0,750	0,750	25,5687	34,7500	0,736	-1,895	-1,895
224,0	126	1,778	221,40	124,90	1,773	-0,256	0,750	0,750	25,2890	34,7213	0,728	-2,888	-2,888
256,0	144	1,778	251,80	143,30	1,758	-1,131	0,750	0,750	25,4130	34,8409	0,729	-2,747	-2,747
Μέσος Όρος					1,776	-0,104					0,717	-4,401	-4,401

5.1.3 Για $\sigma=4$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

❖ 60x6 - 40x4 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{40} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{40} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{40} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
225	100	2,25	223,2	119,0	1,876	-16,639	0,667	0,667	1,1577	1,3647	0,848	27,248	27,248
450	200	2,25	450,4	195,6	2,303	2,340	0,667	0,667	1,1794	1,3538	0,871	30,678	30,678
675	300	2,25	673,6	298,0	2,260	0,462	0,667	0,667	1,1853	1,3745	0,862	29,350	29,350
900	400	2,25	899,2	400,8	2,244	-0,288	0,667	0,667	1,1899	1,3653	0,872	30,738	30,738
1125	500	2,25	1124,0	496,0	2,266	0,717	0,667	0,667	1,1851	1,3645	0,869	30,272	30,272
1350	600	2,25	1348,0	599,2	2,250	-0,015	0,667	0,667	1,1246	1,3672	0,823	23,391	23,391
Μέσος Όρος					2,200	-2,237					0,857	28,613	28,613

❖ 40x4 - 20x2 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	400,8	104,6	3,832	-4,207	0,500	0,496	1,3653	1,7591	0,776	55,225	56,355
600	150	4	599,2	147,2	4,071	1,766	0,500	0,496	1,3672	1,7717	0,772	54,329	55,453
800	200	4	795,2	202,4	3,929	-1,779	0,500	0,496	1,3682	1,8103	0,756	51,160	52,261
1000	250	4	1000,4	246,0	4,067	1,667	0,500	0,496	1,3515	1,8081	0,747	49,487	50,575
1200	300	4	1198,0	299,6	3,999	-0,033	0,500	0,496	1,3456	1,8291	0,736	47,129	48,201
1400	350	4	1396,0	349,2	3,998	-0,057	0,500	0,496	1,2722	1,8236	0,698	39,527	40,543
1600	400	4	1600,0	404,0	3,960	-0,990	0,500	0,496	1,2650	1,8139	0,697	39,481	40,497
2000	500	4	2000,0	492,8	4,058	1,461	0,500	0,496	1,2940	1,8084	0,716	43,107	44,149
2400	600	4	2400,0	594,4	4,038	0,942	0,500	0,496	1,2667	1,8136	0,698	39,686	40,703
2800	700	4	2792,0	694,4	4,021	0,518	0,500	0,496	1,2550	1,8088	0,694	38,771	39,781
3200	800	4	3200,0	788,8	4,057	1,420	0,500	0,496	1,2650	1,8281	0,692	38,396	39,403
Μέσος Όρος					4,003	0,064					0,726	45,118	46,175

❖ 40x4 - 30x3 → $K_I = 1,333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
177,8	100	1,778	166,4	108,4	1,535	-13,653	0,750	0,745	1,3462	1,5055	0,894	19,218	20,086
355,6	200	1,778	355,2	196,4	1,809	1,731	0,750	0,745	1,3671	1,5845	0,863	15,039	15,877
533,3	300	1,778	538,4	292,8	1,839	3,432	0,750	0,745	1,3670	1,5273	0,895	19,339	20,208
711,1	400	1,778	702,4	391,2	1,796	0,997	0,750	0,745	1,3599	1,5378	0,884	17,907	18,766
888,9	500	1,778	886,4	500,0	1,773	-0,280	0,750	0,745	1,3538	1,5328	0,883	17,762	18,619
1067,0	600	1,778	1070,0	598,4	1,788	0,581	0,750	0,745	1,3533	1,5321	0,883	17,772	18,629
1244,0	700	1,778	1244,0	691,2	1,800	1,237	0,750	0,745	1,3408	1,5567	0,861	14,843	15,680
1422,0	800	1,778	1424,0	796,8	1,787	0,527	0,750	0,745	1,2725	1,5663	0,812	8,323	9,112
1600,0	900	1,778	1600,0	905,6	1,767	-0,618	0,750	0,745	1,2650	1,5592	0,811	8,176	8,964
Μέσος Όρος					1,766	-0,672					0,865	15,375	16,216

❖ 30x3 - 20x2 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{30} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{30} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{30} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
225	100	2,25	220,4	104,6	2,107	-6,352	0,667	0,667	1,5136	1,7591	0,861	29,068	29,068
450	200	2,25	438,4	202,4	2,166	-3,733	0,667	0,667	1,5401	1,8103	0,851	27,617	27,617
675	300	2,25	666,4	299,6	2,224	-1,142	0,667	0,667	1,5456	1,8291	0,845	26,752	26,752
900	400	2,25	905,6	404,0	2,242	-0,374	0,667	0,667	1,5592	1,8236	0,855	28,251	28,251
1125	500	2,25	1108,0	492,8	2,248	-0,072	0,667	0,667	1,5668	1,8084	0,866	29,956	29,956
1350	600	2,25	1354,0	594,4	2,278	1,241	0,667	0,667	1,5657	1,8136	0,863	29,500	29,500
1575	700	2,25	1588,0	694,4	2,287	1,639	0,667	0,667	1,5113	1,8088	0,836	25,335	25,335
1800	800	2,25	1804,0	788,8	2,287	1,645	0,667	0,667	1,5188	1,8281	0,831	24,626	24,626
Μέσος Όρος					2,230	-0,894					0,851	27,638	27,638

5.1.4 Για $\sigma=4$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

❖ 60x6 - 40x4 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{40} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{40} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{40} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
225	100	2,25	220,80	118,04	1,871	-16,864	0,667	0,667	0,5978	0,8404	0,711	6,705	6,705
450	200	2,25	446,08	192,64	2,316	2,916	0,667	0,667	0,6062	0,8949	0,677	1,600	1,600
675	300	2,25	664,00	295,12	2,250	-0,003	0,667	0,667	0,6120	0,8620	0,710	6,502	6,502
900	400	2,25	891,20	395,68	2,252	0,103	0,667	0,667	0,6032	0,8896	0,678	1,713	1,713
1125	500	2,25	1116,80	490,88	2,275	1,115	0,667	0,667	0,5981	0,8638	0,692	3,873	3,873
1350	600	2,25	1324,00	594,08	2,229	-0,949	0,667	0,667	0,5740	0,8699	0,660	-1,022	-1,022
Μέσος Όρος					2,199	-2,280					0,688	3,229	3,229

❖ 40x4 - 20x2 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	395,68	104,02	3,804	-4,903	0,500	0,496	0,8896	1,3113	0,678	35,685	36,673
600	150	4	594,08	146,08	4,067	1,670	0,500	0,496	0,8699	1,3417	0,648	29,671	30,615
800	200	4	785,28	200,40	3,919	-2,036	0,500	0,496	0,8517	1,3892	0,613	22,611	23,504
1000	250	4	988,48	243,36	4,062	1,545	0,500	0,496	0,8538	1,3609	0,627	25,477	26,390
1200	300	4	1188,20	297,36	3,996	-0,108	0,500	0,496	0,8383	1,4017	0,598	19,610	20,481
1400	350	4	1371,20	346,64	3,956	-1,108	0,500	0,496	0,8168	1,3963	0,585	16,999	17,850
1600	400	4	1576,00	402,08	3,920	-2,010	0,500	0,496	0,8173	1,3768	0,594	18,715	19,580
2000	500	4	1978,40	489,44	4,042	1,054	0,500	0,496	0,8067	1,3697	0,589	17,792	18,649
2400	600	4	2361,60	589,76	4,004	0,109	0,500	0,496	0,8198	1,3809	0,594	18,732	19,596
2800	700	4	2736,00	689,76	3,967	-0,835	0,500	0,496	0,8392	1,3709	0,612	22,427	23,318
3200	800	4	3163,20	780,48	4,053	1,322	0,500	0,496	0,8169	1,3879	0,589	17,720	18,577
Μέσος Όρος					3,981	-0,4817					0,612	22,312	23,203

❖ 40x4 - 30x3 → $K_I = 1,333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
177,8	100	1,778	163,84	107,44	1,525	-14,222	0,750	0,745	0,8887	0,9978	0,891	18,755	19,620
355,6	200	1,778	352,80	194,56	1,813	1,999	0,750	0,745	0,8549	1,0033	0,852	13,610	14,437
533,3	300	1,778	533,44	290,24	1,838	3,383	0,750	0,745	0,8698	1,0198	0,853	13,720	14,548
711,1	400	1,778	697,92	387,04	1,803	1,431	0,750	0,745	0,8895	1,0335	0,861	14,757	15,593
888,9	500	1,778	878,72	495,84	1,772	-0,315	0,750	0,745	0,8421	1,0294	0,818	9,081	9,876
1067,0	600	1,778	1066,90	594,40	1,795	0,962	0,750	0,745	0,8286	1,0202	0,812	8,292	9,080
1244,0	700	1,778	1233,60	686,88	1,796	1,022	0,750	0,745	0,8431	1,0179	0,828	10,427	11,232
1422,0	800	1,778	1397,60	786,56	1,777	-0,052	0,750	0,745	0,8214	1,0232	0,803	7,039	7,818
1600,0	900	1,778	1576,00	896,32	1,758	-1,096	0,750	0,745	0,8173	1,0353	0,789	5,248	6,014
Μέσος Όρος					1,764	-0,765					0,834	11,214	12,024

❖ 30x3 - 20x2 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{30} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{30} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{30} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
225	100	2,25	217,76	104,02	2,093	-6,958	0,667	0,667	1,0213	1,3113	0,779	16,829	16,829
450	200	2,25	432,80	200,40	2,160	-4,014	0,667	0,667	1,0388	1,3892	0,748	12,165	12,165
675	300	2,25	662,88	297,36	2,229	-0,924	0,667	0,667	1,0017	1,4017	0,715	7,196	7,196
900	400	2,25	896,32	402,08	2,229	-0,924	0,667	0,667	1,0353	1,3768	0,752	12,796	12,796
1125	500	2,25	1100,80	489,44	2,249	-0,040	0,667	0,667	1,0065	1,3697	0,735	10,227	10,227
1350	600	2,25	1347,50	589,76	2,285	1,549	0,667	0,667	1,0300	1,3809	0,746	11,888	11,888
1575	700	2,25	1569,60	689,76	2,276	1,137	0,667	0,667	0,9913	1,3709	0,723	8,468	8,468
1800	800	2,25	1779,20	780,48	2,280	1,317	0,667	0,667	0,9892	1,3879	0,713	6,913	6,913
Μέσος Όρος					2,225	-1,107					0,739	10,810	10,810

5.2 ΣΥΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΩΝ

5.2.1 Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

❖ Ηλεκτρόδιο 20x2cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		Z $\pi\epsilon\iota\rho.$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_4 (A)	I_2 (A)	K_I	I_4 (A)	I_2 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_4 (Ω)	Z_2 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200	100	2	202,4	99,4	2,036	1,811	0,500	0,522	1,810	2,889	0,627	25,307	20,062
300	150	2	299,6	150,0	1,997	-0,133	0,500	0,522	1,829	2,907	0,629	25,856	20,587
400	200	2	404,0	198,8	2,032	1,610	0,500	0,522	1,814	2,954	0,614	22,819	17,677
500	250	2	492,8	250,4	1,968	-1,597	0,500	0,522	1,808	2,939	0,615	23,053	17,902
600	300	2	594,4	302,0	1,968	-1,589	0,500	0,522	1,814	2,956	0,613	22,694	17,558
700	350	2	694,4	351,6	1,975	-1,251	0,500	0,522	1,809	2,986	0,606	21,135	16,064
800	400	2	788,8	401,6	1,964	-1,793	0,500	0,522	1,828	2,968	0,616	23,182	18,025
900	450	2	900,8	450,4	2,000	0,000	0,500	0,522	1,825	2,948	0,619	23,795	18,613
1000	500	2	996,8	500,0	1,994	-0,320	0,500	0,522	1,822	2,928	0,622	24,442	19,233
Μέσος Όρος					1,993	-0,363					0,618	23,587	18,414

5.2.2 Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=1$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

❖ Ηλεκτρόδιο 20x2cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_4 (A)	I_1 (A)	K_I	I_4 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_4 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	404,0	98,9	4,086	2,144	0,250	0,260	1,814	5,890	0,308	23,183	18,578
600	150	4	594,4	148,2	4,011	0,270	0,250	0,260	1,814	5,873	0,309	23,518	18,900
800	200	4	788,8	198,0	3,984	-0,404	0,250	0,260	1,828	5,899	0,310	23,960	19,326
1000	250	4	996,8	248,8	4,006	0,161	0,250	0,260	1,822	5,868	0,310	24,184	19,542
Μέσος Όρος					4,022	-0,543					0,309	23,711	19,086

5.2.3 Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

❖ Ηλεκτρόδιο 30x3cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_4 (A)	I_2 (A)	K_I	I_4 (A)	I_2 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_4 (Ω)	Z_2 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200	100	2	194,6	100,4	1,937	-3,146	0,500	0,524	1,003	1,613	0,622	24,408	18,648
400	200	2	387,0	200,8	1,927	-3,625	0,500	0,524	1,033	1,673	0,618	23,526	17,807
450	225	2	432,8	225,2	1,922	-3,908	0,500	0,524	1,039	1,616	0,643	28,539	22,588
600	300	2	594,4	299,6	1,984	-0,801	0,500	0,524	1,020	1,648	0,619	23,845	18,111
800	400	2	786,6	400,8	1,962	-1,876	0,500	0,524	1,023	1,665	0,615	22,930	17,239
900	450	2	896,3	450,4	1,990	-0,497	0,500	0,524	1,035	1,638	0,632	26,442	20,588
1000	500	2	1012,0	499,2	2,028	1,410	0,500	0,524	1,011	1,647	0,614	22,782	17,098
1350	675	2	1348,0	674,4	1,998	-0,095	0,500	0,524	1,030	1,630	0,632	26,394	20,542
1600	800	2	1570,0	800,0	1,962	-1,900	0,500	0,524	0,991	1,645	0,603	20,527	14,947
1800	900	2	1779,0	899,2	1,979	-1,068	0,500	0,524	0,989	1,619	0,611	22,184	16,527
Μέσος Όρος					1,969	-1,551					0,621	24,158	18,410

❖ Ηλεκτρόδιο 20x2cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)		
I_4 (A)	I_2 (A)	K_I	I_4 (A)	I_2 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_4 (Ω)	Z_2 (Ω)	K_Z	(α)	(β)	
200	100	2	200,4	99,4	2,016	0,805	0,500	0,522	1,389	2,435	0,571	14,123	9,346	
300	150	2	297,4	150,0	1,982	-0,880	0,500	0,522	1,402	2,448	0,573	14,515	9,722	
400	200	2	402,1	198,8	2,023	1,127	0,500	0,522	1,377	2,523	0,546	9,137	4,569	
500	250	2	489,4	250,4	1,955	-2,268	0,500	0,522	1,370	2,518	0,544	8,813	4,258	
600	300	2	589,8	302,0	1,953	-2,358	0,500	0,522	1,381	2,511	0,550	9,977	5,373	
700	350	2	689,8	351,6	1,962	-1,911	0,500	0,522	1,371	2,494	0,550	9,948	5,346	
800	400	2	780,5	401,6	1,943	-2,829	0,500	0,522	1,388	2,522	0,550	10,064	5,457	
900	450	2	891,8	450,4	1,980	-0,995	0,500	0,522	1,413	2,544	0,555	11,091	6,441	
1000	500	2	988,2	500,0	1,976	-1,184	0,500	0,522	1,401	2,496	0,561	12,226	7,528	
Μέσος Όρος					1,977	-1,164						0,555	10,959	6,314

5.2.4 Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=1$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

❖ Ηλεκτρόδιο 40x4cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)		
I_4 (A)	I_1 (A)	K_I	I_4 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_4 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)	
400	100	4	395,7	98,2	4,029	0,733	0,250	0,270	0,89	2,668	0,333	33,373	23,549	
800	200	4	785,3	198,4	3,958	-1,048	0,250	0,270	0,852	2,722	0,313	25,164	15,944	
1200	300	4	1188,0	298,0	3,987	-0,322	0,250	0,270	0,838	2,733	0,307	22,694	13,656	
1600	400	4	1576,0	400,0	3,940	-1,500	0,250	0,270	0,817	2,764	0,296	18,272	9,560	
2000	500	4	1978,0	499,2	3,963	-0,921	0,250	0,270	0,807	2,753	0,293	17,203	8,570	
2400	600	4	2362,0	600,8	3,931	-1,731	0,250	0,270	0,820	2,730	0,300	20,128	11,279	
2800	700	4	2736,0	700,8	3,904	-2,397	0,250	0,270	0,839	2,700	0,311	24,334	15,175	
3200	800	4	3163,0	798,4	3,962	-0,952	0,250	0,270	0,817	2,796	0,292	16,883	8,274	
Μέσος Όρος					3,959	-1,017						0,306	22,256	13,251

❖ Ηλεκτρόδιο 30x3cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_4 (A)	I_1 (A)	K_I	I_4 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_4 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	387,0	102,8	3,765	-5,875	0,250	0,260	1,033	3,767	0,274	9,754	5,651
800	200	4	786,6	198,8	3,957	-1,087	0,250	0,260	1,023	3,847	0,266	6,386	2,409
900	225	4	896,3	224,8	3,987	-0,320	0,250	0,260	1,035	3,801	0,272	8,963	4,890
1600	400	4	1570,0	399,2	3,932	-1,703	0,250	0,260	0,991	3,717	0,267	6,669	2,681
1800	450	4	1779,0	448,0	3,971	-0,714	0,250	0,260	0,989	3,777	0,262	4,767	0,851
Μέσος Όρος					3,922	-1,940					0,268	7,308	3,296

❖ Ηλεκτρόδιο 20x2cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_4 (A)	I_1 (A)	K_I	I_4 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_4 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	402,1	98,9	4,066	1,659	0,250	0,260	1,377	5,574	0,247	-1,203	-4,897
600	150	4	589,8	148,2	3,979	-0,513	0,250	0,260	1,381	5,517	0,250	0,122	-3,621
800	200	4	780,5	198,0	3,942	-1,455	0,250	0,260	1,388	5,568	0,249	-0,291	-4,019
1000	250	4	988,2	248,8	3,972	-0,707	0,250	0,260	1,401	5,601	0,250	0,019	-3,720
Μέσος Όρος					3,990	-0,254					0,249	-0,338	-4,064

5.2.5 Σύγκριση $\sigma=2$ S/m με $\sigma=0,08$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

❖ Ηλεκτρόδιο 40x4cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		Z $\pi\epsilon\iota\rho.$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	$I_{0,08}$ (A)	K_I	I_2 (A)	$I_{0,08}$ (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	$Z_{0,08}$ (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200,0	8,000	25	202,4	8,20	24,683	-1,268	0,040	0,037	1,2292	23,1220	0,053	32,909	42,878
300,0	12,000	25	300,4	11,22	26,774	7,094	0,040	0,037	1,1505	23,3868	0,049	22,982	32,206
355,6	14,224	25	356,8	14,10	25,305	1,220	0,040	0,037	1,1749	24,2270	0,049	21,238	30,331
400,0	16,000	25	400,8	15,84	25,303	1,212	0,040	0,037	1,1916	24,5960	0,048	21,119	30,203
500,0	20,000	25	499,2	19,46	25,653	2,610	0,040	0,037	1,1923	23,8438	0,050	25,012	34,388
533,3	21,332	25	532,8	21,12	25,227	0,909	0,040	0,037	1,1832	23,9773	0,049	23,365	32,617
600,0	24,000	25	600,8	23,12	25,986	3,945	0,040	0,037	1,1851	24,0657	0,049	23,109	32,342
711,1	28,444	25	700,0	27,78	25,198	0,792	0,040	0,037	1,1794	24,6796	0,048	19,474	28,434
800,0	32,000	25	800,0	31,24	25,608	2,433	0,040	0,037	1,1780	24,4558	0,048	20,421	29,453
888,9	35,556	25	899,2	35,04	25,662	2,648	0,040	0,037	1,2028	24,2237	0,050	24,139	33,450
1000,0	40,000	25	1000,0	39,32	25,432	1,729	0,040	0,037	1,2320	24,2523	0,051	26,998	36,523
1066,7	42,668	25	1068,0	41,34	25,835	3,338	0,040	0,037	1,1536	24,1509	0,048	19,411	28,367
1100,0	44,000	25	1100,0	43,24	25,439	1,758	0,040	0,037	1,1818	24,3663	0,049	21,255	30,349
1200,0	48,000	25	1200,0	46,64	25,729	2,916	0,040	0,037	1,1767	24,3396	0,048	20,859	29,924
1244,4	49,776	25	1244,0	48,52	25,639	2,556	0,040	0,037	1,1929	24,1385	0,049	23,550	32,816
1300,0	52,000	25	1300,0	51,12	25,430	1,721	0,040	0,037	1,1815	24,3818	0,049	21,149	30,236
1400,0	56,000	25	1400,0	54,70	25,594	2,377	0,040	0,037	1,1629	23,9561	0,049	21,353	30,454
1422,2	56,888	25	1420,0	55,68	25,503	2,011	0,040	0,037	1,1690	23,8506	0,049	22,535	31,725
1500,0	60,000	25	1500,0	58,84	25,493	1,971	0,040	0,037	1,1947	24,2556	0,049	23,133	32,368
1600,0	64,000	25	1600,0	63,08	25,365	1,458	0,040	0,037	1,1425	23,9696	0,048	19,162	28,099
1700,0	68,000	25	1700,0	66,66	25,503	2,010	0,040	0,037	1,1529	23,9424	0,048	20,387	29,416
1777,8	71,112	25	1780,0	70,42	25,277	1,108	0,040	0,037	1,1596	23,8569	0,049	21,511	30,625
2000,0	80,000	25	2000,0	79,14	25,272	1,087	0,040	0,037	1,1980	24,1092	0,050	24,227	33,544
Μέσος Όρος					25,518	2,071					0,049	22,578	31,772

❖ Ηλεκτρόδιο 30x3cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	$I_{0,08}$ (A)	K_I	I_2 (A)	$I_{0,08}$ (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	$Z_{0,08}$ (Ω)	K_Z	(α)	(β)
100	4	25	100,4	4,74	21,190	-15,241	0,040	0,037	1,6129	40,0844	0,040	0,594	8,139
200	8	25	200,8	6,84	29,357	17,427	0,040	0,037	1,6733	38,1287	0,044	9,715	17,943
225	9	25	225,2	9,10	24,747	-1,011	0,040	0,037	1,6163	36,5714	0,044	10,492	18,779
300	12	25	299,6	11,76	25,476	1,905	0,040	0,037	1,6475	35,1701	0,047	17,112	25,895
400	16	25	400,8	16,88	23,744	-5,024	0,040	0,037	1,6647	34,1706	0,049	21,791	30,925
450	18	25	450,4	17,88	25,190	0,761	0,040	0,037	1,6377	35,0783	0,047	16,714	25,468
500	20	25	499,2	20,32	24,567	-1,732	0,040	0,037	1,6474	35,1969	0,047	17,016	25,792
600	24	25	601,6	23,54	25,556	2,226	0,040	0,037	1,6197	34,3246	0,047	17,968	26,816
675	27	25	674,4	25,66	26,282	5,129	0,040	0,037	1,6299	34,5440	0,047	17,958	26,804
700	28	25	700,0	27,70	25,271	1,083	0,040	0,037	1,6389	35,1769	0,047	16,473	25,208
800	32	25	800,0	31,08	25,740	2,960	0,040	0,037	1,6450	35,4698	0,046	15,944	24,640
900	36	25	899,2	35,78	25,131	0,525	0,040	0,037	1,6192	34,7904	0,047	16,355	25,082
1000	40	25	1000,0	39,26	25,471	1,885	0,040	0,037	1,6440	34,4778	0,048	19,207	28,148
1100	44	25	1100,0	42,22	26,054	4,216	0,040	0,037	1,6582	35,1871	0,047	17,812	26,648
1125	45	25	1124,0	44,36	25,338	1,353	0,040	0,037	1,6512	35,5275	0,046	16,195	24,909
1200	48	25	1200,0	47,88	25,063	0,251	0,040	0,037	1,6867	35,2548	0,048	19,605	28,576
1300	52	25	1300,0	51,08	25,450	1,801	0,040	0,037	1,6554	35,6304	0,046	16,150	24,861
1350	54	25	1350,0	53,12	25,414	1,657	0,040	0,037	1,6148	35,3916	0,046	14,068	22,623
1400	56	25	1400,0	55,32	25,307	1,229	0,040	0,037	1,6657	35,2856	0,047	18,017	26,868
1575	63	25	1574,0	61,84	25,453	1,811	0,040	0,037	1,6417	35,6404	0,046	15,156	23,792
1800	72	25	1800,0	70,94	25,374	1,494	0,040	0,037	1,6356	35,4666	0,046	15,288	23,935
Μέσος Όρος					25,294	1,176					0,046	15,697	24,374

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παραθέτονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των πινάκων των αποτελεσμάτων. Θα γίνει προσπάθεια να ερμηνευθούν και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα των δύο συγκρίσεων - συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων και συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων - και για τους δύο ορισμούς της μεταβατικής αντίστασης.

5.3.1 Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων

Για την αγωγιμότητα $\sigma=0,08$ S/m για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$ και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$:

- Πραγματοποιήθηκε μόνο μία σύγκριση, η 40x4-30x3.
- Παρατηρείται ότι, και με τους δύο ορισμούς της μεταβατικής αντίστασης προκύπτουν πολύ καλά αποτελέσματα, καθώς οι τιμές για τις αποκλίσεις K_Z κυμαίνονται περίπου στο 4-5%. Η αγωγιμότητα $\sigma=0,08$ S/m, αντιστοιχεί σε ειδική αντίσταση $\rho=12,5 \Omega \cdot m$, η οποία ως τάξη μεγέθους προσεγγίζει περισσότερο την ειδική αντίσταση του εδάφους σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αγωγιμότητες στις οποίες έγιναν μετρήσεις. Ενδεχομένως τα πολύ καλά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις συγκρίσεις να δικαιολογούνται από το γεγονός ότι οι θεωρητικές σχέσεις υπολογισμού της αντίστασης ισχύουν εδώ με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς έχουν εξ αρχής διατυπωθεί για συστήματα γείωσης στο έδαφος.
- Για τις αποκλίσεις K_I , ισχύει $K_I < 1\%$.
- Επίσης παρατηρείται ότι στις πολύ χαμηλές τιμές ρευμάτων, τα K_Z είναι μεγαλύτερα, λόγω ορισμένων αποκλίσεων στις επιμέρους αντιστάσεις των ηλεκτροδίων, οι οποίες μεταφράζονται σε μεγάλες % αποκλίσεις στους αντίστοιχους λόγους.

Για την αγωγιμότητα $\sigma=4$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$:

- Για όλες τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν, ισχύει $K_{Z\alpha} \leq K_{Z\beta}$.
- Η μεγαλύτερη απόκλιση στα K_Z , λαμβάνεται για τη σύγκριση 40x4-20x2 με τιμή περίπου 45%. Ακολουθούν οι συγκρίσεις 60x6-40x4 και 30x3-20x2 με τιμές απόκλισης K_Z περίπου 28%. Η καλύτερη σύγκριση είναι η 40x4-30x3, με τιμή απόκλισης K_Z περίπου 15%. Αν και η συγκεκριμένη τιμή απόκλισης είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι για την αγωγιμότητα $\sigma=0,08$ S/m, μπορεί να θεωρηθεί ανεκτή.
- Οι συγκρίσεις 60x6-20x2 και 60x6-30x3 δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν λόγω των λίγων διαθέσιμων μετρήσεων.
- Για τις αποκλίσεις K_I ισχύει γενικά $K_I < 1\%$, με εξαίρεση τη σύγκριση 60x6-40x4 που η τιμή απόκλισης K_I είναι λίγο μεγαλύτερη από 1%.

Για την αγωγιμότητα $\sigma=4 \text{ S/m}$ και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$:

- Ο δεύτερος ορισμός της μεταβατικής αντίστασης δίνει καλύτερα αποτελέσματα, όπως άλλωστε αναμενόταν. Σε σύγκριση με τον πρώτο ορισμό, οι λόγοι μεταβατικών αντιστάσεων $K_{Z\alpha}$ και $K_{Z\beta}$ έχουν μικρότερες αποκλίσεις σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές. Και εδώ ισχύει $K_{Z\alpha} \leq K_{Z\beta}$.
- Η μεγαλύτερη απόκλιση στα K_Z , λαμβάνεται και πάλι για τη σύγκριση 40x4-20x2 με τιμή περίπου 22-23%, δηλαδή σχεδόν υποδιπλασιασμένη σε σχέση με τον πρώτο ορισμό. Η καλύτερη σύγκριση είναι αυτή τη φορά η 60x6-40x4 με τιμή ιδιαίτερα ικανοποιητική, περίπου 3%. Οι συγκρίσεις 40x4-30x3 και 30x3-20x2 εμφανίζουν και αυτές βελτιωμένες αποκλίσεις στα K_Z , με τιμές αρκετά ικανοποιητικές περίπου 10-12%.
- Για τις αποκλίσεις K_I ισχύει γενικά $K_I < 1\%$, με εξαίρεση τις συγκρίσεις 60x6-40x4, 60x6-30x3 και 30x3-20x2 που οι τιμές απόκλισης K_I είναι λίγο μεγαλύτερες από 1%.

Συμπεραίνεται πως για τη σύγκριση μεταξύ ηλεκτροδίων, ο δεύτερος ορισμός της μεταβατικής αντίστασης ($Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$) δίνει αρκετά πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τον πρώτο ορισμό.

Επίσης πρέπει να γίνουν δύο παρατηρήσεις:

- Η απειροελάχιστη απόκλιση στους λόγους K_I και στις δύο περιπτώσεις αγωγιμότητας υποδηλώνει ότι είναι αμελητέα η επίδραση της μη ακριβούς ρύθμισης του ρεύματος δοκιμίου μέσω ρύθμισης της τάσης φόρτισης της γεννήτριας.
- Παρόλο που στα αποτελέσματα των συγκρίσεων παρατηρείται ότι $K_{Z\alpha} \leq K_{Z\beta}$, δεν κρίνεται αναγκαίο να ληφθεί υπόψη η απόκλιση στο λόγο των αγωγιμοτήτων σ , καθώς είναι αρκετά μικρή και βρίσκεται μέσα στα όρια σφάλματος του αγωγιμομέτρου ή λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας του διαλύματος.

5.3.2 Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων

❖ Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$:

Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=2$ S/m και $\sigma=1$ S/m

Παρατηρείται ότι λαμβάνονται οριακά αποτελέσματα για την αγωγιμότητα $\sigma=4$ S/m. Η απόκλιση στα K_Z για το ηλεκτρόδιο 20x2 έχει τιμή περίπου 20%.

❖ Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$:

Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=2$ S/m

Η απόκλιση στα K_Z για το ηλεκτρόδιο 20x2, είναι εμφανώς βελτιωμένη και είναι αποδεκτή. Για το ηλεκτρόδιο 30x3, η απόκλιση έχει βελτιωθεί παραμένει όμως σχετικά μεγάλη, αλλά μπορεί σε αυτήν την περίπτωση να θεωρηθεί ανεκτή. Για τα μεγαλύτερα ηλεκτρόδια 40x4 και 60x6 υπάρχει πρόβλημα, καθώς οι αποκλίσεις αν και βελτιωμένες σε σχέση με τον πρώτο ορισμό, παραμένουν αρκετά μεγάλες και τα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Παρατηρείται ότι και στην περίπτωση του δεύτερου ορισμού, η αγωγιμότητα $\sigma=4$ S/m είναι οριακή για τα μεγάλα ηλεκτρόδια 40x4 και 60x6, καθώς στην αγωγιμότητα αυτή η αντίσταση δεν είναι αρκετά μικρή όσο θα έπρεπε.

Σύγκριση $\sigma=4$ S/m με $\sigma=1$ S/m

Σε αυτήν την περίπτωση ο δεύτερος ορισμός δίνει αρκετά βελτιωμένα αποτελέσματα για τα ηλεκτρόδια 20x2, 30x3 και 40x4, τα οποία είναι αποδεκτά. Ειδικά για τα ηλεκτρόδια 20x2 και 30x3, οι αποκλίσεις στα K_Z είναι πολύ καλές και κυμαίνονται μέχρι 7%. Τα αποτελέσματα για το ηλεκτρόδιο 60x6 ωστόσο, παραμένουν αναξιόπιστα.

Σύγκριση των $\sigma=4$ S/m, $\sigma=2$ S/m και $\sigma=1$ S/m με την $\sigma=0,08$ S/m

Για όλες τις συγκρίσεις τα αποτελέσματα είναι εμφανώς καλύτερα. Ωστόσο μόνο για τη σύγκριση μεταξύ των αγωγιμοτήτων $\sigma=2$ S/m και $\sigma=0,08$ S/m, οι αποκλίσεις στα K_Z για τα ηλεκτρόδια 30x3 και 40x4 έχουν σχετικά αποδεκτές τιμές.

Συμπεραίνεται ότι, ενώ σε προηγούμενα πειράματα με μετρήσεις στις αγωγιμότητες $\sigma=2$ S/m και $\sigma=1$ S/m φαινόταν να λειτουργεί σωστά ο πρώτος ορισμός για τις συγκρίσεις αγωγιμοτήτων, στην παρούσα περίπτωση για τις συγκρίσεις με τις αγωγιμότητες $\sigma=4$ S/m και $\sigma=0,08$ S/m κρίθηκε απαραίτητη η χρήση του δεύτερου ορισμού της μεταβατικής αντίστασης, που έδινε εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα.

Ακολουθούν κάποιες γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τις συγκρίσεις:

- Εν γένει, παρατηρείται καλή συμπεριφορά της Θεωρίας της Ομοιότητας μέσω της μεθόδου της Διαστατικής Ανάλυσης, για τις συγκρίσεις των K_Z . Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ήταν σχετικά ικανοποιητικά, καθώς επαληθεύθηκαν σε ένα βαθμό για την πλειοψηφία των μετρήσεων οι αναμενόμενοι λόγοι κλίμακας. Με τη διεξαγωγή μετρήσεων σε διαφορετικές αγωγιμότητες από αυτές προηγούμενων πειραμάτων, προέκυψε ότι είναι αναγκαία η χρήση του δεύτερου ορισμού της μεταβατικής αντίστασης, διότι η συμπεριφορά των δοκιμών είναι έντονα επαγωγική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χρονική υστέρηση μεταξύ τάσης και ρεύματος.
- Φαίνεται από τα αποτελέσματα, ότι η τιμή της αγωγιμότητας $\sigma=4$ S/m είναι οριακή για τα μεγάλα ηλεκτρόδια (40x4, 60x6). Πιθανώς στην αγωγιμότητα αυτή να εξαντλείται το περιθώριο για την αποδεκτή απόσταση από τη "γη". Συγκεκριμένα σε αυτά τα ηλεκτρόδια (40x4, 60x6), για αγωγιμότητα διαλύματος $\sigma=4$ S/m, παρατηρήθηκε μία παραμόρφωση στην καμπύλη της τάσης εξόδου. Αυτό φαίνεται στα αντίστοιχα παλμογραφήματα του Παραρτήματος. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος των ηλεκτροδίων, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των ηλεκτροδίων, τόσο περισσότερο επηρεάζει το περιορισμένο μέγεθος της δεξαμενής, της οποίας τα τοιχώματα θα έπρεπε ιδανικά να βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από το ηλεκτρόδιο. Ειδικά για το ηλεκτρόδιο 60x6 αναγκαστικά έγινε περιορισμένος αριθμός μετρήσεων, καθώς η παραμόρφωση της τάσης εξόδου γινόταν όλο και πιο έντονη. Ωστόσο, οι μετρήσεις που λήφθηκαν για αυτά τα ηλεκτρόδια συμπεριλήφθηκαν στους πίνακες αποτελεσμάτων, διότι η παραμόρφωση φαίνεται να επηρεάζει την ουρά της κυματομορφής και όχι το μέτωπο βάσει του οποίου γίνεται ο υπολογισμός της αντίστασης.
- Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι, ότι, όταν η θεωρητικά αναμενόμενη τιμή του K_Z είναι πολύ μικρή, τότε η οποιαδήποτε απόκλιση στις πειραματικές τιμές οδηγεί αυτομάτως σε μεγάλη % διαφορά. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στις συγκρίσεις μεταξύ των αγωγιμοτήτων $\sigma=4$ S/m - $\sigma=0,08$ S/m και $\sigma=2$ S/m - $\sigma=0,08$ S/m, όπου οι θεωρητικά αναμενόμενες τιμές των K_Z είναι πολύ μικρές, 0,02 και 0,04 αντίστοιχα και οδηγούν σε μεγάλες % αποκλίσεις K_Z .

5.3.3 Παρατηρήσεις - Σχόλια

Σε αυτές τις συγκρίσεις θεωρήθηκε, ότι η κρίσιμη ένταση έναρξης του φαινομένου του ιονισμού είναι σταθερή. Αν ληφθούν υπόψη όμως οι μεγάλες αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ενδεχομένως να υπάρχει εξάρτηση από την αγωγιμότητα του διαλύματος σ , και επομένως θα πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση της παραμέτρου E_0 .

Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού ταινίας γείωσης

Ο P. Chowdhuri στο άρθρο του "*Impulse impedance tests on laboratory model ground electrodes*" [25], διεξήγαγε πειράματα υπό κλίμακα για τον υπολογισμό της κρουστικής αντίστασης κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης για διάφορα μείγματα χώματος και υγρασίας, σε διάφορες θερμοκρασίες υπό διαφορετικές κυματομορφές εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

Μελετώντας διάφορα πειραματικά δεδομένα ο Chowdhuri πρότεινε την παρακάτω μη γραμμική σχέση για την εκτίμηση της κρουστικής αντίστασης γείωσης [25]:

$$Z = kI_p^a \quad (5.2)$$

όπου Z η κρουστική αντίσταση γείωσης σε Ω , I_p η μέγιστη τιμή του κρουστικού ρεύματος σε A και οι k και a παράμετροι, που είναι συναρτήσεις των χαρακτηριστικών του εδάφους και της διαμόρφωσης του ηλεκτροδίου γείωσης.

Έτσι, ο Chowdhuri διεξήγαγε υπό κλίμακα πειράματα προκειμένου να επιβεβαιώσει την ορθότητα της (5.2). Επίσης βρήκε ότι η κρουστική αντίσταση γείωσης είναι συνάρτηση της κυματομορφής της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης και παίρνει υψηλότερη τιμή για κρουστικές τάσεις με απότομα μέτωπα. Για τα πειράματά του χρησιμοποίησε μια κυλινδρική διάταξη, για να προσομοιώσει την κατανομή δυναμικού στο έδαφος, όταν κρουστικό ρεύμα διαδίδεται σε κατακόρυφη ράβδο γείωσης. Τη λογική που ακολούθησε για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού στην κυλινδρική διάταξη του πειράματός του, εφαρμόζεται στη συνέχεια για τη ταινία γείωσης, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αυτό:

Όταν το κρουστικό ρεύμα I ρέει διαμέσου της ταινίας γείωσης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη διεπαφή ταινίας γείωσης - εδάφους δίνεται από το τύπο:

$$E = \rho \cdot i = \rho \frac{I}{\text{εμβαδό ταινίας}} = \rho \frac{I}{2ld}, \text{ σε } V/m \quad (5.3)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot m$, i η πυκνότητα ρεύματος διαρροής από τη ταινία γείωσης στο έδαφος σε A/m^2 , l το μήκος και d το πλάτος της ταινίας σε m .

Αν η τιμή της E είναι κάτω από τη κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού, τότε η αντίσταση ταινίας γείωσης δίνεται από τον γνωστό τύπο:

$$R \text{ (σε } \Omega) = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left(\frac{2l}{d} \right) \quad (5.4)$$

Επίσης, ισχύει $I = V/R$ και αγνοώντας το πλάτος της ταινίας ($d \ll l$), η σχέση (5.3) γράφεται:

$$E = \frac{\pi V}{2l \ln \left(\frac{2l}{d} \right)}, \text{ σε } V/m \quad (5.5)$$

Αν όμως, η τιμή της E ξεπεράσει την κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού, τότε η αντίσταση γείωσης θα γίνει μη γραμμική. Η τιμή της θα αλλάζει με το E και κατ' επέκταση με το V (σχέση 5.5) και με το I (σχέση 5.3).

Εάν η διάταξη των ηλεκτροδίων είναι τέτοια που να δημιουργεί ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, τότε η έναρξη του ιονισμού συνοδεύεται με διάσπαση, η οποία γίνεται ορατή και στις κυματομορφές. Οπότε σε αυτή την περίπτωση, η E_0 ταυτίζεται με την ένταση διάσπασης και η V είναι ταυτόχρονα και τάση διάσπασης. Άρα η E_0 μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (5.5), εντοπίζοντας πότε υπάρχει διάσπαση και θέτοντας όπου V τη τάση διάσπασης V_{th} . Στο πείραμα της εργασίας αυτής ωστόσο, δεν υπάρχει διάταξη ομογενούς πεδίου, αλλά ακόμα και να υιοθετείτο αυτή η παραδοχή, δηλαδή αν θεωρήσει κανείς τη διάσπαση ενδεικτική του ιονισμού, στις παρούσες μετρήσεις δεν παρατηρήθηκε διάσπαση που να φαίνεται στις κυματομορφές.

Μια σκέψη ήταν να χρησιμοποιηθεί στη σχέση (5.5) η τάση στην οποία σταματούσαν οι μετρήσεις, λόγω σπινθήρων που παρατηρήθηκαν στις ακμές των ηλεκτροδίων ή εσωτερικά στον όγκο του νερού με αντανάκλαση στον πυθμένα. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε κάποια αισθητή μείωση της αντίστασης, καθώς αυξανόταν το εγχεόμενο ρεύμα.

Ένας άλλος τρόπος να προσδιοριστεί η E_0 ήταν από την εμφάνιση δεύτερης κορυφής του ρεύματος, αλλά κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε στις τρέχουσες κυματομορφές.

Σχολιασμός των καμπυλών V-I

Τα ανωτέρω οδηγούν στο σχεδιασμό των καμπυλών V-I για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τάσης V και στη συνέχεια της κρίσιμης έντασης ιονισμού E_0 . Οι καμπύλες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, σχεδιάστηκαν ειδικά για την αγωγιμότητα $\sigma=4$ S/m, στην οποία λόγω της μεγάλης τιμής της είναι μεγαλύτερα τα εγχεόμενα ρεύματα και συνεπώς αναμένεται να είναι πιο έντονη η επίδραση του ιονισμού.

Μελετώντας τις καμπύλες V-I (Παράρτημα), παρατηρήθηκαν τα εξής:

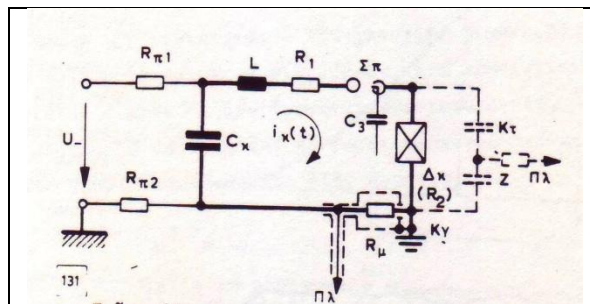
- Αν το δοκίμιο ήταν ωμικό, η καμπύλη V-I θα ήταν ευθεία με κλίση R .
- Στο παρόν δοκίμιο εμφανίζεται καμπύλη μορφής βρόχου. Ο βρόχος είναι ενδεικτικός της υστέρησης μεταξύ τάσης και ρεύματος, αλλά δεν υπάρχει ανάλογη εικόνα όπως στα πειράματα της Nor (δείγμα χώματος). Δηλαδή δεν ήταν εφικτό να παρατηρηθεί η μετάβαση από τη γραμμική στη μη γραμμική περιοχή, όπου αρχίζει να σχηματίζεται ο βρόχος που υποδηλώνει την έναρξη του ιονισμού, καθότι εμφανιζόταν βρόχος σε όλα τα επίπεδα τάσης φόρτισης. Έτσι δεν ήταν εφικτό να προσδιοριστεί με ακρίβεια η κρίσιμη τάση στην οποία άρχισε να δημιουργείται ο βρόχος και κατ' επέκταση η αντίστοιχη κρίσιμη ένταση ιονισμού E_0 .
- Γι' αυτό το λόγο αναζητήθηκε ο εκφυλισμός των βρόχων σε ένα "8", όπως παρατήρησαν στα πειράματα τους οι Lima - Visacro, για τον προσδιορισμό της E_0 . Ούτε αυτό, ωστόσο, ήταν εφικτό να παρατηρηθεί.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, εκτός των καμπυλών V-I, σχεδιάστηκαν και οι καμπύλες της κρουστικής αντίστασης συναρτήσεως του χρόνου $Z(t)$, για να διαπιστωθεί πως αυτή επηρεάζεται από το φαινόμενο του ιονισμού. Ωστόσο παρατηρώντας τις καμπύλες $Z(t)$, δεν παρατηρείται να εμφανίζεται κάποια αισθητή μείωση της αντίστασης κατά τη διάρκεια της έγχυσης του κρουστικού ρεύματος.

Λειτουργία γεννήτριας εκθετικών κρουστικών ρευμάτων

Ένα φαινόμενο που παρατηρείται στα παλμογραφήματα είναι η αλλαγή της κυματομορφής του παραγόμενου ρεύματος για διαφορετικά μεγέθη δοκιμίων, ουσιαστικά δηλαδή για διαφορετικές τιμές των R και L μεγεθών τους. Συγκεκριμένα παρατηρείται, ότι για ηλεκτρόδια μεγαλύτερων διαστάσεων, δηλαδή αντίστοιχα για μικρότερες τιμές αντίστασης R , η κυματομορφή παρουσίαζε μεγαλύτερο χρόνο ανόδου. Παρατηρείται δηλαδή μια διαπλάτυνση της κυματομορφής του ρεύματος στην έξοδο, καθώς χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερου μεγέθους ηλεκτρόδια.

Μια γεννήτρια, όμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αυτό, παράγει εκθετικά κρουστικά ρεύματα μέσω της εκφόρτισης ενός πυκνωτή C_k , φορτισμένου από πηγή συνεχούς τάσεως σε τάση U_- , σε ένα εν σειρά κύκλωμα μιας αυτεπαγωγής L και μιας αντίστασης R . Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας εκθετικών κρουστικών ρευμάτων φαίνεται στο **Σχήμα 5.1**.



Σχήμα 5.1: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας εκθετικών κρουστικών ρευμάτων [29]

Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η αυτεπαγωγή L είναι η συνολική αυτεπαγωγή του βρόχου εκφόρτισης και περιλαμβάνει τις παράσιτες αυτεπαγωγές των διαφόρων αντιστάσεων και του C_k . Συνεπώς, στην περίπτωση του πειράματος της εργασίας αυτής συμπεριλαμβάνει και τις αυτεπαγωγές $L_{\text{ταινίας γείωσης}} + L_{\text{νερού}}$.

Η αντίσταση R είναι η συνολική αντίσταση που "βλέπει" η κρουστική γεννήτρια (ηλεκτρόδιο και εσωτερικές αντιστάσεις της γεννήτριας) και συγκεκριμένα ισχύει: $R = R_1 + R_2 + R_{\mu}$, όπου R_2 είναι η ωμική αντίσταση του δοκιμίου, δηλαδή $R_2 = R_{\text{ταινίας γείωσης}} + R_{\text{νερού}}$.

Η διαφορική εξίσωση του ρεύματος εκφόρτισης $i_k(t)$ του C_k είναι η εξής [29]:

$$\frac{1}{C_k} \int i_k dt + R i_k + L \frac{di_k}{dt} = 0 \quad (5.6)$$

Θεωρώντας ότι βρίσκεται στην περιοχή της κρίσιμης απόσβεσης, όταν δηλαδή είναι $R = 2 \sqrt{\frac{L}{C_k}}$, τότε επιλύοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση προσδιορίζεται ότι [29]:

$$\text{για } t = t_m = T_1 = 2 \frac{L}{R} \text{ (χρόνος ανόδου),} \quad (5.7)$$

$$i_k = \hat{I}_k = I_m = 0,736 \frac{U_-}{R} \quad (5.8)$$

Οπότε ο χρόνος ημίσεως εύρους προκύπτει [29]:

$$T_\eta = 4,9 \cdot \frac{L}{R} \quad (5.9)$$

Συνεπώς από τη σχέση (5.7) παρατηρείται, ότι κρατώντας τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά, για μικρότερη αντίσταση ηλεκτροδίου ο χρόνος ανόδου αυξάνεται. Με την παραπάνω ανάλυση δηλαδή, επαληθεύθηκε το φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στα παλμογραφήματα.

Σε αυτό το σημείο, θα αναφερθούν μερικές γενικές παρατηρήσεις:

- Παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή του δοκιμίου αλλάζει το εγγεόμενο ρεύμα και τον χρόνο ανόδου της κυματομορφής του. Συγκεκριμένα όπως εξηγήθηκε, καθώς χρησιμοποιούνταν μεγαλύτερου μεγέθους ηλεκτρόδια, αυξανόταν και ο χρόνος ανόδου του ρεύματος. Δηλαδή η επίδραση της παραμέτρου του χρόνου είναι ιδιαίτερα σημαντική. Όμως, η παράμετρος του χρόνου απαλείφεται κατά την εφαρμογή του Θεωρήματος Π της Διαστατικής Ανάλυσης και δεν εμφανίζεται στις Π παραμέτρους. Είναι χαρακτηριστικό ότι η παράμετρος T_1 δεν εισήλθε σε καμία σχέση Π, δηλαδή φαίνεται να μην διαδραματίζει κάποιο ρόλο γι' αυτές τις εξισώσεις. Άλλωστε η επίδραση της διαστατικά, χάνεται μέσω του πηλικού της εμπειρικής σχέσης (2.7). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος δεν υπεισέρχεται ουσιαστικά στο δεύτερο ορισμό της μεταβατικής αντίστασης $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$, καθώς η σχέση αυτή λαμβάνει το Z την ίδια χρονική στιγμή. Αντίθετα, στο πρώτο ορισμό της μεταβατικής αντίστασης, υπεισέρχεται ο χρόνος έμμεσα μέσω της χρονικής διαφοράς μεταξύ των σημείων V_{max} και I_{max} . Γι' αυτό άλλωστε, με το δεύτερο ορισμό λαμβάνονται εμφανώς βελτιωμένα αποτελέσματα.
- Δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή διαγραμμάτων Π_1 , Π_2 , όπως αυτά των Korsuncev και Popolanský (**Διαγράμματα 3.1, 3.2**), διότι δεν παρατηρήθηκε μεταβολή της αντίστασης όταν μεταβαλλόταν το ρεύμα, ούτε μεταβολή των καμπυλών $Z(t)$ κατά τη διάρκεια της έγχυσης του ρεύματος.

- Για το εύρος των αγωγιμοτήτων, των διαστάσεων των δοκιμίων και της δεξαμενής και των εγχεόμενων ρευμάτων που μπορούσε να παράγει η γεννήτρια, παρατηρήθηκε μια αρκετά μεγάλη σταθερότητα στις τιμές αντίστασης που έδινε το κάθε ηλεκτρόδιο.
- Μικρές αποκλίσεις στο βάθος τοποθέτησης, πιθανόν να είχαν κάποια επίδραση στις αποκλίσεις των K_Z .
- Η χρήση probe ρεύματος και διαφορικού probe τάσης, ενδεχομένως οδηγούσε σε μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με τις συσκευές αυτές εκτείνεται η περιοχή μέτρησης των παλμογράφων, σε αρκετά υψηλές τιμές τάσεων.

5.3.4 Προτάσεις

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της κρουστικής γεννήτριας και τις σχέσεις (5.7, 5.8) οι οποίες προέκυψαν, συμπεραίνεται ότι η μεταβατική αντίσταση γείωσης Z μπορεί να γραφεί πλέον σαν συνάρτηση των εξής μεγεθών:

$$Z = f(d, l, \rho, I_m, E_0, T_1, U_-, C_k, L) \quad (5.10)$$

Υπεισέρχονται δηλαδή και άλλες παράμετροι (τάση φόρτισης U_- , L , C_k) στην εφαρμογή του Θεωρήματος Π, της Διαστατικής Ανάλυσης για την περίπτωση της ταινίας γείωσης. Μπορεί να θεωρηθεί επιπλέον, ότι τα μεγέθη L , C_k εξαρτώνται από τις διαστάσεις. Συγκεκριμένα ο τύπος για την αυτεπαγωγή της ταινίας γείωσης, η οποία όπως αναφέρθηκε περιλαμβάνεται στο συνολικό L , δίνεται από τον τύπο [26]:

$$L(\sigma \mu H) = 0.002 \cdot l \cdot \left[2.303 \cdot \log \left(\frac{2l}{d+t} \right) + 0.5 + 0.235 \cdot \left(\frac{d+t}{l} \right) \right] \quad (5.11)$$

όπου l το μήκος (σε cm), d το πλάτος (σε cm) και t το πάχος (σε cm) της ταινίας γείωσης.

Με βάση την (5.11) και θεωρώντας το πάχος t της ταινίας γείωσης αμελητέο σε σχέση με το βάθος εγκατάστασης $h = 0,5 \div 1,0 m$, η μεταβατική αντίσταση γείωσης Z γράφεται τελικά:

$$Z = f(d, l, \rho, I_m, E_0, T_1, U_-) \quad (5.12)$$

Σε αυτόν το φυσικό νόμο, που συνδέει τα 8 φυσικά μεγέθη που εμπλέκονται στην παραπάνω συνάρτηση, θα εφαρμοστεί το Θεώρημα Π της Διαστατικής Ανάλυσης. Τα μεγέθη $d, l, \rho, I_m, E_0, T_1, U_-$ είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, ενώ η μεταβατική αντίσταση Z η εξαρτημένη μεταβλητή (συνολικά $r = 8$).

Το σύστημα μονάδων το οποίο θα χρησιμοποιηθεί είναι το $[M L T I]$, όπου M η μάζα, L το μήκος, T ο χρόνος και I το ρεύμα, καθώς από όλα τα μεγέθη που εμφανίζονται στο πρόβλημα, αυτά είναι τα μόνα θεμελιώδη.

Οι διαστάσεις των φυσικών μεγεθών που εμφανίζονται εδώ, έχουν ήδη αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2, με εξαίρεση το μέγεθος U_- οι διαστάσεις του οποίου είναι:

$$[U_-] = V = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1} = [M^1 L^2 T^{-3} A^{-1}] = (1, 2, -3, -1)$$

Οπότε η μήτρα των διαστάσεων είναι:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & -3 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & -3 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -3 & -1 \end{bmatrix}$$

Ο βαθμός (rank) της μήτρας των διαστάσεων είναι 4 ($\Rightarrow n = 4$ διαστατικά ανεξάρτητα μεγέθη).

Επομένως, οι Π παράμετροι που θα πρέπει να υπολογιστούν είναι:

$$k = r - n = 8 - 4 = 4 \text{ } \Pi \text{ παράμετροι}$$

Επιλέγεται ως διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα η $[\rho, I_m, l, T_1]$ μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Επιλύοντας, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, προσδιορίζονται οι Π παράμετροι για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα:

$$\Pi_1 = \frac{d}{l}, \quad \Pi_2 = \frac{E_0 \cdot l^2}{\rho \cdot I_m}, \quad \Pi_3 = \frac{U_- \cdot l}{\rho \cdot I_m}, \quad \Pi_4 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \quad (5.13)$$

Σημειώνεται ότι, αν επιλεγθεί ως διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα η $[\rho, I_m, l, E_0]$ ή η $[\rho, I_m, l, U_-]$, η επίλυση των συστημάτων είναι αδύνατη. Οδηγείται κανείς δηλαδή σε άτοπο, καθώς οι $[\rho, I_m, l, E_0]$ και $[\rho, I_m, l, U_-]$ δεν είναι διαστατικά ανεξάρτητες ομάδες.

Έχοντας υπολογίσει τις Π παραμέτρους, μπορεί πλέον να προσδιοριστούν οι λόγοι κλίμακας για τα φυσικά μεγέθη του προβλήματος.

$$K_Z = \frac{1}{K_\sigma \cdot K_l}, \quad K_l = K_d, \quad K_{I_m} = K_{E_0} K_l^2 K_\sigma, \quad K_{U_-} K_l = \frac{K_{I_m}}{K_\sigma} \quad (5.14)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρηθεί, ότι στην προσέγγιση που εφαρμόστηκε στο πείραμα αγνοήθηκαν οι εξαρτήσεις ορισμένων μεγεθών, οι οποίες όμως λαμβάνονται υπόψη στην εναλλακτική προσέγγιση που διερευνάται παραπάνω. Ενδεχομένως αυτό να είχε αντίκτυπο και να εξηγεί ορισμένες μεγάλες αποκλίσεις που συναντήθηκαν στις συγκρίσεις, ειδικά για τις πιο ακραίες συνθήκες (υψηλότερη αγωγιμότητα και μεγάλα ηλεκτρόδια).

Τέλος μια άλλη πρόταση, θα ήταν να διερευνηθεί και η άλλη μέθοδος εφαρμογής της Θεωρίας της Ομοιότητας, οι *Νόμοι υπό κλίμακα*, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 1.2 του Κεφαλαίου 1. Οι *Νόμοι υπό κλίμακα* θα μπορούσαν να προσδιοριστούν είτε α) από τη διαφορική εξίσωση κρουστικού ρεύματος (σχέση 5.7) είτε β) από τις εξισώσεις ηλεκτρομαγνητισμού (λόγοι κλίμακας για E , L , C κλπ.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] William J. Becker, "Boating-Lightning Protection", University of Florida, Florida Cooperative Extension Service, October 1992
- [2] C. Gomes & M.Z.A. Ab Kadir, "Protection of Naval Systems against electromagnetic effects due to lightning", Centre of Excellence on Lightning Protection, Department of Electrical and Electronics Engineering University Putra Malaysia, Progress in Electromagnetic Research, Vol. 113, 333-349, 2011
- [3] I.A. Metwally, F.H. Heidler and W.J. Zischank, "Magnetic Fields and Loop Voltages Inside Reduced and Full-Scale Structures Produced by Direct Lightning Strikes", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 48, No. 2, May 2006
- [4] E.M. Thomson, "A Critical Assessment of the U.S. Code for Lightning Protection of Boats", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 33, No. 2, May 1991
- [5] Α.Γ. Καλογιαννάκης, «Μελέτη της αλληλεπίδρασης του κεραυνικού πλήγματος με τη σιδηρο-μεταλλική κατασκευή πλοίων», Διπλωματική εργασία, Πάτρα, Νοέμβριος 2011
- [6] Γ.Κ. Πολίτης και Γ.Ν. Λαμπρινίδης, «Η υδροδυναμική της πρόωσης του πλοίου», Εκδόσεις ΑΣΤΕΡΟΣ, Αθήνα, 1993
- [7] R. Frentzel, "Use of Similarity Relations in the Analysis of Lightning-Induced Transient Phenomena", ETEP, Vol. 7, No. 2, May/June 1997
- [8] A.A. Sonin, "The Physical Basis of Dimensional Analysis", Second Edition, Department of Mechanical Engineering MIT, 2001
- [9] Α.Γ. Βαλαμβάνου, «Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2009
- [10] Π. Ντοκόπουλος, "Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 2005
- [11] Ε. Καγιάς, «Μέτρηση της αντίστασης γείωσης σε εγκαταστάσεις κτιρίων», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Μάιος 2009
- [12] Π.Δ. Μπούρκας, "Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1998
- [13] Ι.Δ. Φραγγής, «Ιονισμός εδάφους υπό κρουστική τάση», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- [14] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, January 2007
- [15] L. Grcev, "Modeling of Grounding Electrodes under Lightning Currents, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, August 2009
- [16] L. Grcev, "Time- and Frequency-Dependent Lightning Surge Characteristics of Grounding Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009
- [17] S. Zhendong, D. Chunsheng & C. Jiayu, "Dimensional Analysis and Physical Similarity of Lossy Electromagnetic Systems", Department of Microwave Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, Vol. 10, No. 6(1993)347, 14 October 1992
- [18] S. Zhendong & L. Hongwei, "Physical Similarity of Lossy Scatterers", Department of Microwave Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, Vol. 11, No. 10(1994)611, 4 April 1994

- [19] E.E. Oettle, "A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988
- [20] W.A. Chisolm & W. Janischewskyj, "Lightning Surge Response of Ground Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989
- [21] S. Grzybowski, "Experimental Evaluation of Lightning Protection Zone used on Ship", IEEE, 2007
- [22] K. Tonmitr & A. Kaewrawang, "Saint Elmo's Fire Corona by using HVDC, HVAC and Tesla Coil", Department of Electrical Engineering, Khon Kaen University, Thailand, Marine Engineering Frontiers, Vol. 1, Issue 2, May 2013
- [23] I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, F.V. Topalis: "Modelling of a Grounding Grid using an Electrolytic Tank", Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering, Bangalore, India, August 19-24, 2001
- [24] N. Mohamad Nor, "Ionization Gradient of Low Resistivity Soils and Liquids", 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006
- [25] P. Chowdhuri, "Impulse Impedance tests on laboratory model ground electrodes", IEE Proceedings, Vol. 150, No. 4, July 2003
- [26] Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility Engineering", John Wiley & Sons, 20 September 2011
- [27] Korsuncev, A.V.. "Application on the Theory of Similarity to Calculation of Impulse Characteristics of Concentrated Electrodes", Elektrichestvo, No. 5, pp 31-35, 1958
- [28] R. Rudenberg, "Grounding Principles and Practices I - Fundamental Considerations on Ground Currents", Electrical Engineering, Vol. 64, pp. 1-13, January 1945
- [29] Π.Ν. Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις», Τόμος Α, Μέρος 2^ο, Αθήνα, 1994, σελ. 114-117

ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ


Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες με όλες τις μετρήσεις που λήφθηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος. Υπενθυμίζεται ότι έγιναν 5 επαναλήψεις για κάθε τάση φόρτισης της γεννήτριας. Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψαν οι πίνακες συγκρίσεων του Κεφαλαίου 5. Για την καλύτερη κατανόηση των πινάκων μετρήσεων, για κάθε ηλεκτρόδιο έχουν χρωματιστεί διαφορετικά οι τιμές εκείνες, στις οποίες ελήφθησαν μετρήσεις που εξυπηρετούν τις συγκρίσεις, είτε με διαφορετικά ηλεκτρόδια, είτε με διαφορετικές αγωγιμότητες. Εκτός από τις καταγραφόμενες τιμές ρεύματος και τάσης, στους πίνακες σημειώνεται και ο μέσος όρος των 5 επαναλήψεων, η τυπική τους απόκλιση και τέλος η αντίσταση Z , που προκύπτει από τον παραπάνω μέσο όρο για κάθε τάση φόρτισης.

Τονίζεται ότι, οι τιμές που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες δεν είναι οι απευθείας ενδείξεις του παλμογράφου, αλλά τα πραγματικά μεγέθη της γεννήτριας, τα οποία έχουν προκύψει από τον παλμογράφο με τις αντίστοιχες αναγωγές του καταμεριστή τάσης στο εσωτερικό της γεννήτριας.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι, όσον αφορά στους πίνακες μετρήσεων για το δεύτερο ορισμό της μεταβατικής αντίστασης γίνεται πρώτα εξομάλυνση της κυματομορφής του ρεύματος, με χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του Matlab. Αυτό έγινε, γιατί η κυματομορφή του ρεύματος που λαμβανόταν από τον παλμογράφο, εμφάνιζε μέγιστο σε διάφορες χρονικές στιγμές και συνεπώς δεν ήταν γνωστό ποια ήταν η σωστή χρονική στιγμή για να εφαρμοστεί ο δεύτερος ορισμός ($Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$). Έτσι, εισάγονταν τα δεδομένα κάθε κυματομορφής ρεύματος που λήφθηκαν από το παλμογράφο στο Matlab και χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό εργαλείο *cftool*, επιτυγχανόταν η εξομάλυνση της κυματομορφής του ρεύματος. Λαμβανόταν έτσι μια νέα ομαλοποιημένη κυματομορφή του ρεύματος, που παρουσίαζε μέγιστο σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα εφαρμογής του δεύτερου ορισμού της αντίστασης.

Για αγωγιμότητα $\sigma=0,08 \text{ S/m}$ και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

❖ Ηλεκτρόδιο 30cm x 3cm: Αγωγιμότητα $\sigma=0,80 \text{ mS/cm}$, $P=988 \text{ mbar}$, $T=22,0 \text{ C}$, $\text{Hum}\%= 39\%$

 : σύγκριση με 40x4

Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,28 kV		0,36 kV		0,44 kV		0,60 kV		0,64 kV		0,72 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	4,96	0,192	7,20	0,276	8,80	0,346	12,1	0,448	16,1	0,612	18,6	0,672	20,6	0,736
2η επανάληψη	5,28	0,204	7,28	0,280	9,44	0,348	12,0	0,448	16,0	0,628	18,6	0,664	21,2	0,752
3η επανάληψη	5,12	0,196	7,28	0,284	9,76	0,364	12,6	0,452	16,6	0,616	18,4	0,664	21,4	0,752
4η επανάληψη	4,96	0,196	6,96	0,276	9,84	0,364	11,8	0,448	17,6	0,624	18,6	0,664	21,0	0,760
5η επανάληψη	5,12	0,202	7,20	0,280	9,52	0,360	12,3	0,444	17,4	0,624	18,8	0,664	20,8	0,760
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	5,088	0,198	7,184	0,279	9,472	0,3564	12,16	0,448	16,74	0,621	18,6	0,6656	21,0	0,752
Τυπική απόκλιση	0,1197	0,0044	0,1176	0,0030	0,3670	0,0078	0,2728	0,0025	0,6560	0,0059	0,1265	0,0032	0,2828	0,0088
Αντίσταση Z (Ω)	38,9151		38,8641		37,6267		36,8421		37,0848		35,7849		35,8095	


Τάση φόρτισης	0,84 kV		0,92 kV		1,00 kV		1,12 kV		1,28 kV		1,40 kV		1,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	24,0	0,880	26,8	0,968	28,2	1,04	31,8	1,18	36,2	1,37	39,6	1,49	43,4	1,61
2η επανάληψη	24,4	0,888	26,6	0,968	28,2	1,04	31,4	1,18	36,4	1,35	40,4	1,49	42,2	1,60
3η επανάληψη	24,4	0,880	25,8	0,944	28,8	1,06	31,6	1,19	36,4	1,34	40,0	1,48	42,8	1,60
4η επανάληψη	24,0	0,864	26,6	0,968	28,2	1,06	31,8	1,19	36,6	1,36	39,8	1,46	42,8	1,62
5η επανάληψη	24,2	0,880	26,4	0,960	28,2	1,04	32,2	1,19	36,4	1,34	40,2	1,48	42,8	1,62
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	24,2	0,8784	26,44	0,962	28,32	1,048	31,76	1,186	36,4	1,352	40,0	1,48	42,8	1,61
Τυπική απόκλιση	0,1789	0,0078	0,3441	0,0093	0,24	0,0098	0,2653	0,0049	0,1265	0,0117	0,2828	0,0110	0,3795	0,0089
Αντίσταση Z (Ω)	36,2975		36,3691		37,0056		37,3426		37,1429		37,0000		37,6168	

Τάση φόρτισης	1,6 kV		1,72 kV		1,84 kV		1,92 kV		2,00 kV		2,24 kV		2,28 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	45,2	1,72	48,4	1,84	52,0	1,96	54,0	2,04	56,0	2,12	62,8	2,38	64,0	2,42
2η επανάληψη	45,2	1,70	48,4	1,82	51,6	1,96	53,6	2,04	56,0	2,12	62,4	2,38	63,6	2,44
3η επανάληψη	45,2	1,72	48,8	1,84	51,6	1,96	54,0	2,06	56,4	2,12	62,4	2,38	64,4	2,44
4η επανάληψη	44,8	1,70	48,4	1,82	52,0	1,98	54,0	2,04	55,6	2,10	62,8	2,40	63,6	2,42
5η επανάληψη	45,2	1,70	48,4	1,82	51,6	1,94	53,6	2,04	56,4	2,12	62,4	2,40	63,6	2,42
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	45,12	1,708	48,48	1,828	51,76	1,96	53,84	2,044	56,08	2,116	62,56	2,388	63,84	2,428
Τυπική απόκλιση	0,16	0,0098	0,16	0,0098	0,196	0,0126	0,196	0,008	0,299	0,008	0,196	0,0098	0,32	0,0098
Αντίσταση Z (Ω)	37,8546		37,7063		37,8671		37,9643		37,7318		38,1714		38,0326	

Τάση φόρτισης	2,56 kV		2,88 kV		3,08 kV		3,36 kV		3,64 kV		3,76 kV		4,4 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	72,0	2,76	80,0	3,10	88	3,32	96,0	3,68	104	3,92	108	4,08	126	4,80
2η επανάληψη	72,0	2,74	82,4	3,12	88	3,36	96,0	3,60	104	3,92	108	4,08	126	4,72
3η επανάληψη	72,0	2,76	82,4	3,12	88	3,36	95,2	3,60	104	4,00	107	4,08	126	4,72
4η επανάληψη	71,2	2,74	82,4	3,12	88	3,36	96,0	3,68	105	4,00	108	4,08	126	4,80
5η επανάληψη	71,6	2,74	82,4	3,12	88	3,36	96,0	3,60	105	3,92	108	4,08	126	4,72
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	71,76	2,748	81,92	3,116	88	3,352	95,84	3,632	104,4	3,952	107,8	4,08	126	4,752
Τυπική απόκλιση	0,32	0,0098	0,96	0,008	0	0,016	0,32	0,0392	0,4899	0,0392	0,4	0	0	0,0392
Αντίσταση Z (Ω)	38,2943		38,0371		38,0909		37,8965		37,8544		37,8479		37,7143	

Τάση φόρτισης	5,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	144	5,44
2η επανάληψη	145	5,44
3η επανάληψη	145	5,52
4η επανάληψη	144	5,44
5η επανάληψη	144	5,44
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	144,4	5,456
Τυπική απόκλιση	0,4899	0,032
Αντίσταση Z (Ω)	37,7839	

❖ **Ηλεκτρόδιο 40cm x 4cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=0,81 \text{ mS/cm}$, $P=977,3 \text{ mbar}$, $T=22,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 42,5\%$

 : σύγκριση με 30x3

Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,36 kV		0,40 kV		0,56 kV		0,72 kV		0,80 kV		0,92 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	7,60	0,192	14,0	0,352	16,2	0,404	22,0	0,572	28,4	0,732	31,2	0,832	36,0	0,960
2η επανάληψη	8,00	0,204	14,6	0,356	16,4	0,400	22,4	0,572	28,8	0,748	31,6	0,840	36,0	0,952
3η επανάληψη	8,00	0,208	14,6	0,356	16,2	0,400	22,4	0,564	28,4	0,744	31,6	0,832	36,4	0,968
4η επανάληψη	8,32	0,200	15,0	0,368	16,6	0,404	22,6	0,576	27,6	0,728	31,2	0,840	36,4	0,960
5η επανάληψη	8,56	0,204	14,4	0,360	16,0	0,400	22,2	0,572	28,0	0,744	31,6	0,824	36,0	0,952
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	8,096	0,2016	14,52	0,3584	16,28	0,4016	22,32	0,5712	28,24	0,7392	31,44	0,8336	36,16	0,9584
Τυπική απόκλιση	0,3256	0,0054	0,3250	0,0054	0,2040	0,00196	0,2040	0,0039	0,4079	0,0078	0,1960	0,0060	0,1960	0,0060
Αντίσταση Z (Ω)	24,9012		24,6832		24,6683		25,5914		26,1756		26,5140		26,5044	

Τάση φόρτισης	1,08 kV		1,20 kV		1,28 kV		1,44 kV		1,64 kV		1,76 kV		1,96 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	42,4	1,14	47,2	1,27	49,6	1,36	56,8	1,54	64,0	1,74	70,4	1,86	78,4	2,10
2η επανάληψη	42,0	1,14	46,4	1,26	49,2	1,34	56,0	1,52	64,0	1,73	70,4	1,88	78,4	2,10
3η επανάληψη	42,8	1,14	46,4	1,26	50,0	1,36	56,0	1,52	64,4	1,75	70,4	1,90	78,4	2,12
4η επανάληψη	43,2	1,14	47,2	1,28	50,0	1,37	56,8	1,54	64,8	1,73	70,4	1,88	78,4	2,08
5η επανάληψη	42,4	1,12	46,4	1,26	49,6	1,35	57,2	1,53	64,4	1,74	70,4	1,90	78,4	2,10
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	42,56	1,136	46,72	1,266	49,68	1,356	56,56	1,53	64,32	1,738	70,4	1,884	78,4	2,10
Τυπική απόκλιση	0,4079	0,008	0,3919	0,008	0,2993	0,0102	0,48	0,0089	0,2993	0,0075	0	0,0150	0	0,0126
Αντίσταση Z (Ω)	26,6917		27,0976		27,2947		27,0509		27,0211		26,7614		26,7857	



Τάση φόρτισης	2,00 kV		2,12 kV		2,32 kV		2,40 kV		2,48 kV		2,80 kV		2,84 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	80,8	2,14	84,8	2,26	92,8	2,50	96,0	2,60	99,2	2,68	112	3	114	3,08
2η επανάληψη	80,8	2,16	85,6	2,26	92,0	2,46	96,0	2,58	99,2	2,66	111	3	114	3,08
3η επανάληψη	79,2	2,12	84,8	2,26	92,0	2,48	96,8	2,58	99,2	2,66	112	3	114	3,06
4η επανάληψη	80,0	2,12	84,8	2,26	92,8	2,48	96,0	2,58	99,2	2,68	112	3	114	3,08
5η επανάληψη	79,2	2,12	86,4	2,26	92,8	2,46	96,8	2,60	99,2	2,68	113	3	114	3,04
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	80,0	2,132	85,28	2,26	92,48	2,476	96,32	2,588	99,2	2,672	112	3	114	3,068
Τυπική απόκλιση	0,7155	0,016	0,64	0	0,3919	0,0150	0,3919	0,0098	0	0,0098	0,6325	0	0	0,016
Αντίσταση Z (Ω)	26,6500		26,5009		26,7734		26,8688		26,9355		26,7857		26,9123	

Τάση φόρτισης	3,20 kV		3,56 kV		3,88 kV		4,28 kV		4,60 kV		4,80 kV		5,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	128	3,44	142	3,82	156	4,22	170	4,60	184	4,96	192	5,20	224	6,00
2η επανάληψη	128	3,40	142	3,84	156	4,20	172	4,60	184	4,96	192	5,20	224	6,00
3η επανάληψη	128	3,44	142	3,84	156	4,20	172	4,64	184	4,96	192	5,20	224	6,00
4η επανάληψη	128	3,44	142	3,84	155	4,18	170	4,60	184	4,96	192	5,20	224	5,92
5η επανάληψη	127	3,42	143	3,84	156	4,18	172	4,64	184	4,96	192	5,24	224	5,92
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	127,8	3,428	142,2	3,836	155,8	4,196	171,2	4,616	184	4,96	192	5,208	224	5,968
Τυπική απόκλιση	0,4	0,016	0,4	0,008	0,4	0,0150	0,9798	0,0196	0	0	0	0,016	0	0,0392
Αντίσταση Z (Ω)	26,8232		26,9761		26,9320		26,9626		26,9565		27,1250		26,6429	

Τάση φόρτισης	6,28 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	256	6,72
2η επανάληψη	256	6,80
3η επανάληψη	256	6,80
4η επανάληψη	256	6,80
5η επανάληψη	256	6,80
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	256	6,784
Τυπική απόκλιση	0	0,032
Αντίσταση Z (Ω)	26,5000	

Για αγωγιμότητα $\sigma=0,08 \text{ S/m}$ και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

❖ Ηλεκτρόδιο 30cm x 3cm: Αγωγιμότητα $\sigma=0,80 \text{ mS/cm}$, $P=988 \text{ mbar}$, $T=22,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 39\%$

 : σύγκριση με 40x4
 : σύγκριση με $\sigma=2 \text{ S/m}$

Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,28 kV		0,36 kV		0,44 kV		0,60 kV		0,64 kV		0,72 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	4,6	0,184	6,8	0,256	8,5	0,320	11,7	0,420	16,0	0,572	17,8	0,640	20,0	0,696
2η επανάληψη	5,0	0,196	6,9	0,260	9,0	0,328	11,6	0,408	15,6	0,576	17,9	0,648	20,5	0,728
3η επανάληψη	4,8	0,180	7,0	0,264	9,2	0,344	12,1	0,424	16,3	0,576	17,7	0,616	20,5	0,728
4η επανάληψη	4,6	0,194	6,7	0,256	9,5	0,340	11,4	0,408	16,9	0,576	17,9	0,624	20,3	0,696
5η επανάληψη	4,7	0,196	6,8	0,268	9,3	0,332	12,0	0,408	19,6	0,584	18,1	0,608	20,3	0,728
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	4,74	0,19	6,84	0,2608	9,1	0,3328	11,76	0,4136	16,88	0,5768	17,88	0,6272	20,32	0,7152
Τυπική απόκλιση	0,1497	0,0067	0,1020	0,0047	0,3406	0,0085	0,2577	0,0070	1,4246	0,0039	0,1327	0,0148	0,1833	0,0157
Αντίσταση Z (Ω)	40,0844		38,1287		36,5714		35,1701		34,1706		35,0783		35,1969	

Τάση φόρτισης	0,84 kV		0,92 kV		1,00 kV		1,12 kV		1,28 kV		1,40 kV		1,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	23,6	0,800	25,8	0,880	27,5	0,960	31,2	1,072	35,6	1,272	39,0	1,344	43,0	1,520
2η επανάληψη	23,8	0,832	25,9	0,888	27,8	0,952	30,7	1,080	35,7	1,256	39,5	1,368	41,6	1,488
3η επανάληψη	23,6	0,816	25,1	0,856	27,8	0,968	31,0	1,120	35,6	1,240	39,4	1,360	42,1	1,480
4η επανάληψη	23,2	0,800	25,7	0,936	27,8	0,992	31,3	1,128	36,2	1,224	39,0	1,336	42,2	1,480
5η επανάληψη	23,5	0,792	25,8	0,872	27,6	1,000	31,2	1,112	35,8	1,232	39,4	1,360	42,2	1,460
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	23,54	0,808	25,66	0,8864	27,7	0,9744	31,08	1,1024	35,78	1,2448	39,26	1,3536	42,22	1,4856
Τυπική απόκλιση	0,1960	0,0143	0,2871	0,0270	0,1265	0,0185	0,2135	0,0223	0,2227	0,0172	0,2154	0,0118	0,4490	0,0195
Αντίσταση Z (Ω)	34,3246		34,5440		35,1769		35,4698		34,7904		34,4778		35,1871	

Τάση φόρτισης	1,6 kV		1,72 kV		1,84 kV		1,92 kV		2,00 kV		2,24 kV		2,28 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	44,6	1,58	47,8	1,66	51,1	1,80	53,1	1,90	55,3	1,96	62,0	2,18	63,1	2,24
2η επανάληψη	44,3	1,62	47,9	1,68	51,2	1,82	53,2	1,90	55,4	1,96	61,7	2,18	62,7	2,18
3η επανάληψη	44,6	1,56	48,2	1,72	51,1	1,84	53,1	1,90	55,4	1,96	61,6	2,22	63,4	2,24
4η επανάληψη	44,1	1,54	47,7	1,68	51,0	1,84	53,2	1,86	55,0	1,94	61,9	2,24	62,8	2,24
5η επανάληψη	44,2	1,58	47,8	1,70	51,0	1,80	53,0	1,84	55,5	1,94	62,0	2,20	62,8	2,30
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	44,36	1,576	47,88	1,688	51,08	1,82	53,12	1,88	55,32	1,952	61,84	2,204	62,96	2,24
Τυπική απόκλιση	0,2059	0,0265	0,1720	0,0204	0,0748	0,0179	0,0748	0,0253	0,1720	0,0098	0,1625	0,0233	0,2577	0,0379
Αντίσταση Z (Ω)	35,5275		35,2548		35,6304		35,3916		35,2856		35,6404		35,5781	

Τάση φόρτισης	2,56 kV		2,88 kV		3,08 kV		3,36 kV		3,64 kV		3,76 kV		4,4 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	71,0	2,52	79,4	2,84	86,9	3,08	95,2	3,20	102,7	3,52	106,7	3,76	124,5	4,16
2η επανάληψη	71,0	2,50	81,0	2,88	87,5	3,04	94,9	3,20	103,7	3,52	106,9	3,68	125,0	4,40
3η επανάληψη	70,9	2,52	81,3	2,88	86,7	3,12	94,9	3,36	103,2	3,60	106,9	3,68	124,8	4,40
4η επανάληψη	70,8	2,50	81,3	2,88	87,2	3,04	94,9	3,36	103,7	3,60	106,9	3,68	124,8	4,40
5η επανάληψη	71,0	2,54	81,4	2,84	87,5	3,04	95,2	3,28	103,5	3,84	106,7	3,76	125,3	4,32
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	70,94	2,516	80,88	2,864	87,16	3,064	95,02	3,28	103,36	3,616	106,82	3,712	124,88	4,336
Τυπική απόκλιση	0,08	0,0150	0,7521	0,0196	0,32	0,032	0,1470	0,0716	0,3774	0,1176	0,0980	0,0392	0,2638	0,0933
Αντίσταση Z (Ω)	35,4666		35,4105		35,1537		34,5190		34,9845		34,7500		34,7213	

Τάση φόρτισης	5,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	143,4	4,96
2η επανάληψη	143,2	4,96
3η επανάληψη	143,4	5,04
4η επανάληψη	143,2	5,04
5η επανάληψη	143,2	4,96
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	143,28	4,992
Τυπική απόκλιση	0,0980	0,0392
Αντίσταση Z (Ω)	34,8409	

❖ **Ηλεκτρόδιο 40cm x 4cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=0,81 \text{ mS/cm}$, $P=977,3 \text{ mbar}$, $T=22,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 42,5\%$

: σύγκριση με 30x3

Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,36 kV		0,40 kV		0,56 kV		0,72 kV		0,80 kV		0,92 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	7,2	0,188	13,4	0,344	15,5	0,384	21,6	0,552	27,7	0,684	30,5	0,808	35,1	0,856
2η επανάληψη	7,7	0,196	14,0	0,352	15,6	0,392	21,9	0,560	28,3	0,712	30,8	0,800	35,2	0,912
3η επανάληψη	7,6	0,200	14,1	0,336	15,8	0,384	21,6	0,528	27,7	0,704	30,7	0,792	35,9	0,920
4η επανάληψη	8,0	0,192	14,4	0,348	15,9	0,392	22,0	0,560	27,3	0,712	30,9	0,776	35,8	0,920
5η επανάληψη	8,0	0,192	14,1	0,344	15,4	0,392	21,9	0,536	27,4	0,688	30,6	0,768	35,3	0,888
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	7,7	0,1936	14	0,3448	15,64	0,3888	21,8	0,5472	27,68	0,7	30,7	0,7888	35,46	0,8992
Τυπική απόκλιση	0,2966	0,0041	0,3286	0,0053	0,1855	0,0039	0,1673	0,0130	0,3487	0,0119	0,1414	0,0148	0,3262	0,0246
Αντίσταση Z (Ω)	25,1429		24,6286		24,8593		25,1009		25,2890		25,6938		25,3582	

Τάση φόρτισης	1,08 kV		1,20 kV		1,28 kV		1,44 kV		1,64 kV		1,76 kV		1,96 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	41,9	1,088	46,8	1,176	49,3	1,272	55,7	1,440	63,4	1,624	69,0	1,76	77,4	1,96
2η επανάληψη	41,5	1,024	45,6	1,208	48,7	1,240	55,4	1,448	63,4	1,616	69,4	1,76	77,1	1,92
3η επανάληψη	41,9	1,104	45,7	1,176	49,2	1,272	55,6	1,424	63,8	1,712	69,6	1,72	77,3	1,94
4η επανάληψη	42,2	1,064	46,5	1,224	49,5	1,264	56,2	1,448	63,6	1,616	69,6	1,74	77,0	2,02
5η επανάληψη	41,3	1,016	46,0	1,184	49,0	1,224	56,2	1,504	63,7	1,624	69,8	1,84	77,4	1,98
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	41,76	1,0592	46,12	1,1936	49,14	1,2544	55,82	1,4528	63,58	1,6384	69,48	1,764	77,24	1,964
Τυπική απόκλιση	0,32	0,0345	0,4622	0,0192	0,2728	0,0192	0,3250	0,0271	0,16	0,0370	0,2713	0,0408	0,1625	0,0344
Αντίσταση Z (Ω)	25,3640		25,8803		25,5271		26,0265		25,7691		25,3886		25,4272	

Τάση φόρτισης	2,00 kV		2,12 kV		2,32 kV		2,40 kV		2,48 kV		2,80 kV		2,84 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	79,0	2,00	83,8	2,08	91,8	2,32	94,4	2,32	98,1	2,50	110,7	2,78	113,3	2,90
2η επανάληψη	79,2	2,02	84,0	2,08	91,5	2,38	94,7	2,38	98,1	2,48	110,9	2,78	113,3	2,86
3η επανάληψη	78,2	1,94	83,8	2,14	91,4	2,38	95,0	2,40	98,2	2,46	111,2	2,80	113,0	2,86
4η επανάληψη	78,9	1,96	84,3	2,14	91,7	2,34	94,9	2,38	98,2	2,52	110,7	2,80	112,8	2,84
5η επανάληψη	78,7	1,98	84,2	2,08	91,5	2,34	95,2	2,44	98,2	2,44	111,4	2,80	112,5	2,78
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	78,8	1,98	84,02	2,104	91,58	2,352	94,84	2,384	98,16	2,48	110,98	2,792	112,98	2,848
Τυπική απόκλιση	0,3406	0,0283	0,2040	0,0294	0,1470	0,024	0,2728	0,0388	0,0490	0,0283	0,2786	0,0098	0,3059	0,0392
Αντίσταση Z (Ω)	25,1269		25,0417		25,6825		25,1371		25,2649		25,1577		25,2080	

Τάση φόρτισης	3,20 kV		3,56 kV		3,88 kV		4,28 kV		4,60 kV		4,80 kV		5,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	127,2	3,18	141,4	3,54	155,0	3,96	169,2	4,32	182,0	4,60	190,4	4,92	219,2	5,68
2η επανάληψη	127,0	3,16	141,4	3,58	154,9	3,94	169,2	4,32	181,2	4,68	190,0	4,76	222,4	5,60
3η επανάληψη	126,9	3,28	141,3	3,62	154,9	3,94	169,6	4,24	182,4	4,68	189,6	4,72	221,6	5,52
4η επανάληψη	126,9	3,22	141,6	3,60	154,1	3,90	168,4	4,32	182,8	4,68	189,6	4,96	221,6	5,60
5η επανάληψη	126,7	3,14	141,3	3,64	154,6	3,86	169,6	4,32	183,2	4,56	190,0	4,92	222,4	5,60
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	126,94	3,196	141,4	3,596	154,7	3,92	169,2	4,304	182,32	4,64	189,92	4,856	221,44	5,6
Τυπική απόκλιση	0,1625	0,0496	0,1095	0,0344	0,3286	0,0358	0,4382	0,032	0,6882	0,0506	0,2993	0,0967	1,1758	0,0506
Αντίσταση Z (Ω)	25,1772		25,4314		25,3394		25,4374		25,4498		25,5687		25,2890	

Τάση φόρτισης	6,28 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	250,4	6,40
2η επανάληψη	251,2	6,40
3η επανάληψη	252,0	6,56
4η επανάληψη	252,0	6,32
5η επανάληψη	253,6	6,32
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	251,84	6,40
Τυπική απόκλιση	1,0613	0,0876
Αντίσταση Z (Ω)	25,4130	

❖ **Ηλεκτρόδιο 40cm x 4cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=0,81 \text{ mS/cm}$, $P=980,6 \text{ mbar}$, $T=23,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 39,5\%$

: σύγκριση με $\sigma=2 \text{ S/m}$

Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,28 kV		0,32 kV		0,36 kV		0,40 kV		0,48 kV		0,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	8,0	0,190	11,2	0,252	13,0	0,298	13,4	0,320	15,9	0,394	19,5	0,454	21,3	0,508
2η επανάληψη	8,2	0,190	11,5	0,266	12,6	0,290	14,2	0,346	15,8	0,390	20,0	0,482	20,6	0,490
3η επανάληψη	8,2	0,188	11,1	0,264	12,8	0,298	14,2	0,348	15,9	0,394	19,1	0,456	21,2	0,516
4η επανάληψη	8,2	0,190	11,0	0,266	12,7	0,302	14,4	0,348	16,0	0,386	19,9	0,470	21,3	0,518
5η επανάληψη	8,4	0,190	11,3	0,264	12,8	0,296	14,3	0,346	15,6	0,384	18,8	0,458	21,2	0,500
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	8,2	0,1896	11,22	0,2624	12,78	0,2968	14,1	0,3416	15,84	0,3896	19,46	0,464	21,12	0,5064
Τυπική απόκλιση	0,1265	0,0008	0,1720	0,0053	0,1327	0,0039	0,3578	0,0108	0,1356	0,0041	0,4587	0,0106	0,2638	0,0104
Αντίσταση Z (Ω)	23,1220		23,3868		23,2238		24,2270		24,5960		23,8438		23,9773	



Τάση φόρτισης	0,56 kV		0,68 kV		0,76 kV		0,84 kV		0,96 kV		1,00 kV		1,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	23,5	0,564	27,4	0,684	31,3	0,776	35,4	0,844	39,6	0,956	42,3	1,012	43,3	1,068
2η επανάληψη	22,9	0,562	28,1	0,696	31,4	0,776	35,0	0,856	39,4	0,964	41,2	1,000	43,4	1,052
3η επανάληψη	23,0	0,544	28,2	0,692	30,8	0,756	35,1	0,852	39,2	0,940	41,0	0,972	43,6	1,060
4η επανάληψη	23,2	0,560	27,7	0,672	31,3	0,768	35,3	0,868	39,0	0,952	41,2	1,000	42,9	1,028
5η επανάληψη	23,0	0,552	27,5	0,684	31,4	0,744	34,4	0,824	39,4	0,956	41,0	1,008	43,0	1,060
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	23,12	0,5564	27,78	0,6856	31,24	0,764	35,04	0,8488	39,32	0,9536	41,34	0,9984	43,24	1,0536
Τυπική απόκλιση	0,2135	0,0074	0,3187	0,0082	0,2245	0,0124	0,3499	0,0146	0,2040	0,0078	0,4883	0,0140	0,2577	0,0138
Αντίσταση Z (Ω)	24,0657		24,6796		24,4558		24,2237		24,2523		24,1509		24,3663	

Τάση φόρτισης	1,12 kV		1,16 kV		1,24 kV		1,28 kV		1,32 kV		1,40 kV		1,48 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	46,6	1,120	49,0	1,184	52,0	1,280	54,9	1,280	55,5	1,344	59,0	1,456	63,5	1,52
2η επανάληψη	46,6	1,136	49,0	1,180	50,9	1,268	54,9	1,312	55,7	1,320	59,0	1,408	62,7	1,48
3η επανάληψη	46,6	1,116	48,2	1,176	50,7	1,236	53,8	1,320	56,5	1,344	58,7	1,408	63,4	1,48
4η επανάληψη	46,9	1,160	48,1	1,160	51,0	1,196	54,9	1,320	55,2	1,312	58,9	1,432	62,9	1,54
5η επανάληψη	46,5	1,144	48,3	1,156	51,0	1,252	55,0	1,320	55,5	1,320	58,6	1,432	62,9	1,54
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	46,64	1,1352	48,52	1,1712	51,12	1,2464	54,7	1,3104	55,68	1,328	58,84	1,4272	63,08	1,512
Τυπική απόκλιση	0,1356	0,0161	0,3970	0,0111	0,4534	0,0292	0,4517	0,0155	0,44	0,0134	0,1625	0,0180	0,3124	0,0271
Αντίσταση Z (Ω)	24,3396		24,1385		24,3818		23,9561		23,8506		24,2556		23,9696	

Τάση φόρτισης	1,56 kV		1,60 kV		1,64 kV		1,88 kV		2,00 kV		2,08 kV		2,24 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	66,9	1,60	69,1	1,66	70,7	1,70	79,2	1,88	84,8	2,10	88,5	2,14	94,2	2,30
2η επανάληψη	66,1	1,56	69,0	1,66	70,6	1,66	79,5	1,92	84,5	2,06	87,7	2,10	94,1	2,28
3η επανάληψη	67,2	1,64	69,0	1,64	70,1	1,66	79,0	1,94	84,2	2,02	88,3	2,14	94,7	2,28
4η επανάληψη	65,9	1,58	68,8	1,66	70,1	1,70	79,0	1,88	84,3	2,02	87,5	2,10	95,0	2,28
5η επανάληψη	67,2	1,60	68,0	1,64	70,6	1,68	79,0	1,92	84,3	2,00	87,2	2,08	94,9	2,28
	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)
	66,66	1,596	68,78	1,652	70,42	1,68	79,14	1,908	84,42	2,04	87,84	2,112	94,58	2,284
Τυπική απόκλιση	0,5535	0,0265	0,4020	0,0098	0,2638	0,0179	0,1960	0,024	0,2135	0,0358	0,4883	0,024	0,3655	0,008
Αντίσταση Z (Ω)	23,9424		24,0186		23,8569		24,1092		24,1649		24,0437		24,1489	

Για αγωγιμότητα $\sigma=4 \text{ S/m}$ και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$



❖ Ηλεκτρόδιο 20cm x 2cm: Αγωγιμότητα $\sigma=41,2 \text{ mS/cm}$, $P=985,8 \text{ mbar}$, $T=21,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 44\%$

 : σύγκριση με 40x4
 : σύγκριση με 30x3

Τάση φόρτισης	0,24 kV		0,32 kV		0,44 kV		0,52 kV		0,64 kV		0,72 kV		0,84 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	102	0,180	142	0,246	200	0,360	246	0,444	302	0,556	350	0,636	402	0,724
2η επανάληψη	104	0,184	146	0,256	206	0,372	246	0,444	298	0,544	346	0,628	408	0,736
3η επανάληψη	104	0,184	147	0,274	202	0,376	244	0,440	302	0,548	352	0,644	400	0,720
4η επανάληψη	107	0,186	151	0,266	202	0,360	246	0,452	300	0,552	348	0,640	400	0,740
5η επανάληψη	106	0,186	150	0,262	202	0,364	248	0,444	296	0,540	350	0,636	410	0,744
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	104,6	0,184	147,2	0,2608	202,4	0,3664	246	0,4448	299,6	0,548	349,2	0,6368	404	0,7328
Τυπική απόκλιση	1,7436	0,0022	3,1875	0,0094	1,9596	0,0065	1,2649	0,0039	2,3324	0,0057	2,0396	0,0053	4,1952	0,0093
Αντίσταση Z (Ω)	1,75908		1,77174		1,81028		1,80813		1,82911		1,82360		1,81386	

Τάση φόρτισης	0,92 kV		1,00 kV		1,20 kV		1,40 kV		1,60 kV		1,84 kV		2,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	456	0,820	496	0,904	592	1,07	696	1,26	792	1,45	904	1,66	1000	1,82
2η επανάληψη	452	0,816	496	0,896	592	1,08	696	1,26	784	1,44	896	1,64	992	1,82
3η επανάληψη	444	0,812	496	0,896	600	1,08	696	1,26	792	1,44	896	1,64	1000	1,82
4η επανάληψη	448	0,804	484	0,864	592	1,08	688	1,24	784	1,43	904	1,64	992	1,80
5η επανάληψη	452	0,812	492	0,896	596	1,08	696	1,26	792	1,45	904	1,64	1000	1,82
	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (A)	V _m μέσο (kV)
	450,4	0,8128	492,8	0,8912	594,4	1,078	694,4	1,256	788,8	1,442	900,8	1,644	996,8	1,816
Τυπική απόκλιση	4,0792	0,0053	4,6648	0,0139	3,2	0,004	3,2	0,008	3,9192	0,0075	3,9192	0,008	3,9192	0,008
Αντίσταση Z (Ω)	1,80462		1,80844		1,81359		1,80876		1,82809		1,82504		1,82183	

❖ **Ηλεκτρόδιο 30cm x 3cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=41,2 \text{ mS/cm}$, $P=985,8 \text{ mbar}$, $T=21,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 44\%$




 : σύγκριση με 40x4
 : σύγκριση με 20x2

Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,36 kV		0,40 kV		0,52 kV		0,64 kV		0,76 kV		0,88 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	106	0,178	198	0,300	218	0,328	296	0,460	392	0,600	440	0,680	508	0,784
2η επανάληψη	108	0,158	198	0,320	222	0,336	292	0,456	392	0,592	440	0,680	500	0,768
3η επανάληψη	108	0,158	192	0,308	220	0,328	294	0,444	392	0,616	440	0,672	504	0,768
4η επανάληψη	110	0,162	200	0,312	220	0,344	290	0,436	392	0,608	432	0,672	492	0,752
5η επανάληψη	110	0,160	194	0,316	222	0,332	292	0,440	388	0,592	440	0,672	496	0,760
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	108,4	0,1632	196,4	0,3112	220,4	0,3336	292,8	0,4472	391,2	0,6016	438,4	0,6752	500	0,7664
Τυπική απόκλιση	1,4967	0,0075	2,9394	0,0069	1,4967	0,0060	2,0396	0,0093	1,6	0,0093	3,2	0,0039	5,6569	0,0106
Αντίσταση Z (Ω)	1,5055		1,5845		1,5136		1,5273		1,5378		1,5401		1,5328	

Τάση φόρτισης	1,04 kV		1,16 kV		1,20 kV		1,40 kV		1,60 kV		1,80 kV		1,96 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	604	0,928	668	1,02	696	1,09	800	1,24	904	1,42	1020	1,58	1120	1,74
2η επανάληψη	596	0,920	668	1,03	688	1,07	800	1,26	904	1,42	1020	1,60	1120	1,74
3η επανάληψη	592	0,904	672	1,05	692	1,07	792	1,24	912	1,42	1030	1,60	1100	1,74
4η επανάληψη	596	0,904	660	1,02	688	1,06	800	1,25	904	1,40	1030	1,58	1100	1,74
5η επανάληψη	604	0,928	664	1,03	692	1,09	792	1,25	904	1,40	1020	1,56	1100	1,72
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	598,4	0,9168	666,4	1,03	691,2	1,076	796,8	1,248	905,6	1,412	1024	1,584	1108	1,736
Τυπική απόκλιση	4,8	0,0109	4,0792	0,011	2,9933	0,012	3,9192	0,0075	3,2	0,0098	4,899	0,015	9,798	0,008
Αντίσταση Z (Ω)	1,5321		1,5456		1,5567		1,5663		1,5592		1,5469		1,5668	

Τάση φόρτισης	2,40 kV		2,68 kV		3,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1350	2,12	1580	2,44	1800	2,74
2η επανάληψη	1360	2,12	1580	2,44	1800	2,72
3η επανάληψη	1350	2,12	1580	2,36	1800	2,76
4η επανάληψη	1350	2,12	1600	2,38	1800	2,76
5η επανάληψη	1360	2,12	1600	2,38	1820	2,72
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1354	2,12	1588	2,4	1804	2,74
Τυπική απόκλιση	4,899	0	9,798	0,0335	8	0,0179
Αντίσταση Z (Ω)	1,5657		1,5113		1,5188	

❖ **Ηλεκτρόδιο 40cm x 4cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=41,5 \text{ mS/cm}$, $P=989,5 \text{ mbar}$, $T=22,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 43,7\%$

 : σύγκριση με 20x2
 : σύγκριση με 30x3
 : σύγκριση με 60x6


Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,28 kV		0,32 kV		0,48 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,76 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	115	0,160	164	0,220	198	0,270	294	0,396	358	0,492	400	0,544	496	0,672
2η επανάληψη	122	0,166	166	0,222	196	0,268	298	0,420	356	0,488	408	0,560	492	0,680
3η επανάληψη	117	0,160	168	0,228	194	0,262	300	0,412	354	0,480	388	0,528	492	0,672
4η επανάληψη	120	0,162	166	0,222	194	0,264	300	0,412	356	0,488	412	0,560	492	0,664
5η επανάληψη	121	0,164	168	0,228	196	0,260	298	0,408	352	0,480	396	0,544	508	0,696
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	119	0,1624	166,4	0,224	195,6	0,2648	298	0,4096	355,2	0,4856	400,8	0,5472	496	0,6768
Τυπική απόκλιση	2,6077	0,0023	1,4967	0,0033	1,4967	0,0037	2,1909	0,0078	2,0396	0,0048	8,5417	0,012	6,1968	0,0109
Αντίσταση Z (Ω)	1,3647		1,3462		1,3538		1,3745		1,3671		1,3653		1,3645	

Τάση φόρτισης	0,84 kV		0,92 kV		1,08 kV		1,24 kV		1,36 kV		1,40 kV		1,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	536	0,728	600	0,816	700	0,960	808	1,11	888	1,20	912	1,22	1000	1,36
2η επανάληψη	540	0,744	600	0,824	700	0,944	808	1,11	888	1,22	904	1,24	992	1,34
3η επανάληψη	540	0,736	596	0,816	700	0,952	784	1,08	888	1,20	896	1,20	1000	1,34
4η επανάληψη	540	0,736	600	0,824	708	0,960	792	1,07	888	1,18	896	1,22	1000	1,36
5η επανάληψη	536	0,736	600	0,816	704	0,960	784	1,07	880	1,20	896	1,22	1010	1,36
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	538,4	0,736	599,2	0,8192	702,4	0,9552	795,2	1,088	886,4	1,2	900,8	1,22	1000,4	1,352
Τυπική απόκλιση	1,9596	0,0051	1,6	0,0039	3,2	0,0064	10,8517	0,0183	3,2	0,0126	6,4	0,0126	5,7131	0,0098
Αντίσταση Z (Ω)	1,3670		1,3672		1,3599		1,3682		1,3538		1,3544		1,3515	

Τάση φόρτισης	1,64 kV		1,68 kV		1,80 kV		1,88 kV		1,96 kV		2,00 kV		2,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1070	1,44	1100	1,50	1220	1,64	1250	1,68	1300	1,76	1380	1,78	1440	1,82
2η επανάληψη	1060	1,44	1100	1,46	1210	1,62	1240	1,66	1300	1,74	1400	1,76	1420	1,82
3η επανάληψη	1080	1,46	1100	1,48	1190	1,60	1240	1,68	1290	1,74	1400	1,78	1420	1,80
4η επανάληψη	1070	1,44	1100	1,48	1180	1,60	1240	1,66	1300	1,72	1400	1,78	1420	1,80
5η επανάληψη	1070	1,46	1100	1,48	1190	1,60	1250	1,66	1300	1,74	1400	1,78	1420	1,82
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1070	1,448	1100	1,48	1198	1,612	1244	1,668	1298	1,74	1396	1,776	1424	1,812
Τυπική απόκλιση	6,3246	0,0098	0	0,0126	14,6969	0,016	4,8990	0,0098	4	0,0126	8	0,008	8	0,0098
Αντίσταση Z (Ω)	1,3533		1,3455		1,3456		1,3408		1,3405		1,2722		1,2725	

Τάση φόρτισης	2,12 kV		2,28 kV		2,88 kV		3,36 kV		3,88 kV		4,48 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1500	1,90	1600	2,02	1980	2,54	2400	3,04	2800	3,48	3200	4,04
2η επανάληψη	1500	1,88	1600	2,02	2020	2,60	2400	3,04	2760	3,48	3200	4,08
3η επανάληψη	1500	1,88	1600	2,02	2020	2,64	2400	3,04	2800	3,52	3200	4,04
4η επανάληψη	1500	1,88	1600	2,04	2000	2,62	2400	3,04	2800	3,52	3200	4,04
5η επανάληψη	1480	1,88	1600	2,02	1980	2,54	2400	3,04	2800	3,52	3200	4,04
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1496	1,884	1600	2,024	2000	2,588	2400	3,04	2792	3,504	3200	4,048
Τυπική απόκλιση	8	0,008	0	0,008	17,8885	0,0412	0	0	16	0,0196	0	0,016
Αντίσταση Z (Ω)	1,2594		1,2650		1,2940		1,2667		1,2550		1,2650	

❖ **Ηλεκτρόδιο 60cm x 6cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=41,5 \text{ mS/cm}$, $P=989,5 \text{ mbar}$, $T=22,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 43,7\%$



 : σύγκριση με 40x4

Τάση φόρτισης	0,32 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,92 kV		1,08 kV		1,20 kV		1,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	212	0,244	392	0,460	452	0,528	672	0,800	800	0,944	904	1,07	1110	1,32
2η επανάληψη	220	0,256	392	0,460	448	0,528	680	0,800	792	0,944	896	1,07	1110	1,30
3η επανάληψη	216	0,252	404	0,468	448	0,536	680	0,792	808	0,952	896	1,06	1110	1,32
4η επανάληψη	218	0,252	392	0,452	456	0,536	664	0,800	800	0,952	896	1,07	1140	1,36
5η επανάληψη	250	0,288	408	0,476	448	0,528	672	0,800	800	0,952	904	1,08	1150	1,36
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	223,2	0,2584	397,6	0,4632	450,4	0,5312	673,6	0,7984	800	0,9488	899,2	1,07	1124	1,332
Τυπική απόκλιση	13,6587	0,0153	6,9742	0,0082	3,2	0,0039	5,9867	0,0032	5,0596	0,0039	3,9192	0,0063	17,4356	0,024
Αντίσταση Z (Ω)	1,1577		1,1650		1,1794		1,1853		1,1860		1,1899		1,1851	

Τάση φόρτισης	1,60 kV		1,72 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1200	1,40	1340	1,50
2η επανάληψη	1190	1,40	1360	1,52
3η επανάληψη	1220	1,42	1360	1,52
4η επανάληψη	1200	1,42	1340	1,50
5η επανάληψη	1210	1,42	1340	1,54
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1204	1,412	1348	1,516
Τυπική απόκλιση	10,198	0,0098	9,7980	0,015
Αντίσταση Z (Ω)	1,1728		1,1246	

Για αγωγιμότητα $\sigma=4 \text{ S/m}$ και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$



❖ Ηλεκτρόδιο 20cm x 2cm: Αγωγιμότητα $\sigma=41,2 \text{ mS/cm}$, $P=985,8 \text{ mbar}$, $T=21,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 44\%$

 : σύγκριση με 40x4
 : σύγκριση με 30x3

Τάση φόρτισης	0,24 kV		0,32 kV		0,44 kV		0,52 kV		0,64 kV		0,72 kV		0,84 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	101,8	0,134	140,3	0,190	198,0	0,264	243,6	0,328	299,2	0,412	348,4	0,496	398,8	0,552
2η επανάληψη	103,2	0,132	145,0	0,192	204,0	0,288	244,0	0,328	296,4	0,412	343,2	0,464	407,2	0,568
3η επανάληψη	103,2	0,138	146,4	0,204	199,6	0,284	242,0	0,340	300,4	0,416	348,4	0,484	397,6	0,544
4η επανάληψη	105,9	0,138	149,9	0,194	199,6	0,276	242,4	0,332	295,2	0,412	345,2	0,476	398,0	0,552
5η επανάληψη	106,0	0,140	148,8	0,200	200,8	0,280	244,8	0,328	295,6	0,432	348,0	0,500	408,8	0,552
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	104,02	0,1364	146,08	0,196	200,4	0,2784	243,36	0,3312	297,36	0,4168	346,64	0,484	402,08	0,5536
Τυπική απόκλιση	1,6570	0,0029	3,3665	0,0052	2,0080	0,0082	1,0307	0,0047	2,0646	0,0078	2,0953	0,0131	4,8754	0,0078
Αντίσταση Z (Ω)	1,3113		1,3417		1,3892		1,3609		1,4017		1,3963		1,3768	

Τάση φόρτισης	0,92 kV		1,00 kV		1,20 kV		1,40 kV		1,60 kV		1,84 kV		2,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	448,8	0,620	491,2	0,696	588,0	0,816	692,8	0,944	782,4	1,104	894,4	1,32	993,6	1,36
2η επανάληψη	446,4	0,600	494,4	0,656	590,4	0,792	692,0	0,920	779,2	1,072	888,0	1,24	985,6	1,40
3η επανάληψη	441,6	0,608	492,8	0,688	594,4	0,816	689,6	0,968	779,2	1,112	889,6	1,26	988,8	1,40
4η επανάληψη	442,4	0,596	478,4	0,648	586,4	0,816	683,2	0,936	777,6	1,080	896,0	1,28	985,6	1,34
5η επανάληψη	446,4	0,620	490,4	0,664	589,6	0,832	691,2	0,960	784,0	1,048	891,2	1,20	987,2	1,42
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	445,12	0,6088	489,44	0,6704	589,76	0,8144	689,76	0,9456	780,48	1,0832	891,84	1,26	988,16	1,384
Τυπική απόκλιση	2,7058	0,0099	5,6884	0,0185	2,6964	0,0128	3,4465	0,0171	2,3515	0,0230	2,9676	0,04	2,9676	0,0294
Αντίσταση Z (Ω)	1,3677		1,3697		1,3809		1,3709		1,3879		1,4128		1,4006	

❖ **Ηλεκτρόδιο 30cm x 3cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=41,2 \text{ mS/cm}$, $P=985,8 \text{ mbar}$, $T=21,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 44\%$




 : σύγκριση με 40x4
 : σύγκριση με 20x2

Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,36 kV		0,40 kV		0,52 kV		0,64 kV		0,76 kV		0,88 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	104,6	0,110	196,0	0,204	215,2	0,224	293,2	0,296	388,8	0,376	436,0	0,448	504,8	0,536
2η επανάληψη	107,4	0,106	196,4	0,200	218,8	0,232	289,2	0,296	388,0	0,408	432,8	0,424	496,8	0,512
3η επανάληψη	107,4	0,108	190,0	0,188	217,2	0,224	291,6	0,288	386,4	0,400	432,8	0,464	497,6	0,480
4η επανάληψη	108,8	0,106	198,0	0,192	218,0	0,212	287,6	0,292	387,2	0,416	429,6	0,448	488,0	0,520
5η επανάληψη	109,0	0,106	192,4	0,192	219,6	0,220	289,6	0,308	384,8	0,400	432,8	0,464	492,0	0,504
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	107,44	0,1072	194,56	0,1952	217,76	0,2224	290,24	0,296	387,04	0,4	432,8	0,4496	495,84	0,5104
Τυπική απόκλιση	1,5718	0,0016	2,9241	0,0059	1,5094	0,0065	1,9530	0,0067	1,3764	0,0134	2,0239	0,0147	5,6659	0,0185
Αντίσταση Z (Ω)	0,9978		1,0033		1,0213		1,0198		1,0335		1,0388		1,0294	

Τάση φόρτισης	1,04 kV		1,16 kV		1,20 kV		1,40 kV		1,60 kV		1,80 kV		1,96 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	598,4	0,608	664,0	0,680	689,6	0,728	790,4	0,832	892,8	0,90	1008,0	1,00	1110,4	1,12
2η επανάληψη	592,0	0,616	664,8	0,648	685,6	0,688	788,8	0,784	892,8	0,92	1008,0	1,02	1110,4	1,16
3η επανάληψη	589,6	0,584	668,0	0,704	687,2	0,696	782,4	0,768	905,6	0,96	1019,2	1,02	1096,0	1,14
4η επανάληψη	591,2	0,600	657,6	0,632	682,4	0,680	785,6	0,816	896,0	0,92	1019,2	1,04	1097,6	1,08
5η επανάληψη	600,8	0,624	660,0	0,656	689,6	0,704	785,6	0,824	894,4	0,94	1008,0	1,04	1089,6	1,04
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	594,4	0,6064	662,88	0,664	686,88	0,6992	786,56	0,8048	896,32	0,928	1012,48	1,024	1100,8	1,108
Τυπική απόκλιση	4,3818	0,0138	3,6696	0,0253	2,7058	0,0165	2,7897	0,0246	4,7893	0,0204	5,4869	0,0150	8,2830	0,0431
Αντίσταση Z (Ω)	1,0202		1,0017		1,0179		1,0232		1,0353		1,0114		1,0065	

Τάση φόρτισης	2,40 kV		2,68 kV		3,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1344,0	1,40	1564	1,52	1772	1,76
2η επανάληψη	1348,8	1,40	1576	1,52	1772	1,92
3η επανάληψη	1348,8	1,38	1568	1,54	1784	1,68
4η επανάληψη	1348,8	1,40	1568	1,60	1784	1,72
5η επανάληψη	1347,2	1,36	1572	1,60	1784	1,72
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1347,52	1,388	1569,6	1,556	1779,2	1,76
Τυπική απόκλιση	1,8659	0,016	4,0792	0,0367	5,8788	0,0839
Αντίσταση Z (Ω)	1,0300		0,9913		0,9892	

❖ **Ηλεκτρόδιο 40cm x 4cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=41,5 \text{ mS/cm}$, $P=989,5 \text{ mbar}$, $T=22,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 43,7\%$

 : σύγκριση με 20x2
 : σύγκριση με 30x3
 : σύγκριση με 60x6


Τάση φόρτισης	0,20 kV		0,28 kV		0,32 kV		0,48 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,76 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	113,9	0,094	160,8	0,144	195,2	0,178	291,6	0,244	356,0	0,292	393,6	0,352	490,4	0,424
2η επανάληψη	120,3	0,106	162,8	0,148	193,2	0,172	294,8	0,244	353,6	0,304	407,2	0,360	488,0	0,408
3η επανάληψη	116,3	0,102	166,4	0,146	190,4	0,166	296,4	0,268	350,8	0,308	380,0	0,344	488,0	0,416
4η επανάληψη	118,9	0,096	162,4	0,136	192,4	0,178	297,6	0,260	353,6	0,300	405,6	0,360	487,2	0,424
5η επανάληψη	120,8	0,098	166,8	0,154	192,0	0,168	295,2	0,256	350,0	0,304	392,0	0,344	500,8	0,448
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	118,04	0,0992	163,84	0,1456	192,64	0,1724	295,12	0,2544	352,8	0,3016	395,68	0,352	490,88	0,424
Τυπική απόκλιση	2,5935	0,0043	2,3542	0,0059	1,5718	0,0050	2,0143	0,0093	2,1615	0,0054	9,9483	0,0072	5,0748	0,0134
Αντίσταση Z (Ω)	0,8404		0,8887		0,8949		0,8620		0,8549		0,8896		0,8638	

Τάση φόρτισης	0,84 kV		0,92 kV		1,08 kV		1,24 kV		1,36 kV		1,40 kV		1,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	528,8	0,504	594,4	0,520	696,8	0,632	803,2	0,648	880,0	0,78	899,2	0,72	987,2	0,82
2η επανάληψη	536,0	0,480	594,4	0,512	695,2	0,608	800,0	0,696	883,2	0,76	899,2	0,80	980,8	0,84
3η επανάληψη	535,2	0,440	589,6	0,544	696,0	0,616	774,4	0,688	880,0	0,70	884,8	0,72	992,0	0,88
4η επανάληψη	533,6	0,456	594,4	0,496	701,6	0,632	774,4	0,664	878,4	0,74	884,8	0,72	990,4	0,86
5η επανάληψη	533,6	0,440	597,6	0,512	700,0	0,616	774,4	0,648	872,0	0,72	886,4	0,74	992,0	0,82
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	533,44	0,464	594,08	0,5168	697,92	0,6208	785,28	0,6688	878,72	0,74	890,88	0,74	988,48	0,844
Τυπική απόκλιση	2,4993	0,0248	2,56	0,0157	2,4580	0,0096	13,3636	0,0200	3,7043	0,0283	6,8183	0,0310	4,2211	0,0233
Αντίσταση Z (Ω)	0,8698		0,8699		0,8895		0,8517		0,8421		0,8306		0,8538	

Τάση φόρτισης	1,64 kV		1,68 kV		1,80 kV		1,88 kV		1,96 kV		2,00 kV		2,04 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1064,0	0,90	1097,6	0,96	1203,2	1,02	1240,0	1,02	1289,6	1,10	1356	1,10	1408	1,18
2η επανάληψη	1060,8	0,84	1089,6	0,90	1201,6	0,98	1225,6	1,04	1283,2	1,10	1376	1,12	1396	1,20
3η επανάληψη	1073,6	0,84	1092,8	0,90	1184,0	0,96	1230,4	1,02	1281,6	1,10	1372	1,12	1396	1,06
4η επανάληψη	1067,2	0,92	1086,4	1,02	1171,2	1,04	1233,6	1,06	1284,8	1,14	1376	1,12	1392	1,20
5η επανάληψη	1068,8	0,92	1094,4	0,92	1180,8	0,98	1238,4	1,06	1283,2	1,10	1376	1,14	1396	1,10
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1066,88	0,884	1092,16	0,94	1188,16	0,996	1233,6	1,04	1284,48	1,108	1371,2	1,12	1397,6	1,148
Τυπική απόκλιση	4,3407	0,0367	3,8666	0,0456	12,3770	0,0294	5,2581	0,0179	2,7527	0,016	7,7563	0,0126	5,4259	0,0574
Αντίσταση Z (Ω)	0,8286		0,8607		0,8383		0,8431		0,8626		0,8168		0,8214	

Τάση φόρτισης	2,12 kV		2,28 kV		2,88 kV		3,36 kV		3,88 kV		4,48 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1468	1,18	1576	1,28	1964	1,54	2360	1,80	2728	2,32	3160	2,64
2η επανάληψη	1468	1,14	1576	1,38	2000	1,68	2368	2,00	2720	2,40	3160	2,52
3η επανάληψη	1472	1,20	1576	1,20	1988	1,60	2360	2,00	2752	2,32	3168	2,68
4η επανάληψη	1468	1,22	1580	1,26	1984	1,58	2360	1,88	2728	2,24	3168	2,56
5η επανάληψη	1452	1,24	1572	1,32	1956	1,58	2360	2,00	2752	2,20	3160	2,52
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1465,6	1,196	1576	1,288	1978,4	1,596	2361,6	1,936	2736	2,296	3163,2	2,584
Τυπική απόκλιση	6,9742	0,0344	2,5298	0,0601	16,1196	0,0463	3,2	0,0824	13,3866	0,0697	3,9192	0,0650
Αντίσταση Z (Ω)	0,8160		0,8173		0,8067		0,8198		0,8392		0,8169	

❖ **Ηλεκτρόδιο 60cm x 6cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=41,5 \text{ mS/cm}$, $P=989,5 \text{ mbar}$, $T=22,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Hum}\%= 43,7\%$

 : σύγκριση με 40x4

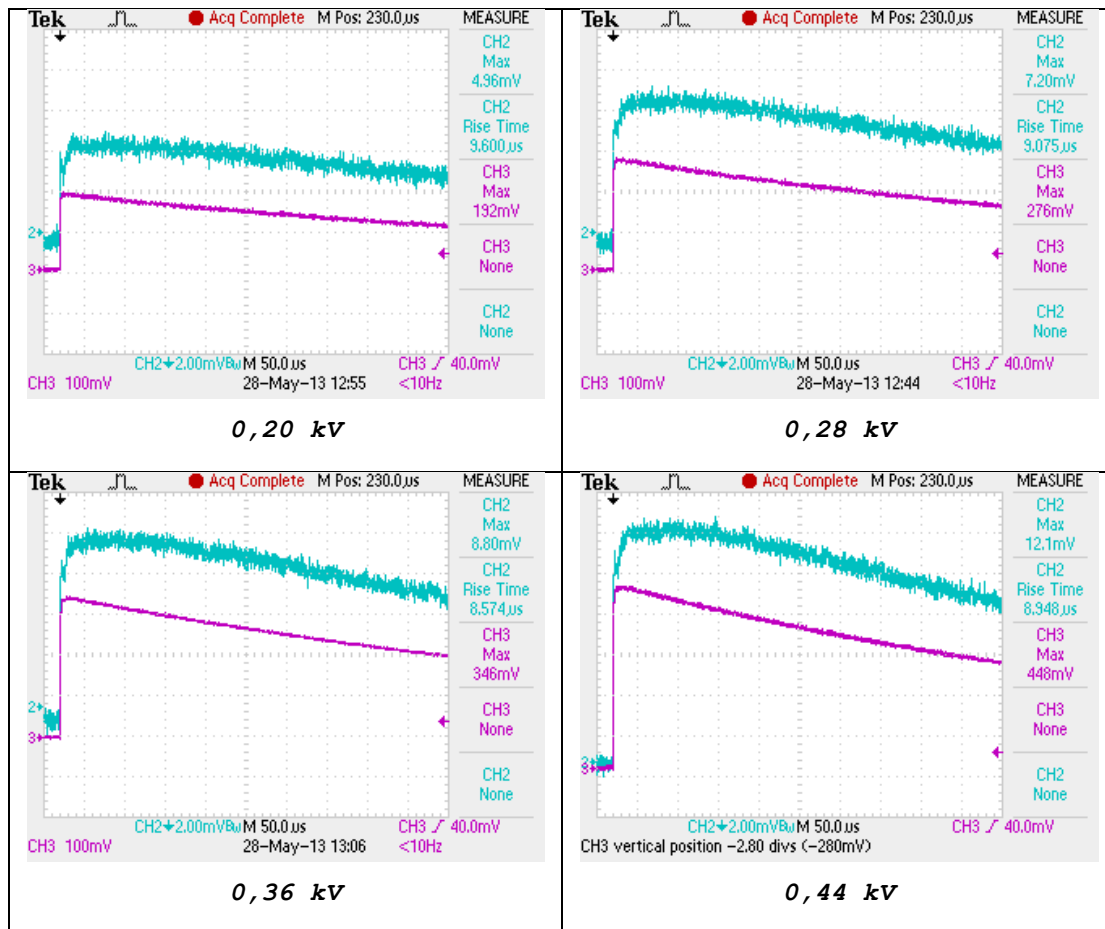
Τάση φόρτισης	0,32 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,92 kV		1,08 kV		1,20 kV		1,52 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	209,2	0,124	388,0	0,224	445,6	0,280	665,6	0,392	788,8	0,440	892,8	0,552	1107,2	0,64
2η επανάληψη	218,0	0,132	386,4	0,224	444,8	0,256	672,0	0,408	785,6	0,424	889,6	0,544	1092,8	0,64
3η επανάληψη	213,2	0,132	397,6	0,248	445,6	0,256	664,0	0,376	798,4	0,456	886,4	0,544	1107,2	0,66
4η επανάληψη	216,4	0,128	384,0	0,216	449,6	0,280	652,8	0,432	787,2	0,504	888,0	0,528	1134,4	0,68
5η επανάληψη	247,2	0,144	404,8	0,252	444,8	0,280	665,6	0,424	793,6	0,464	899,2	0,520	1142,4	0,72
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	220,8	0,132	392,16	0,2328	446,08	0,2704	664	0,4064	790,72	0,4576	891,2	0,5376	1116,8	0,668
Τυπική απόκλιση	13,5387	0,0067	7,8286	0,0144	1,7960	0,0118	6,2379	0,0205	4,6812	0,0270	4,5255	0,0118	18,5765	0,0299
Αντίσταση Z (Ω)	0,5978		0,5936		0,6062		0,6120		0,5787		0,6032		0,5981	

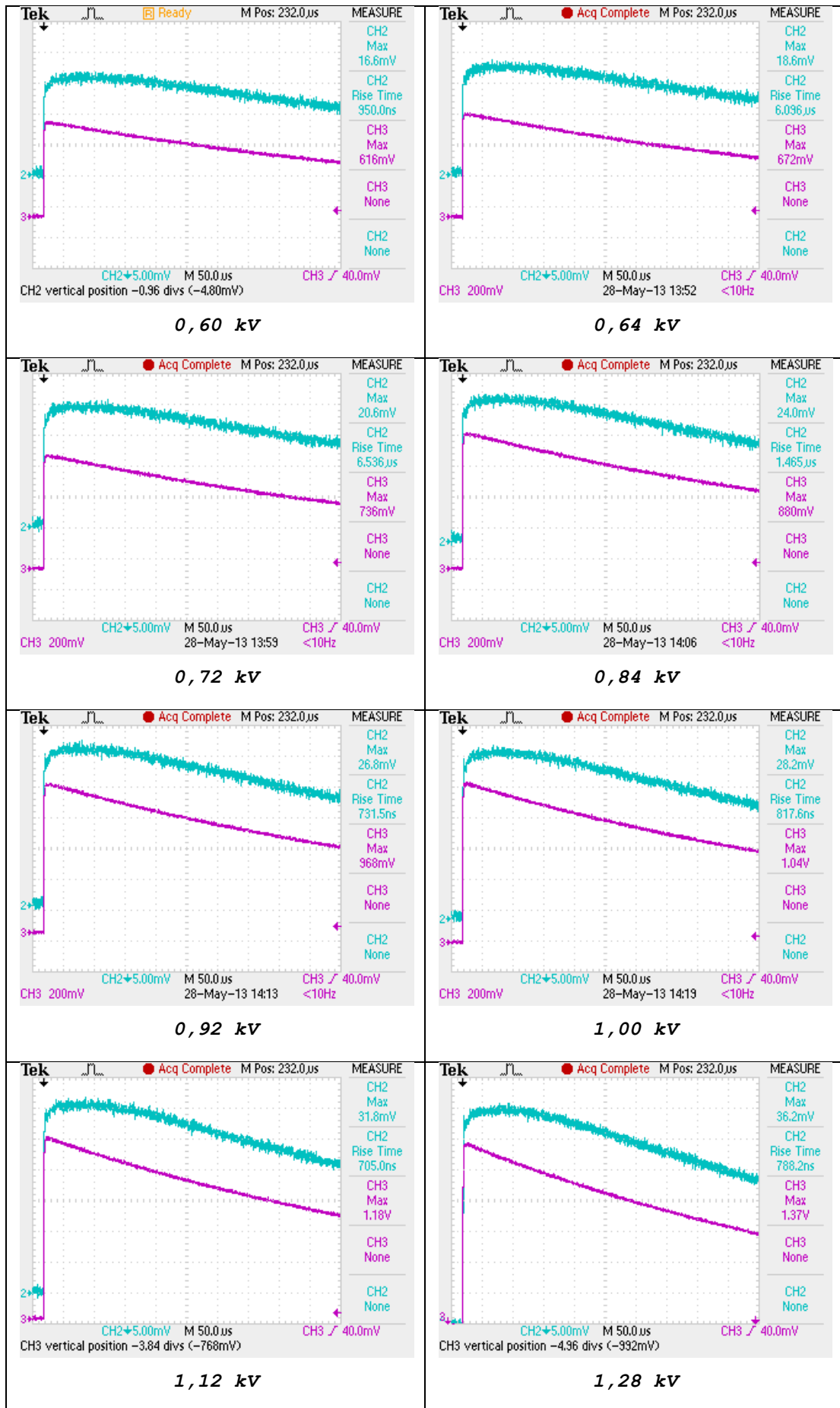
Τάση φόρτισης	1,60 kV		1,72 kV	
	I _{max} (A)	V _{max} (kV)	I _{max} (A)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1190,4	0,70	1332	0,70
2η επανάληψη	1185,6	0,76	1332	0,72
3η επανάληψη	1214,4	0,70	1320	0,82
4η επανάληψη	1190,4	0,74	1320	0,78
5η επανάληψη	1201,6	0,70	1316	0,78
	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (A)	V _{m μέσο} (kV)
	1196,48	0,72	1324	0,76
Τυπική απόκλιση	10,3889	0,0253	6,6933	0,0438
Αντίσταση Z (Ω)	0,6018		0,5740	

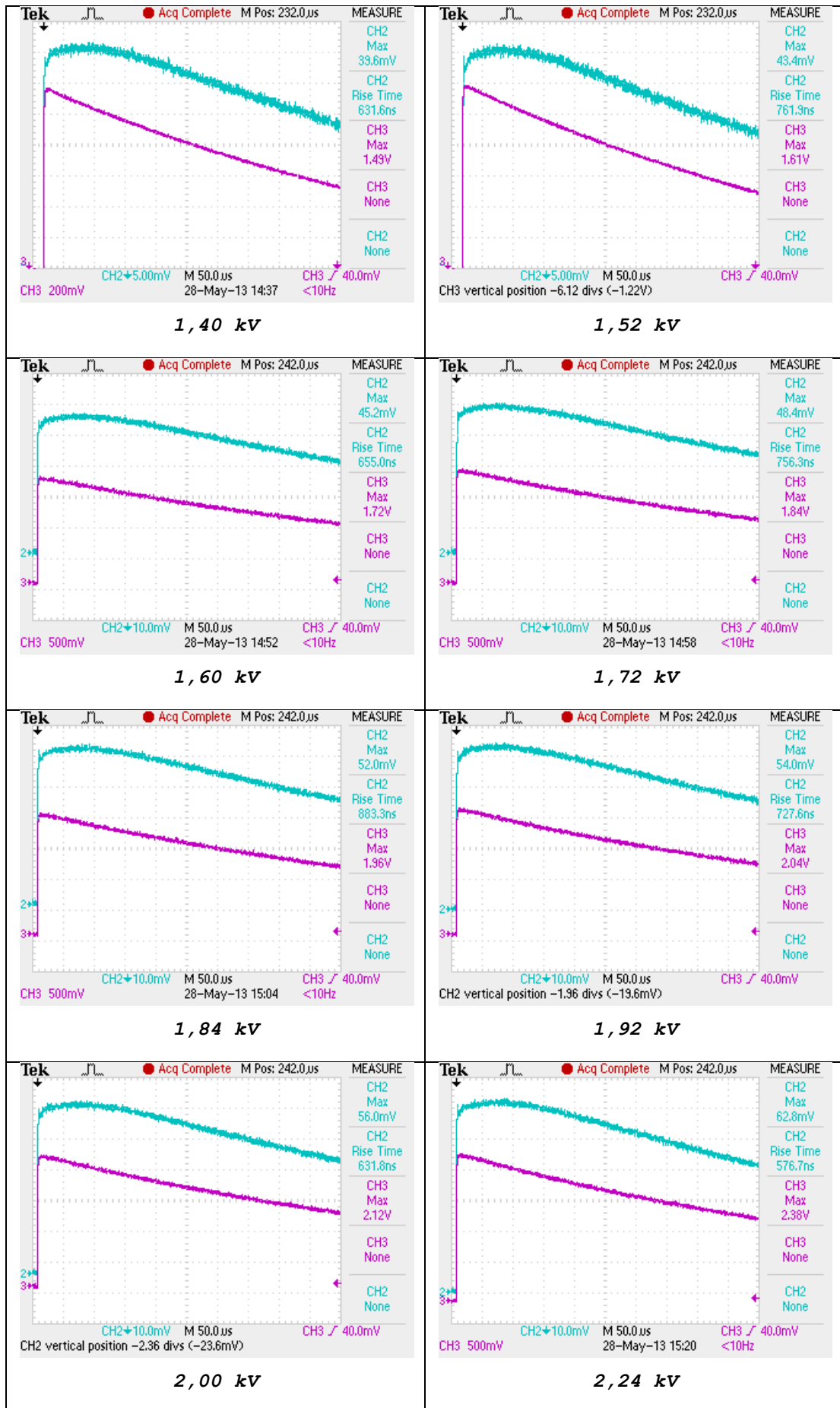
ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

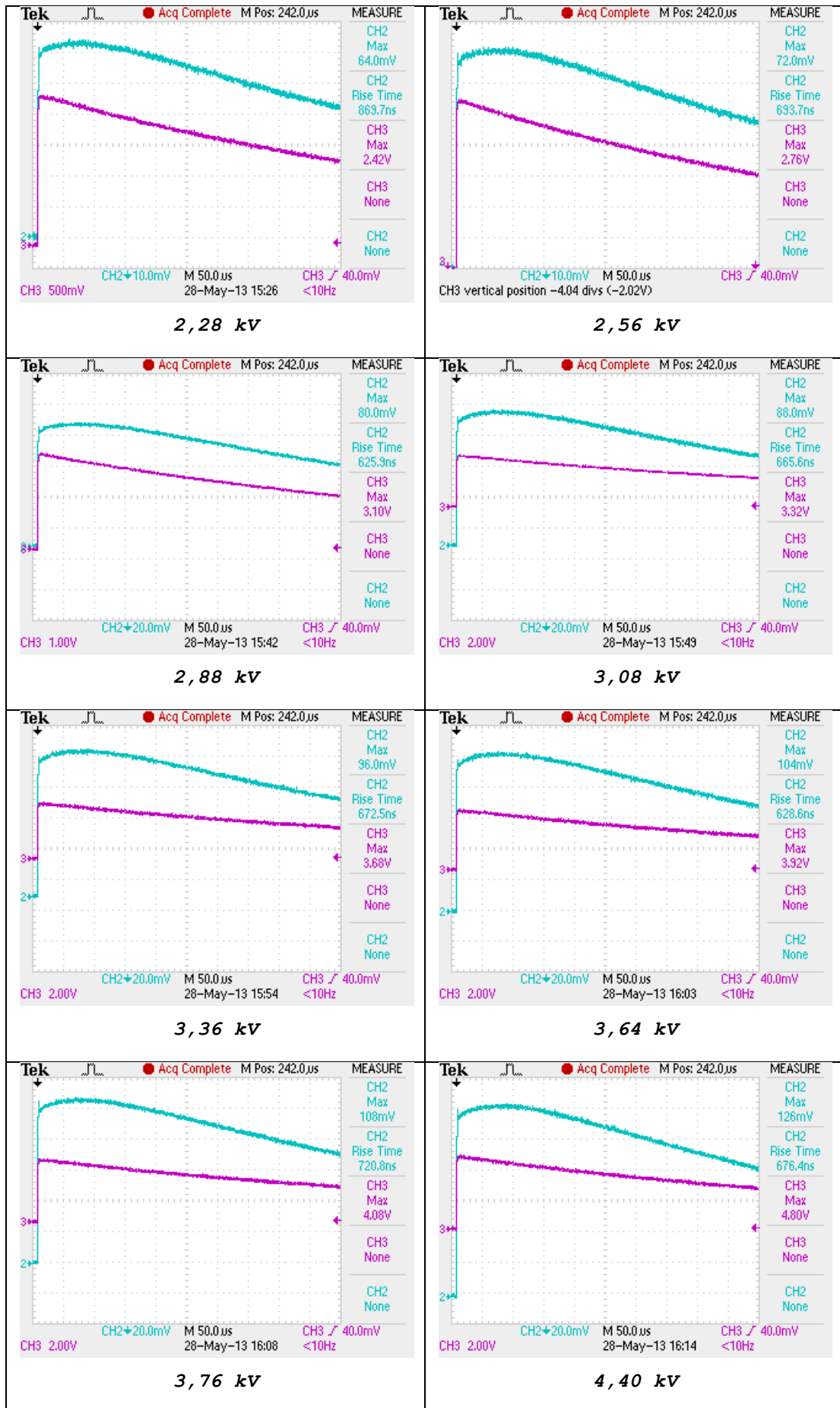
Ακολουθούν τα παλμογραφήματα των μετρήσεων μας. Για πρακτικούς λόγους, παρουσιάζουμε το παλμογράφημα μίας μόνο εκ των 5 επαναλήψεων που πραγματοποιήθηκαν για κάθε τάση φόρτισης. Έχουμε καταγράψει μέσω του παλμογράφου και των ομοαξονικών καλωδίων, τις κυματομορφές του κρουστικού ρεύματος (CH2) και της κρουστικής τάσης (CH3). Οι πίνακες έχουν ταξινομηθεί με βάση το ηλεκτρόδιο και την αγωγιμότητα κάθε μέτρησης, ενώ αναγράφονται και οι συνθήκες περιβάλλοντος. Επίσης, κάτω από κάθε παλμογράφημα αναγράφεται η εκάστοτε τάση φόρτισης της γεννήτριας.

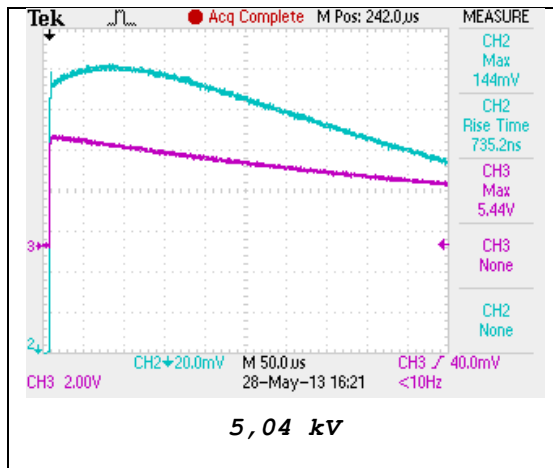
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
30cm x 3cm	0,80 mS/cm	22,0 °C	39,0%	988,0 mbar



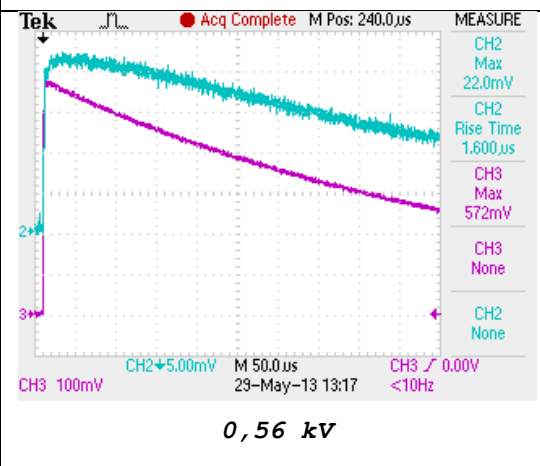
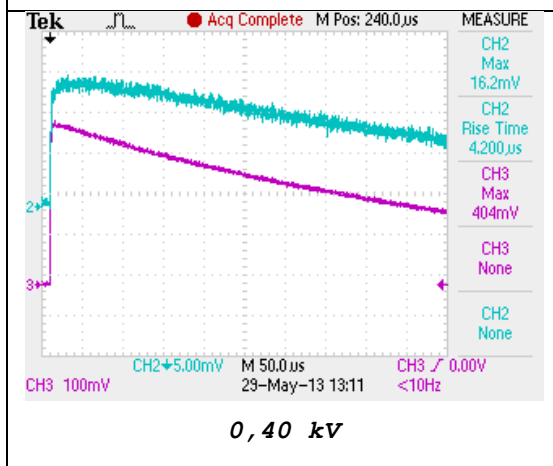
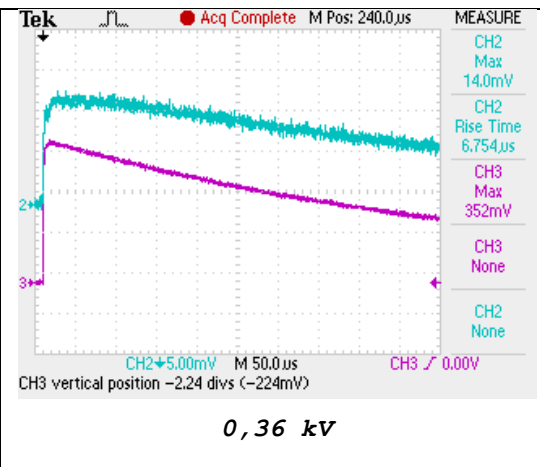
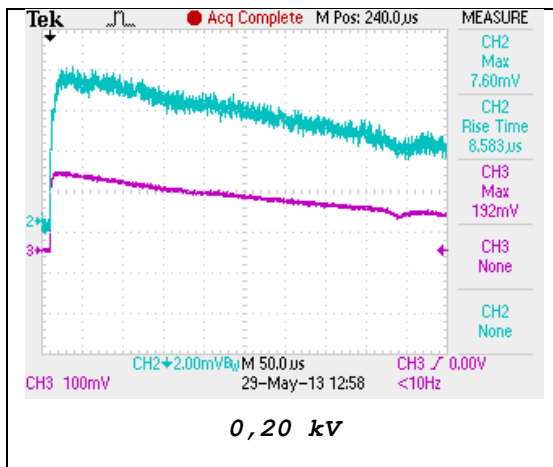


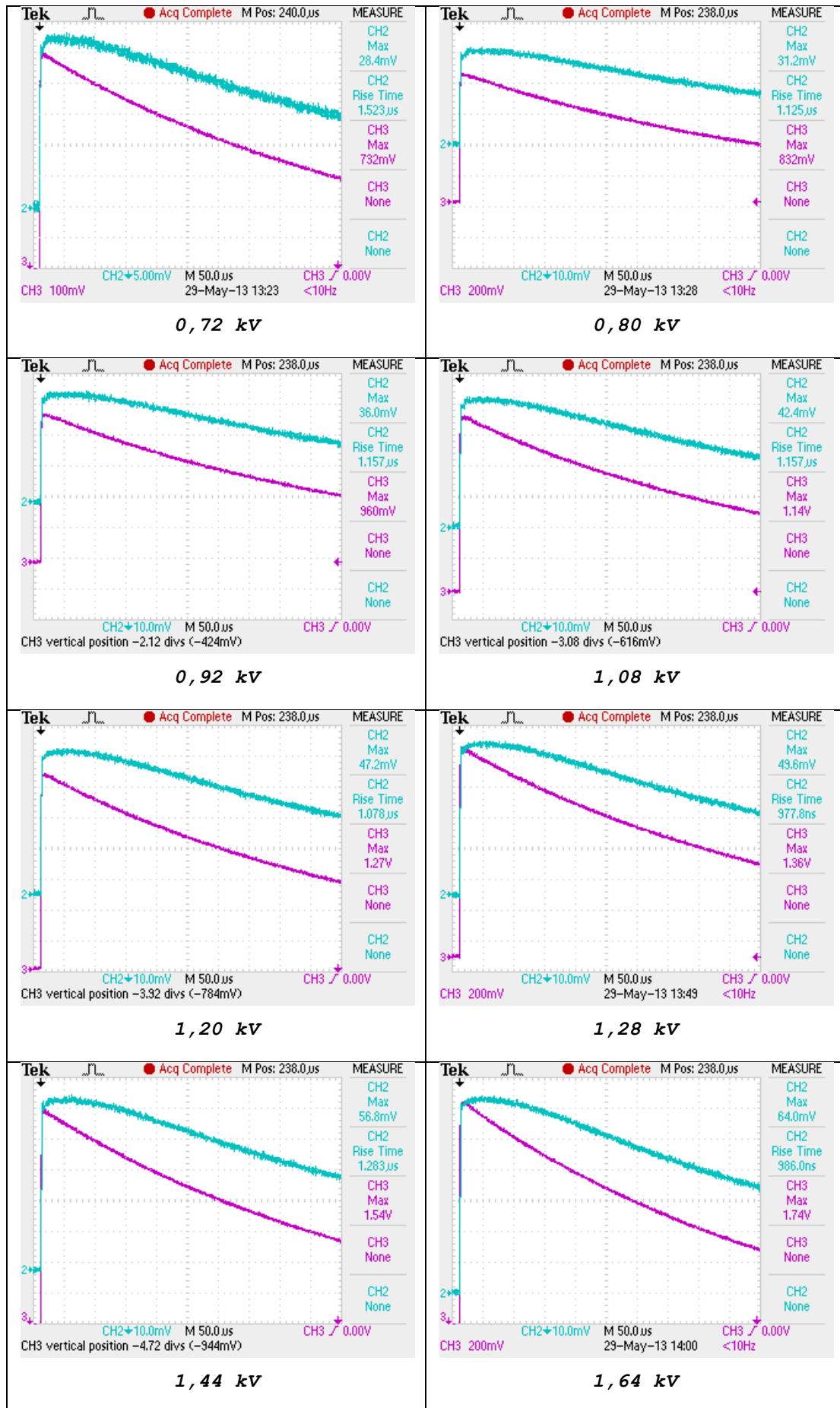


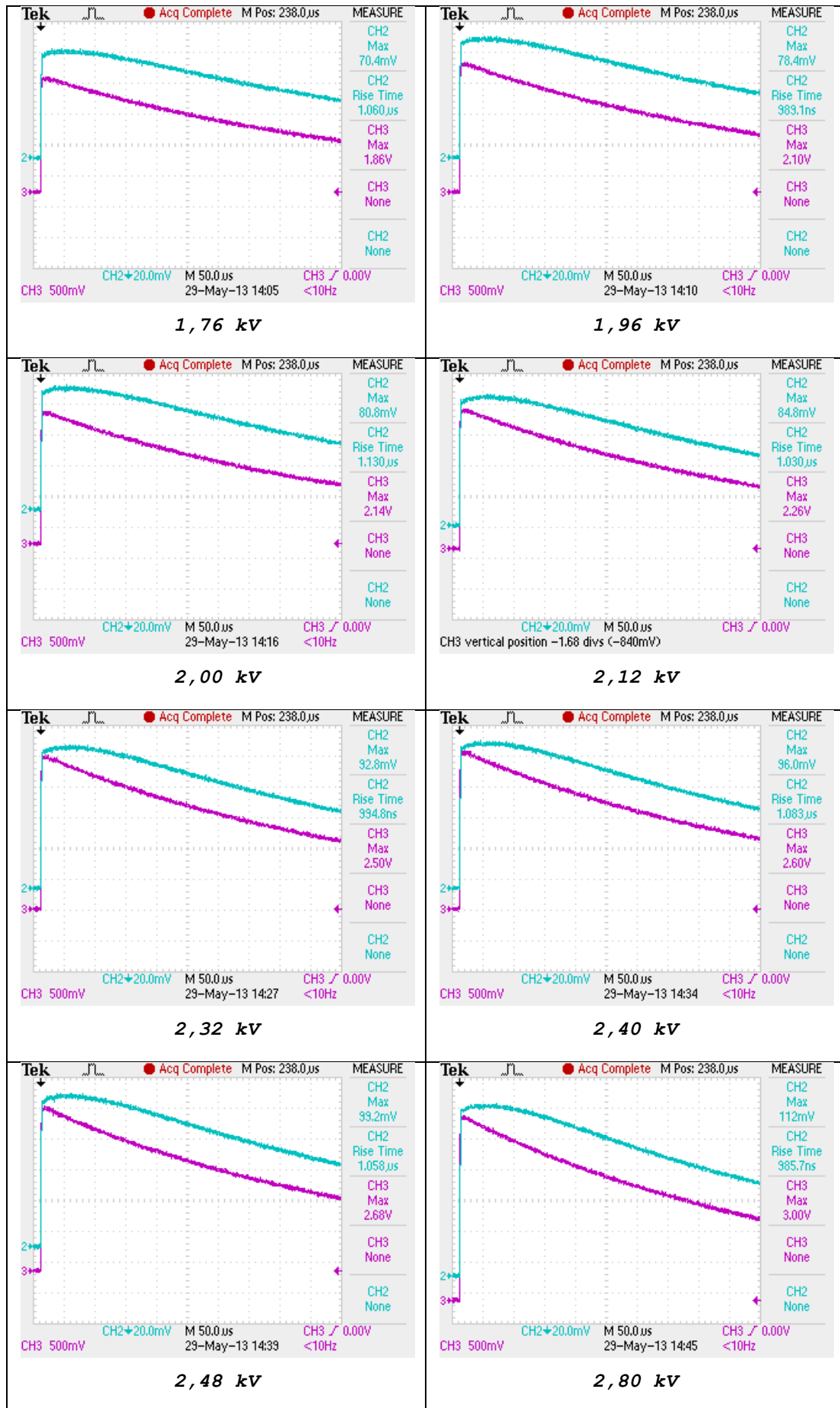


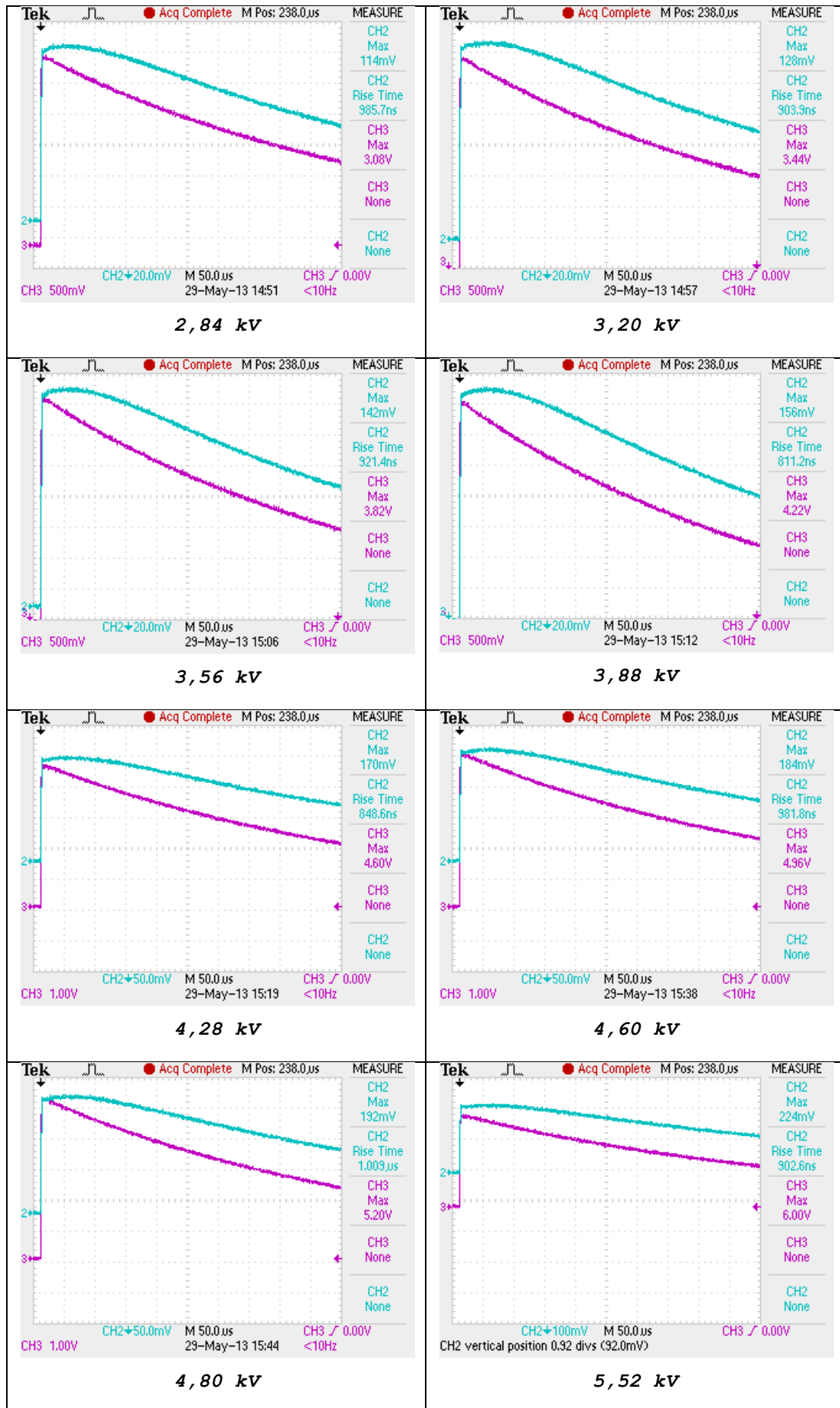


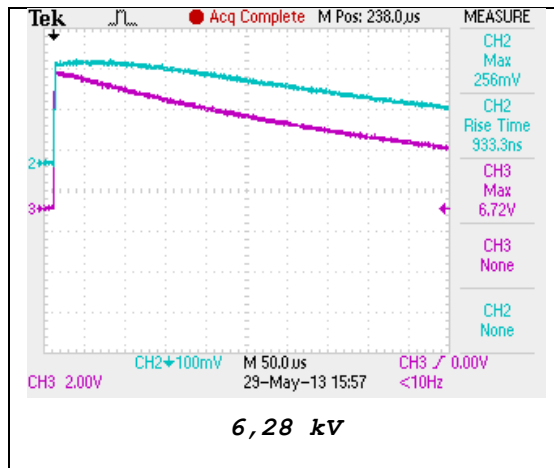
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
40cm x 4cm	0,81 mS/cm	22,5 °C	42,5%	977,3 mbar



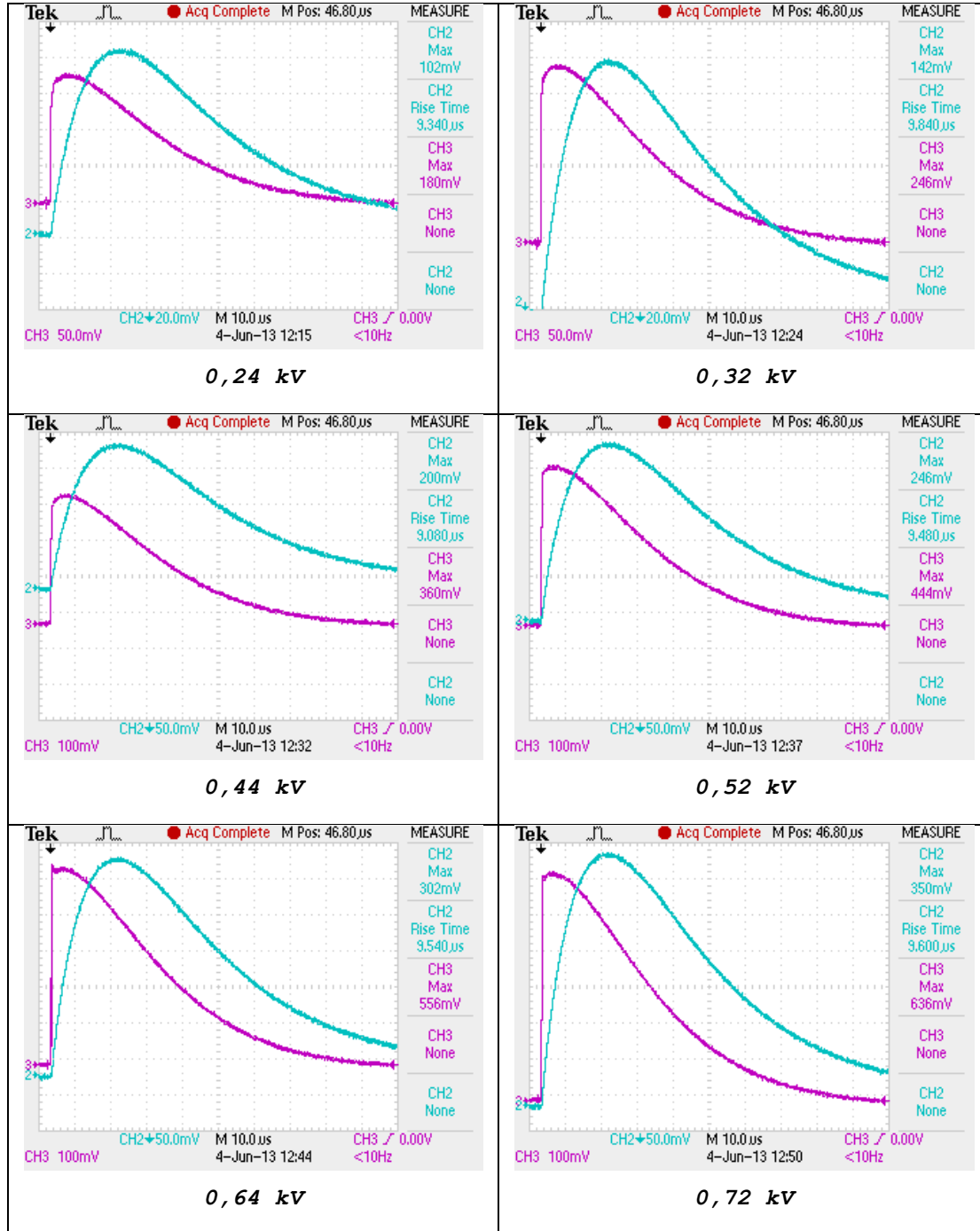


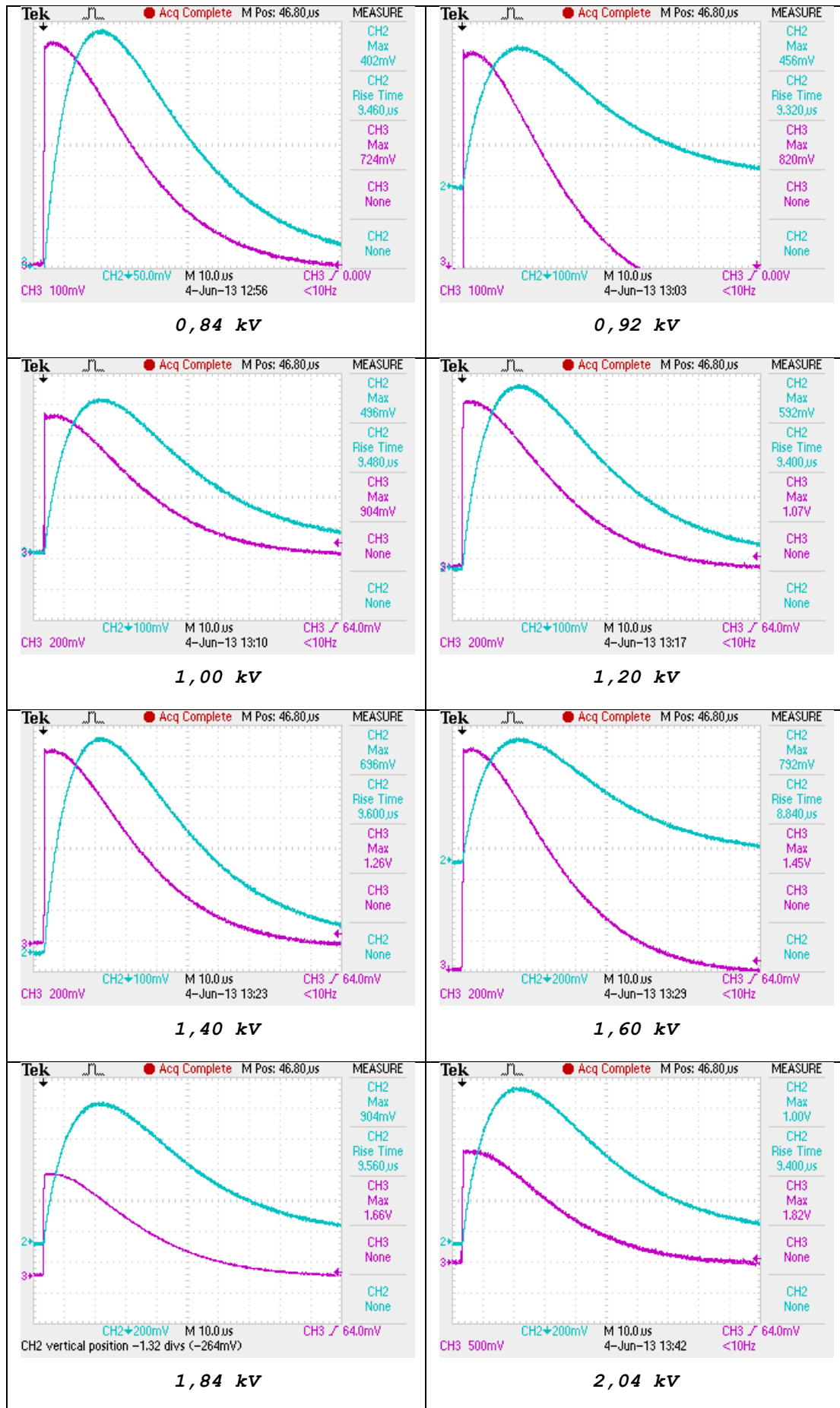




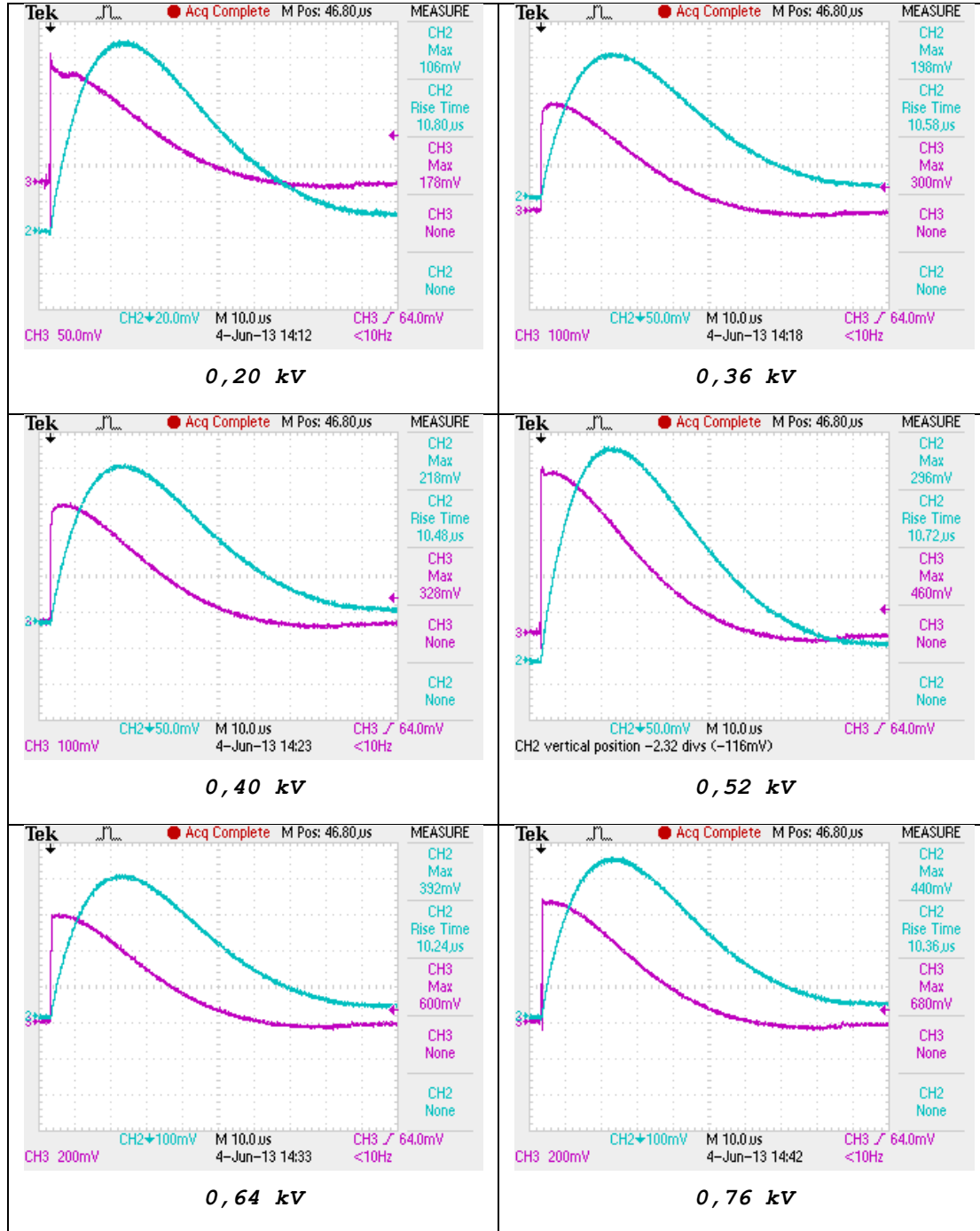


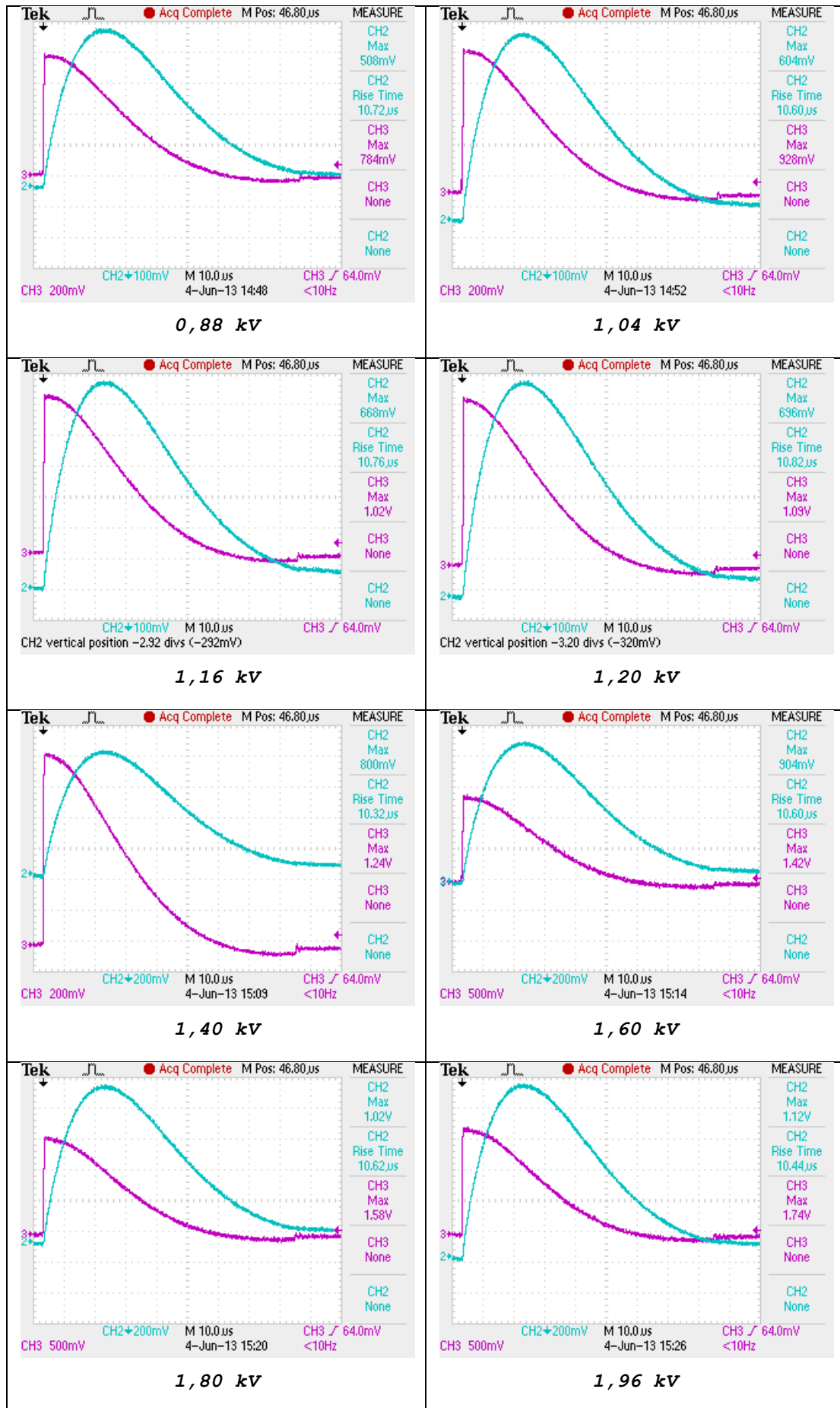
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
20cm x 2cm	41,2 mS/cm	21,6 °C	44,0%	985,8 mbar

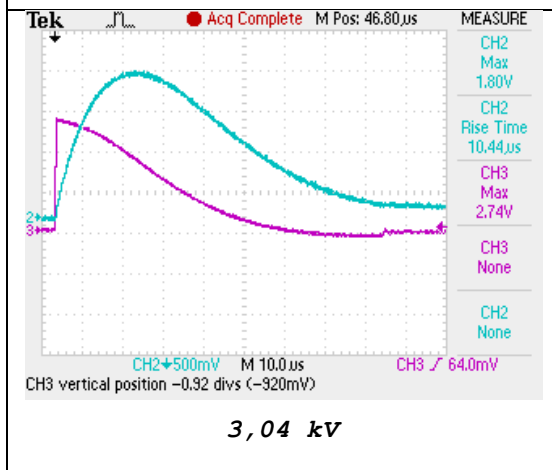
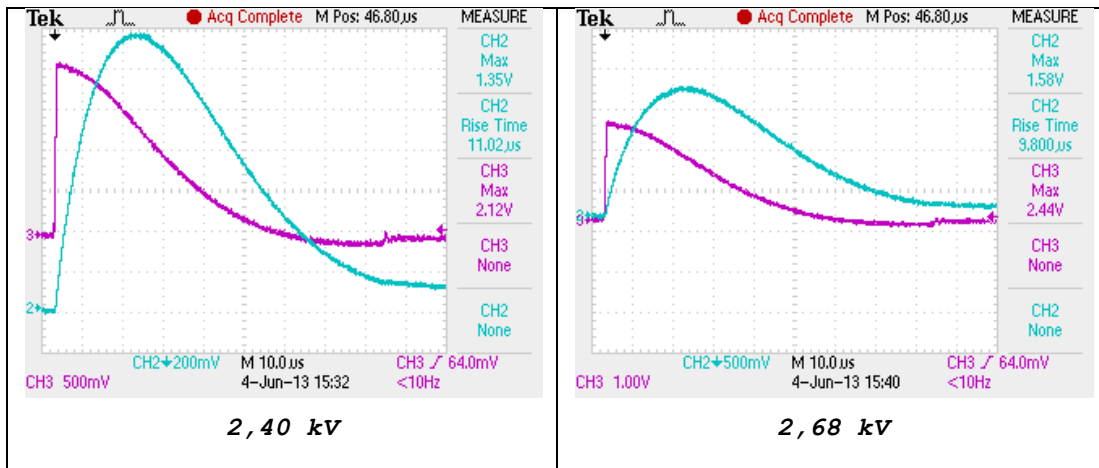




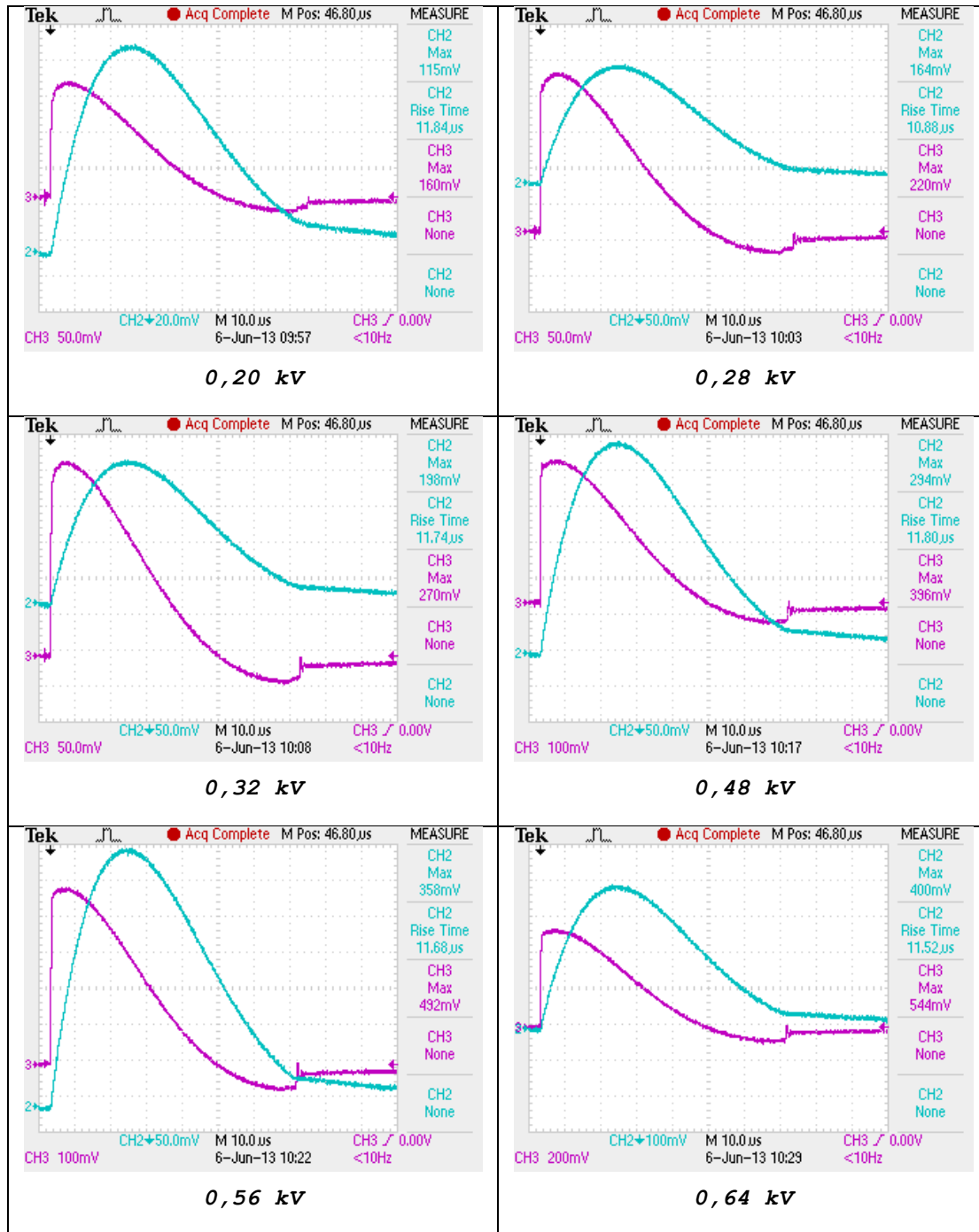
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
30cm x 3cm	41,2 mS/cm	21,6 °C	44,0%	985,8 mbar

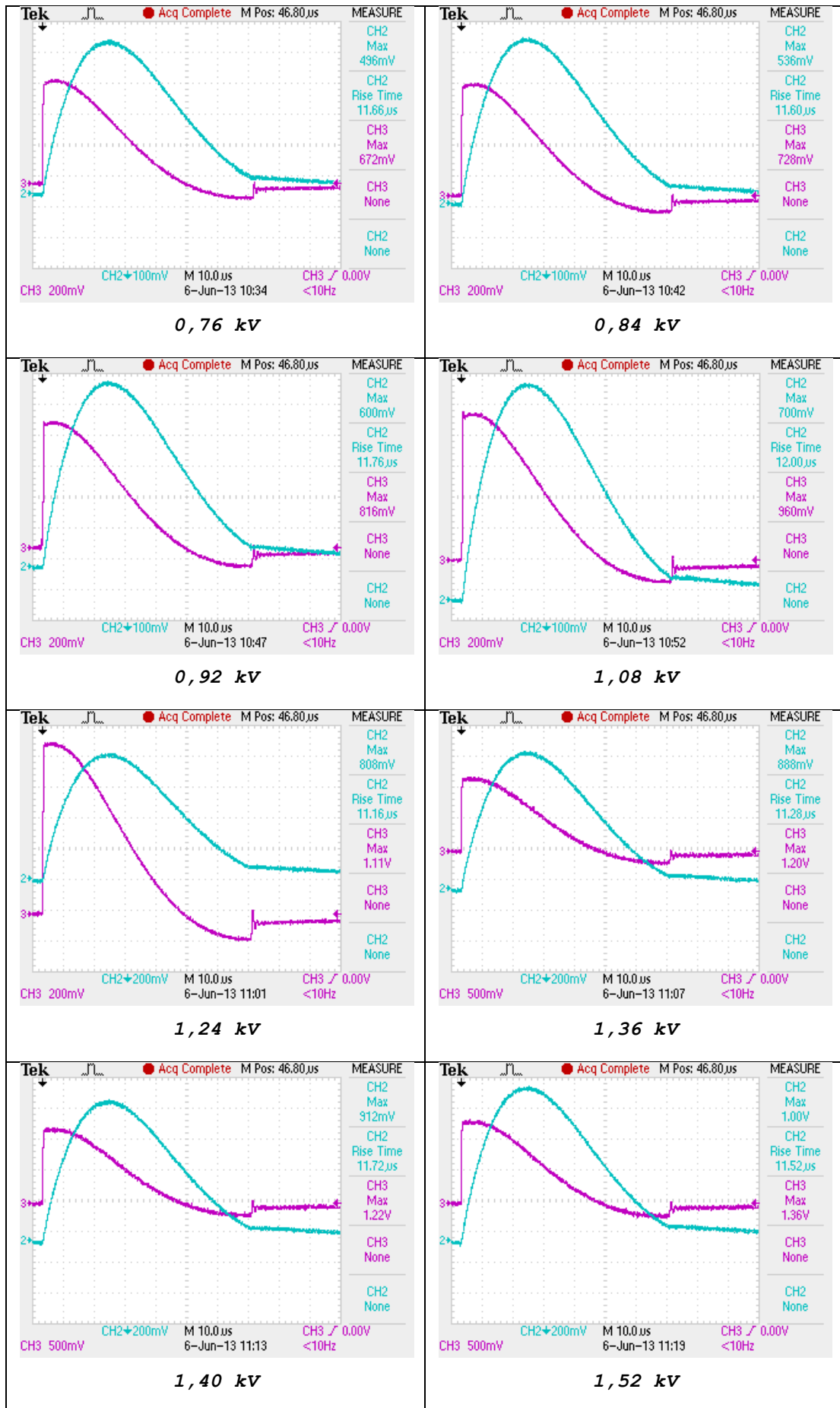


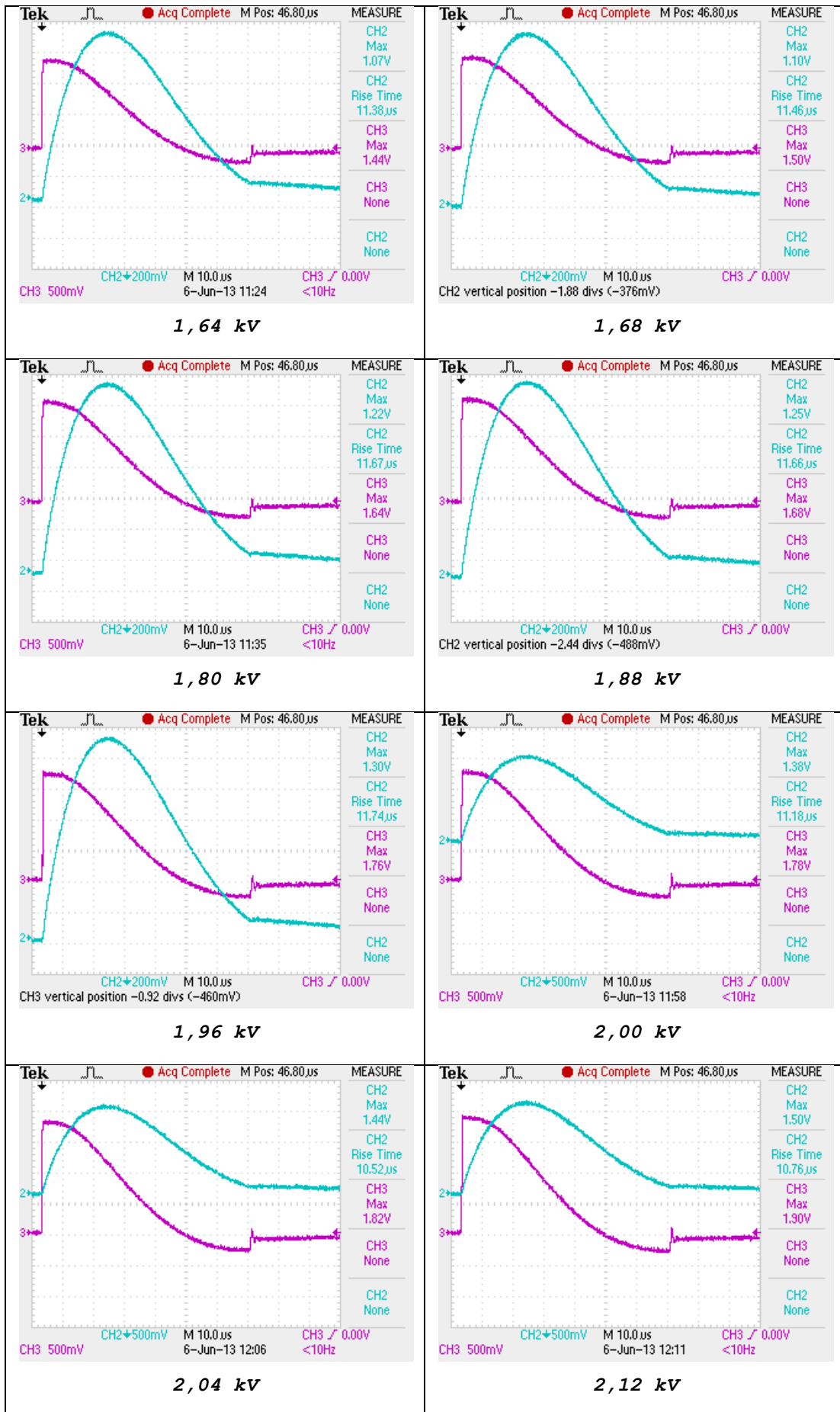


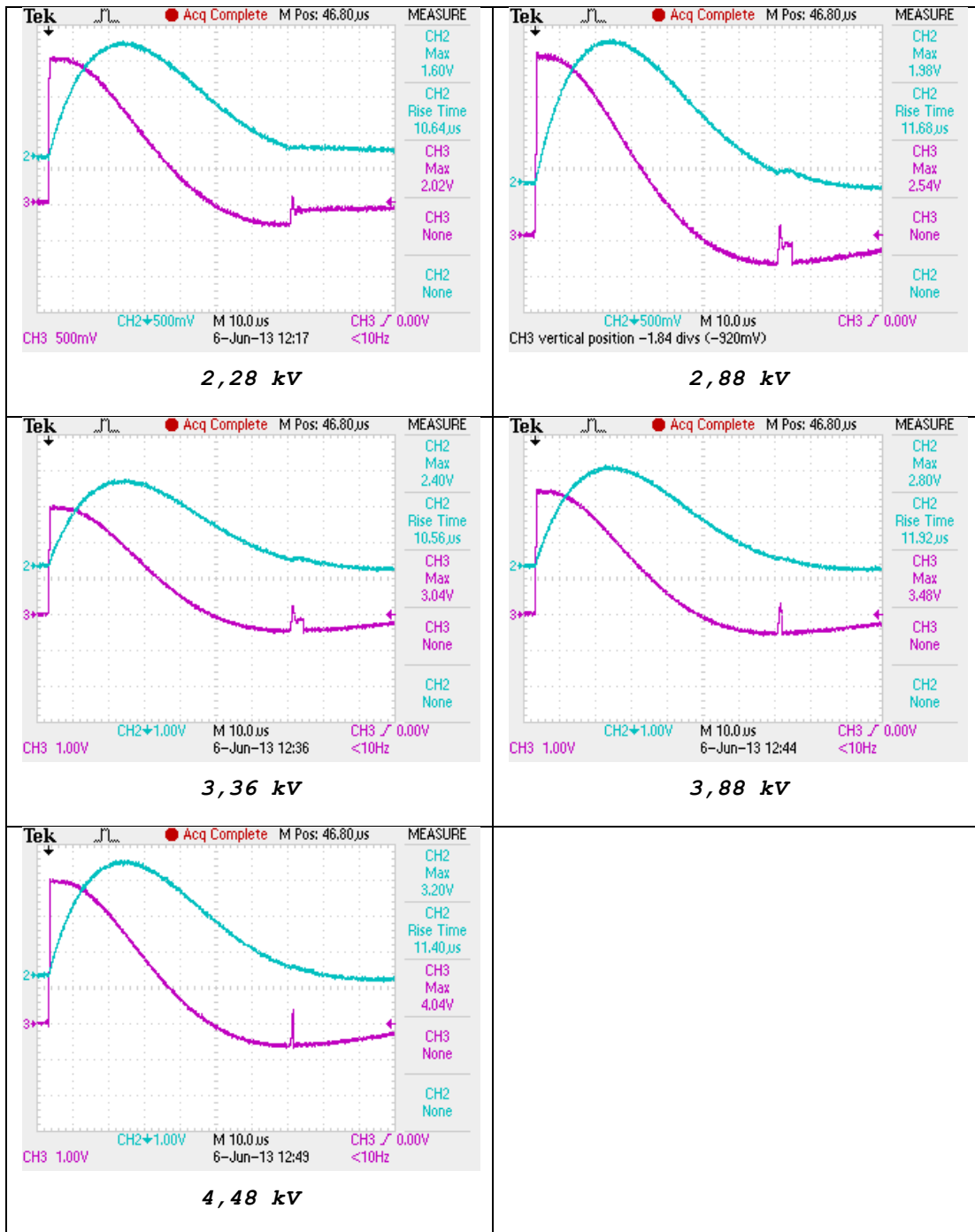


Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
40cm x 4cm	41,5 mS/cm	22,7 °C	43,7%	989,5 mbar

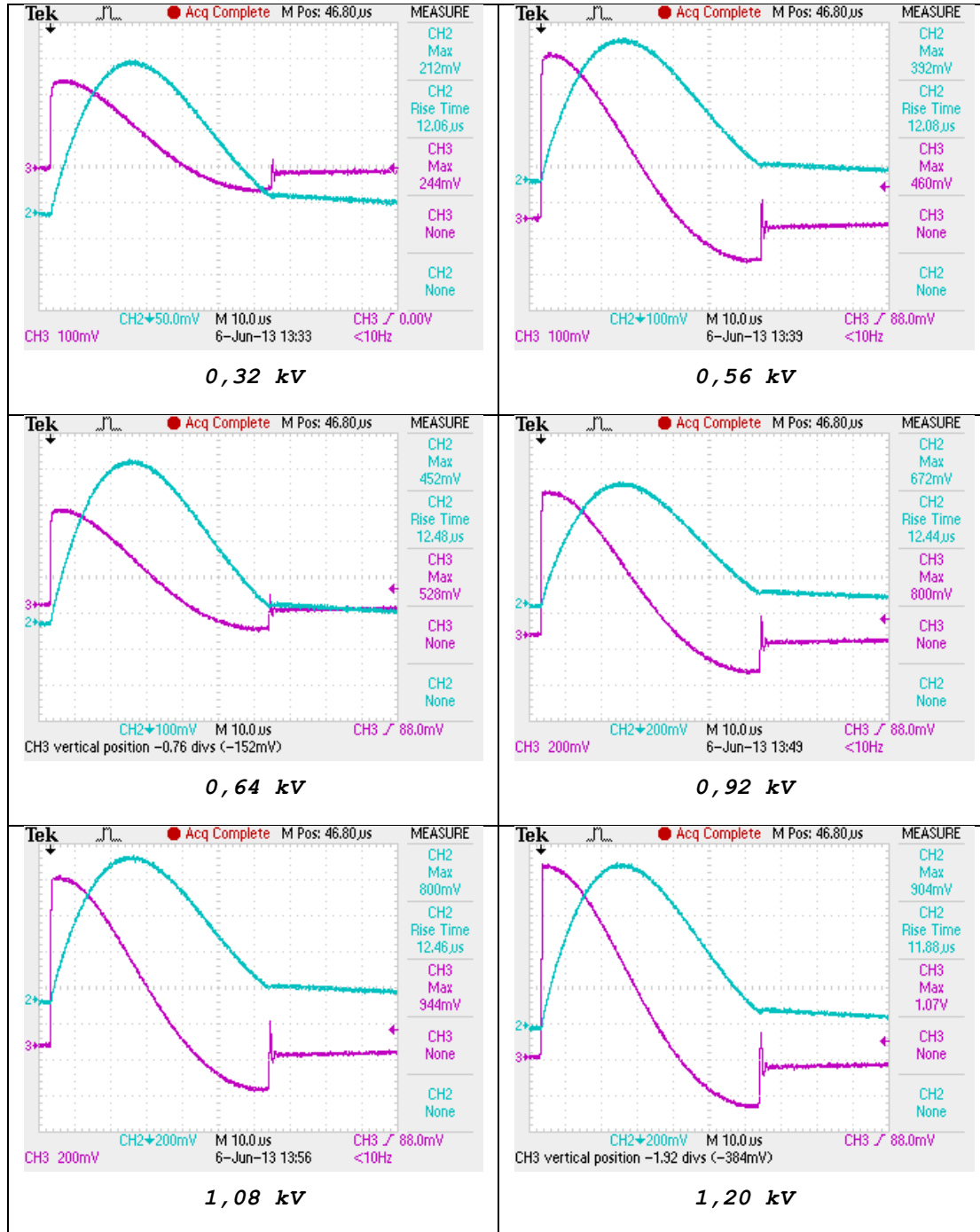


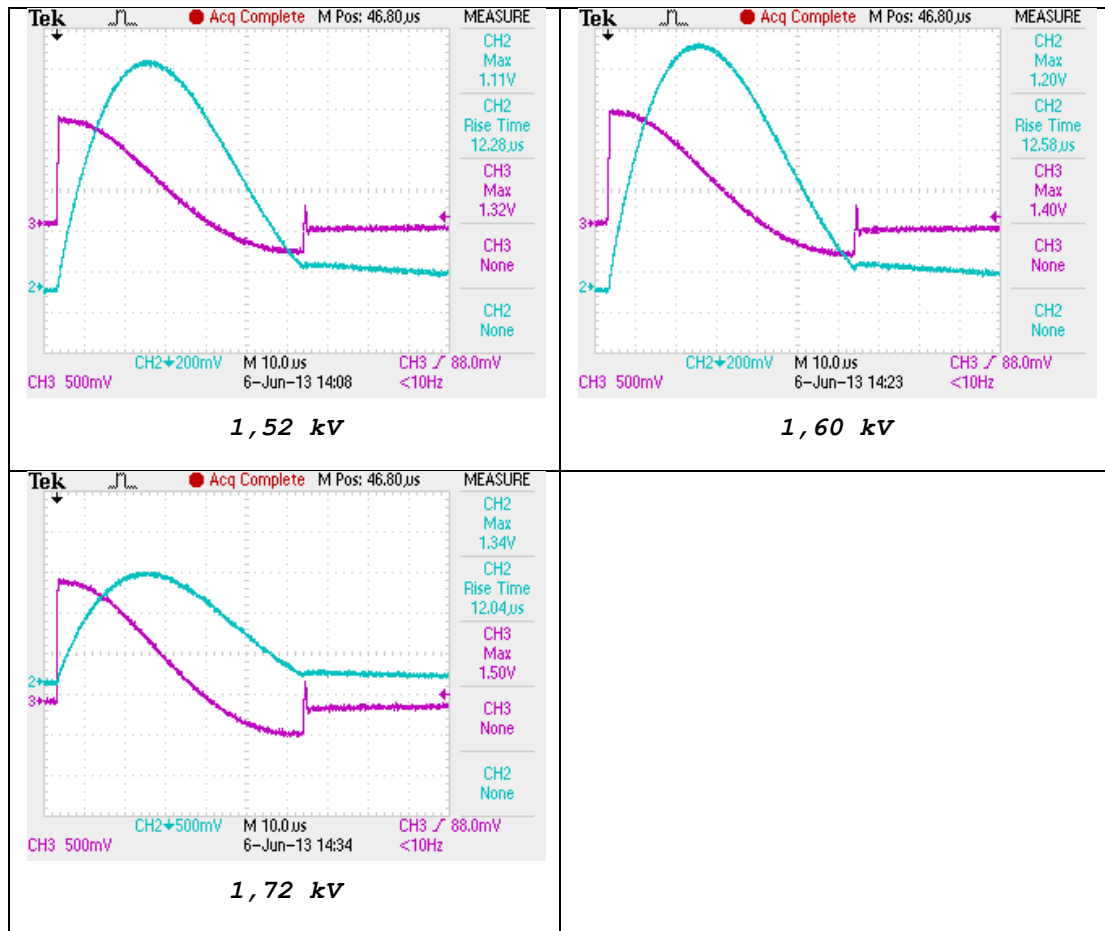






Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
60cm x 6cm	41,5 mS/cm	22,7 °C	43,7%	989,5 mbar

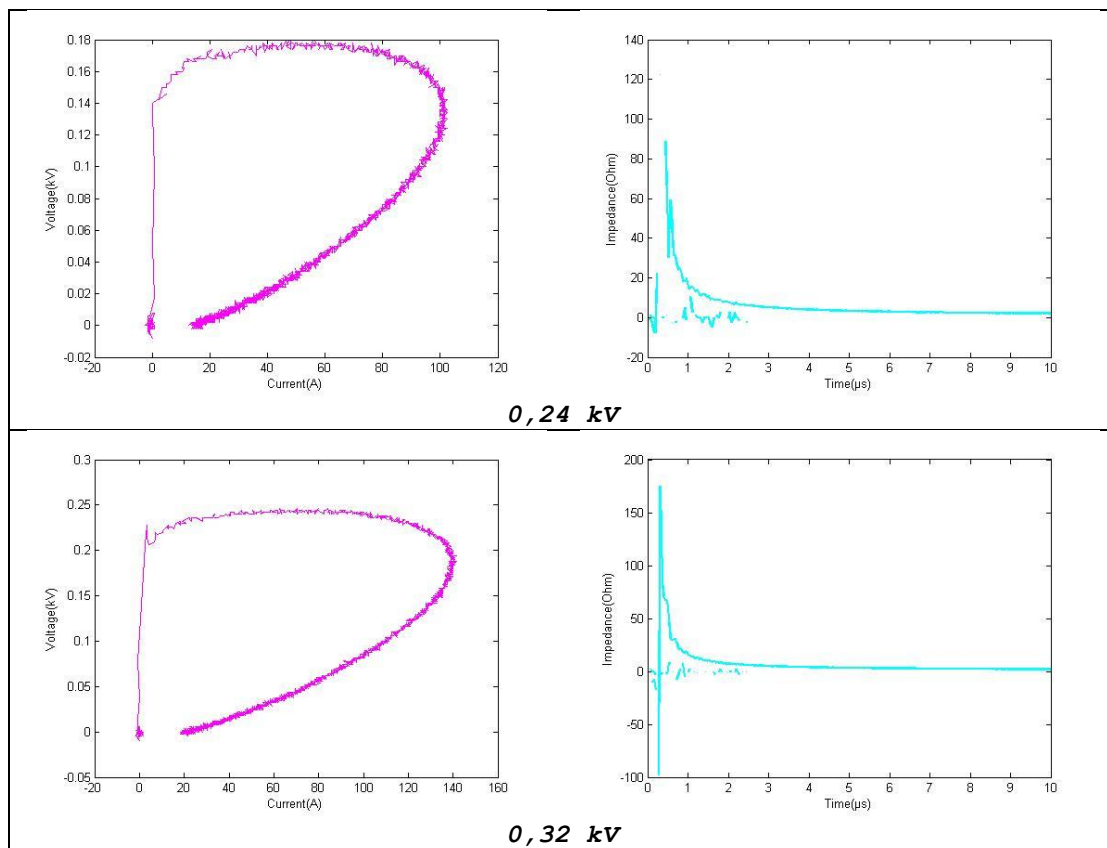


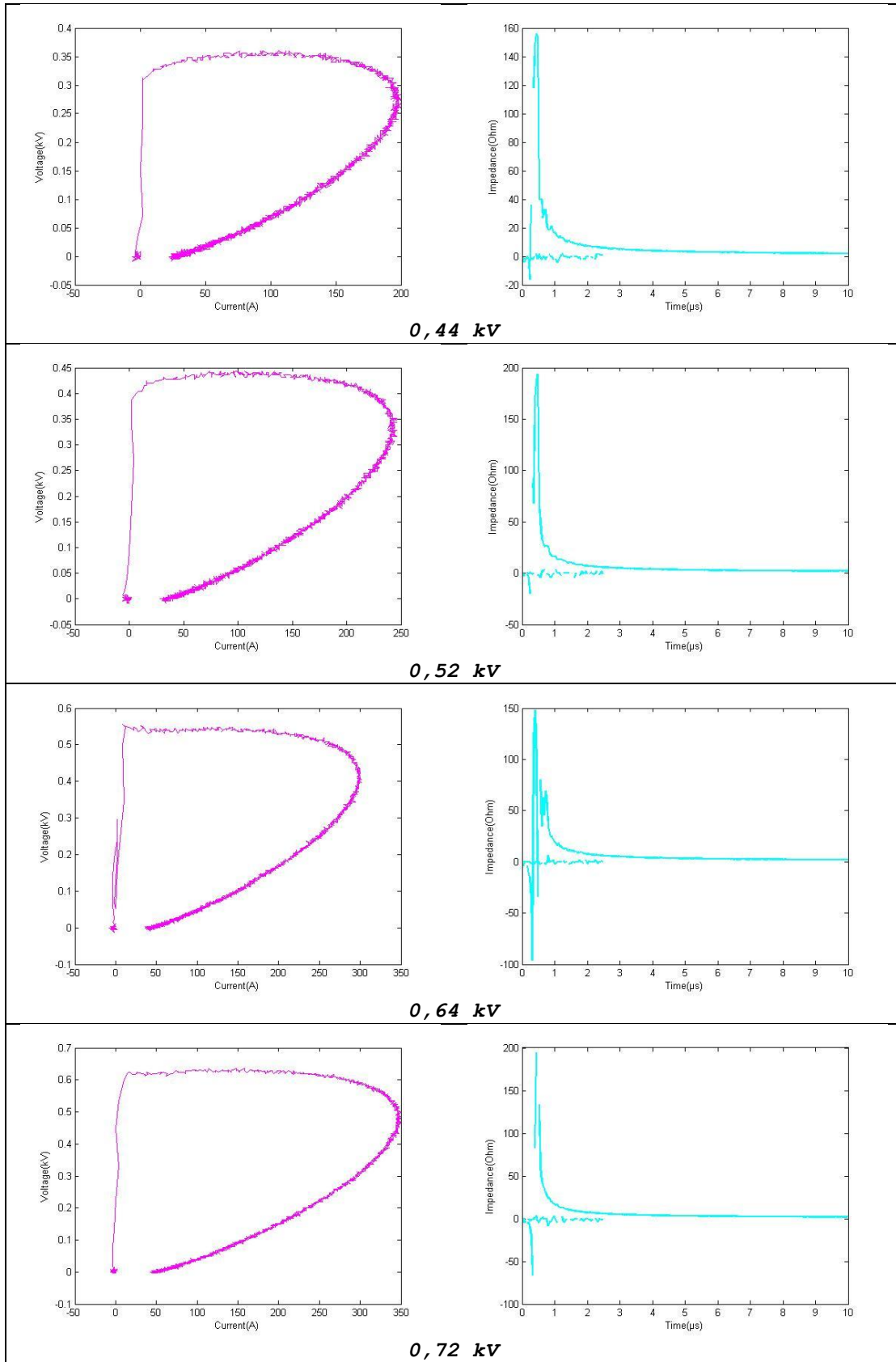


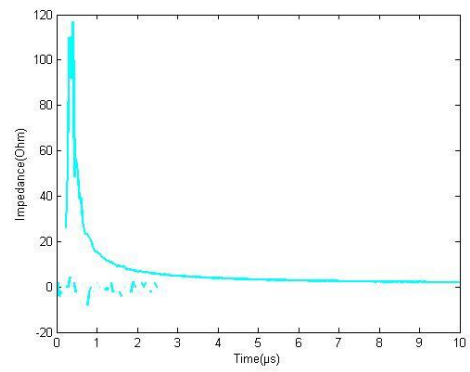
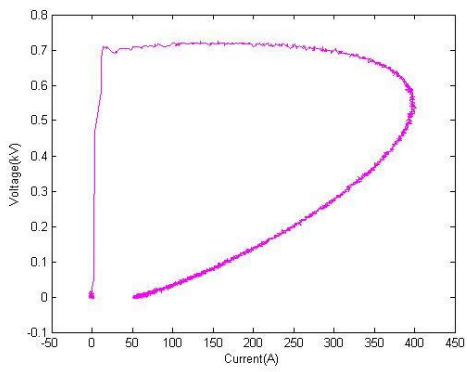
ΚΑΜΠΥΛΕΣ V-I & Z(t)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες V-I και Z(t), για την αγωγιμότητα $\sigma=4 \text{ S/m}$. Για πρακτικούς λόγους, παρουσιάζονται οι καμπύλες V-I και Z(t) μίας μόνο εκ των 5 επαναλήψεων που πραγματοποιήθηκαν για κάθε τάση φόρτισης. Οι πίνακες έχουν ταξινομηθεί με βάση το ηλεκτρόδιο και την αγωγιμότητα κάθε μέτρησης, ενώ αναγράφονται και οι συνθήκες περιβάλλοντος. Κάθε πίνακας περιλαμβάνει στην πρώτη στήλη τη καμπύλη V-I και στη δεύτερη στήλη τη καμπύλη Z(t). Επίσης, κάτω από κάθε ζεύγος καμπυλών αναγράφεται η εκάστοτε τάση φόρτισης της γεννήτριας.

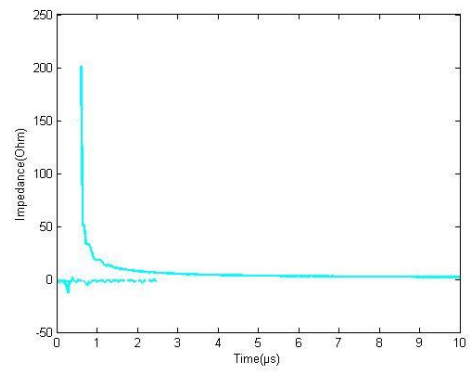
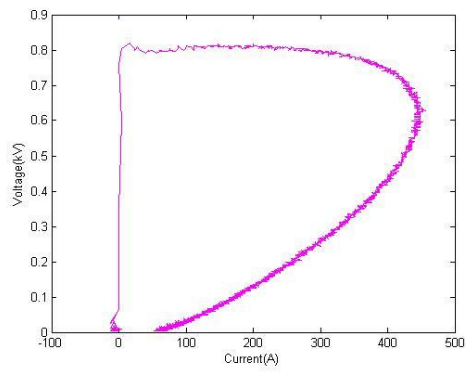
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
20cm x 2cm	41,2 mS/cm	21,6 °C	44,0%	985,8 mbar



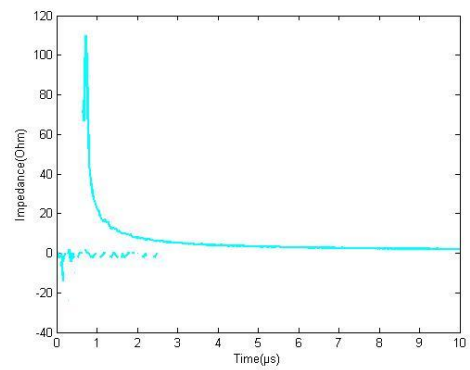
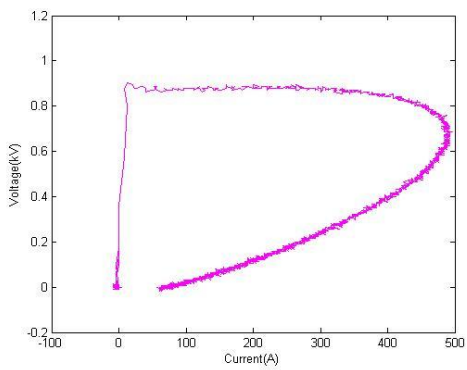




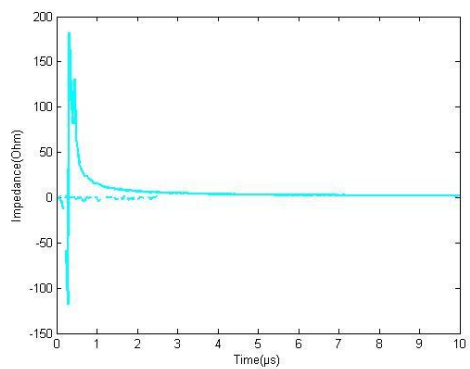
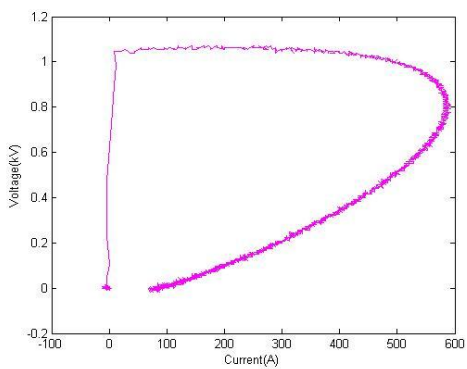
0,84 kV



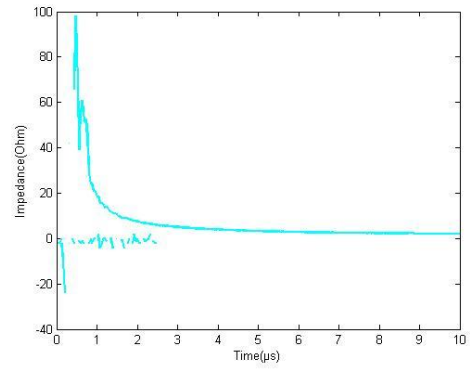
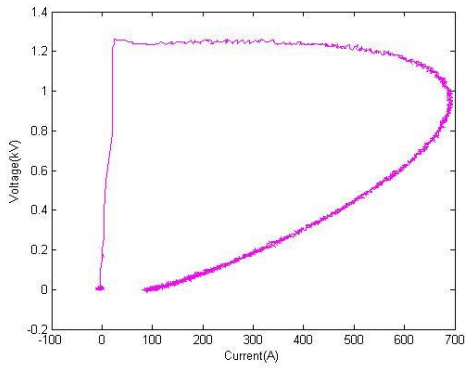
0,92 kV



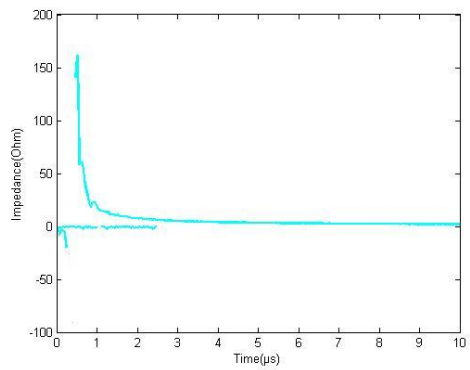
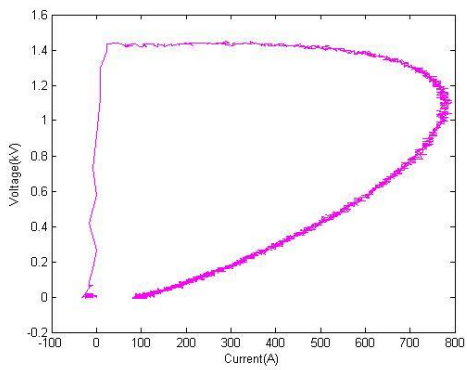
1,00 kV



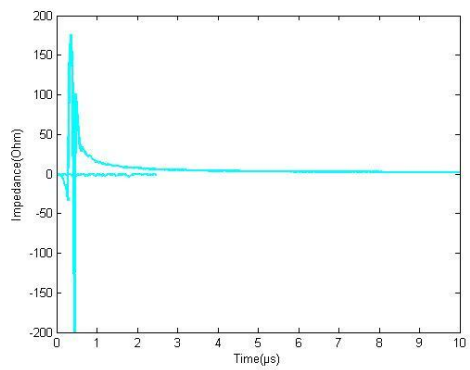
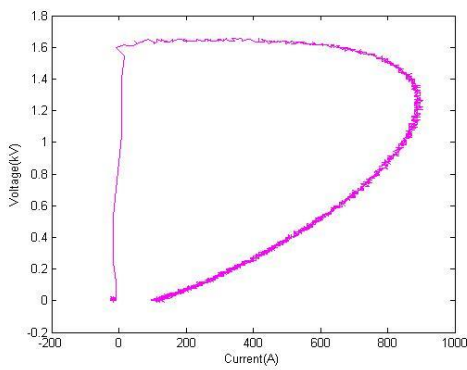
1,20 kV



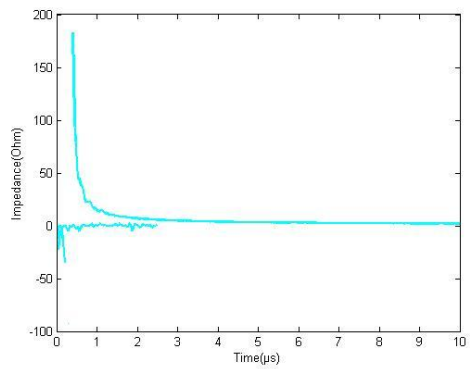
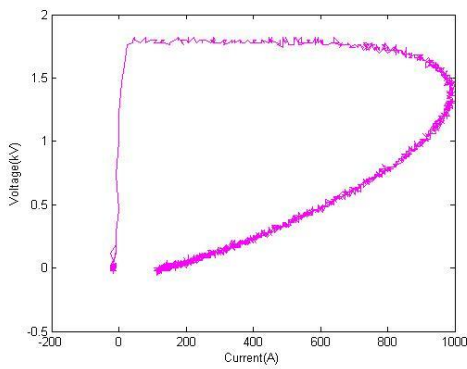
1,40 kV



1,60 kV

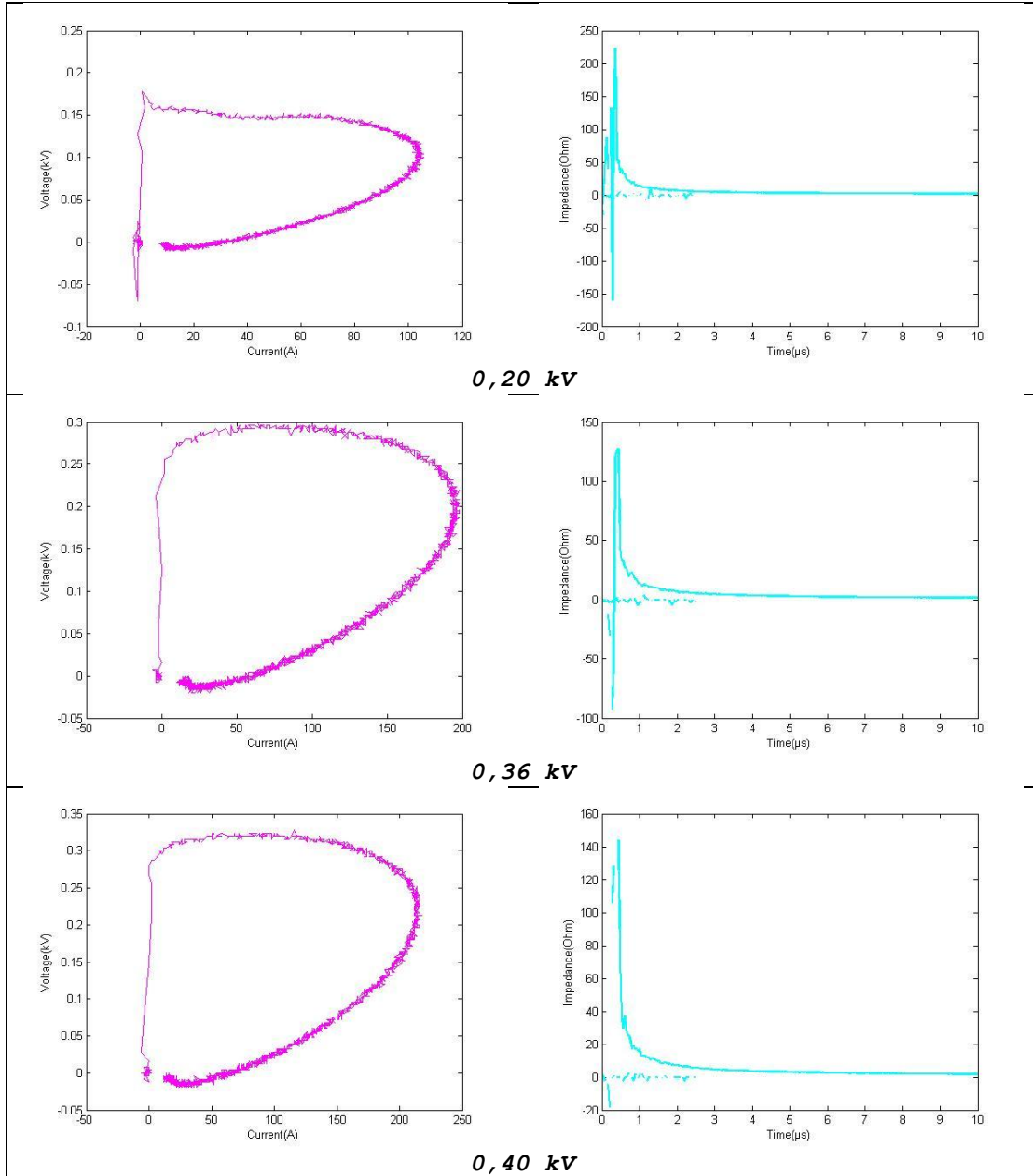


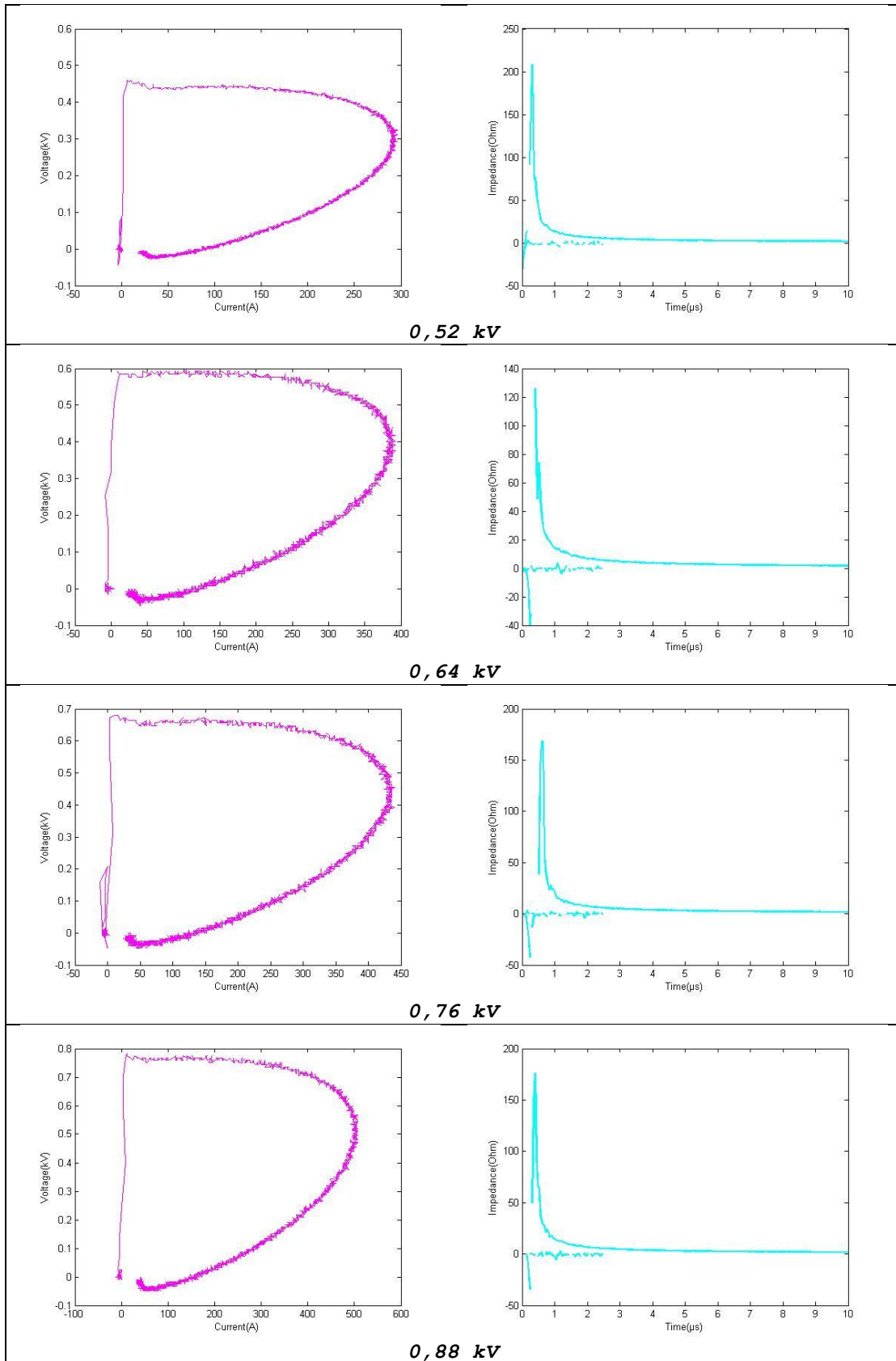
1,84 kV

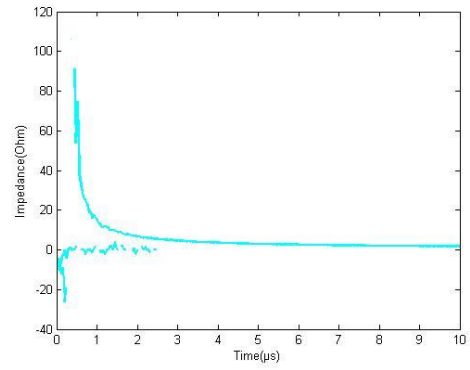
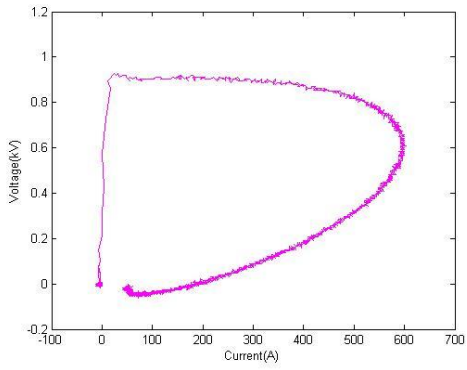


2,04 kV

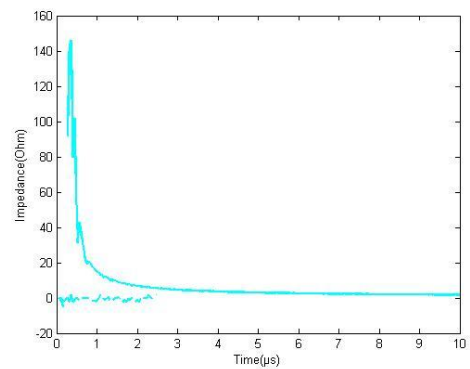
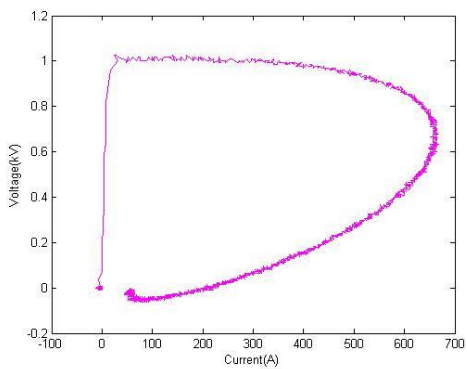
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
30cm x 3cm	41,2 mS/cm	21,6 °C	44,0%	985,8 mbar



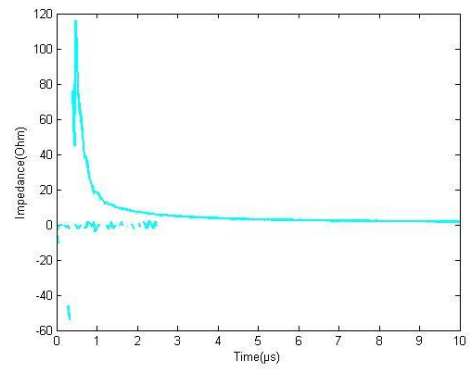
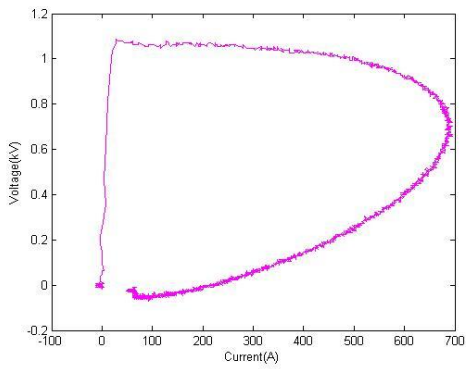




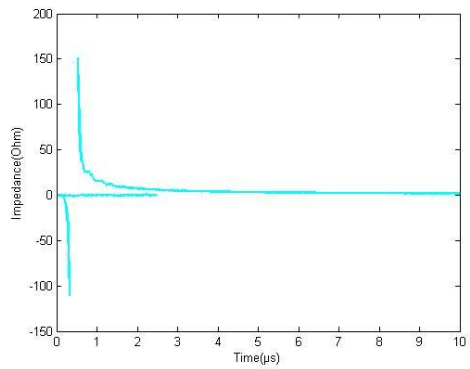
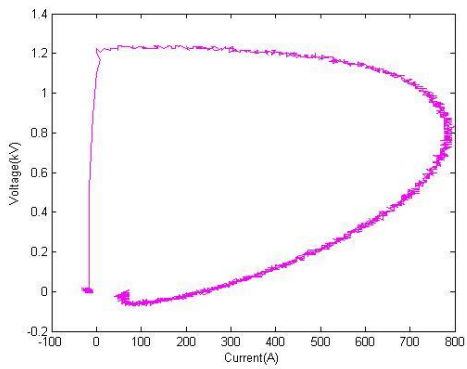
1,04 kV



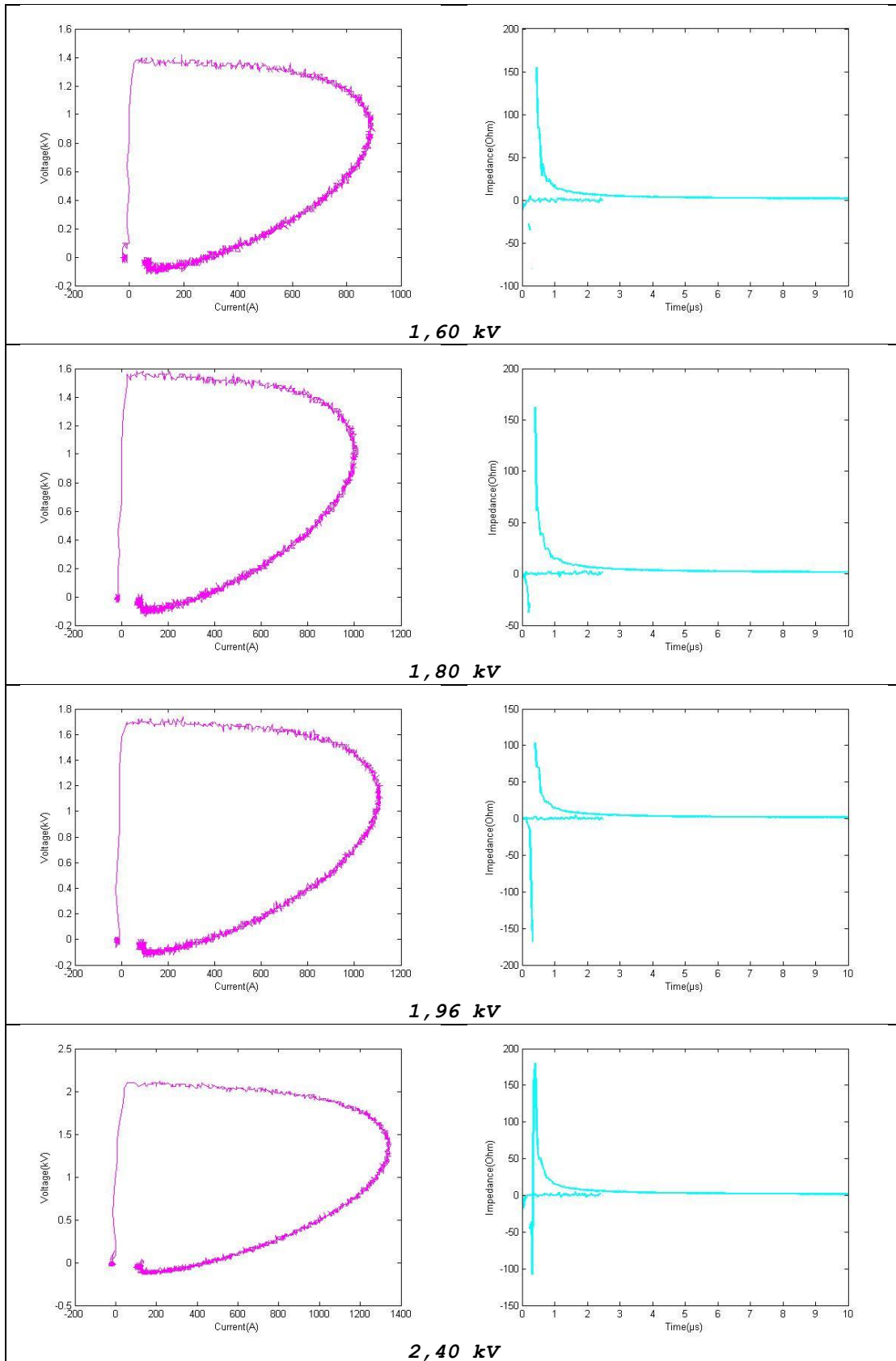
1,16 kV

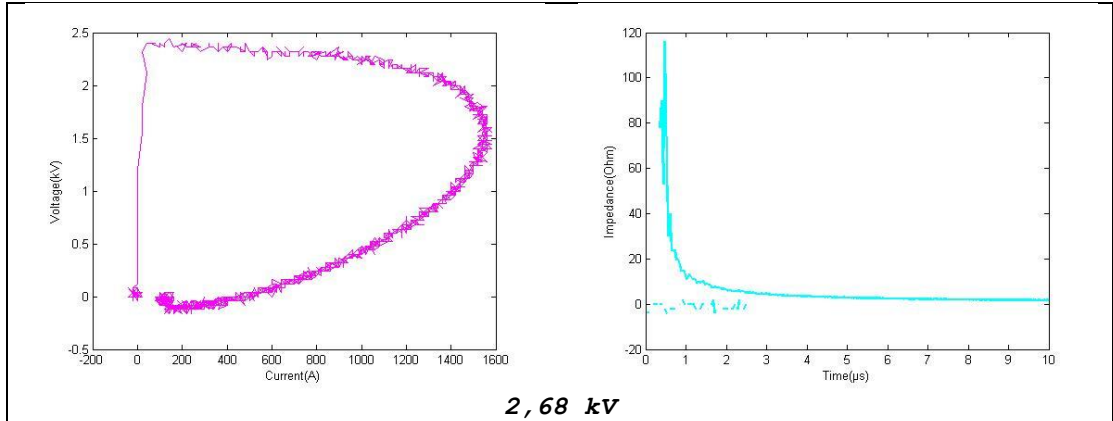


1,20 kV

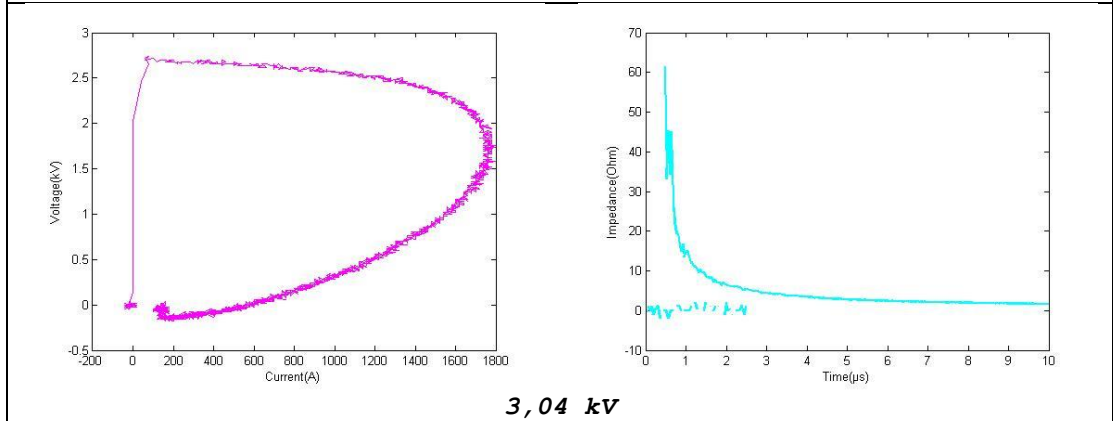


1,40 kV



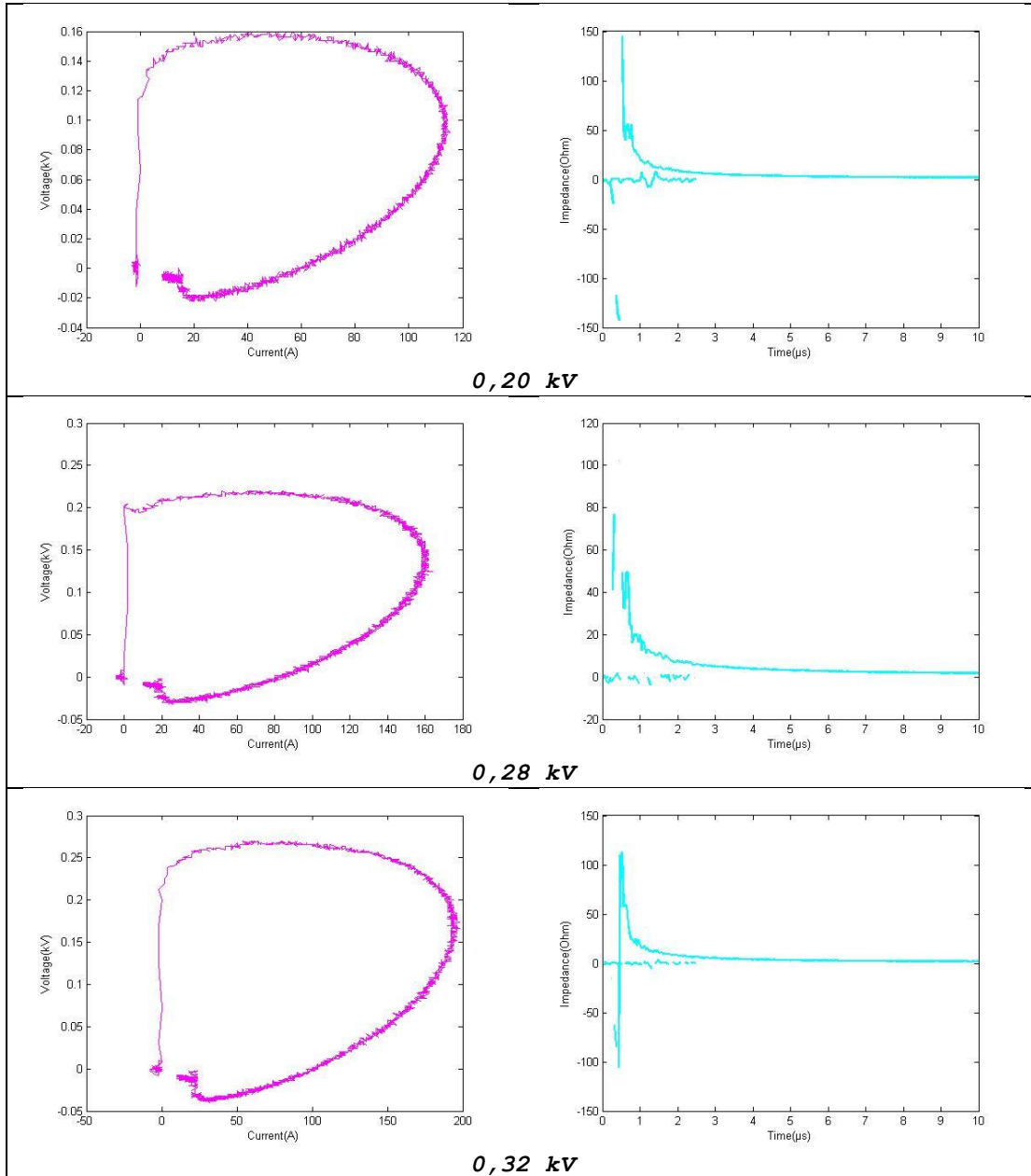


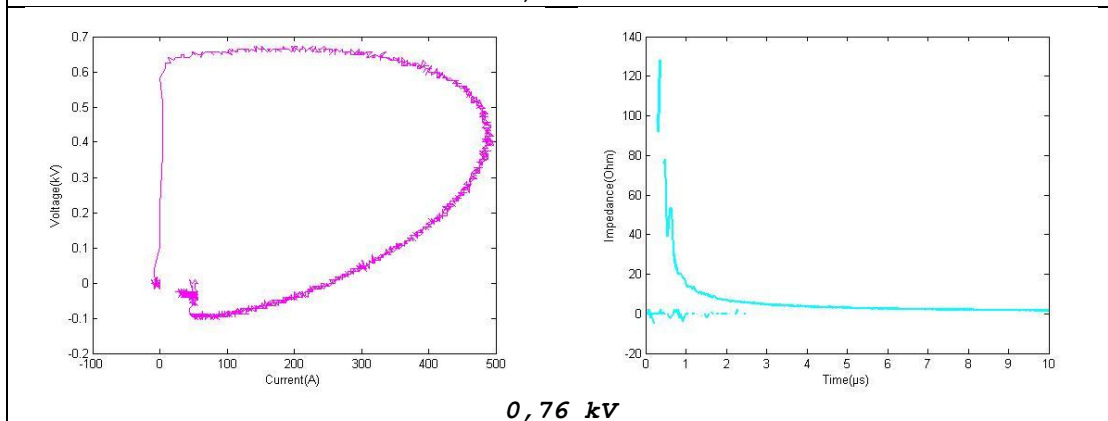
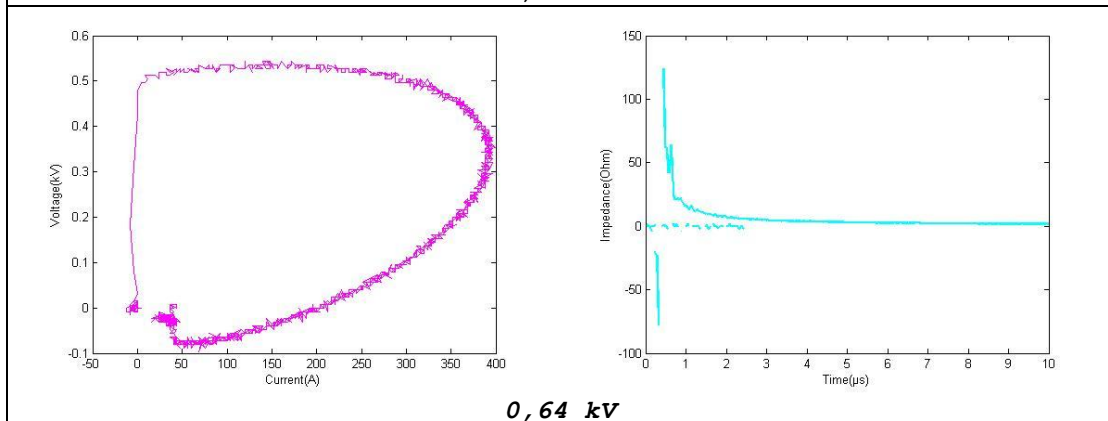
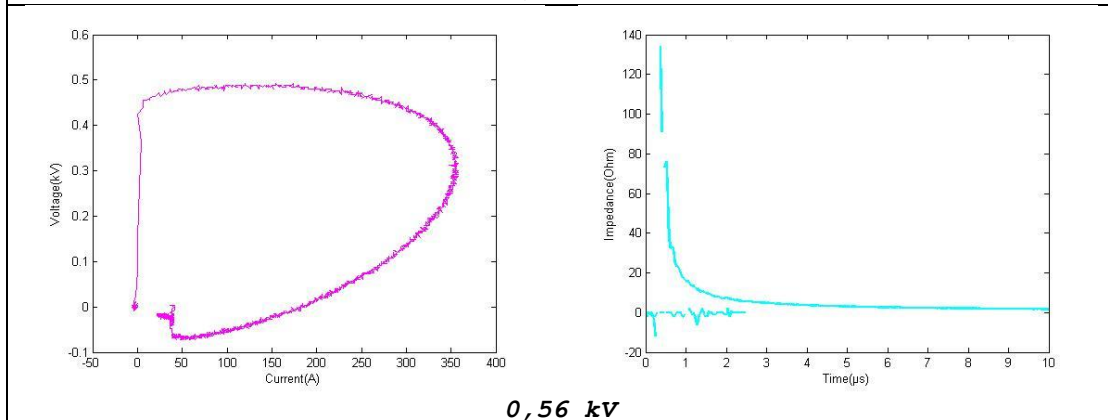
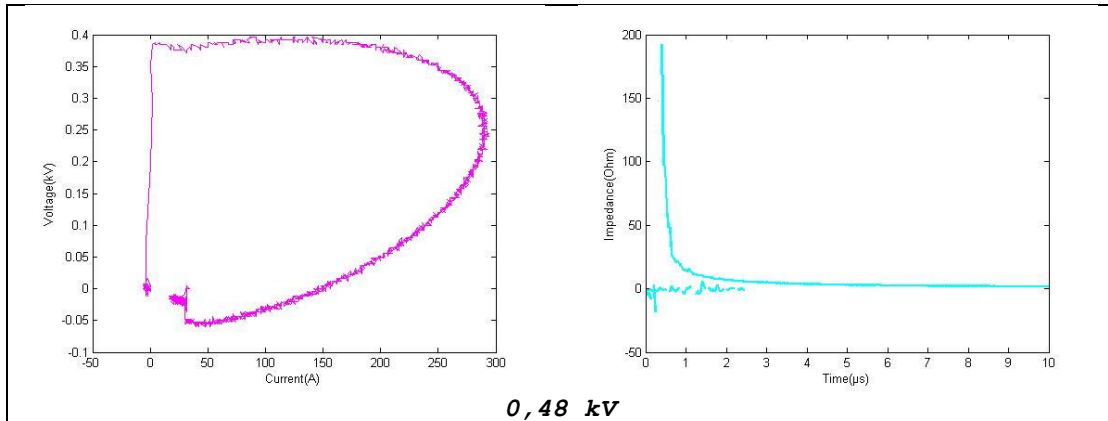
2,68 kV

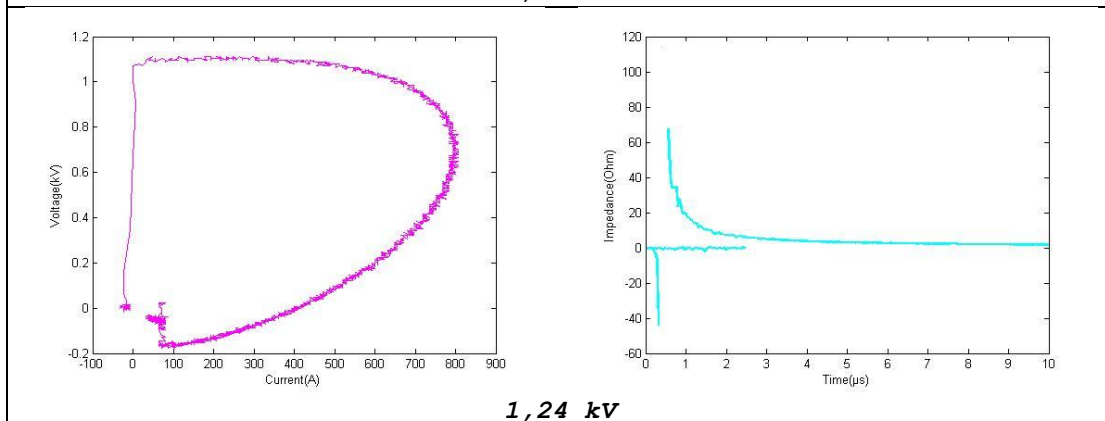
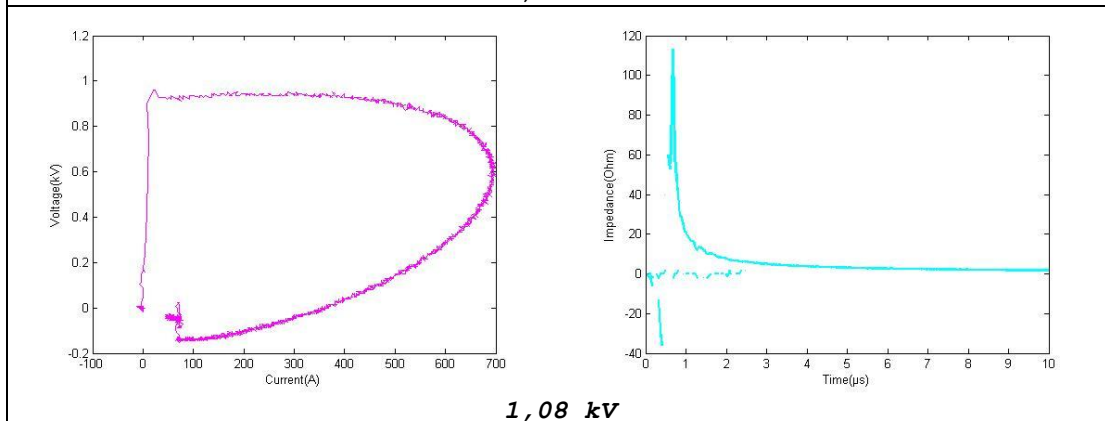
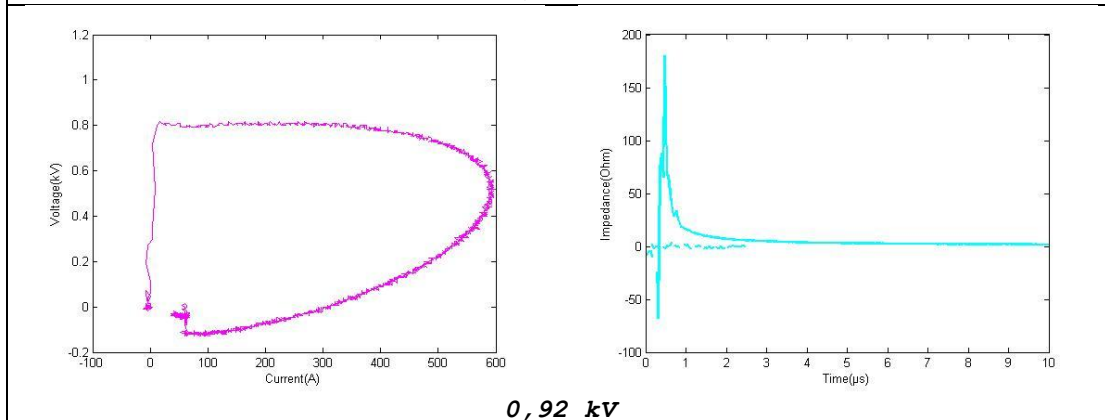
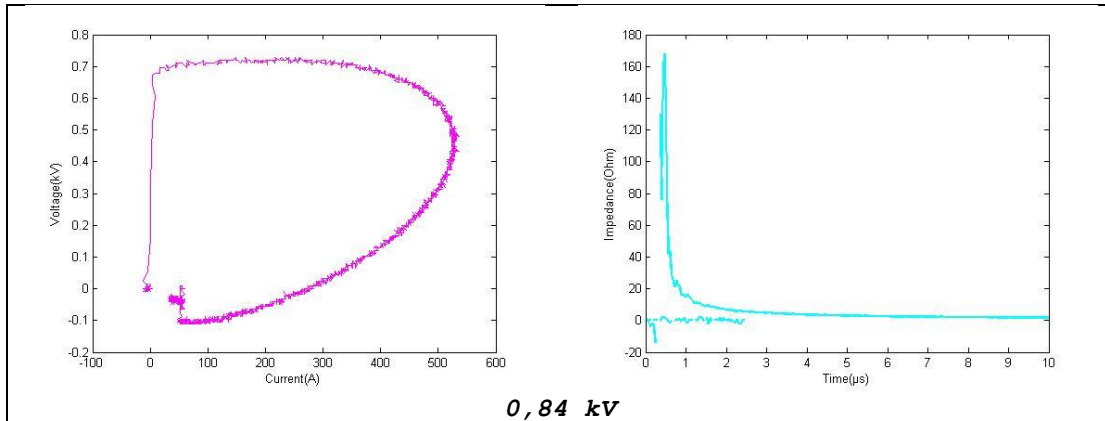


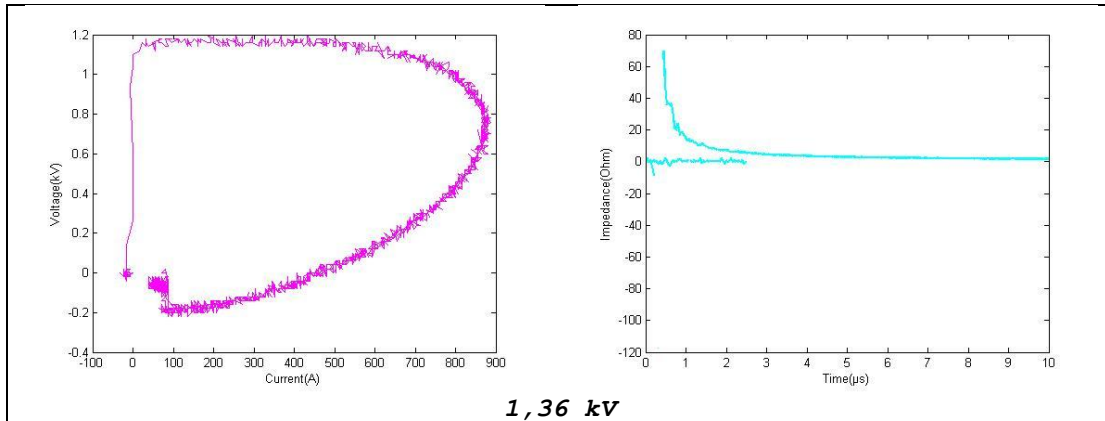
3,04 kV

Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
40cm x 4cm	41,5 mS/cm	22,7 °C	43,7%	989,5 mbar

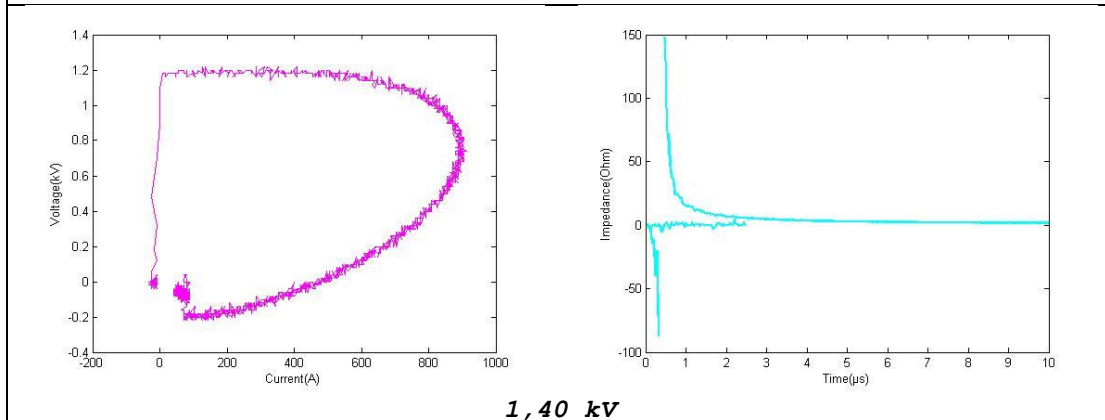




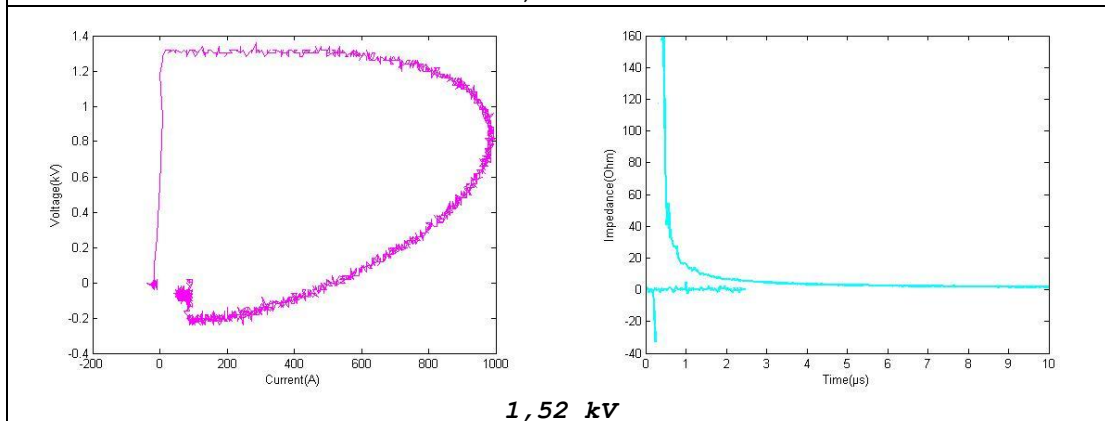




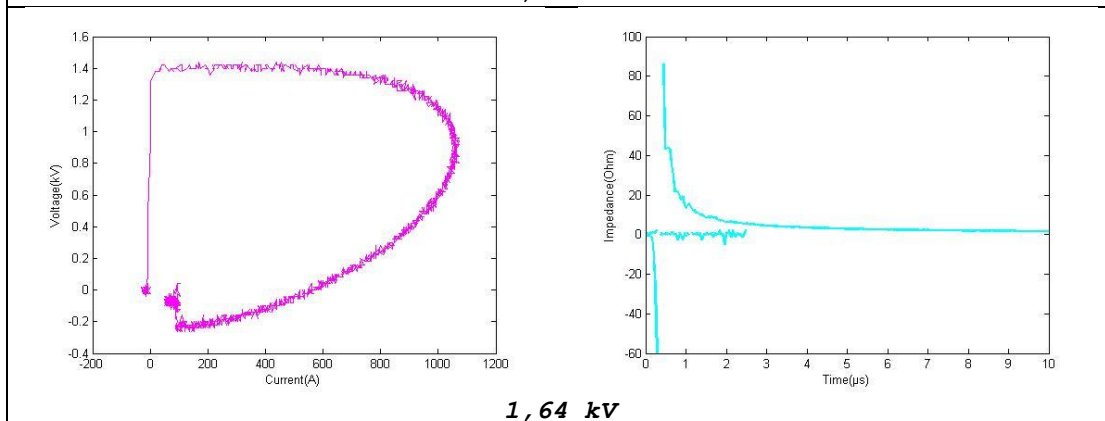
1,36 kV



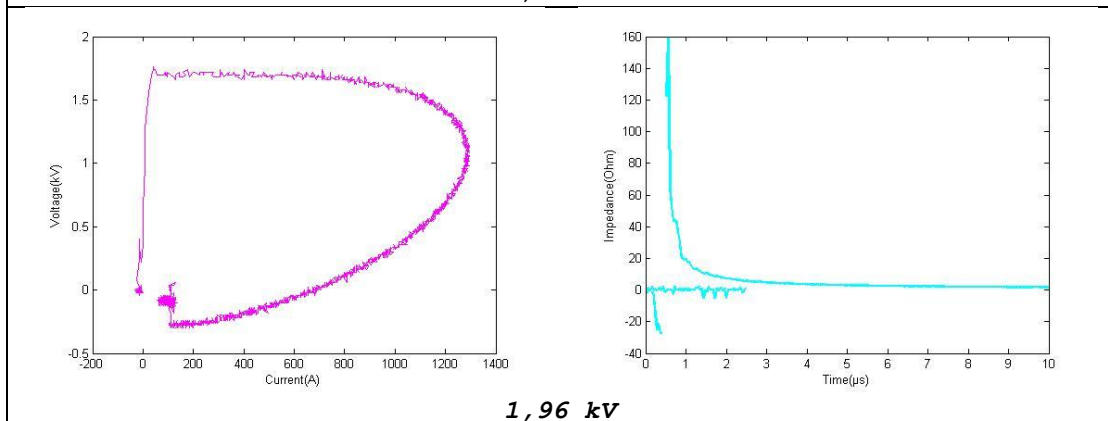
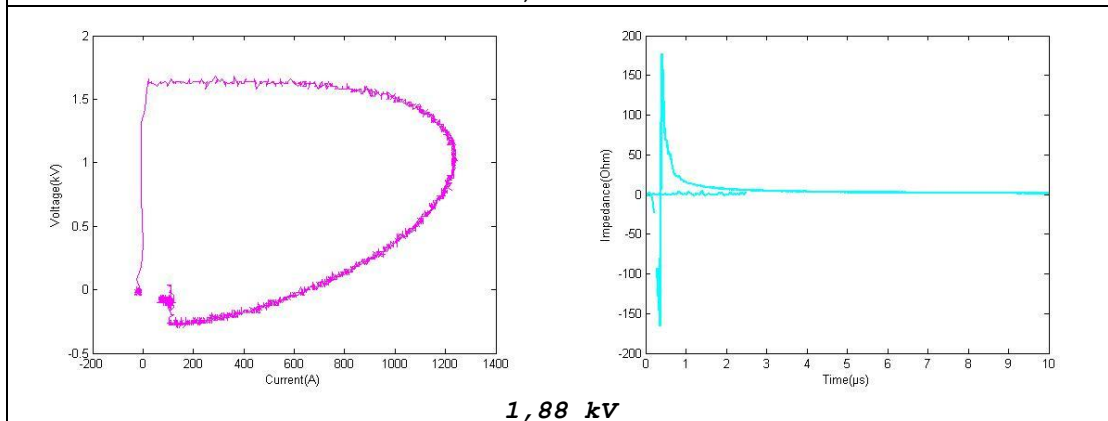
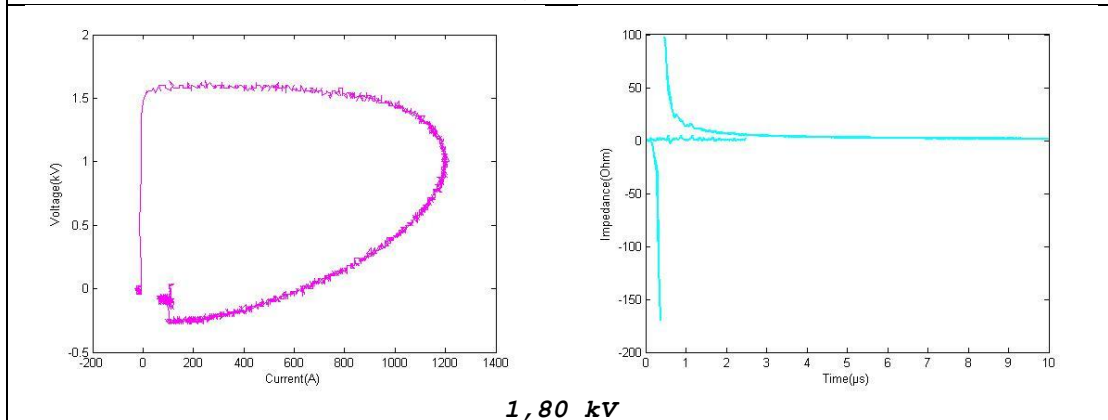
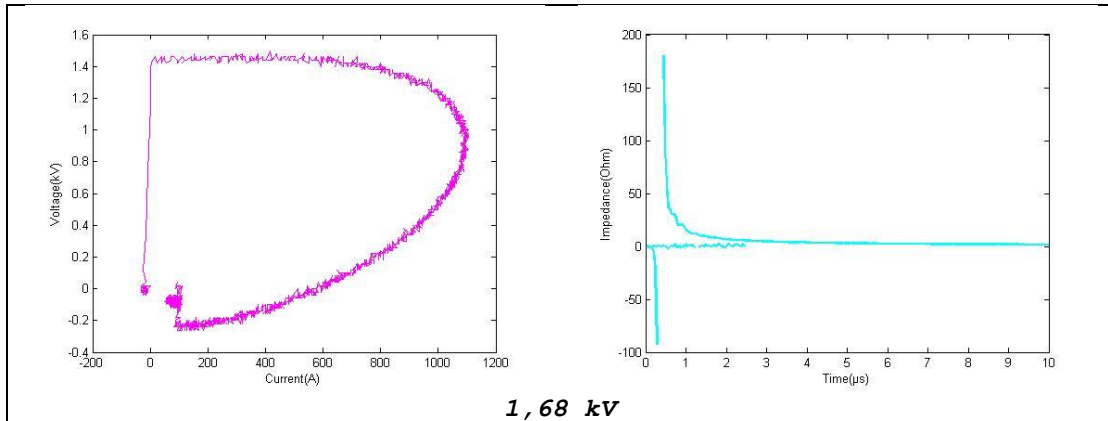
1,40 kV

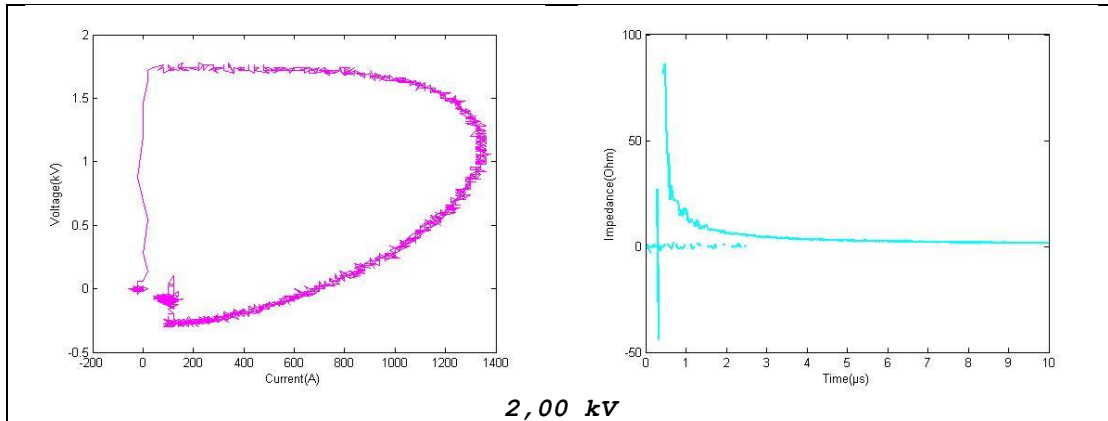


1,52 kV

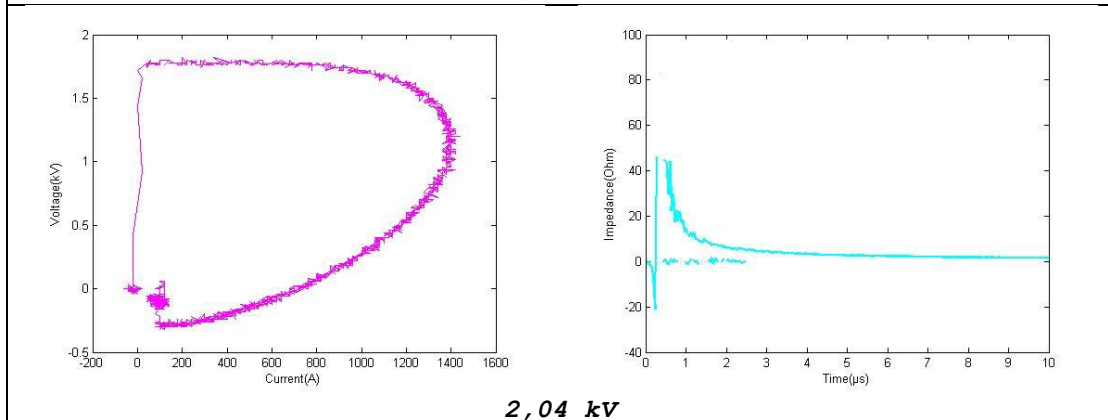


1,64 kV

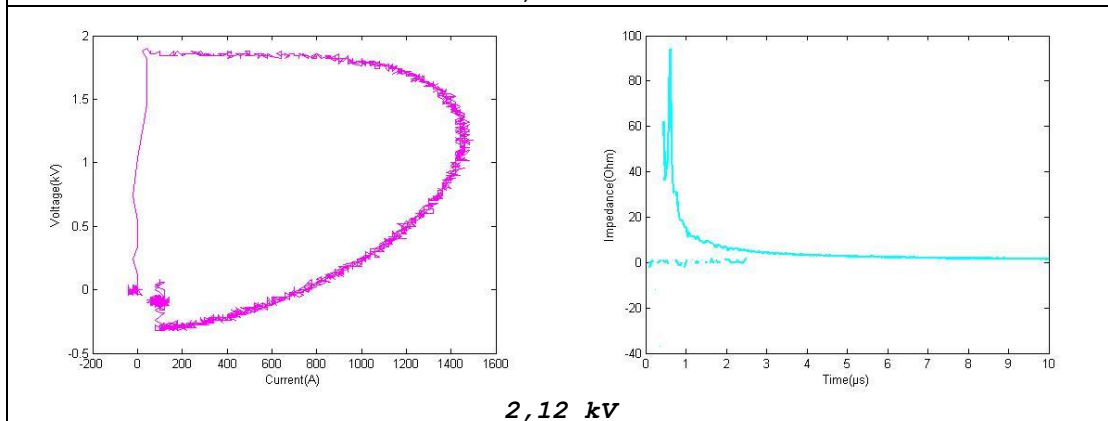




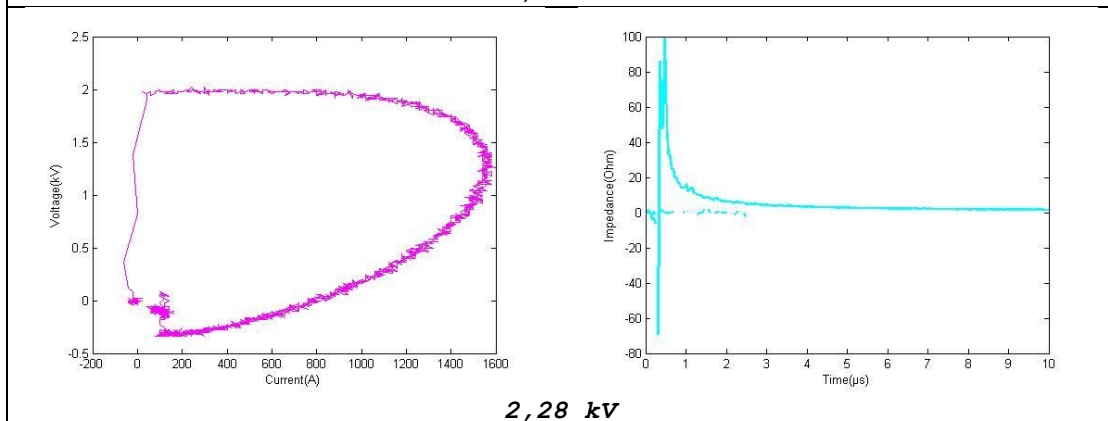
2,00 kV



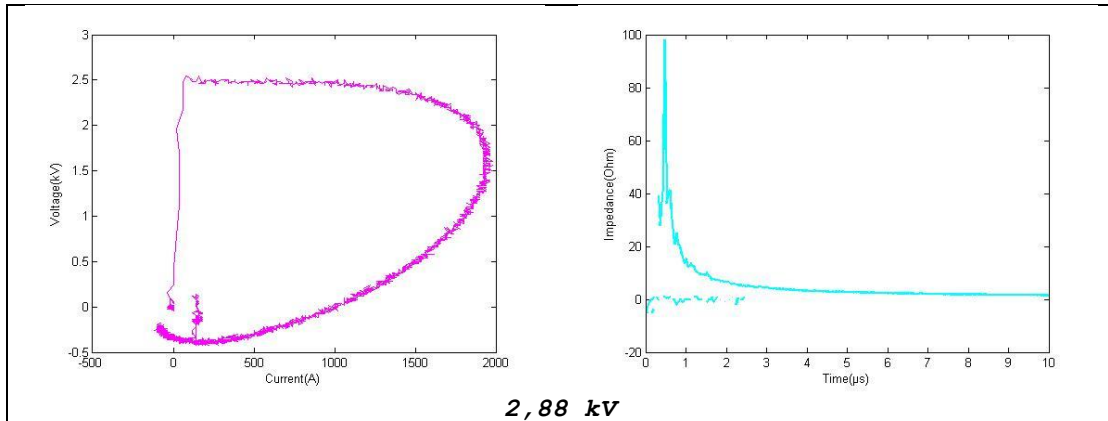
2,04 kV



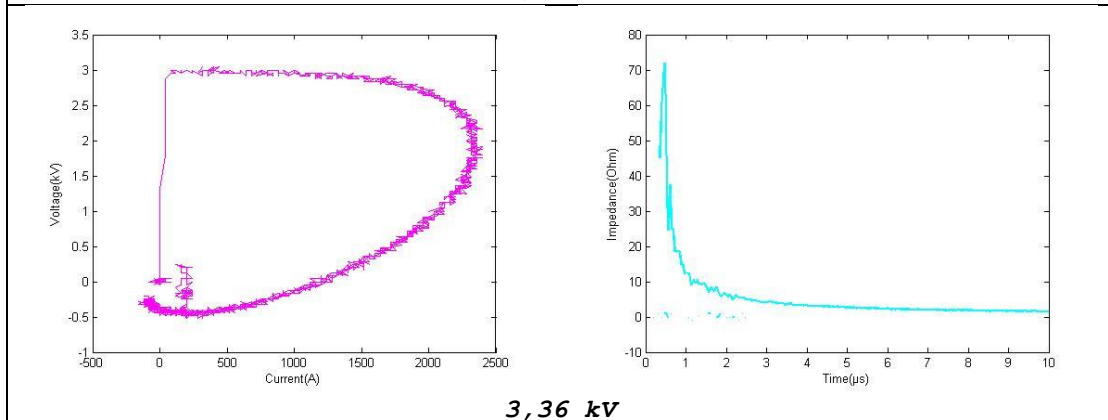
2,12 kV



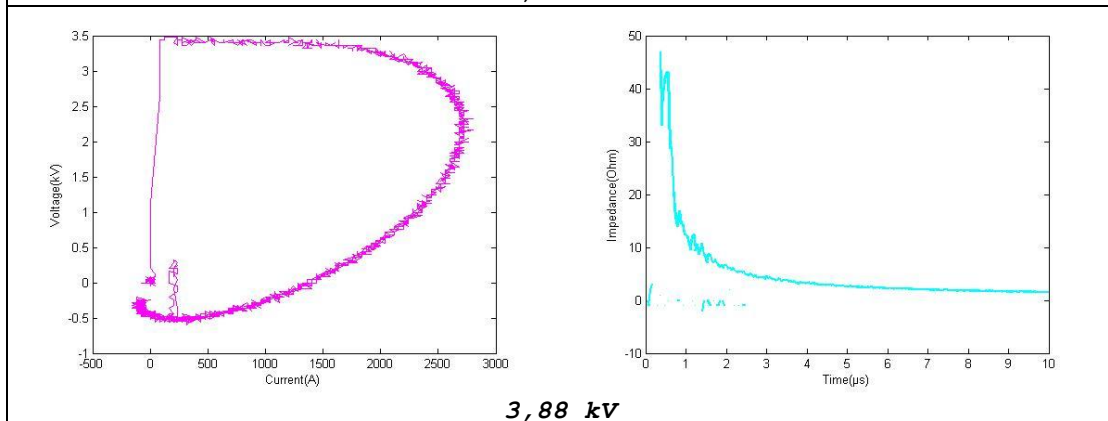
2,28 kV



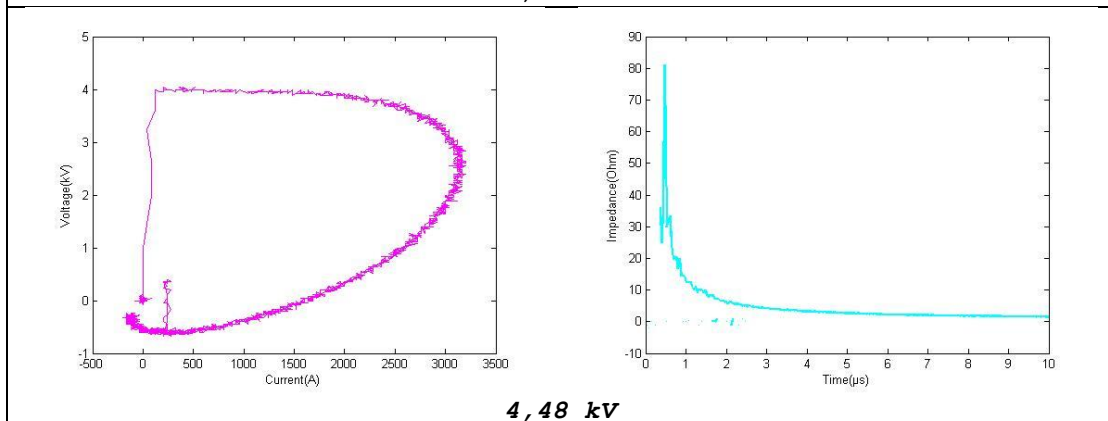
2,88 kV



3,36 kV

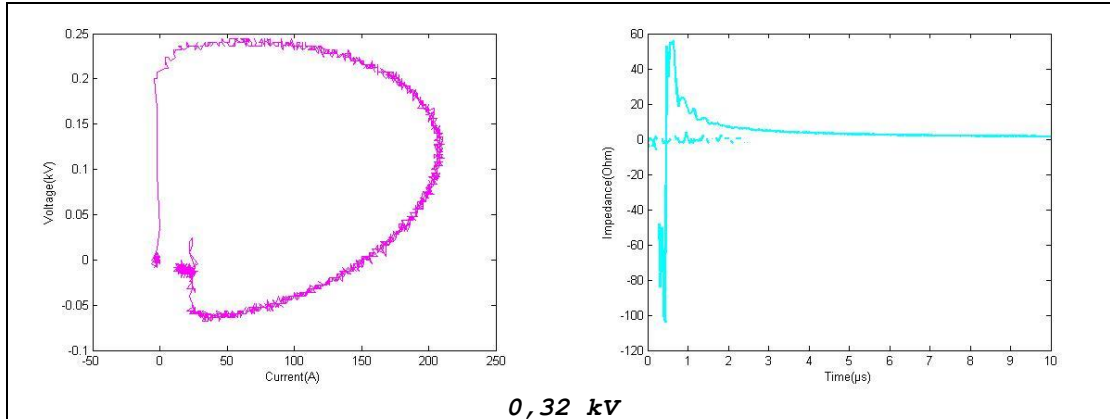


3,88 kV

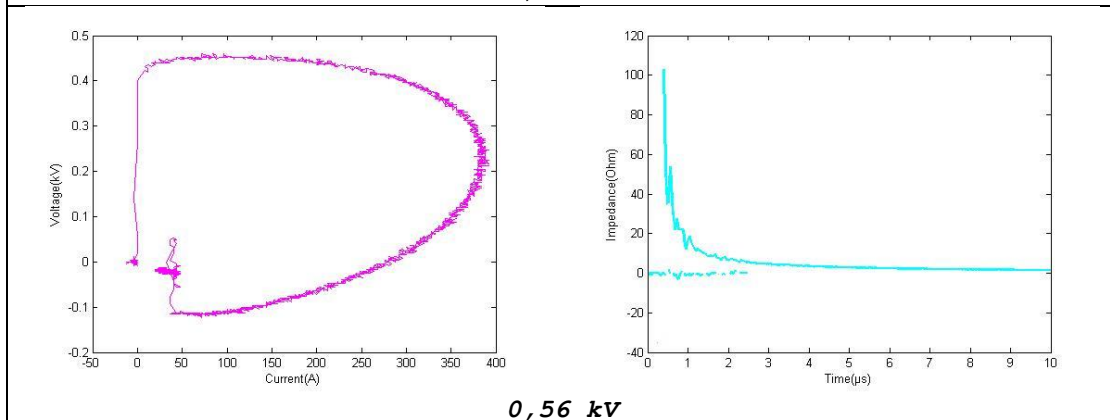


4,48 kV

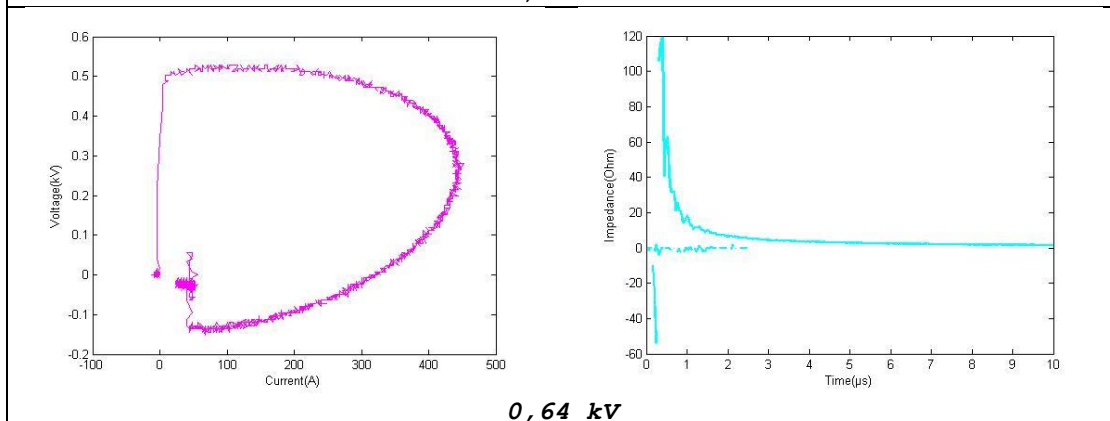
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
60cm x 6cm	41,5 mS/cm	22,7 °C	43,7%	989,5 mbar



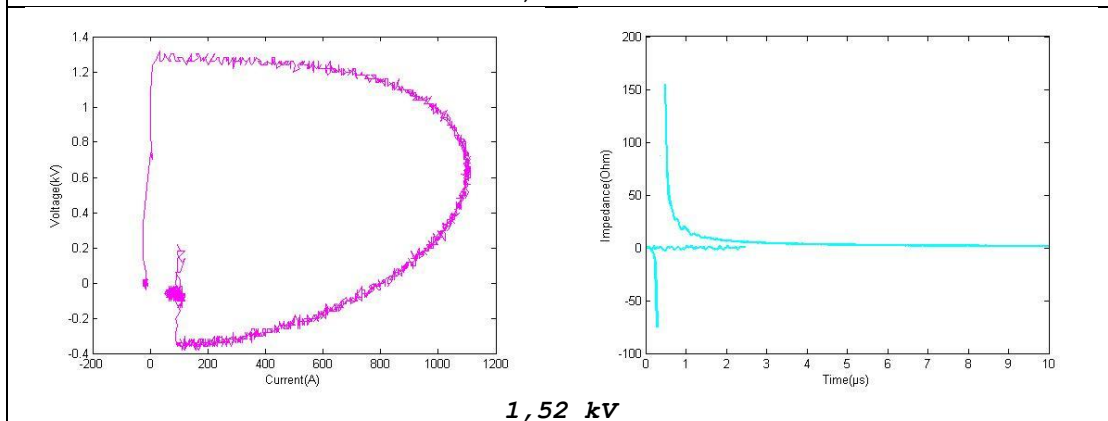
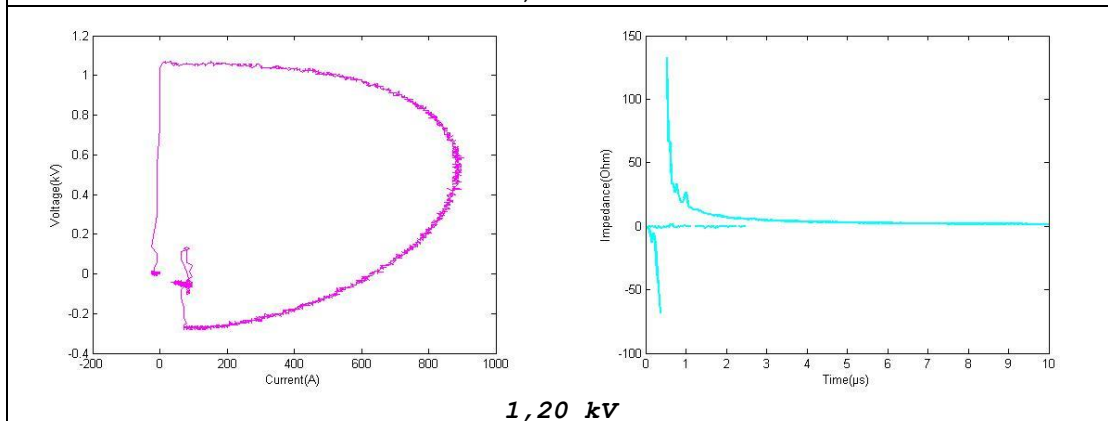
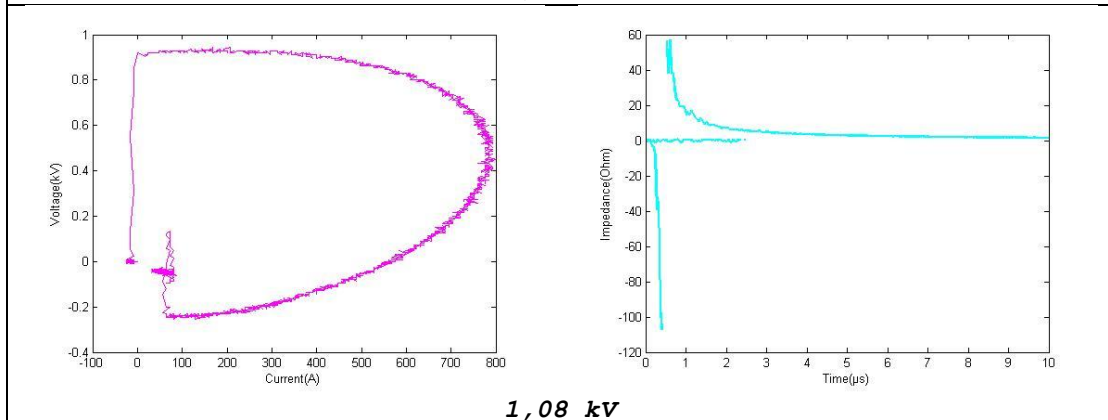
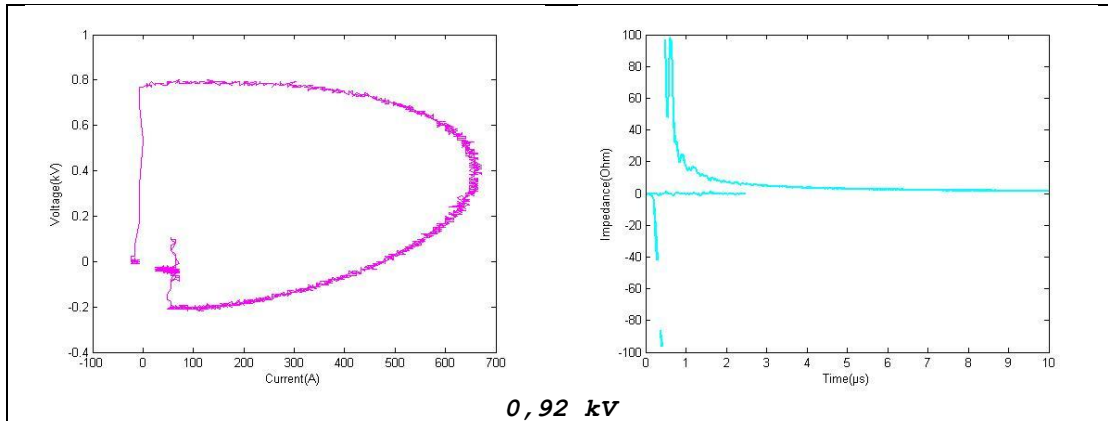
0,32 kV

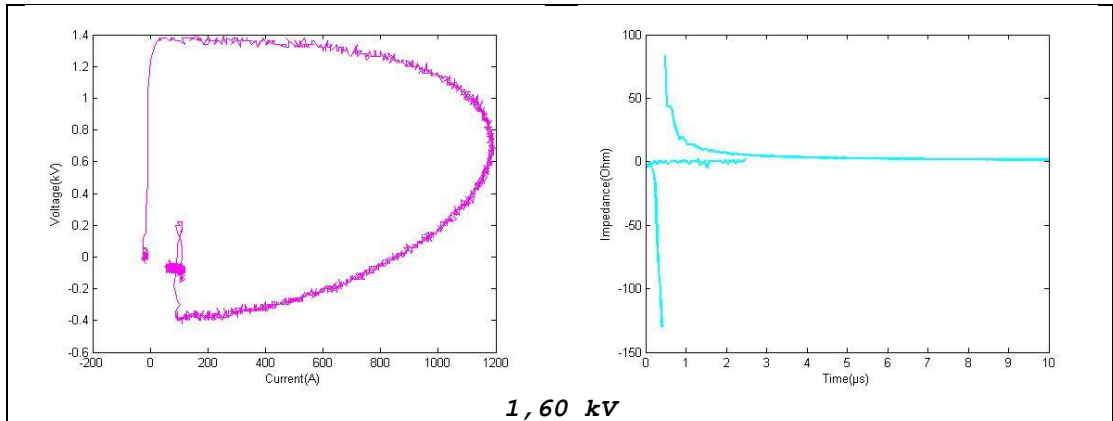


0,56 kV

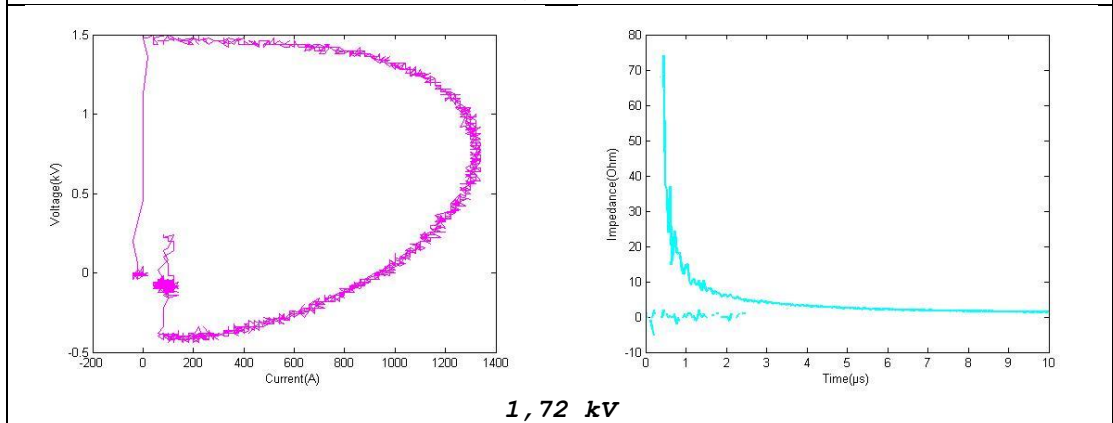


0,64 kV





1,60 kV



1,72 kV