



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

Πειραματική μελέτη μεταβατικής αντίστασης γείωσης με χρήση μοντέλων υπό κλίμακα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Δημήτριος Κ. Αναγνωστόπουλος

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013



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

Πειραματική μελέτη μεταβατικής αντίστασης γείωσης με χρήση μοντέλων υπό κλίμακα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Δημήτριος Κ. Αναγνωστόπουλος

185

Επιβλέπων: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Ιουλίου 2013

.....
Ιωάννης
Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φραγκίσκος
Β. Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης
Μ. Προυσαλίδης
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

Copyright © Αναγνωστόπουλος Δημήτριος, 2013

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.

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.

Στο σημείο αυτό, θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον επιβλέποντα 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. Τοπαλή και κ. Προυσαλίδη.

Την κ. Ελένη Π. Νικολοπούλου για την πολύτιμη καθοδήγηση, κατανόηση και υποστήριξή της και για την ουσιαστική και διαρκή βοήθεια που πρόθυμα μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας, καθώς και για το φιλικό κλίμα που φρόντισε να καλλιεργηθεί από την πρώτη στιγμή.

Τον κ. Ιωάννη Γκόνο και την κ. Βασιλική Κονταργύρη για τις πολύτιμες συμβουλές και τη βοήθεια που μου προσέφεραν όποτε τους ζητήθηκε.

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

Τέλος, δεν θέλω να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της μεταβατικής συμπεριφοράς ηλεκτροδίων γείωσης, και πιο συγκεκριμένα της αντίστασής τους, σε υδάτινο περιβάλλον χρησιμοποιώντας μοντέλα κλίμακας. Συγκεκριμένα, μεταλλικές ταινίες τεσσάρων διαφορετικών μεγεθών τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό μιας ηλεκτρολυτικής δεξαμενής και κατεγράφησαν σε δύο διαφορετικές συνθήκες αγωγιμότητας οι κυματομορφές του εγχέομένου κρουστικού ρεύματος και της τάσης του ηλεκτροδίου. Οι πειραματικοί λόγοι κλίμακας της μεταβατικής αντίστασης για τις διάφορες περιπτώσεις ηλεκτροδίων και αγωγιμοτήτων συγκρίθηκαν με τους θεωρητικά αναμενόμενους λόγους κλίμακας που υπαγορεύονται από τη Θεωρία της Ομοιότητας. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατέδειξαν την καταλληλότητα της συγκεκριμένης θεωρητικής μεθόδου για τον σχεδιασμό πειραμάτων κλίμακας, προκειμένου να μελετηθεί η απόκριση σε κεραυνικά πλήγματα. Αναλυτικότερα:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική εισαγωγή στην οποία περιγράφονται τα κύρια σημεία τη Θεωρίας της Ομοιότητας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή βασικών εννοιών όπως είναι τα φυσικά μοντέλα και η φυσική ομοιότητα μεταξύ φυσικών μοντέλων, ενώ στη συνέχεια γίνεται ένας διαχωρισμός των μεθόδων εφαρμογής της Θεωρίας της Ομοιότητας στους Νόμους υπό κλίμακα και στη Διαστατική Ανάλυση. Ειδικότερα για την τελευταία περιγράφονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα αξιώματά της, το κεντρικό της σημείο που είναι το Θεώρημα Π και περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου μέσω αυτής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική αναφορά στις γειώσεις και την αντίσταση γείωσης και στη συνέχεια μελετάται η μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίου. Με βάση αυτή τη μελέτη, καθώς και τις μεθόδους που περιγράφηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται η εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης στον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης ορισμένων τυπικών γεωμετρικών ηλεκτροδίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στα υπό κλίμακα πειράματα που σχετίζονται με τη μελέτη της αντίστασης γείωσης. Παρουσιάζονται κυρίως πειράματα σε ηλεκτρολυτική δεξαμενή που αποτέλεσαν τη βάση πάνω στην οποία στηριχθήκαμε για τη διαμόρφωση του πειράματός μας, αλλά και κάποια πειράματα σε υπό κλίμακα μοντέλα συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας κτιρίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και αναλύεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε με τα μέρη τα οποία την αποτελούν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων με τον σχολιασμό και τα συμπεράσματα που προκύπτουν, ενώ γίνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Τέλος, στο παράρτημα δίνονται οι αναλυτικοί πίνακες των μετρήσεων όπως αυτοί προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία, καθώς και τα παλμογραφήματα ρεύματος και τάσης που λάβαμε.

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 investigate the transient behavior of grounding electrodes, and more particularly their resistance in an aquatic environment using scale models. Specifically, strip electrodes of four different sizes, placed in an electrolytic tank, were subjected to impulse current pulses in two different conductivity conditions and the respective measurements were taken. The experimental scale factors of the impulse resistances for different electrode dimensions and conductivity values were compared to the theoretically expected scale factors that arise from the Similarity Theory. The validity of the Similarity Theory for the construction of scaled experiments that investigate the response to lightning strikes is verified.

The first chapter gives a theoretical introduction, outlining the main points of the Similarity Theory. Specifically, a description of basic concepts such as physical models and physical similarity between physical models is given, followed by a division of the application methods of the Similarity Theory into Scale Laws and Dimensional Analysis. Especially for the latter, its theoretical background, its focal point, which is the Π -Theorem, and the resulting methods of constructing a physical model are described in greater detail.

In the second chapter, grounding systems and grounding resistance are briefly discussed, and then the transient behavior of electrodes is studied. Based on this study and on the methods described in the first chapter, dimensional analysis is used to calculate the impulse resistance of some typical geometries of grounding electrodes.

The third chapter is a bibliographical review on scale model experiments related to the study of grounding resistance. Experiments in electrolytic tanks -which were used as a basis for our experiment- are mainly presented, along with some experiments on scaled models of the lightning protection systems of buildings.

In the fourth chapter, the experimental procedure is explained and the experimental setup, with its components is presented.

Chapter five contains the final results of measurements with commentary and conclusions arising, while suggestions for further investigation are made.

Finally, the tables containing the results of the experiment, as well as the current and voltage waveforms of our measurements are presented in the Appendix.

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	ii
Περιεχόμενα	iv
Εισαγωγή.....	1
1. Θεωρία της Ομοιότητας	4
1.1. Γενικά στοιχεία για τη Θεωρία της Ομοιότητας	4
1.2. Νόμοι υπό κλίμακα	5
1.3. Διαστατική Ανάλυση.....	8
1.3.1. Αξιώματα διαστατικής ανάλυσης	8
1.3.2. Θεώρημα Π (Vaschy και Buckingham).....	9
1.3.2.1. Ορισμός και χρήση για την κατασκευή φυσικού μοντέλου	9
1.3.2.2. Διαδικασία εφαρμογής Θεωρήματος Π.....	11
2. Αντίσταση γείωσης-Εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης στον υπολογισμό της.....	13
2.1. Γείωση	13
2.1.1. Είδη γείωσης.....	14
2.1.2. Είδη ηλεκτροδίων γείωσης	15
2.2. Αντίσταση γείωσης	20
2.2.1. Ειδική αντίσταση του εδάφους.....	21
2.3. Μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης.....	23
2.3.1. Το φαινόμενο ιονισμού του εδάφους	23
2.3.1.1. Μηχανισμοί διάσπασης εδάφους	24
2.3.1.2. Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων.....	25
2.3.2. Ενεργό μήκος ηλεκτροδίου	28
2.3.3. Προσδιορισμός αντίστασης γείωσης σε κεραυνικό πλήγμα	29
2.4. Εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης για τον υπολογισμό της μεταβατικής αντίστασης γείωσης.....	32
2.4.1. Για το οριζόντιο ηλεκτρόδιο γείωσης	32
2.4.2. Για το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο γείωσης	35
2.4.3. Για την ταινία γείωσης	37
2.4.4. Λόγοι κλίμακας για ηλεκτρόδια γείωσης	39
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων υπό κλίμακα.....	40
3.1. Θεωρητική προσέγγιση	40

3.1.1. Γενικά.....	40
3.1.2. Το μοντέλο του Korsuncev	41
3.1.3. Άλλες θεωρήσεις (Popolansky, Rudenberg, Berger, Liew/Darveniza, Oettle).....	45
3.2. Πειράματα υπό κλίμακα	48
3.2.1. Πειράματα σε δεξαμενή.....	49
3.2.1.1. Μελέτη προφίλ δυναμικού σε πλέγματα γείωσης.....	49
3.2.1.2. Μελέτη μεταβατικής αντίστασης πλεγμάτων γείωσης.....	52
3.2.1.2. Μελέτη συμπεριφοράς ηλεκτροδίου γείωσης.....	54
3.2.2. Πειράματα σε συστήματα αντικεραυνικής προστασία κτιρίων με μοντέλα κλίμακας.....	56
4. Πειραματικό μέρος.....	60
4.1. Εξοπλισμός	60
4.1.1. Κρουστική Γεννήτρια Ρεύματος.....	61
4.1.2. Παλμογράφος	63
4.1.3. Ομοαξονικά καλώδια.....	64
4.1.4. Αγωγιμόμετρο-Διαλύματα βαθμονόμησης	64
4.1.5. Υγρόμετρο-Θερμόμετρο	66
4.1.6. Αγωγοί για τη σύνδεση δοκιμίων και δεξαμενής με τη γεννήτρια	66
4.1.7. Δεξαμενή.....	67
4.1.8. Δοκίμια.....	67
4.2. Πειραματική διαδικασία	68
4.2.1. Στάδιο προετοιμασίας	68
4.2.2. Στάδιο λήψης μετρήσεων.....	71
5. Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	74
5.1. Πίνακες αποτελεσμάτων	74
5.1.1. Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων	75
5.1.1.1. Για $\sigma=1$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$	75
5.1.1.2. Για $\sigma=1$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	79
5.1.1.3. Για $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$	82
5.1.1.4. Για $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	85
5.1.2. Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων	89
5.1.2.1. Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$	89
5.1.2.2. Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$	92
5.2. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις	95

5.2.1. Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων	95
5.2.2. Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων	97
5.2.3. Συγκρίσεις παλμογραφημάτων	98
5.3. Επόμενη μέρα	100
Βιβλιογραφία	102
Παράρτημα	104

Εισαγωγή

Κεραυνοί που πλήττουν είτε έμμεσα είτε άμεσα ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας παράγουν ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (LEMP) που έχουν ως αποτέλεσμα την επαγωγή υπερτάσεων σε αγωγούς και καλώδια μέσα στο σύστημα. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από την πτώση κεραυνών σε γειτονικά σημεία είναι παρόμοια με αυτά των άμεσων πληγμάτων, αλλά με χαμηλότερα πλάτη [1].

Ο κεραυνός αποτελεί ένα έντονα μεταβατικό φαινόμενο κι έτσι, εξαιτίας του ευρέος φάσματος συχνοτήτων του, θέτει μια σοβαρή απειλή για τον ευαίσθητο ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό που βρίσκεται στο εσωτερικό των κατασκευών που πλήττουν. Τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα μπορεί να σχετίζονται με μια ποικιλία κυματομορφών ρεύματος, οι οποίες όμως διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος του κεραυνού, τους θετικούς κεραυνούς και τους αρνητικούς κεραυνούς. Τα ρεύματα θετικής πολικότητας έχουν ένταση που αυξάνεται αργά (χρόνοι μετώπου της τάξης των μs) με πλάτη έως 200 kA, ενώ η ένταση των ρευμάτων αρνητικής πολικότητας αυξάνεται αστραπιαία (χρόνοι μετώπου στην περιοχή των μερικών εκατοντάδων ns) και με πλάτη έως 50 kA.

Η ροή τέτοιων ρευμάτων μέσω των αγωγών του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας μπορεί να προκαλέσει [1]:

- 1) Βλάβες στο σύστημα εξαιτίας των θερμικών και ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που ασκούνται,
- 2) Βραχυκυκλώματα και σπινθηρισμούς σε δεύτερο χρόνο, που μπορούν να προκαλέσουν κίνδυνο πυρκαγιάς ή έκρηξης,
- 3) Ανισομερή κατανομή υψηλών τάσεων, που μπορεί να αποδειχτεί επικίνδυνη για τα άτομα που βρίσκονται μέσα στην πληττόμενη κατασκευή, και
- 4) Όπως αναφέραμε και νωρίτερα, δυσλειτουργία και παρεμβολές στις ηλεκτρονικές επικοινωνίες, στον έλεγχο και τα μετρητικά συστήματα στο εσωτερικό της κατασκευής.

Τα θαλάσσια σκάφη σπάνια πλήττονται άμεσα από κεραυνούς, ωστόσο ένα πλοίο που είναι αγκυροβολημένο σε λιμάνι θα χρειαστεί να αντιμετωπίσει συχνά τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις από έναν κεραυνό που πλήττει τη γη σε κοντινή απόσταση (συνδέεται μέσω της άγκυρας με τη γη και η τροφοδοσία γίνεται μέσω ac πηγής στη στεριά). Ένα κεραυνικό πλήγμα σε απόσταση 1 km από το πλοίο μπορεί να προκαλέσει μεταβατικά φαινόμενα, αρκετά ισχυρά ώστε να προξενήσουν προσωρινή ή και μόνιμη βλάβη στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα του πλοίου. Στις μέρες μας ειδικά, ως αποτέλεσμα της ολοένα αυξανόμενης χρήσης τεχνολογικά εξελιγμένων μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων που μεταφέρουν πολύ ασθενή σήματα, ο εξοπλισμός γίνεται περισσότερο

ευάλωτος σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, και έτσι ο έλεγχος των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών έχει γίνει κυρίαρχο ζήτημα της αντικεραυνικής προστασίας. Παρά την αποτελεσματική θωράκιση που μπορεί να προσφέρει ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, οι επαγόμενες τάσεις μπορεί να φτάσουν σε επικίνδυνα μεγέθη για τις μονάδες ελέγχου και τα όργανα στο εσωτερικό του πλοίου, οδηγώντας σε διάφορα προβλήματα όπως η απώλεια ηλεκτρονικά αποθηκευμένων δεδομένων.

Παρότι όπως αναφέραμε δεν είναι τόσο συχνό φαινόμενο, τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα σε πλοία μπορούν να προκαλέσουν αρκετά πιο σοβαρά προβλήματα στα περισσότερα μέρη των συστημάτων και δικτύων τους, εξαιτίας της αναπόφευκτης εγγύτητάς τους με τις διόδους απ' όπου περνάει το κεραυνικό ρεύμα σε μια τέτοια περίπτωση [1].

Στην περίπτωση άμεσου κεραυνικού πλήγματος το κατάρτι του πλοίου είναι αυτό που ελκύει τον κεραυνό, καθώς βρίσκεται σε αρκετά υψηλότερο επίπεδο από το υπόλοιπο κατάστρωμα. Στα πιο πολλά σύγχρονα πλοία τα κατάρτια είναι κατασκευασμένα από κούφιους μεταλλικούς σωλήνες, η βάση των οποίων ενώνεται με την επιφάνεια εκτόνωσης του ρεύματος, τη θάλασσα, λειτουργώντας ως αλεξικέραυνο. Σε μικρότερα σκάφη χρησιμοποιούνται επίσης κατάρτια από ξύλο ή πολυμερή (πλαστικά) [2].

Ωστόσο στην περίπτωση των μεταλλικών πλοίων (συνήθως των μεγαλύτερων σε μέγεθος) η ροή του κεραυνικού ρεύματος γίνεται μέσω του μεταλλικού σώματος του πλοίου, με κατεύθυνση προς την ιδανική γη που θεωρείται το νερό. Παρουσιάζει συνεπώς ενδιαφέρον η μελέτη της συμπεριφοράς της γάστρας του πλοίου ως ηλεκτροδίου γείωσης στο οποίο γίνεται ουσιαστικά έγχυση κρουστικού ρεύματος κατά το κεραυνικό πλήγμα.

Για την ποσοτικοποίηση και τη μελέτη αυτού του φαινομένου, κρίνεται αναγκαία η λήψη μετρήσεων και η διεξαγωγή ελεγχόμενων πειραμάτων μέσα σε εργαστήρια υψηλών τάσεων. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που καθιστούν αδύνατη τη χρήση κατασκευών πλήρους μεγέθους για τη διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων. Οι βασικότεροι από αυτούς είναι:

- i. ο περιορισμένος χώρος του εργαστηρίου (ανάγκη προσομοίωσης της απεριόριστης θάλασσας από μία πεπερασμένη δεξαμενή με θαλασσινό νερό),
- ii. οι περιορισμοί στο μέγεθος του δοκιμίου (πρακτικά αδύνατη η διεξαγωγή πειράματος επάνω σε πραγματικού μεγέθους πλοίο),
- iii. η αδυναμία προσομοίωσης της διέγερσης (κεραυνικού πλήγματος) παρά μόνο μέσω κρουστικών γεννητριών καθορισμένων χαρακτηριστικών.

Αντ' αυτού, πραγματοποιούνται πειράματα υπό κλίμακα, χρησιμοποιώντας δοκίμια, τα οποία έχουν πολλαπλάσια μικρότερες διαστάσεις από τα πρωτότυπα. Σε αυτά τα μοντέλα, όπως γίνεται κατανοητό, όχι μόνο η γεωμετρία τους αλλά και οι σχετιζόμενες φυσικές ποσότητες θα πρέπει να προσδιορίζονται από την κλίμακα την οποία έχουμε επιλέξει. Στον καθορισμό αυτών των μεγεθών

(γεωμετρικών και φυσικών) μας βοηθά η Θεωρία της Ομοιότητας, στην οποία θα αναφερθούμε αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Συνεπώς, τα πειράματα υπό κλίμακα είναι μία πολύ συμφέρουσα και πρακτική λύση για μια πρώτη προσέγγιση στη μελέτη της συμπεριφοράς της μεταλλικής γάστρας ενός πλοίου μετά από ένα κεραυνικό πλήγμα. Αυτή η θεώρηση του μεταλλικού σκελετού του πλοίου ως ηλεκτροδίου γείωσης μπορεί να υλοποιηθεί μέσα από τη Θεωρία της Ομοιότητας, το μαθηματικό εργαλείο που επιτρέπει τον υπολογισμό των απαιτούμενων λόγων κλίμακας για την αναγωγή πειραματικά μετρούμενων μεγεθών σε πραγματικά μεγέθη. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται ο σχεδιασμός και η διεξαγωγή πειραμάτων έγχυσης κρουστικού ρεύματος σε ηλεκτρόδια γείωσης τοποθετημένα εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής. Στόχος είναι μέσα από τη σύγκριση των μετρήσεων που λαμβάνονται για διαφορετικές διαστάσεις δοκιμίων, τιμές αγωγιμότητας του διαλύματος και τιμές εγχέομένου ρεύματος να αξιολογηθεί η ακρίβεια της Θεωρίας της Ομοιότητας για τον υπολογισμό της μεταβατικής αντίστασης ηλεκτροδίου γείωσης.

Κεφάλαιο 1^ο

Θεωρία της Ομοιότητας

Η Θεωρία της Ομοιότητας είναι η θεωρία που μας επιτρέπει είτε μέσω γνωστών φυσικών νόμων/σχέσεων, είτε με τη βοήθεια αδιάστατων παραμέτρων να δημιουργήσουμε μια σχέση φυσικής ομοιότητας μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου. Στο πείραμά μας θέλουμε να αναπτύξουμε ένα φυσικό μοντέλο για την προσομοίωση του φαινομένου του κεραυνικού πλήγματος σε αντικεραυνικό σύστημα προστασίας ενός πλοίου. Το φυσικό μοντέλο είναι μια προσπάθεια αναπαράστασης ενός φυσικού φαινομένου (ή **πρωτοτύπου**) από ένα άλλο φυσικό φαινόμενο (φυσικό **μοντέλο** ή **πρότυπο**) με σκοπό την πρόβλεψη των συμβαινόντων στο πρωτότυπο από μετρήσεις στο μοντέλο. Για να το πετύχουμε αυτό λοιπόν, θα πρέπει να πετύχουμε φυσική ομοιότητα μεταξύ των χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου και του υπό κλίμακα μοντέλου. Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι εφαρμογής της Θεωρίας της Ομοιότητας, οι «Νόμοι υπό κλίμακα» και η Διαστατική Ανάλυση (με σημείο αναφοράς το Θεώρημα Π των Vaschy και Buckingham) [3,4]. Πριν εξετάσουμε καθεμία από τις δύο μεθόδους θα πρέπει να ορίσουμε πρώτα κάποιες έννοιες σχετικές με τη Θεωρία της Ομοιότητας, οι οποίες θα μας χρησιμεύσουν και στη συνέχεια.

1.1. Γενικά στοιχεία για τη Θεωρία της Ομοιότητας

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. Μπορεί να υπάρξει μη γραμμική φυσική ομοιότητα, ωστόσο εμείς 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 και είναι ένα μέγεθος πολύ σημαντικό για τη συνέχεια. 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 [3].

Μερικές ειδικές μορφές φυσικής ομοιότητας είναι η ομοιότητα ως προς το **μήκος L** (**γεωμετρική ομοιότητα**), ως προς τη **μάζα M**, ως προς το **χρόνο T** (**χρονική ομοιότητα**), η κινηματική και η δυναμική ομοιότητα. Στη συνέχεια για τους υπολογισμούς που θα κάνουμε στα πλαίσια της Διαστατικής Ανάλυσης (εφαρμογή Θεωρήματος Π) θα χρησιμοποιήσουμε κυρίως τις 3 πρώτες μορφές φυσικής ομοιότητας. Αυτό συμβαίνει διότι τα μεγέθη **Μήκος L** (σε m), **Μάζα M** (σε kg) και **Χρόνος T** (σε sec) είναι **θεμελιώδη**, από τη σύνθεση των οποίων μπορούν να προκύψουν όλα τα άλλα μεγέθη, δηλαδή τα **παραγόμενα**. Μια θεμελιώδης ομάδα μεγεθών είναι η ελάχιστη υποομάδα του «σύμπαντος» μεγεθών που κανένα αντικείμενο (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, εκπεφρασμένα σαν συνάρτηση των διαστάσεων των θεμελιωδών μεγεθών [3].

1.2. Νόμοι υπό κλίμακα

Οι «Νόμοι υπό κλίμακα» προκύπτουν με τη βοήθεια των φυσικών νόμων και ηλεκτρομαγνητικών εξισώσεων που περιγράφουν μια φυσική διαδικασία και στηρίζονται στην παραδοχή ότι ισχύουν οι ίδιοι φυσικοί νόμοι και εξισώσεις μεταξύ του πρωτότυπου (**full scale, F**) και του μοντέλου (**model, M**) πολλαπλασιαζόμενα κατά έναν αριθμητικό παράγοντα (**λόγος κλίμακας**) [4]. Συγκεκριμένα, στο πρόβλημά μας που είναι η αντικεραυνική προστασία, τα φαινόμενα που εμπλέκονται μπορούν να περιγραφούν στο σύνολό τους από τις εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητισμού, μερικές από τις οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Νόμος του Ampère	$\oint_S H ds = I + \frac{d}{dt} \int_A D dA$	Τύποι για ρεύματα και τάσεις	$u = iR$ $u = \frac{1}{C} \int i dt$ $u = L \frac{di}{dt}$
Νόμος του Faraday	$\oint_S E ds = -\frac{d}{dt} \int_A B dA$	Τύποι για τάση, ροή και φορτία	$\frac{U}{I} = R$ $\frac{U}{Q} = \frac{1}{C}$ $\frac{V}{\Phi} = R_{in}$
Ηλεκτρομαγνητική ροή	$\int_A J dA = I$ $\int_A D dA = \Psi$		
Τύποι για πυκνότητες και εντάσεις πεδίων	$S = \kappa E$ $D = \epsilon E$ $B = \mu H$	Διαστατικές εξισώσεις σε ομογενή πεδία	$R = \frac{1}{\kappa A}$ $\frac{1}{C} = \frac{l}{\epsilon A}$ $R_{in} = \frac{l}{\mu A}$

Πίνακας 1.1: Χρήσιμες εξισώσεις ηλεκτρομαγνητισμού για εφαρμογή των Νόμων υπό κλίμακα [4]

Οι Νόμοι υπό κλίμακα προκύπτουν μέσω απλών μετασχηματισμών αυτών των εξισώσεων. Ως προαπαιτούμενο, το μοντέλο θα πρέπει να υποβληθεί σε παρόμοιες φυσικές διαδικασίες με το πρωτότυπο. Τόσο το πρωτότυπο, όσο και το μοντέλο υπόκεινται στους ίδιους φυσικούς νόμους με τη μόνη διαφορά να βρίσκεται στις φυσικές ποσότητες για το κάθε αντικείμενο. Όλες οι ομόλογες τιμές του πρωτότυπου και του μοντέλου πρέπει, για κάθε ποσότητα, να παραμένουν σε μια σταθερή αναλογία μεταξύ τους. Έτσι για μια τυχαία ποσότητα k θα ισχύει [4]:

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

όπου: x_{kF} η ποσότητα k για το πρωτότυπο (F=full scale)
 x_{kM} η ποσότητα k για το μοντέλο (M=model)
 f_k ο λόγος κλίμακας για την ποσότητα k .

Η παραπάνω σχέση μας επιτρέπει να εκφράζουμε οποιαδήποτε ποσότητα/μέγεθος πραγματικής κλίμακας ως το γινόμενο μιας σταθεράς (λόγος κλίμακας) επί την αντίστοιχη ποσότητα/μέγεθος στο υπό κλίμακα μοντέλο. Αυτό είναι εξαιρετικά χρήσιμο, καθώς σε συνδυασμό με τους τύπους του ανωτέρω πίνακα μπορούμε να εξάγουμε τις αντίστοιχες σχέσεις μεταξύ των λόγων κλίμακας των διάφορων μεγεθών [4]. Ας λάβουμε για παράδειγμα το Νόμο του Ampère. Θα έχουμε:

$$\oint_S H_F ds_F = I_F + \frac{d}{dt_F} \int_A D_F dA_F \Leftrightarrow \oint_S (f_H H_M) d(f_I s_M) = (f_I I_M) + \frac{d}{d(f_t t_M)} \int_A (f_D D_M) d(f_I^2 A_M) \quad (1.2)$$

και επειδή οι λόγοι κλίμακας f είναι σταθερές, προκύπτει τελικά ότι:

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

Η φυσική ομοιότητα συνεπάγεται την προϋπόθεση ότι οι εξισώσεις για το πρωτότυπο και το μοντέλο διαφέρουν μόνο κατά ένα σταθερό παράγοντα. Συνεπώς, για την παραπάνω εξίσωση το γινόμενο των λόγων κλίμακας του 1^{ου} μέλους θα πρέπει να ισούται με το γινόμενο των λόγων κλίμακας για καθένα από τους δύο όρους του 2^{ου} μέλους. Δηλαδή:

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

Μετασχηματίζοντας και τους υπόλοιπους τύπους του πίνακα κατά τον ίδιο τρόπο, μπορούμε να δημιουργήσουμε παρόμοιες σχέσεις για τους λόγους κλίμακας όλων των αναφερόμενων μεγεθών. Οι λύσεις αυτών των εξισώσεων

δίνουν τους «Νόμους υπό κλίμακα» που διέπουν τις σχέσεις μεταξύ των λόγων κλίμακας για όλα τα φυσικά μεγέθη.

Ωστόσο, οι νόμοι αυτοί υπόκεινται σε κάποιες παραδοχές/προϋποθέσεις, οι οποίες δεν είναι δυνατό να τηρούνται επακριβώς σε κάθε περίπτωση. Μια τέτοια προϋπόθεση για παράδειγμα είναι πως, τόσο η επιτρεπτότητα, όσο και η διηλεκτρική σταθερά είναι η ίδια για κάθε υλικό για το πρωτότυπο και το μοντέλο. Αυτό όμως δεν ισχύει πάντα (π.χ. φερρομαγνητικά υλικά).

Τελικά, έχοντας το μήκος και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ως ανεξάρτητες μεταβλητές, αν ο λόγος των διαστάσεων του πρωτότυπου προς το μοντέλο είναι f_l και των ρευμάτων είναι f_I , έπειτα από μετασχηματισμούς προκύπτει για τους λόγους κλίμακας των βασικών μεγεθών που εξετάζουμε στο πείραμα.

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

Πίνακας 1.2: Λόγοι κλίμακας βασικών μεγεθών συναρτήσει των λόγων κλίμακας μήκους και ρεύματος [4]

Θα χρειαστεί να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι κάποιες από τις παραπάνω σχέσεις, στις οποίες στηριχθήκαμε για να εξάγουμε τους λόγους κλίμακας, αναφέρονται σε στατικά ή ομογενή πεδία, ενώ το φαινόμενο της ηλεκτρικής εκκένωσης είναι χρονομεταβλητό. Όλα αυτά βρίσκονται στο πλαίσιο των παραδοχών που κάνουμε, όπως αναφέραμε προηγουμένως, αποτελούν ωστόσο μειονεκτήματα, και σε συνδυασμό με ορισμένα πλεονεκτήματα της Διαστατικής Ανάλυσης, τα οποία θα μελετήσουμε αργότερα, μας οδήγησαν στο να προτιμήσουμε τη συγκεκριμένη μέθοδο της Θεωρίας της Ομοιότητας και όχι τους «Νόμους υπό κλίμακα».

1.3. Διαστατική Ανάλυση

Η άλλη μέθοδος της Θεωρίας της Ομοιότητας είναι η Διαστατική Ανάλυση (Θεώρημα Π). Η Διαστατική Ανάλυση είναι ο κλάδος της γνώσης που εξετάζει τα επακόλουθα της εφαρμογής της «διαστατικής ομοιογένειας» στη μαθηματική μορφή των φυσικών νόμων. Μέσω της Διαστατικής Ανάλυσης μπορούμε να παράγουμε αδιάστατες μορφές για τους φυσικούς νόμους και κατ' επέκταση να παράγουμε «φυσικά μοντέλα», καθώς, όπως θα δούμε και παρακάτω, η φυσική ομοιότητα μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου συνεπάγεται την ταυτότητα των αδιάστατων μεγεθών τους και αντιστρόφως. Ουσιαστικά κεντρικός άξονας της Διαστατικής Ανάλυσης είναι η απομάκρυνση από ένα πρόβλημα όλων των «άσχετων» πληροφοριών και παραγόντων, με τη δημιουργία αδιάστατων ομάδων. Βασίζεται δε στην υπόθεση ότι υπάρχουν συναρτησιακές σχέσεις μεταξύ των αδιάστατων παραμέτρων που περιγράφουν κάθε φυσικό σύστημα.

Όπως τονίσαμε και νωρίτερα, η εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης στηρίζεται στον διαχωρισμό των μεγεθών σε θεμελιώδη και παραγόμενα και ακολούθως στη δημιουργία ομάδων αδιάστατων μεγεθών.

1.3.1. Αξιώματα διαστατικής ανάλυσης

Ο G. Birkhoff στο σύγγραμμά του *Hydrodynamics* θεμελιώνει αξιωματικά τη Διαστατική Ανάλυση ως ακολούθως [3]:

1. 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 (\cdot) συμβολίζεται το μέγεθος στο νέο σύστημα μονάδων και

$$a_i = \frac{q_i}{\tilde{q}_i} \text{ είναι ο λόγος των μονάδων μέτρησης.}$$

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

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

όπου: $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, $\mathbf{b}_j = (b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jm})$ και

$\alpha^{b_j} \stackrel{\text{def}}{=} a_1^{b_{j1}} a_2^{b_{j2}} \dots a_m^{b_{jm}}$. 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**.

3. Υπάρχουν φυσικοί νόμοι υπό μορφή μαθηματικών τύπων:

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_r) = 0 \quad (1.7)$$

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

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_r) = 0 \Leftrightarrow f(Q_1', Q_2', \dots, Q_r') = 0 \quad (1.8)$$

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

Με βάση αυτό τον ορισμό, στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται όλα τα θεμελιώδη μεγέθη και οι **μονάδες μέτρησής τους κατά S.I.** (Système International) καθώς και μερικά παραγόμενα μεγέθη και ο τρόπος με τον οποίο παράγονται από τα θεμελιώδη [5]:

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης SI	Σύμβολο
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 1.3: Θεμελιώδη μεγέθη, ονομασίες και σύμβολα μονάδων μέτρησης κατά SI [5]

Μέγεθος	Ορισμός	Διάσταση	Διαστατικό σύμβολο	Μονάδα μέτρησης
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}	$m s^{-2}$	---
Πυκνότητα	$\rho = M/V$	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}	$N m = kg m^2s^{-2}$	Joule (J)
Ροπή	$T = F \cdot l$	ML^2t^{-2}	$N m = kg m^2s^{-2}$	---
Ισχύς	$P = dW/dt$	ML^2t^{-3}	$J s^{-1} = kg m^2s^{-3}$	Watt (W)
Φορτίο	$Q = \int I dt$	It	$A s$	Coulomb (C)

Πίνακας 1.4: Παραγόμενα μεγέθη, οι ορισμοί και η διαστατική περιγραφή τους [5]

1.3.2. Θεώρημα Π (Vaschy και Buckingham)

Κεντρικό θεώρημα της διαστατικής ανάλυσης είναι το **Θεώρημα Π**. Το θεώρημα Π είναι συνεπαγωγή των αξιωμάτων 1 έως 4, και η διατύπωσή του κατά Birkhoff είναι η ακόλουθη [3]:

1.3.2.1. Ορισμός και χρήση για την κατασκευή φυσικού μοντέλου

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 διαστάσεων του αξιώματος 2, b_{jk} . 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:

$$\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{r-n}) = 0 \quad (1.9)$$

όπου $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{r-n}$ είναι τα $k = r - n$ είναι τα αδιάστατα μονώνυμα που παράγονται από τις μεταβλητές Q_j . [3]

Η χρήση φυσικού μοντέλου για την πρόβλεψη, μέσω πειραμάτων, των χαρακτηριστικών του πρωτότυπου απαιτεί τον προσδιορισμό δύο πραγμάτων:

- των χαρακτηριστικών του μοντέλου, δηλαδή εάν η κατάσταση του πρωτότυπου χαρακτηρίζεται μονοσήμαντα από τα μεγέθη $Q_{s_2}, Q_{s_3}, \dots, Q_{s_r}$ (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, δηλαδή ο προσδιορισμός της τιμής Q_{s_1} (εξαρτημένη μεταβλητή) για το πρωτότυπο, εάν γνωρίζουμε ότι από τις μετρήσεις στο μοντέλο προέκυψε η τιμή Q_{m_1} .

Σύμφωνα με το Θεώρημα Π, η σχέση που εκφράζει την εξαρτημένη μεταβλητή συναρτήσει των ανεξάρτητων (φυσικός νόμος):

$$Q_{s_1} = f(Q_{s_2}, Q_{s_3}, \dots, Q_{s_r}) \quad (1.10)$$

μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\Pi_{s_1} = \Phi(\Pi_{s_2}, \Pi_{s_3}, \dots, \Pi_{s_{r-n}}) \quad (1.11)$$

Γνωρίζουμε όμως ότι, εάν τα δύο φαινόμενα είναι όμοια ως προς την εξαρτημένη μεταβλητή Q_{s_1} , τότε η αδιαστατοποιημένη εξαρτημένη μεταβλητή είναι αναλλοίωτη σε αλλαγή κλίμακας, δηλαδή $\Pi_{s_1} \equiv \Pi_{m_1}$. Συνεπώς, για την παραπάνω ισότητα ισχύει:

$$\Phi(\Pi_{s_2}, \Pi_{s_3}, \dots, \Pi_{s_{r-n}}) \equiv \Phi(\Pi_{m_2}, \Pi_{m_3}, \dots, \Pi_{m_{r-n}}) \quad (1.12)$$

και επομένως:

$$\Pi_{s_2} = \Pi_{m_2}, \Pi_{s_3} = \Pi_{m_3}, \dots, \Pi_{s_{r-n}} = \Pi_{m_{r-n}} \quad (1.13)$$

Με άλλα λόγια, για να ικανοποιείται η φυσική ομοιότητα ως προς τα εξαρτημένα μεγέθη θα πρέπει οι Π παράμετροι που ορίζονται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές στο πρωτότυπο και στο μοντέλο να είναι ίδιες.

Η δυνατότητα κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου εξαρτάται από το κατά πόσο 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 μιλάμε για **μοντέλα υπό συνθήκες πλήρους ομοιότητας**.

Δυστυχώς όμως, μοντέλα υπό συνθήκες πλήρους ομοιότητας δεν είναι εφικτό να παραχθούν, λόγω αδυναμίας συναλήθευσης όλων των συνθηκών του προβλήματος για το μοντέλο και το πρωτότυπο (π.χ. ταυτόχρονη ικανοποίηση των $\Pi_{1m} = \Pi_{1f}$ και $\Pi_{2m} = \Pi_{2f}$). Πολλές τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται σε προβλήματα υδροδυναμικής πρόωσης, όπως αυτό της παράλληλης κίνησης υδροτομής κάτω από ελεύθερη επιφάνεια [3]. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να γίνει **ευρηματική διαδικασία** όπου πραγματοποιείται πρόβλεψη των μεγεθών του πρωτοτύπου από μετρήσεις στο μοντέλο, συνήθως μέσω εμπειρικών υποθέσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουμε **μερική ομοιότητα**.

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω, σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σε σχέση με τους «Νόμους υπό κλίμακα» είναι πως **δεν είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση των σχέσεων-εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τα μεγέθη, ούτε φυσικά και η επίλυσή τους**. Η απλή καταγραφή των μεγεθών, θεμελιωδών και παραγόμενων, που συμμετέχουν σε ένα πρόβλημα είναι αρκετή για τη δημιουργία των αδιάστατων παραμέτρων και, συνεπώς, για την επίλυση του προβλήματος διαστασιολόγησης.

1.3.2.2. Διαδικασία εφαρμογής Θεωρήματος Π

Η εφαρμογή του Θεωρήματος Π μπορεί να περιγραφεί στα εξής 6 απλά βήματα:

- **1° Βήμα:** Καθορισμός των φυσικών μεγεθών που συμμετέχουν στο μονοσήμαντο καθορισμό της εξέλιξης του φαινομένου και περιγραφή του αντίστοιχου φυσικού νόμου που τα συνδέει (φαινομενολογική έρευνα).
- **2° Βήμα:** Διαχωρισμός των φυσικών μεγεθών σε αυτών που βρίσκονται στο δεύτερο μέλος και ονομάζονται **ανεξάρτητες μεταβλητές**, και αυτής που βρίσκεται στο πρώτο μέλος και ονομάζεται **εξαρτημένη μεταβλητή**.
- **3° Βήμα:** Περιγραφή των διαστάσεων όλων των φυσικών μεγεθών του προβλήματος κατ' εξοχήν με τη βοήθεια των θεμελιωδών μεγεθών (π.χ.: μάζα **M**, μήκος **L**, χρόνος **T**) και η κατασκευή των αντίστοιχων διανυσμάτων. Για παράδειγμα η ταχύτητα u ενός αντικειμένου θα περιγραφόταν ως εξής:

$$u = \frac{dx}{dt} \Rightarrow [u] = [M^0 L^1 T^{-1}] = (0, 1, -1)$$

- **4° Βήμα:** Κατασκευή της μήτρας διαστάσεων των μεγεθών. Ο βαθμός (**rank**) k της μήτρας αυτής 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° Βήμα:** Αφαιρώντας το βαθμό της μήτρας διαστάσεων των μεγεθών από το συνολικό αριθμό μεγεθών του προβλήματος, προκύπτει ο **αριθμός των Π**

παραμέτρων που καλούμαστε να προσδιορίσουμε, για καθένα από τα μεγέθη που δεν συμπεριλάβαμε στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.

- **6^ο Βήμα:** Για τον υπολογισμό των Π παραμέτρων, ακολουθούμε τον εξής συλλογισμό: Σύμφωνα με το Θεώρημα Π , οι διαστάσεις των Π παραμέτρων πρέπει να είναι ίσες με 0. Για να συμβεί αυτό, υψώνουμε κατάλληλα τα μεγέθη της διαστατικά ανεξάρτητης ομάδας ούτως ώστε το γινόμενο τους επί το μέγεθος που προσδιορίζει η παράμετρος Π να δίνει ένα αδιάστατο αριθμό. Έτσι έχουμε ένα σύστημα k εξισώσεων (όσο είναι το rank) με k αγνώστους για να βρούμε τους κατάλληλους εκθέτες. Λύνοντας, βρίσκουμε τελικά το συνολικό γινόμενο που μας δίνει την αντίστοιχη παράμετρο.

Τελικά, τρία είναι τα διαδοχικά στάδια για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου από εκτέλεση πειραμάτων σε μοντέλο [3]:

- 1) Φαινομενολογική έρευνα και διαστατική ανάλυση του προβλήματος με σκοπό τον καθορισμό των αδιάστατων ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών και των αντίστοιχων ανεξάρτητων και εξαρτημένων Π παραμέτρων.
- 2) 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.
- 3) Εκτέλεση πειραμάτων στο μοντέλο και μέτρηση της τιμής των εξαρτημένων διαστατών παραμέτρων

Με τη χρήση των Π παραμέτρων που προκύπτουν με αυτό τον τρόπο είναι εύκολη η μετάβαση από τις πειραματικά μετρούμενες τιμές στις αντίστοιχες τιμές του φυσικού προβλήματος.

Κεφάλαιο 2^ο

Αντίσταση γείωσης-Εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης στον υπολογισμό της

2.1. Γείωση

Γείωση είναι η αγώγιμη σύνδεση μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιου μεγέθους ώστε να θεωρείται γη.

Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα από κεραυνούς ή ρεύματα σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει κατά το δυνατόν περισσότερο τις πιθανότητες εμφάνισης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς.

Εάν ένα σύστημα για να προστατευτεί είναι εξ' ολοκλήρου απομονωμένο ή προστατευμένο από εξωτερικούς μηχανισμούς σύζευξης, τότε δεν υπάρχει ανάγκη για σύστημα γείωσης, ώστε να επιτευχθεί ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Ωστόσο, τα περισσότερα πρακτικά συστήματα δεν είναι πάντα απομονωμένα αλλά συνήθως υπάρχουν συνδέσεις με το εξωτερικό σύστημα. Επομένως, όταν ένα φαινόμενο κερανού εμφανίζεται σε γειτονική περιοχή του συστήματος ή πλήττει άμεσα το σύστημα, παρατηρείται αύξηση του δυναμικού και μεταφορά ενέργειας μεταξύ του συστήματος και του εξωτερικού χώρου, έχοντας δυσάρεστα και συχνά καταστροφικά αποτελέσματα για το σύστημα [7]. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτές οι δυσάρεστες συνέπειες θα πρέπει να υπάρχει ένα αποτελεσματικό σύστημα γείωσης το οποίο θα μπορεί να οδηγήσει με ασφάλεια τα κεραυνικά ρεύματα στο έδαφος, περιορίζοντας ταυτόχρονα την επίδρασή τους μέσω ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων στα γειτονικά ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα.

Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω κριτήρια [9]:

- Να παρέχει χαμηλή εμπέδηση για το κύμα του ρεύματος, για να είναι αποτελεσματική η λειτουργία του συστήματος προστασίας.
- Να μειώνει τον κίνδυνο κατάρρευσης σημαντικών συστημάτων ή ηλεκτρονικού εξοπλισμού.
- Να μειώνει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας για τους ανθρώπους.
- Να ελαχιστοποιεί το κόστος.

Για να ικανοποιηθούν τα κριτήρια που αναφέρθηκαν ανωτέρω, υπάρχουν κάποιοι βασικοί κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται, σημαντικότεροι από τους οποίους είναι οι εξής [9]:

- Το μέγεθος του συστήματος γείωσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μειωθεί η μέγιστη αύξηση του δυναμικού όταν εισέρχονται ρεύματα απότομα στο σύστημα.
- Το κενό ανάμεσα στα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να είναι προκαθορισμένο, ώστε η δημιουργούμενη βηματική τάση να είναι μικρότερη και από την τιμή ασφαλείας για το προσωπικό.
- Ο αγωγός καθόδου πρέπει να συνδέεται με το σύστημα γείωσης σε τέτοιο σημείο, ώστε να μειώνεται η αύξηση του δυναμικού του εδάφους, για παράδειγμα στο μέσω του συστήματος γείωσης.
- Για διαφορετικά στρώματα εδάφους, το σύστημα γείωσης πρέπει να τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εκμεταλλευτεί το τμήμα με τη χαμηλή ειδική αντίσταση του εδάφους για να μειώσει την αύξηση του δυναμικού του εδάφους όσο το δυνατόν περισσότερο.
- Στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης του κόστους είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη ο λόγος του μήκους προς το εμβαδό, αναζητώντας τον αποτελεσματικότερο δυνατό.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβατική συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης είναι [8]:

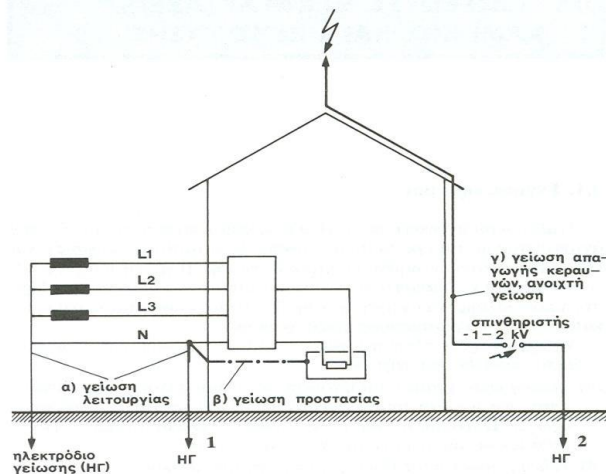
- Σχήμα και διαστάσεις του συστήματος γείωσης
- Ειδική αντίσταση του εδάφους που περιβάλλει το σύστημα γείωσης
- Ανάπτυξη ιονισμού του εδάφους ή όχι
- Σημείο έγχυσης του ρεύματος
- Κυματομορφή του ρεύματος που εγχέεται.

2.1.1. Είδη γείωσης

Οι γειώσεις ανάλογα με το ρόλο τους διακρίνονται στα παρακάτω τρία είδη:

- **Γείωση λειτουργίας:** Είναι η γείωση ενός τμήματος εγκατάστασης που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας, όπως είναι ο ουδέτερος κόμβος γεννητριών, μετασχηματιστών ή άλλων στοιχείων του δικτύου συνδεδεμένων σε αστέρα. Η γείωση λειτουργίας εκτός της αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης μπορεί να περιλαμβάνει και πρόσθετες ωμικές, επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις (π.χ. αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά τα σφάλματα με επαφή γης). Τα υλικά κατασκευής της θα πρέπει να εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια συνεχή λειτουργία της, την ασφαλή διέλευση ενδεχόμενου ρεύματος σφάλματος προς τη γη, την αντοχή της σε διάβρωση και σε μηχανικές καταπονήσεις. Διακρίνεται σε:

- *Άμεση*, όταν δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης.
 - *Έμμεση*, όταν εκτός της αντίστασης γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.
- **Γείωση προστασίας:** Είναι η γείωση ενός αγωγίμου τμήματος της εγκατάστασης που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας για την προστασία ανθρώπων έναντι επικίνδυνων τάσεων επαφής. Η γείωση προστασίας γίνεται είτε με τη λεγόμενη άμεση γείωση, είτε με ουδετέρωση.
- *Άμεση γείωση:* Με απευθείας αγωγίμη σύνδεση στο σύστημα γείωσης (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, πλέγμα, κλπ)
 - *Ουδετέρωση:* Η αγωγίμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό ή άλλο γειωμένο αγωγό φάσης δικτύου.
- **Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας:** Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον περιβάλλοντα χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση αντικεραυνικής προστασίας είναι ανοιχτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα τρία είδη γείωσης, όπως μπορούν να είναι τοποθετημένα στο χώρο μιας οικίας.

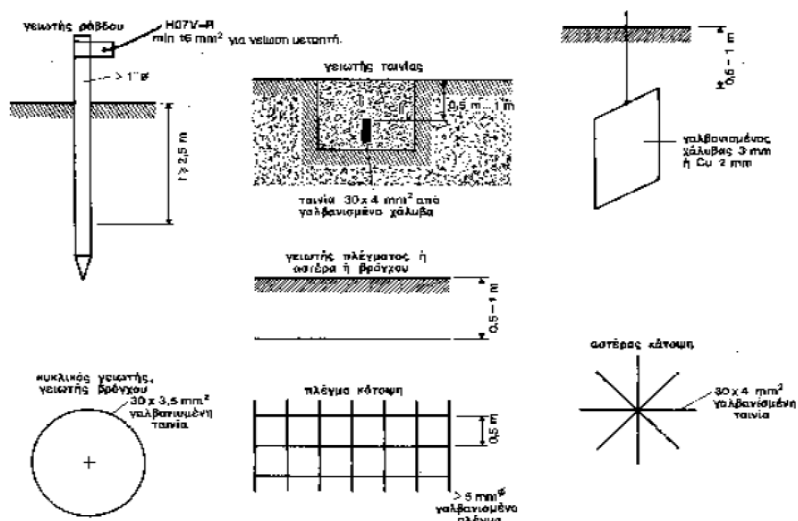


Εικόνα 2.1: Τα τρία είδη γείωσης σε μια κατοικία [7]

2.1.2. Είδη ηλεκτροδίων γείωσης

Τα *ηλεκτρόδια γείωσης* είναι αγωγοί οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο έδαφος προκειμένου να εξασφαλίσουν την καλύτερη δυνατή επαφή με τη γη για την αποτελεσματικότερη διάχυση των ρευμάτων που παρουσιάζονται μετά από κάποιο σφάλμα.

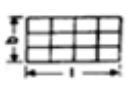
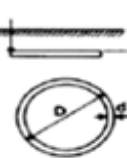
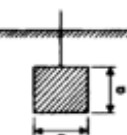
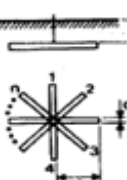

Τα κυριότερα είδη των γειωτών παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 2.2: Κυριότερα είδη γειωτών [10]

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αντιστάσεις που δίνουν τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια γείωσης.

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}^*$	$R_A \approx \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασάλων $\alpha \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{\alpha}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1.2$ R_{A1} = αντίσταση ενός πασάλου	$K = (1 \dots 1.5)$ για $n = 10 : k \approx 1.25$
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right)$	$R_A \approx \frac{2 \cdot \rho}{l}$
	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S}$		$R_A = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\rho}{D}$

	Πλέγμα σε βάθος 0,5 -1,0 m $D = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot l}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot d} + \frac{\rho}{l \cdot g}$ $l \cdot g = \text{συνολικό μήκος αγωγού}$	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot D}$
	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{8 \cdot D}{d}$ $\cdot \left(1 + \frac{\ln \frac{2 \cdot D}{r}}{\ln \frac{8 \cdot D}{d}} \right)$	$R = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot D}^{***}$
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m ²]		$R = \frac{\rho}{4,5 \cdot \alpha}^{****}$
	n=2 n=3 n=4 n=5	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0,27 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0,25 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0,22 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0,09 \cdot t \cdot d} \right)$	
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi \cdot D}^{*****}$	
<p>* Όπου εμφανίζεται το πάχος του αγωγού d, αυτό είναι το ισοδύναμο πάχος</p> $d = \sqrt{4 \cdot \frac{A}{\pi}}$, όπου A η διατομή του αγωγού. <p>** Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος $D = 0,33 \cdot U$, U το μήκος αγωγού.</p> <p>*** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S η επιφάνεια.</p> <p>**** Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V}$.</p>			

Πίνακες 2.1-2.2: Είδη γειωτών και τύποι των αντιστάσεων για καθένα απ' αυτούς [7]

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε περιληπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά από τους παραπάνω γειωτές.

➤ Γειωτής ράβδου

Αυτός ο γειωτής είναι ένας σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μίας ίντσας ή μια ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, π.χ. U,L,T ή I προφίλ. Η ράβδος καρφώνεται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20° ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος) σε βάθος, π.χ. 2,5 m με σφυρί χεριού ή με μηχανικό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Το άνω μέρος τοποθετείται συνήθως σε φρεάτιο έτσι ώστε το σημείο σύνδεσης της με τον αγωγό γείωσης να είναι επισκέψιμο. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους και δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή την διάμετρο της ράβδου. Εφόσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιχαλκωμένου η επιμολυβδωμένου χάλυβα, γιατί αντέχουν στη διάβρωση.

➤ Γειωτής ταινίας

Ταινία ή συρματόσχοινο, τοποθετείται σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 0,5m. Το βάθος που προτιμάται είναι 0,7-1 m, για να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιμολυβδωμένος ή επιχαλκωμένος διαστάσεων 40x4 mm². Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμη ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η τελευταία γείωση λέγεται γειωτής βρόγχου. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους και ισχύουν οι τύποι των Πινάκων 2.1-2.2. Για το ίδιο μήκος ταινίας ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Μια περίπτωση γειωτή ταινίας είναι η θεμελιακή γείωση. Δεν συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης γιατί διαβρώνεται σχετικά γρήγορα. Χάλκινα η επιχαλκωμένα ηλεκτρόδια γενικά αποφεύγονται όπου στην περιοχή υπάρχουν χαλύβδινοι σωλήνες διότι προκαλούνται διαβρώσεις.

➤ Γειωτής πλάκας

Πλάκα μορφής παραλληλογράμμου, π.χ. 0,5 x 0,5m² , ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνεια της κατακόρυφη. Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1,0m. Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις της πλάκας και όσο βαθύτερα τοποθετείται στο έδαφος. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι γαλβανισμένος, επιχαλκωμένος η επιμολυβδωμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3mm ή χαλκός η μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2mm.

➤ Γειωτής ακτινικός

Ταινίες ή ράβδοι διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες (Πίνακας 2.1). Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0,8 m. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια, όπως στον γειωτή ταινίας.

➤ Γειωτής πλέγματος

Πλέγμα από ταινίες ή αγωγός κυκλικής ή άλλης διατομής με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 0,7-2,0m τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0,5-1,0m (Πίνακας 2.2). Τα ελάχιστα πάχη είναι όπως στους γειωτές ταινίας. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα είναι αμελητέες. Προφανώς, ανοίγματα μεγαλύτερα από 0,7m έχουν μεγαλύτερες βηματικές τάσεις από ότι πλέγματα με ανοίγματα 0,5m.

➤ Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής

Επιτρέπεται χωρίς ιδιαίτερη άδεια, η χρησιμοποίηση μεταλλικών δικτύων ύδρευσης ως γειωτών για εγκαταστάσεις με τάσεις ως προς γη μικρότερες των 250V, εφόσον υπάρχει απλή συγκατάθεση του οργανισμού ύδρευσης. Πάνω από αυτές τις τάσεις χρειάζεται ειδική άδεια από τον οργανισμό ύδρευσης. Η γραμμή γείωσης συνδέεται κατά προτίμηση πριν από τον μετρητή. Αν η σύνδεση γίνει μετά τον μετρητή, πρέπει να βραχυκυκλωθεί μονίμως ο μετρητής με χάλκινο σύρμα H03V-U και διατομή τουλάχιστον 6mm². Προσοχή πρέπει να δοθεί καθώς κατά VDE100 δεν επιτρέπεται η παράλληλη σύνδεση γειωτών από χαλκό με το δίκτυο ύδρευσης. Σχηματίζονται ηλεκτροχημικά στοιχεία με αποτέλεσμα τη διάβρωση του σιδήρου.

➤ Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές

Γίνεται διάκριση στους γειωτές ανάλογα με το βάθος τους σε:

- Επιφανειακούς γειωτές, π.χ. γειωτές ταινίας, πλέγματος και ακτινικούς γειωτές
- Βαθείς γειωτές, π.χ. γειωτές ράβδου.

Στους βαθείς γειωτές η αντίσταση μεταβάλλεται λιγότερο με τον χρόνο από ότι στους επιφανειακούς, επειδή η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους δεν μεταβάλλονται πολύ σε μεγάλα βάθη.

➤ Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης

Στη μέση και χαμηλή τάση οι διατομές που προσδιορίζονται από το ρεύμα είναι ασημαντες. Πολύ περισσότερο παίζει ρόλο η στιβαρότητα του αγωγού. Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης που βγαίνει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά και μάλιστα 30cm μέσα και 30cm έξω από το έδαφος. Οι συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης γίνονται σε γειώσεις ουδετέρου με χάλκινο μονόκλωνο αγωγό (Cu), ελάχιστης διατομής ίσης με την διατομή του ουδετέρου, όχι όμως μικρότερη των 16 mm² (H07V-U). Σε εγκαταστάσεις αλεξικέραυνου η ελάχιστη διατομή για τον χαλκό είναι 50 mm². Η σύνδεση του ουδετέρου του μετασχηματιστή με το γειωτή γίνεται με καλώδια H07-R (πριν ΝΥΑ) 25mm² τουλάχιστον.

➤ Θεμελιακή γείωση

Η θεμελιακή γείωση είναι ένας γειωτής ταινίας που τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Η τοποθέτηση γίνεται στη βάση των εξωτερικών τοίχων και είναι ένας κλειστός βρόχος. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι υγρό όλο το έτος συνήθως, ο θεμελιακός γειωτής έχει σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τιμές των 2Ω ή μικρότερες δεν είναι σπάνιες, ενώ σε συνήθεις πασσαλογειωτές έχουμε περί τα 30Ω .

Η θεμελιακή γείωση έναντι των συμβατικών τύπων γείωσης παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης.
- Αντοχή στο χρόνο-Μηχανική προστασία
- Αναμονές γείωσης σε οποιοδήποτε σημείο του εσωτερικού κτιρίου.
- Η εγκατάστασή της γίνεται σε ήδη υπάρχουσα εκσκαφή με αποτέλεσμα την ευκολία τοποθέτησης.

Για αυτούς τους λόγους η εγκατάσταση της θεμελιακής γείωσης επιβάλλεται από τους κανονισμούς HD384 και προτείνεται από το Κ.Ε.Η.Ε. για κάθε νεοαναγειρόμενο κτίριο.

2.2. Αντίσταση γείωσης

Αντίσταση γείωσης είναι η αντίσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος [7]. Άπειρη γη είναι ένα σημείο στην επιφάνεια σε άπειρη απόσταση από το γειωτή. Λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών και λέμε ότι η τάση της άπειρης γης είναι μηδέν. Αν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση U (100%) ως προς την άπειρη γη, δημιουργείται ένα πεδίο ροής και δυναμικού γύρω από το γειωτή. Όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από το γειωτή, τόσο μειώνεται η τάση. Το διάγραμμα τάσης-απόστασης ονομάζεται χοάνη δυναμικού του γειωτή.

Από τη χοάνη δυναμικού μπορεί κανείς να διαπιστώσει την τάση επαφής και την βηματική τάση. Η τάση επαφής είναι ίση με την πτώση τάσης σε απόσταση 1m από το γειωτή. Η βηματική τάση είναι η μέγιστη πτώση τάσης σε μήκος 1m κατά μήκος του πεδίου ροής του ρεύματος, στην περιοχή του εδάφους που μας ενδιαφέρει.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η χοάνη δυναμικού δεν εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους, εφόσον φυσικά το έδαφος είναι ομοιογενές. Εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του γειωτή. Η χοάνη δυναμικού χρησιμοποιείται επίσης για να εκτιμήσουμε το σφάλμα στη μέτρηση της αντίστασης των γειωτών.

2.2.1. Ειδική αντίσταση του εδάφους

Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων. Υπάρχουν εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίσταση του, ρ , μετρούμενη συνήθως σε $\Omega \cdot m$. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική, περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [7].

Η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ($CaCl_2$), θειικός χαλκός ($CuSO_4$), ή θειικό μαγνήσιο ($MgSO_4$) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Η επίδραση των διακυμάνσεων αυτών στην αποτελεσματικότητα της γείωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες [10]:

- **Είδος του εδάφους**

Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται ενδεικτικά οι ειδικές αντιστάσεις ορισμένων εδαφών. Στο Διάγραμμα 2.1 φαίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε αλάτι με υγρασία 30% στην ειδική αντίσταση του εδάφους.

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ρ ($\Omega \cdot m$)
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες η αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

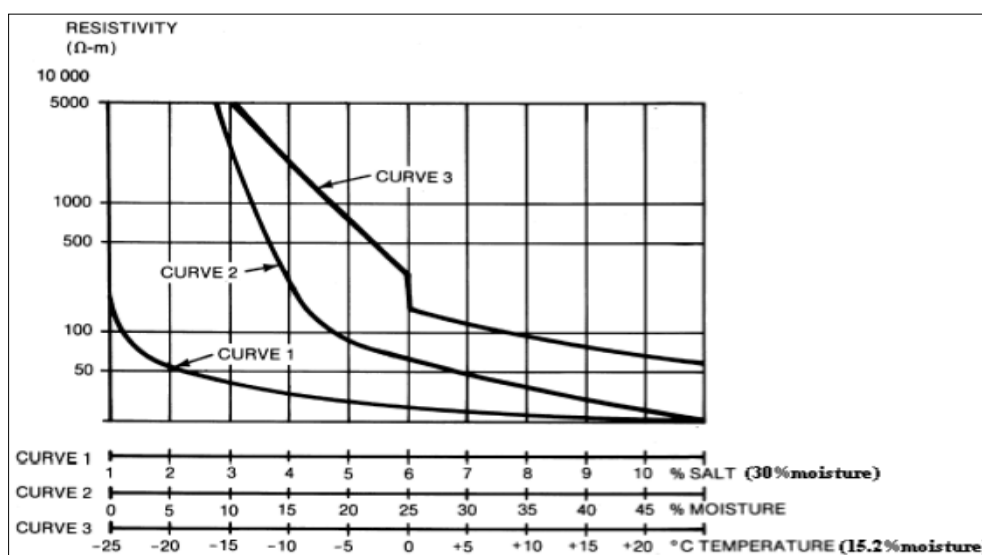
Πίνακας 2.3: Ειδικές αντιστάσεις διαφόρων τύπων εδάφους [7]

- **Υγρασία**

Η αντίσταση μειώνεται όσο αυξάνεται η υγρασία του εδάφους. Εδώ πρέπει να παρατηρηθεί ότι το έδαφος ξηραίνεται επιφανειακά, αλλά σε βάθος κάτω του μισού μέτρου (0,5 m) διατηρείται συνήθως υγρό, σε όλες τις εποχές του έτους. Έτσι, σε γειωτές ράβδων πασσαλωμένων λαμβάνεται σαν ενεργό μήκος αυτό που είναι κάτω από 0,5m. Για τον ίδιο λόγο τοποθετούμε τους γειωτές ταινίας σε βάθη μεγαλύτερα από 0,5m. Στο Διάγραμμα 2.1 φαίνεται η επίδραση της υγρασίας στη ειδική αντίσταση. Επίσης, έχει μετρηθεί ότι η επίδραση της υγρασίας και της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μεγαλύτερη σε μικρά βάθη (0,5-1m). Έτσι, ο γειωτής ράβδου που φτάνει σε μεγάλο βάθος, σε σύγκριση με ένα επιφανειακό γειωτή, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της σταθερότητας της αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους.

- **Θερμοκρασία**

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης το εδάφους λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας φθάνει περίπου στο 130% κατά τη διάρκεια του έτους. Από τον Ιανουάριο ως τον Φεβρουάριο είναι υψηλότερη και από τον Ιούλιο ως τον Αύγουστο χαμηλότερη. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο Διάγραμμα 2.1 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους με υγρασία 15,2%. Παρατηρούμε ότι η επίδραση αυτή γίνεται αρκετά έντονη για θερμοκρασίες υπό του μηδενός.



Διάγραμμα 2.1: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει θερμοκρασίας, υγρασίας, αλατινότητας [10]

- **Μορφή της τάσης**

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0,3/30 μs, η αντίσταση του θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από τα 3 Ω στα 26 Ω. Η άνοδος της

αντίστασης γίνεται στο μέτωπο τάσης. Η αντίσταση υπό κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση.

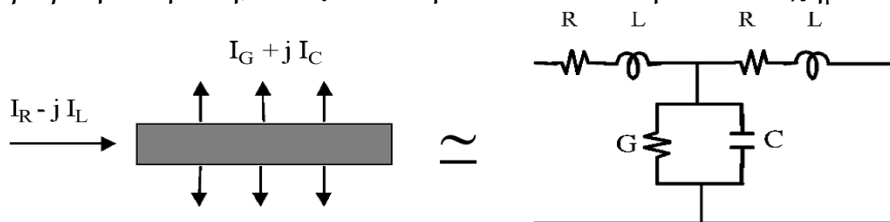
- **Ηλεκτρικό ρεύμα**

Η ειδική αντίσταση στην περιοχή των ηλεκτροδίων γείωσης επηρεάζεται από την ροή ρεύματος από τα ηλεκτρόδια προς το περιβάλλον έδαφος. Η επίδραση αυτή εξαρτάται από το ποσό υγρασίας στο έδαφος και τη θερμοκρασία του, καθώς και το μέγεθος και τη διάρκεια της ροής ρεύματος που προκαλεί ξήρανση του εδάφους και επομένως αύξηση της αντίστασής του. Ανεκτό όριο για την πυκνότητα ρεύματος είναι τα 200 A/m^2 με διάρκεια 1s.

2.3. Μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης

Ένα σύστημα γείωσης αποτελείται από τρία μέρη: 1) τους μεταλλικούς αγωγούς που συνδέουν το σύστημα με τα ηλεκτρόδια, 2) τα ηλεκτρόδια, και 3) το υλικό που περιβάλλει τα ηλεκτρόδια (έδαφος, γη/νερό).

Κάθε απόληξη στη γη που διαρρέεται από ρεύμα παρουσιάζει ωμική, χωρητική και επαγωγική επίδραση, όπως αναπαρίσταται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.3: Οι συνιστώσες του ρεύματος στο ηλεκτρόδιο και το έδαφος [11]

Το ρεύμα όπως βλέπουμε αρχικά περιγράφεται με δύο συνιστώσες: το εγκάρσιο ρεύμα διαρροής I_T που διαχέεται μέσα στο έδαφος και το διαμήκες ρεύμα I_L 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. Από την άλλη, το ρεύμα διαρροής εγκαθιστά ένα ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος και το οποίο καθορίζει τα χωρητικά και τα αγωγιμα ρεύματα που το διαρρέουν [11].

2.3.1 Το φαινόμενο ιονισμού του εδάφους

Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να συμβεί όταν το ηλεκτρικό πεδίο σε συνεργασία με την πλευρική επιφάνεια των ηλεκτροδίων γείωσης, ξεπεράσει το πεδίο ιονισμού του εδάφους [9]. Σε αυτήν την περίπτωση γύρω από το σημείο εγχύσεως του ρεύματος (δηλαδή, όπου είναι πιθανότερο να υπάρχει υψηλότερο

ηλεκτρικό πεδίο), τοπικές εγκάρσιες εκφορτίσεις ξεκινούν από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων και σταματούν στα σημεία στα οποία το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται κάτω από την κρίσιμη αντοχή ιονισμού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.4: Το φαινόμενο ιονισμού του εδάφους [9]

Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει την απόκριση των συστημάτων γείωσης. Έτσι, όταν υψηλά ρεύματα οδηγούνται στη γη, η προσομοίωση του ιονισμού του εδάφους πρέπει να είναι ένα θεμελιώδες τμήμα σε κάθε μοντέλο που έχει το χαρακτηρισμό του συστήματος γείωσης σε μεταβατικές συνθήκες.

Το φαινόμενο του ιονισμού δημιουργεί μη γραμμική συμπεριφορά στα συστήματα γείωσης, η οποία δεν είναι πλήρως κατανοητή εξαιτίας της εξαιρετικά σύνθετης διεργασίας, παρόλ' αυτά μερικές προσεγγίσεις συνήθως υιοθετούνται όταν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους συμπεριλαμβάνεται.

2.3.1.1. Μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους

Όπως είναι γνωστό, το έδαφος σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιόμορφα αγωγιμα σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει αέρας και νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα. Στο νερό και τα διαλυμένα σε αυτό άλατα οφείλεται κατά κύριο λόγο η αγωγιμότητα του εδάφους. Όπως είναι κατανοητό, στην περίπτωση μας, όπου το σύστημα γείωσης βρίσκεται σε υδάτινο περιβάλλον, το έδαφος είναι στην ουσία το θαλασσινό νερό και θα εννοείται στη συνέχεια κάθε φορά που αναφερόμαστε με τη λέξη «έδαφος» [9].

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 ο ιονισμός του εδάφους. Πειραματικά αποτελέσματα των Oettle, Petropoulos και Liew et al. υποστηρίζουν το μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω του ιονισμού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο θερμικός μηχανισμός βασίζεται κυρίως σε απλουστευτικές θεωρήσεις και ότι επικρατούσα διαδικασία θεωρείται ο ιονισμός, θα επικεντρωθούμε παρακάτω στην παρουσίαση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους.

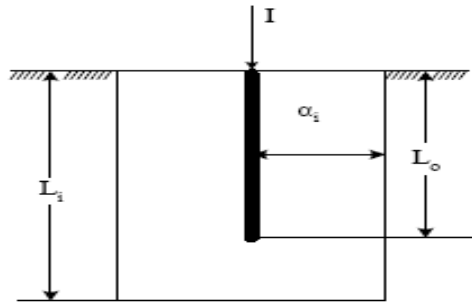
Ο μηχανισμός του ιονισμού του εδάφους που προτάθηκε από τους Leadon et al είναι μια ηλεκτρική διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα, όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους. Μάλιστα, λόγω της ανομοιομορφίας των κόκκων, η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης, που προκαλεί διάσπαση του εδάφους, είναι μικρότερη από την τιμή που απαιτείται για διάσπαση ενός διακένου αέρα αντίστοιχων διαστάσεων. Με τη βοήθεια πειραμάτων, οι Flanagan et al. υπολόγισαν την κρίσιμη τιμή της έντασης στα 10-20kV/cm [9].

2.3.1.2. Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους [9].

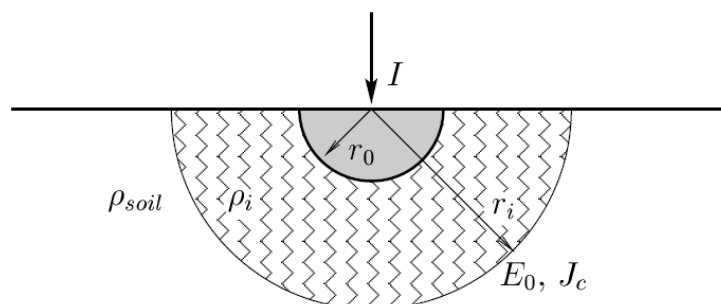
Οι Bellaschi et al. και ο Petropoulos θεώρησαν ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου. Με άλλα λόγια, μοντελοποίησαν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων. Ο Bellaschi απέδωσε τη μείωση της μεταβατικής τιμής της αντίστασης με την αύξηση του επιβαλλόμενου κρουστικού ρεύματος στη βραχυκύκλωση μέσω τόξων της αντίστασης επαφής μεταξύ των αγωγίμων συστατικών του εδάφους στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Έτσι, καθώς η εφαρμοζόμενη στο ηλεκτρόδιο γείωσης τάση αυξάνεται, η τιμή της αντίστασης του παραμένει σταθερή μέχρις ότου η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Τότε εμφανίζονται εκκενώσεις και η αντίσταση μειώνεται.

Σε άλλη εργασία τους, ο Bellaschi και οι συνεργάτες του έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή της ζώνης ιονισμού, σύμφωνα με τους Bellaschi et al. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκενώσεων και, κατ' επέκταση, τη μείωση της αντίστασης.



Εικόνα 2.5. Μοντέλο Bellaschi [9]

Ο Γ. Μ. Πετρόπουλος 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. Η αντίσταση των συνηθισμένων γειώσεων μειώνεται κατά το 1/5 περίπου υπό την επίδραση κρουστικών ρευμάτων της τάξης των 10kA. Σε περιπτώσεις όπου άλλα αγωγίμα σώματα υπάρχουν κοντά στα ηλεκτρόδια γείωσης, τότε η αντίσταση γείωσης μειώνεται ακόμα περισσότερο. Η μείωση αυτή της αντίστασης αποδίδεται σε ηλεκτρικές εκκενώσεις, οι οποίες βραχυκυκλώνουν τη σχετικά υψηλή αντίσταση μεταξύ των αγωγίμων τμημάτων του εδάφους καταλαμβάνοντας ένα χώρο στον οποίο η αγωγιμότητα γίνεται πολύ μεγαλύτερη απ' ό τι στο υπόλοιπο έδαφος. Τότε το ηλεκτρόδιο εμφανίζεται σαν να έχει αυξημένες διαστάσεις και συνεπώς παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση ως προς τη γη. Στα πειράματα, που διεξήγαγε, χρησιμοποίησε ημισφαιρικό δοχείο από άνθρακα γεμάτο με χώμα. Στο κέντρο του τοποθέτησε το σφαιρικό ηλεκτρόδιο. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκενώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης ένα συγκεκριμένο χώρο εκκενώσεων για κάθε τάση, διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο χώμα με μία ημισφαιρική επιφάνεια, η ακτίνα του οποίου εξαρτάται από την τιμή της τάσης [9]. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το μοντέλο των εκκενώσεων που πρότεινε ο Πετρόπουλος.



Εικόνα 2.6. Μοντέλο Πετρόπουλου [9]

Η αντίσταση μονίμου καταστάσεως του ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο:

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

όπου R_0 η αντίσταση μονίμου καταστάσεως σε Ω

r_0 η ακτίνα του ηλεκτροδίου σε m

ρ_{soil} η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot m$

Όταν επιβάλλεται κεραυνικό ρεύμα στο ηλεκτρόδιο τότε η πυκνότητα ρεύματος σε συγκεκριμένη ακτίνα από το ηλεκτρόδιο δίνεται από τον τύπο:

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

όπου J η πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2

I το επιβαλλόμενο ρεύμα σε A

r η απόσταση από το κέντρο του ημισφαιρίου του ηλεκτροδίου σε m

Το φαινόμενο του ιονισμού εκδηλώνεται όταν η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί μία κρίσιμη τιμή, E_c η οποία δίνεται από τον τύπο:

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

όπου J_c η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2

E_c η κρίσιμη ένταση ιονισμού σε V/m

ρ_{soil} η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot m$

Από τις δύο προηγούμενες εξισώσεις για τις πυκνότητες του ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της περιοχής ιονισμού, η οποία δίνεται από τον τύπο:

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

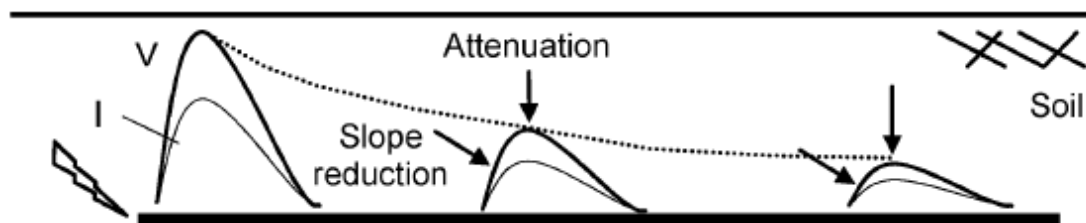
Βέβαια η ομοιομορφία του χώρου εκκενώσεων προϋποθέτει την ομοιογένεια του εδάφους, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πράξη. Ωστόσο, η μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης αποδίδεται και σε άλλους παράγοντες, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας που περιβάλλει τα ηλεκτρόδια, αφού μείωση της αντίστασης γείωσης παρατηρείται και όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι σχετικά μικρή, ώστε να μη συμβαίνουν εκκενώσεις.

Τέλος, σύμφωνα με τις έρευνες των Loboda et al., όταν ένα ηλεκτρόδιο διαρρέεται από ρεύμα τότε στο έδαφος γύρω από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου δημιουργείται μία ζώνη εκκενώσεων. Στη ζώνη αυτή, αρχικά, εκδηλώνονται σπινθήρες και καθώς η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται, δημιουργούνται

τόξα. Στην περιοχή, που εκδηλώνονται τα τόξα η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το ηλεκτρόδιο μαζί με τη γύρω απ' αυτό περιοχή ισοδυναμούν με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων (κυρίως αυξημένης διαμέτρου). Η ζώνη των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι εκείνη την περιοχή, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δεν προκαλεί διάσπαση του εδάφους.

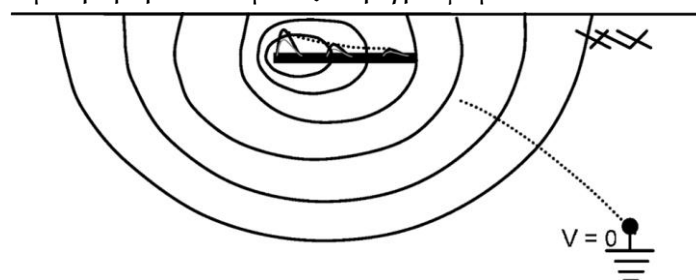
2.3.2. Ενεργό μήκος ηλεκτροδίου

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 (μείωση της κλίσης του μετώπου του κύματος κατά τη κατεύθυνση 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 [11].



Εικόνα 2.7: Απόσβεση κυματομορφών ρεύματος και τάσης κατά μήκος του ηλεκτροδίου [11]

Καθώς το μήκος των ηλεκτροδίων είναι περιορισμένο, αυτή η συμπεριφορά θα πρέπει να υπερτεθεί σε μια άλλη συμπεριφορά, αυτή του αποκλίνοντος πεδίου, εξαιτίας της ροής ρεύματος, από το ηλεκτρόδιο ως την απομακρυσμένη γη. Μάλιστα αυτή η συμπεριφορά είναι και η κυρίαρχη στα συγκεντρωμένα ηλεκτρόδια. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συγκεκριμένη αποκλίνουσα συμπεριφορά που μόλις περιγράψαμε.



Εικόνα 2.8: Αναπαράσταση της αποκλίνουσας συμπεριφοράς του πεδίου [11]

Σαν συνέπεια της απόσβεσης, η διάχυση του ρεύματος στο έδαφος κατά μήκος του ηλεκτροδίου παρουσιάζει έναν ανομοιόμορφο χαρακτήρα. 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). Το ενεργό μήκος εκφράζει ένα όριο στο μήκος του ηλεκτροδίου πέρα από το οποίο δεν καθίσταται δυνατή η μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης. Επομένως, ενώ είναι δυνατή η επέκταση του μήκους του ηλεκτροδίου, δεν έχει κάποιο αντίκρυσμα, καθώς για ρεύματα υψηλών συχνοτήτων, η συνιστώσα του ρεύματος που διαχέεται στο έδαφος είναι πλέον αμελητέα. Το ενεργό μήκος (*efficient 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 τις αυξανόμενες απώλειες ενέργειας και συνεπώς για την απόσβεση 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 [11]:

$$\lambda = \alpha + j\beta = [(R + j\omega L)(G + j\omega C)]^{1/2} \quad (2.5)$$

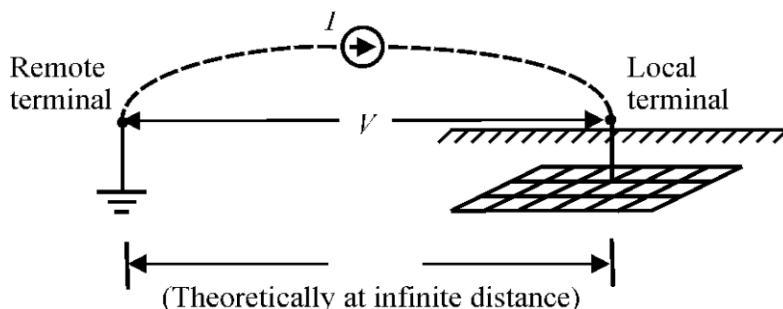
και όπως βλέπουμε αυξάνει με τη συχνότητα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στην παραπάνω σχέση είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του εδάφους.

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

2.3.3. Προσδιορισμός αντίστασης γείωσης σε κεραυνικό πλήγμα

Κάθετα και οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης χρησιμοποιούνται παραδοσιακά σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, για να κατευθύνουν το κεραυνικό ρεύμα από τους καθοδικούς αγωγούς στη γη ή στο νερό με μία ελάχιστη αύξηση του δυναμικού του υπέργειου/υπερθαλάσσιου μέρους του συστήματος προστασίας. Τα κριτήρια ασφαλείας τα οποία βασίζονται σε αυτή την ελάχιστη αύξηση του δυναμικού λαμβάνονται από την ανάλυση συστημάτων ισχύος. Ωστόσο, σε μια τέτοια περίπτωση, η συνήθης dc προσέγγιση οδηγεί σε αρκετά άμεσους υπολογισμούς. Έστω ότι έχουμε ένα θεωρητικό κύκλωμα για την εκτίμηση της τάσης που το υπέργειο μέρος του συστήματος προστασίας επιτυγχάνει 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, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [12].



Εικόνα 2.9: Θεωρητικό κύκλωμα για εκτίμηση της αντίστασης DC γείωσης [12]

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 [12]:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.6)$$

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. Η δυναμική απόκριση των ηλεκτροδίων γείωσης που υπόκεινται σε τέτοιους ηλεκτρικούς παλμούς επηρεάζεται κατ' εξοχήν από δύο φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται με τις ιδιότητες των κυματομορφών των παλμών αυτών [12]:

- 1) Ο ιονισμός του εδάφους/νερού που βρίσκεται γύρω από το ηλεκτρόδιο και που έχει να κάνει με την ένταση του ηλεκτρικού παλμού. Πρόκειται για μια συμπεριφορά του εδάφους που εξαρτάται από το χρόνο και έχει μη γραμμικό χαρακτήρα.
- 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.

Στην περίπτωση παλμού με υψηλή τιμή μέγιστου, το ηλεκτρικό πεδίο στα ηλεκτρόδια γείωσης μπορεί να γίνει μεγαλύτερο από την ηλεκτρική αντοχή του εδάφους, οδηγώντας σε διασπάσεις και σπινθηρισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης γείωσης, μεγεθύνοντας το μέγεθος του ηλεκτροδίου

(στην ουσία επεκτείνοντας την επίδρασή του), και συνεπώς βελτιώνοντας την επίδοση της γείωσης σε σχέση με τις περιπτώσεις χαμηλών ρευμάτων.

Από την άλλη, όταν ηλεκτρικοί παλμοί με μικρούς χρόνους μετώπου εγχέονται στο ηλεκτρόδιο, λόγω της περιορισμένης ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρικού παλμού κατά μήκος του 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 και η επίδοση της γείωσης μπορεί να χειροτερεύσει σε σχέση με τις περιπτώσεις χαμηλών ρευμάτων.

Μελετώντας τη διάδοση των δυναμικών κατά μήκος του ηλεκτροδίου στο ένα άκρο του οποίου εγχέεται ένας κρουστικός ηλεκτρικός παλμός, θα μπορέσουμε να διακρίνουμε δύο περιόδους [12]:

- 1) η «κρουστική» περίοδος -πριν ο παλμός φτάσει στο άλλο άκρο του ηλεκτροδίου, όπου μόνο ένα μέρος του ηλεκτροδίου συνεισφέρει αποτελεσματικά στην εκφόρτιση του ρεύματος στη γη, με χαρακτηριστικά τις μεγάλες τιμές και την ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού, και
- 2) η περίοδος μόνιμης κατάστασης -αμέσως αφ' ότου ο παλμός φτάνει στο άλλο άκρο του ηλεκτροδίου, όπου ολόκληρο το ηλεκτρόδιο συνεισφέρει αποτελεσματικά στην εκφόρτιση του ρεύματος στη γη, με χαρακτηριστικό την ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού.

Γι' αυτούς τους λόγους, οι προσπάθειες για μοντελοποίηση της δυναμικής επίδοσης των ηλεκτροδίων γείωσης σε συνθήκες ηλεκτρικής εκκένωσης θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τόσο τον ιονισμό του εδάφους (ή του νερού αντιστοίχως), όσο και τα φαινόμενα της διάδοσης (ενεργό μήκος). Οι περισσότερες υπάρχουσες μέθοδοι για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης συνήθως αναλύουν ξεχωριστά την επίδραση των δύο προαναφερθέντων παραγόντων. Στην εργασία μας ωστόσο θα προσπαθήσουμε να συμπεριλάβουμε ταυτόχρονα και τις δύο επιδράσεις για τον υπολογισμό της κρουστικής αντίστασης γείωσης.

2.4. Εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης για τον υπολογισμό της μεταβατικής αντίστασης γείωσης

Καταρχάς, ξεκινάμε από τον ορισμό της μεταβατικής αντίστασης γείωσης. Χρησιμοποιείται για την κρουστική αντίσταση ο ορισμός [13]:

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.7)$$

όπου V_m είναι η μέγιστη τιμή τάσης, I_m η μέγιστη τιμή ρεύματος. Η μεταβατική αντίσταση Z συνδέεται με την αντίσταση γείωσης χαμηλής συχνότητας R μέσω του αδιάστατου κρουστικού συντελεστή A [13]:

$$A = \frac{Z}{R} \quad (2.8)$$

Σε συνθήκες ρευμάτων χαμηλής συχνότητας και χαμηλής έντασης, ισχύει $Z = R$, δηλαδή $A = 1$. Γίνεται κατανοητό ότι για τιμές του A μεγαλύτερες της μονάδας έχουμε χειρότερη κρουστική επίδοση, ενώ για τιμές μικρότερες της μονάδας έχουμε βελτιωμένη κρουστική επίδοση σε σχέση με την επίδοση της γείωσης σε χαμηλές συχνότητες [13].

Όπως έχουμε σημειώσει, υπάρχουν διάφοροι τύποι και γεωμετρίες ηλεκτροδίων. Μερικές από αυτές είναι το **οριζόντιο ηλεκτρόδιο**, το **κατακόρυφο ηλεκτρόδιο** και η **ταινία γείωσης**. Στη συνέχεια, για τις γεωμετρίες αυτές θα επιχειρήσουμε να εφαρμόσουμε το Θεώρημα Π (όπως είχαμε περιγράψει σε προηγούμενο κεφάλαιο) για την εύρεση των λόγων κλίμακας των φυσικών μεγεθών που αφορούν στα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα, εκμεταλλευόμενοι τις σχέσεις που μας έχουν δοθεί για καθεμία από αυτές. Έτσι έχουμε:

2.4.1. Για το οριζόντιο ηλεκτρόδιο γείωσης

Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας, χαμηλής έντασης ρεύματος, ο τύπος που μας δίνει την αντίσταση γείωσης R σύμφωνα με τον Sunde είναι [12]:

$$R \text{ (σε } \Omega) = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

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

Έτσι γνωρίζουμε από ποιες μεταβλητές εξαρτάται η αντίσταση γείωσης R . Η μεταβατική αντίσταση γείωσης Z όμως, όπως είδαμε προηγουμένως, εξαρτάται και από τον κρουστικό συντελεστή A . Έπειτα από μια σειρά υπολογισμών και προσεγγίσεων μπορεί να υιοθετηθεί ένας τύπος που δίνει τον κρουστικό

συντελεστή A_i λαμβάνοντας υπόψιν τόσο το φαινόμενο του ιονισμού, όσο και την επίδραση του ενεργού μήκους [13]:

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

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. Η τιμή του A είναι [13]:

$$A = 1 \quad \text{για } (l \leq l_{eff}) \quad (2.11)$$

$$A = b_1 l + b_2 \quad \text{για } (l > l_{eff}) \quad (2.12)$$

όπου $l_{eff} = \frac{1-b_2}{b_1}$ είναι το ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου (σε m), ενώ οι b_1 και b_2 είναι συντελεστές που δεν έχουν καμία φυσική σημασία (προέκυψαν από αποτελέσματα προσομοίωσης σε υπολογιστή), αλλά είναι συναρτήσεις των ρ και T_1 (χρόνος ανόδου κυματομορφής ρεύματος σε sec).

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραπάνω σχέσεις συμπεραίνουμε ότι η μεταβατική αντίσταση Z μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση ως εξής:

$$Z = f(a, d, l, \rho, I_m, E_0, T_1) \quad (2.13)$$

Αυτός ο φυσικός νόμος, που συνδέει τα 8 φυσικά μεγέθη που εμπλέκονται στην παραπάνω συνάρτηση, είναι η βάση πάνω στην οποία θα εφαρμόσουμε το Θεώρημα Π.

Τα μεγέθη $a, d, l, \rho, I_m, E_0, T_1$ είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβληματός μας, 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 απ'όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα, αυτά είναι τα μόνα θεμελιώδη.

Συνεπώς, οι διαστάσεις των φυσικών μεγεθών είναι:

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

Συνεπώς 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 βρεθούν 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. Ακολουθώντας, θα υπολογίσουμε την παράμετρο για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.

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

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

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

$$\text{Οπότε: } \Pi_1 = Z \cdot \rho^{-1} \cdot l^1 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \quad (2.14)$$

➤ 2^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος α)

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

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

$$\text{Οπότε: } \Pi_2 = \alpha \cdot l^{-1} = \frac{\alpha}{l} \quad (2.15)$$

➤ 3^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος \mathbf{d})

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

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

$$\text{Οπότε: } \mathbf{\Pi}_3 = \mathbf{d} \cdot \mathbf{l}^{-1} = \frac{\mathbf{d}}{l} \quad (2.16)$$

➤ 4^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος \mathbf{E}_0)

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

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

$$\text{Οπότε: } \mathbf{\Pi}_4 = \mathbf{E}_0 \cdot \boldsymbol{\rho}^{-1} \cdot \mathbf{I}_m^{-1} \cdot \mathbf{l}^2 = \frac{\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{l}^2}{\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{I}_m} \quad (2.17)$$

2.4.2. Για το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο γείωσης

Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας, χαμηλής έντασης ρεύματος, ο τύπος που μας δίνει την αντίσταση γείωσης R σύμφωνα με τον Dwight είναι [12]:

$$R (\sigma \varepsilon \Omega) = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \left(\frac{4l}{a} \right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

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

Τελικά, συμπεραίνουμε ότι η μεταβατική αντίσταση Z μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση ως εξής:

$$Z = f(a, l, \rho, I_m, E_0, T_1) \quad (2.19)$$

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

Τα μεγέθη που εμφανίζονται σε αυτήν την περίπτωση έχουν ήδη αναλυθεί.

Συνεπώς 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 βρεθούν είναι:

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

Επιλέγουμε διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα την $[\rho, \mathbf{I}_m, \mathbf{l}, \mathbf{T}_1]$ μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ακολουθώντας, θα υπολογίσουμε την παράμετρο για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.

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

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

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

$$\text{Οπότε: } \Pi_1 = Z \cdot \rho^{-1} \cdot l^1 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \quad (2.20)$$

➤ 2^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος α)

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

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

$$\text{Οπότε: } \Pi_2 = \alpha \cdot l^{-1} = \frac{\alpha}{l} \quad (2.21)$$

➤ 3η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος E_0)

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

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

$$\text{Οπότε: } \mathbf{\Pi}_3 = \mathbf{E}_0 \cdot \rho^{-1} \cdot \mathbf{I}_m^{-1} \cdot \mathbf{l}^2 = \frac{E_0 \cdot \mathbf{l}^2}{\rho \cdot \mathbf{I}_m} \quad (2.22)$$

2.4.3. Για την ταινία γείωσης

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

$$R (\sigma \varepsilon \Omega) = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left(\frac{2l}{d} \right) \quad (2.23)$$

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

Τελικά, συμπεραίνουμε ότι η μεταβατική αντίσταση Z μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση ως εξής:

$$Z = f(d, l, \rho, \mathbf{I}_m, E_0, T_1) \quad (2.24)$$

Τα μεγέθη $d, l, \rho, \mathbf{I}_m, E_0, T_1$ είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλημάτος μας, ενώ η μεταβατική αντίσταση Z η εξαρτημένη μεταβλητή (συνολικά $r = 7$).

Τα μεγέθη που εμφανίζονται σε αυτήν την περίπτωση έχουν ήδη αναλυθεί.

$$\text{Συνεπώς η μήτρα των διαστάσεων είναι: } \begin{bmatrix} 1 & 2 & -3 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & -3 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

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

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

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

Επιλέγουμε διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα την $[\rho, \mathbf{I}_m, \mathbf{l}, \mathbf{T}_1]$ μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ακολούθως, θα υπολογίσουμε την παράμετρο για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.

➤ 1^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος \mathbf{Z})

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

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

$$\text{Οπότε: } \mathbf{\Pi}_1 = \mathbf{Z} \cdot \rho^{-1} \cdot \mathbf{l}^1 = \frac{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{l}}{\rho} \quad (2.25)$$

➤ 2^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος \mathbf{d})

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

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

$$\text{Οπότε: } \mathbf{\Pi}_2 = \mathbf{d} \cdot \mathbf{l}^{-1} = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{l}} \quad (2.26)$$

➤ 3^η Π παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος \mathbf{E}_0)

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

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

$$\text{Οπότε: } \mathbf{\Pi}_3 = \mathbf{E}_0 \cdot \rho^{-1} \cdot \mathbf{I}_m^{-1} \cdot \mathbf{l}^2 = \frac{\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{l}^2}{\rho \cdot \mathbf{I}_m} \quad (2.27)$$

2.4.4. Λόγοι κλίμακας για ηλεκτρόδια γείωσης

Από αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να εξάγουμε τους λόγους κλίμακας για τα φυσικά μεγέθη του προβλήματος. Γνωρίζουμε ότι οι παράμετροι αυτές είναι ίσες για το μοντέλο και το πρωτότυπο. Επομένως, σημειώνοντας με δείκτη M (model) τα μεγέθη που αντιστοιχούν στο **μοντέλο** και με F (full scale) αυτά που αντιστοιχούν στο **πρωτότυπο**, έχουμε:

$$\bullet \quad \Pi_{1F} = \Pi_{1M} \Rightarrow \frac{Z_F \cdot l_F}{\rho_F} = \frac{Z_M \cdot l_M}{\rho_M} \Rightarrow \frac{Z_F}{Z_M} = \frac{\rho_F}{\rho_M} \cdot \frac{l_M}{l_F} \Rightarrow \mathbf{K_Z} = \mathbf{K_\rho} \cdot \mathbf{K_l}^{-1} \quad (2.28)$$

$$\bullet \quad \Pi_{2F} = \Pi_{2M} \Rightarrow \frac{a_F}{l_F} = \frac{a_M}{l_M} \Rightarrow \frac{a_F}{a_M} = \frac{l_F}{l_M} \Rightarrow \mathbf{K_a} = \mathbf{K_l} = \mathbf{K_d} \quad (2.29)$$

$$\bullet \quad \Pi_{3F} = \Pi_{3M} \Rightarrow \frac{E_{0F} \cdot l_F^2}{\rho_F \cdot I_{mF}} = \frac{E_{0M} \cdot l_M^2}{\rho_M \cdot I_{mM}} \Rightarrow \frac{E_{0F}}{E_{0M}} \cdot \left(\frac{l_F}{l_M}\right)^2 = \frac{\rho_F}{\rho_M} \cdot \frac{I_{mF}}{I_{mM}} \Rightarrow \mathbf{K_{E_0}} \mathbf{K_l}^2 = \mathbf{K_\rho} \mathbf{K_{I_m}} \quad (2.30)$$

Έτσι προέκυψαν οι λόγοι κλίμακας για όλα τα μεγέθη που χρειαζόμαστε στο πείραμά μας.

Κεφάλαιο 3^ο

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

πειραμάτων υπό κλίμακα

3.1. Θεωρητική προσέγγιση

Το πρόβλημα του προσδιορισμού της μεταβατικής αντίστασης γείωσης και των υπόλοιπων μεταβλητών που αφορούν στα υπό κλίμακα πειράματα για την εξομοίωση κεραυνικού πλήγματος προσεγγίστηκε με την εφαρμογή των δύο μεθόδων της Θεωρίας της Ομοιότητας στις οποίες αναφερθήκαμε στα προηγούμενα κεφάλαια. Οι πρώτες προσπάθειες περιγραφής του παραπάνω προβλήματος έγιναν στα μέσα του 20^{ου} αιώνα από τον Bellaschi και τον Korsuncean, ωστόσο από τότε και μέχρι σήμερα αρκετοί είναι εκείνοι οι επιστήμονες και ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με αυτό. Οι περισσότερες διαφορές μεταξύ αυτών των μελετών παρατηρούνται στο μοντέλο ιονισμού του εδάφους που χρησιμοποιούν, οδηγούμενες έτσι σε διαφορετικά, αλλά παρόμοια μεταξύ τους αποτελέσματα. Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε σε ορισμένες από αυτές τις μελέτες και θα προσπαθήσουμε να διασταυρώσουμε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν, ώστε να έχουμε τελικά ένα μέτρο σύγκρισης και για τα δικά μας αποτελέσματα.

3.1.1. Γενικά

Οι πρώτοι ερευνητές που επιχείρησαν να μοντελοποιήσουν τη δυναμική εμπέδηση ενός ηλεκτροδίου ήταν ο Bellaschi μαζί με τους συνεργάτες του Armington και Snowden το 1942. Περιέγραψαν τη σύνθετη αντίσταση ενός ηλεκτροδίου σε όρους μιας ομοιόμορφης ζώνης ιονισμού, η οποία περικυκλώνει το ηλεκτρόδιο, οπότε υπερβαίνεται η κρίσιμη τιμή 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 συμπεριλαμβάνονται οι διαδικασίες εκφόρτισης και ιονισμού. Πάνω σε αυτήν τη βάση έχουν αναπτυχθεί εξισώσεις που περιγράφουν την κρουστική αντίσταση σφαιρικών ηλεκτροδίων και ηλεκτροδίων ράβδου και έχουν εισαχθεί νέες προτάσεις-βελτιώσεις για τις χρονικές σταθερές του φαινομένου του ιονισμού και του απιονισμού [14].

3.1.2. Το μοντέλο του Korsuncev

Το 1958 ο Korsuncev εφάρμοσε τη θεωρία της ομοιότητας για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών συγκεντρωμένων ηλεκτροδίων γείωσης κατά τη διάρκεια του κεραυνικού πλήγματος [14]. Έτσι, χρησιμοποιώντας το Θεώρημα Π, περιέγραψε την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων με τη βοήθεια δύο αδιάστατων παραμέτρων, Π_1 και Π_2 , ως εξής:

$$\triangleright \Pi_1 = \frac{Zs}{\rho} \quad (3.1)$$

$$\triangleright \Pi_2 = \frac{\rho I}{E_0 s^2} \quad (3.2)$$

$$\triangleright \Pi_1 = f(\Pi_2) \quad (3.3)$$

όπου: s η χαρακτηριστική διάσταση του ηλεκτροδίου (απόσταση του κέντρου από το πιο μακρινό σημείο 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,
 Z η κρουστική αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου, σε Ω ,
 f η συνάρτηση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ Π_1 και Π_2 (θα προσδιοριστεί πειραματικά).

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα στα οποία καταλήξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο (παραμέτρους Π) για το πείραμά μας, με αυτά του Korsuncev και συγκρίνοντάς τα, να επαληθεύσουμε την ορθότητά τους. Πράγματι παρατηρούμε ότι οι Π παράμετροι που προσδιορίζουν τη μεταβατική αντίσταση Z και την κρίσιμη ένταση ιονισμού E_0 είναι ίδιοι και στις δύο περιπτώσεις, με μόνη διαφορά την αντικατάσταση του χαρακτηριστικού μεγέθους s από το μήκος l του ηλεκτροδίου, ενώ τα υπόλοιπα δύο μεγέθη που εκφράζονται μέσω του s , δηλαδή τα Z και d , μας δίνουν σε κάθε είδος ηλεκτροδίου τη μία επιπλέον παράμετρο του προβλήματος, οι οποίες ωστόσο είναι ανάλογες του l ως μήκη. Συνεπώς, καταλήξαμε ουσιαστικά στις ίδιες αδιάστατες Π παραμέτρους με αυτές του Korsuncev [14].

Ο Korsuncev δημοσίευσε μία συλλογή σημειακών δεδομένων από τις (3.1), (3.2) και (3.3), τα οποία μας δίνουν μια πειραματική καμπύλη. (Διαγράμματα 3.3-3.4)

Αυτή η καμπύλη είχε μεγάλη προοπτική χρήσης για επίλυση προβλημάτων από μηχανικούς, αφού πρώτα διαλευκάνονταν ορισμένοι παράγοντες. Οι σημαντικότεροι από αυτοί ήταν:

- α) Ο καθορισμός της τιμής της E_0 .
- β) Ο καθορισμός της (κρουστικής) αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου Z
- γ) Ο καθορισμός της χαρακτηριστικής διάστασης s .

Θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε συνολικά και τους τρεις αυτούς παράγοντες.

Καταρχάς ορίζουμε τη μεταβατική αντίσταση ως:

$$z(t) = V(t)/I(t) \quad (3.4)$$

όπου $z(t)$, $V(t)$ και $I(t)$ οι χρονικές συναρτήσεις αντίστασης, τάσης και έντασης ρεύματος αντίστοιχα. Για τον καθορισμό της κρουστικής αντίστασης υπάρχουν τέσσερις παράμετροι οι οποίες μπορούν να την εκφράσουν, οι εξής [18]:

- $Z_1 = \max(z(t)) \quad (3.5)$

- $Z_2 = V_m/I_{vm} \quad (3.6)$

- $Z_3 = V_m/I_m \quad (3.7)$

- $Z_4 = V_{im}/I_m \quad (3.8)$

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 η έχουμε μέγιστο ρεύμα και I_{vm} η ένταση ρεύματος στην οποία έχουμε μέγιστη τάση. Ωστόσο, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας λαμβάνουμε τον επικρατέστερο ορισμό της κρουστικής αντίστασης, ο οποίος λαμβάνει:

$$Z = Z_3 \text{ (κατά Bellaschi και Korsuncev) ή} \quad (3.9)$$

$$Z = Z_4 \text{ (κατά Liew και Darveniza)} \quad (3.10)$$

Εφαρμόζοντας το κριτήριο 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:

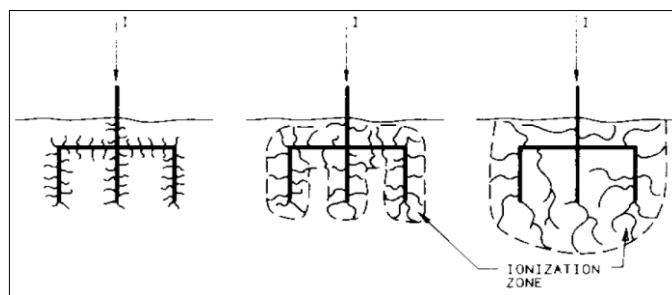
$$E = E_0 = \rho j \quad (3.11)$$

όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο έδαφος

ρ η ειδική αντίσταση

j η πυκνότητα του ρεύματος

Στην Εικόνα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ιδέα της ομοιόμορφης περιοχής ιονισμού.



Εικόνα 3.1: Η σταδιακή ανάπτυξη μιας ενιαίας ζώνης ιονισμού [14]

Για μικρά ρεύματα τα όρια διατηρούν τη διαμόρφωση των ξεχωριστών μερών του ηλεκτροδίου γείωσης, αλλά για μεγαλύτερα ρεύματα «αγκαλιάζουν» ολόκληρο το

ηλεκτρόδιο, παραμορφώνοντας έτσι το αρχικό περίγραμμα της ζώνης. Αυτό σημαίνει ότι, καθώς το ρεύμα μεγαλώνει, η ακριβής διαμόρφωση του ηλεκτροδίου γίνεται ολοένα και λιγότερο σημαντική και μόνο οι «χονδρικές» διαστάσεις της ζώνης ιονισμού έχουν μεγάλη σημασία. Έτσι ο Korsuncev εισήγαγε την ιδέα της χαρακτηριστικής διάστασης s , η οποία είναι μια χονδρική ένδειξη των συνολικών διαστάσεων του ηλεκτροδίου χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι λεπτομέρειες του σχήματός του. Ο Korsuncev όρισε τη χαρακτηριστική διάσταση s ως την απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του πιο απομακρυσμένου σημείου του ηλεκτροδίου [14].

Ένας εναλλακτικός ορισμός (h) θα απαιτούσε τη μέση τετραγωνική ρίζα της μεγαλύτερης οριζόντιας διάστασης h_1 , της οριζόντιας διάστασης που είναι κάθετη σε αυτή, h_2 , και το βάθος του ηλεκτροδίου d . Δηλαδή:

$$h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + d^2} \quad (3.12)$$

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ορισμένες γεωμετρίες ηλεκτροδίων και τα αντίστοιχα s και h μεγέθη τους για την καλύτερη κατανόηση τους.

Category A			Category B		
Plan view	Side view	s and h (m)	s and h (m)	Plan view	Side view
<p>Single buried strip</p>		$s = \sqrt{2}$ $h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + d^2} = \sqrt{5}$	$s = 1.41$ $h = 2.24$	<p>Four strips buried to form a crossarm</p>	
<p>Two rods</p>		$s = \sqrt{3}$ $h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + d^2} = \sqrt{9}$	$s = 1.73$ $h = 3$	<p>Four rods</p>	
		$s = \sqrt{3}$ $h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + d^2} = \sqrt{17}$	$s = 1.73$ $h = 4.12$		

Εικόνα 3.2: Χαρακτηριστικές διαστάσεις s και h , για το διδιάστατο τύπο ηλεκτροδίου (Κατηγορία A) και τα αντίστοιχα διδιάστατα ηλεκτρόδια στο χώρο (Κατηγορία B) [14]

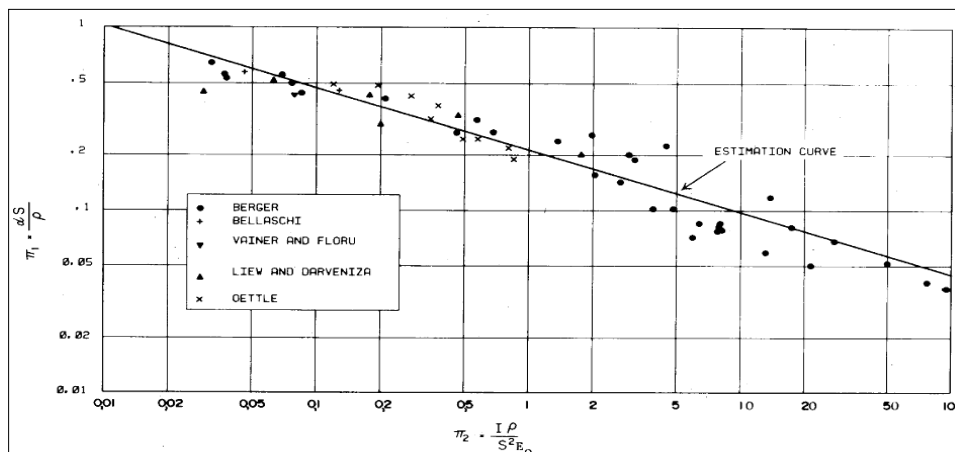
Επανερχόμενοι στη θεώρηση του Korsuncev, η πυκνότητα του ρεύματος γύρω από το ηλεκτρόδιο θα ήταν ανάλογη του I/S^2 , ενώ το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το ηλεκτρόδιο μπορούσε να αναπαρασταθεί με $\rho I/S^2$. Ο ιονισμός του εδάφους θεωρήθηκε ότι αρχίζει μόλις αυτή η τιμή ξεπερνούσε την κρίσιμη αντοχή ιονισμού του εδάφους. Ολόκληρη η κατάσταση απλοποιούνταν αγνοώντας οποιοσδήποτε χρονοεξαρτώμενες επιδράσεις, για παράδειγμα το χρόνο ιονισμού που απαιτούνταν για το σχηματισμό της ζώνης ιονισμού.

Η κρουστική αντίσταση ενός ηλεκτροδίου μπορούσε τότε να περιγραφεί με τη βοήθεια τεσσάρων μεταβλητών, όπως αναφέραμε: s, α, ρ, I και E_0 . Όλες αυτές οι μεταβλητές συνδέονται μεταξύ τους όπως είδαμε στις σχέσεις (3.1) και (3.2) και χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της Θεωρίας της Ομοιότητας ώστε να μειωθούν τελικά σε δύο αδιάστατες ποσότητες, τις Π_1 και Π_2 . Το κριτήριο ομοιότητας που χρησιμοποιείται από τον Korsuncev ουσιαστικά μας λέει πως, εάν δύο ηλεκτρόδια, a και b , βρίσκονται σε ακριβώς όμοιες συνθήκες εδάφους (δηλαδή $E_{0a} = E_{0b}$ και $\rho_a = \rho_b$, και εάν οι χαρακτηριστικές διαστάσεις έχουν αναλογία ίση με $s_a/s_b = n$, τότε ο λόγος των αντιστάσεων τους (R_{i_a}/R_{i_b}) θα είναι ίσος με $1/n$ μόνο όταν τα ηλεκτρικά πεδία παρακείμενα στα ηλεκτρόδια στην κάθε περίπτωση είναι ίσα.

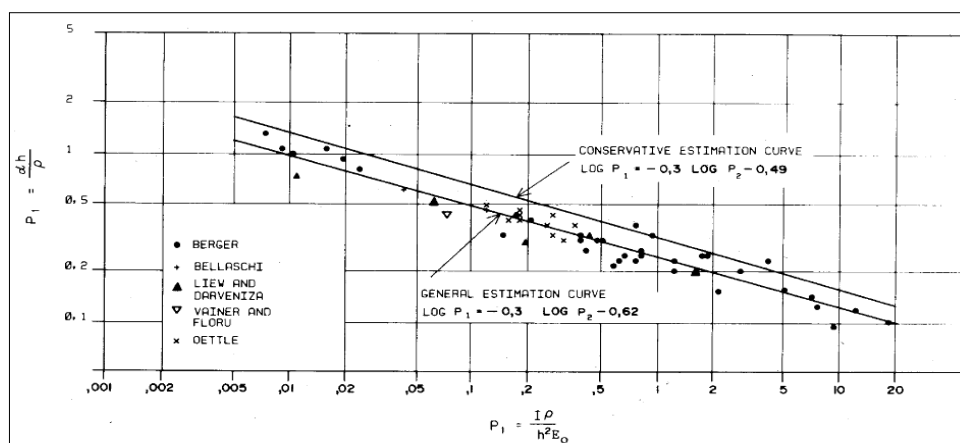
Έτσι οδηγηθήκαμε στις σχέσεις (3.1) και (3.2), στις οποίες η Π_1 μπορεί να ερμηνευτεί ως μία «κανονικοποιημένη» εμπέδηση ή ως μια εμπέδηση ανά μονάδα ειδικής αντίστασης για μια μονάδα μήκους ηλεκτροδίου, είναι δηλαδή μια αδιάστατη παράμετρος. Η Π_2 από την άλλη περιγράφει το λόγο μεταξύ της θεωρητικής ηλεκτρικής έντασης πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, ($\rho I/S^2$) και της κρίσιμης σταθεράς ιονισμού του εδάφους, E_0 , και 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 .

3.1.3. Άλλες θεωρήσεις (Popolansky, Rudenberg, Berger, Liew/Darveniza, Oettle)

Τελικά, προσεγγίζοντας τις αβεβαιότητες που αναφέραμε με τον δικό τους τρόπο, αλλά με βασική αρχή αυτή που ανέπτυξε πρώτος ο Korsuncev, με την εφαρμογή του Θεωρήματος Π για το σχηματισμό των σχέσεων (3.1), (3.2) και (3.3), ερευνητές όπως ο Bellaschi, ο Berger, ο Liew με τον Darveniza και η Oettle βρήκαν ορισμένα πειραματικά δεδομένα. Ακολουθούν πίνακες με τα πειραματικά δεδομένα των ερευνητών αυτών, με αναγραφή των εξισώσεων των ευθειών γύρω από τις οποίες κινούνται με μικρή διασπορά όλα αυτά τα πειραματικά σημεία (όμοια με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων).

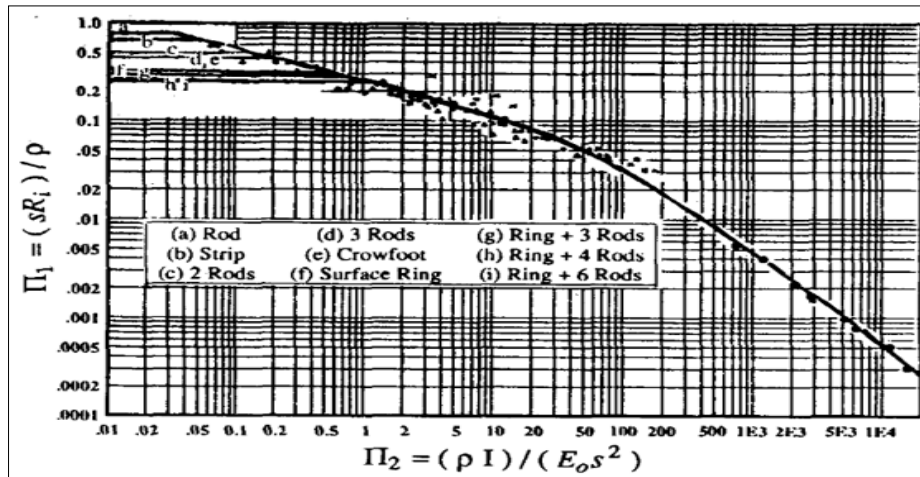


Διάγραμμα 3.1: Παράμετρος Π_1 ως προς Π_2 κατά Bellaschi, Berger, Liew/Darveniza και Oettle. Η παράμετρος διάστασης του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται είναι το S [14]



Διάγραμμα 3.2: Παράμετρος P_1 ως προς P_2 κατά Bellaschi, Berger, Liew/Darveniza και Oettle. Η παράμετρος διάστασης του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται είναι το h [14]

Το 1986 ο Popolanský συνέλεξε πειραματικά δεδομένα για διαφορετικά είδη ηλεκτροδίων από διάφορες πηγές και τα εξέφρασε στις παραμέτρους Π_1 και Π_2 του Korsuncev, διαπιστώνοντας ότι όντως ακολουθούν μια καμπύλη με χαμηλή διασπορά, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.3 [15].



Διάγραμμα 3.3: Παράμετρος Π_1 ως προς παράμετρο Π_2 κατά Popolansky και Korsuncev [15]

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

Για παράδειγμα, η αντίσταση ως προς απομακρυσμένη γη ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου σε ομογενές έδαφος δίνεται από τον Rudenberg σε όρους ειδικής αντίστασης εδάφους και ακτίνας από την παρακάτω εξίσωση [15]:

$$R_{\text{ημισφαιρικό}} = \frac{\rho}{2\pi s} \quad \text{άρα} \quad \Pi_1(\text{ημισφαιρικό}) = \frac{1}{2\pi} = 0,159 \quad (3.13)$$

Κατά παρόμοιο τρόπο, η αντίσταση μιας απλής ράβδου ως προς απέραντο ημιάξονα, σε όρους μήκους ράβδου, ακτίνας και ειδικής αντίστασης δίνεται από τον Rudenberg ως εξής [15]:

$$R_{\text{ράβδου}} = \frac{\rho}{2\pi s} \ln\left(\frac{2s}{r}\right) \quad (3.14)$$

Για μία αναλογία τιμών s/r από 75 έως 300 η τιμή που παίρνει η παράμετρος Π_1 είναι:

$$\Pi_1(\text{ράβδου}) = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{r}\right) = 0,8 - 1,0 \quad (3.15)$$

Η προσέγγιση του Korsuncev μας δείχνει ότι το εύρος τιμών του Π_1 βρίσκεται ανάμεσα στο 0,2 και το 0,8, με τα ημισφαιρικά ηλεκτρόδια να παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές και οι απλές ράβδοι τις υψηλότερες [15].

Οι τιμές της παραμέτρου Π_1 μπορούν να προσεγγιστούν επίσης σε όρους της απόστασης και της επιφάνειας, η οποία ορίζεται ως το ισοδύναμο εμβαδό της περιοχής επαφής του ηλεκτροδίου, εάν ήταν τυλιγμένο σε χαρτί. Ένα ηλεκτρόδιο-ταινία, με μήκος l και πλάτος w , θα κάλυπτε επιφάνεια με τιμή $2lw$ (ο παράγοντας «2» λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι υπάρχουν 2 πλευρές). Ένα ηλεκτρόδιο με τέσσερις ράβδους σε κάθε γωνία ενός τετραγώνου, με απόσταση μεταξύ των R

και βάθος D , θα κάλυπτε επιφάνεια $A = R^2 + 4RD$. Η πάνω επιφάνεια του ηλεκτροδίου δεν προσμετράται αυτή τη φορά, επειδή δεν βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος στο εξωτερικό του. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, τα επιφανειακά ηλεκτρόδια έχουν μόνο μια πλευρά. Έτσι, όταν η παραπάνω εξίσωση εκφράζεται σε όρους χαρακτηριστικής απόστασης s και επιφάνειας επαφής $A = 2\pi rs$ για ένα ηλεκτρόδιο απλής ράβδου, η τιμή της παραμέτρου Π_1 προκύπτει:

$$\Pi_1(\text{ράβδου}) = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{4\pi s^2}{A}\right) = 0,4028 + \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{s^2}{A}\right) \quad (3.16)$$

Στην περίπτωση του ημισφαιρικού ηλεκτροδίου, $A = 2\pi s^2$ κι έτσι ο λόγος s^2/A είναι σταθερός αριθμός. Συνεπώς, η αντίστοιχη τιμή της Π_1 μετασχηματίζοντας την εξίσωση για το συγκεκριμένο είδος ηλεκτροδίου προκύπτει:

$$\Pi_1(\text{ημισφαιρικό}) = \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \ln e = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{2\pi s^2 e}{A}\right) = 0,4517 + \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{s^2}{A}\right) \quad (3.17)$$

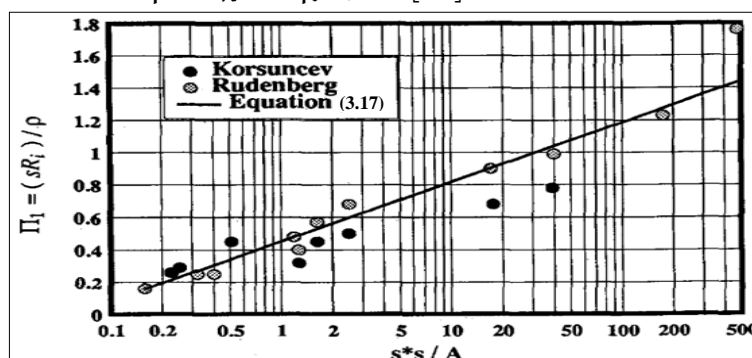
Η σύγκριση μεταξύ των τιμών της παραμέτρου Π_1 για ηλεκτρόδιο απλής ράβδου από τον Korsuncev και τον Rudenberg φανερώνει μια αισθητή διαφορά περί το 20%. Ωστόσο, όταν την ανωτέρω εξίσωση για ημισφαιρικά ηλεκτρόδια (η οποία χρησιμοποιεί τον τύπο του Rudenberg) χρησιμοποιήθηκε για τη ράβδο γείωσης, το σφάλμα στην εκτίμηση του Π_1 περιορίστηκε αρκετά (0,4517-0,4028=0,0489, ή περί το 6%) [15].

Από αυτά προκύπτει και μια απλή τεχνική για να λάβουμε την αρχική αντίσταση γείωσης οποιουδήποτε είδους ηλεκτροδίου. Η χαρακτηριστική απόσταση και η επιφάνεια του ηλεκτροδίου υπολογίζονται και η Εξίσωση (3.17) μας δίνει την τιμή της παραμέτρου Π_1 . Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αρχική αντίσταση $R_{\text{αρχ}}$ μέσω της σχέσης (3.1). Στον παρακάτω πίνακα γίνεται εφαρμογή της απλής αυτής τεχνικής για διάφορα ηλεκτρόδια και συγκρίνονται οι τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τα μοντέλα του Korsuncev και του Rudenberg αντίστοιχα [15].

Electrode Configuration	$\frac{s^2}{A}$	$\Pi_1^{\text{Kor.}}$	$\Pi_1^{\text{Rud.}}$	$\Pi_1^{\text{Eq. (3.17)}}$
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

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 [15]

Στο Διάγραμμα 3.4 παρουσιάζεται μια γραφική παράσταση των τιμών της Π_1 σε σχέση με τον νεπέριο λογάριθμο του λόγου s^2/A . Τα σημεία που προέκυψαν από τον ανωτέρω πίνακα από το μοντέλο τόσο του Korsunceev όσο και του Rudenberg, είναι σχεδόν ομοιόμορφα διεσπαρμένα γύρω από ευθείες σε ημιλογαριθμικό άξονα. Με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για τις τιμές του πίνακα κατά Rudenberg μας δίνουν μια ευθεία με κλίση 0,180, σταθερό όρο 0,439 και συντελεστή συσχέτισης 0,979. Αυτά τα στοιχεία, όπως φαίνεται και στο σχήμα, ταιριάζουν πολύ καλά με την ευθεία της Εξίσωσης (3.17). Οι τιμές του πίνακα κατά Korsunceev με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων μας δίνουν αντίστοιχα μια ευθεία με κλίση 0,091, σταθερό όρο 0,410 και ένα σχετικά χαμηλότερο συντελεστή συσχέτισης 0,956 [15].



Διάγραμμα 3.4: Παράμετρος Π_1 ως προς s^2/A .
Σημειοκάτα δεδομένα κατά Korsunceev και Rudenberg [15]

3.2. Πειράματα υπό κλίμακα

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιαστούν ορισμένες από τις εργασίες και μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν και συνδέονται με το πείραμά μας. Κύρια πηγή της γνώσης μας αποτέλεσαν εργασίες που έχουν δημοσιευθεί και οι οποίες περιγράφουν με λεπτομέρεια τον τρόπο και τις συνθήκες υπό τις οποίες διεξάχθηκαν πειράματα που σχετίζονται με το δικό μας, είτε ως προς τον τρόπο διεξαγωγής (πειράματα στο θαλάσσιο περιβάλλον μιας δεξαμενής/ πειράματα προσομοίωσης κτιριακών γειώσεων), είτε ως προς τη μέθοδο ανάλυσης των φυσικών μεγεθών (πειράματα που χρησιμοποιούν μοντέλα κλίμακας με Διαστατική ανάλυση ή με τη χρήση των Νόμων υπό κλίμακα). Συγκρίνοντας πολλαπλά τέτοια άρθρα παρατηρήσαμε αρκετές ομοιότητες ως προς τη φιλοσοφία τους, οι οποίες μας οδήγησαν τελικά στη σύνθεση και δημιουργία του δικού μας πειράματος. Στη συνέχεια θα παραθέσουμε περιληπτικά το περιεχόμενο των συγκεκριμένων άρθρων, εστιάζοντας στα στοιχεία εκείνα για τα οποία παρουσιάζουν τις προαναφερθείσες ομοιότητες και συγκρίνοντάς τα μεταξύ τους. Όπως ήδη σημειώσαμε, η παρουσίαση των πειραμάτων αυτών θα γίνει χωρίζοντάς τα σε δύο ομάδες ανάλογα με το περιεχόμενό τους: σε αυτά που έγιναν σε υδάτινο περιβάλλον με τη βοήθεια δεξαμενής και σε αυτά τα οποία χρησιμοποίησαν τους Νόμους υπό κλίμακα στα μοντέλα προσομοίωσής τους.

3.2.1. Πειράματα σε δεξαμενή

Ξεκινώντας από τις εργασίες οι οποίες αναφέρονται σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο υδάτινο περιβάλλον μιας δεξαμενής, παρατηρήσαμε ότι στο σύνολό τους αναφέρονται σε μελέτες πάνω στη μεταβατική συμπεριφορά πλεγμάτων γείωσης. Παρότι η μελέτη μας γίνεται σε ηλεκτρόδια γείωσης, υπάρχουν αρκετά στοιχεία στα παραπάνω άρθρα τα οποία μπορέσαμε να αξιοποιήσουμε και στο δικό μας πείραμα. Ακολούθως θα γίνει μια περιληπτική παρουσίαση των συγκεκριμένων άρθρων.

3.2.1.1. Μελέτη προφίλ δυναμικού σε πλέγματα γείωσης

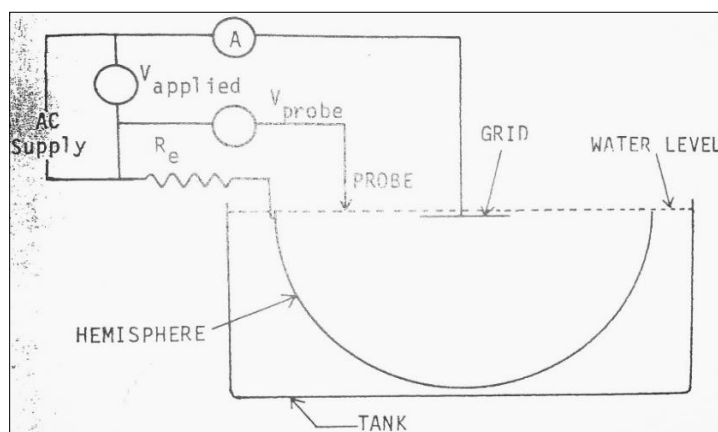
Οι R. Caldecott και D. Kasten περιγράφουν στην εργασία τους “*Scale Model Studies of Station Grounding Grids*” [16] το σχεδιασμό και τη χρήση των μοντέλων κλίμακας για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς μοντελοποιημένων πλεγμάτων γείωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο ηλεκτρολυτικές δεξαμενές διαφορετικού μεγέθους η καθεμία, ενώ το υγρό που τοποθετήθηκε σε αυτές, μέσα στο οποίο βυθίστηκαν τα πλέγματα γείωσης, αποτελείτο από δύο στρώσεις διαλυμάτων διαφορετικής αγωγιμότητας με βάση το νερό, ώστε να μελετηθεί και να προσομοιωθεί η διστρωματική δομή του εδάφους στο πείραμα. Τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται από τη συγκεκριμένη εργασία δεν μας ενδιαφέρουν ποσοτικά, καθώς αναφέρονται σε πλέγματα γείωσης, ωστόσο η λογική του στησίματος της διάταξης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Αρχικά τονίζεται η αναγκαιότητα χρήσης των μοντέλων κλίμακας καθώς και χρησιμοποίησης των δεξαμενών, καθώς η πραγματοποίηση μετρήσεων σε ένα πλέγμα πλήρους κλίμακας βυθισμένο στο έδαφος δεν είναι βολική, τόσο λόγω μεγέθους του πλέγματος όσο και λόγω της φύσης του στερεού εδάφους (καθίσταται δύσκολη η αντικατάσταση του πλέγματος). Σημειώνεται ότι όλες οι φυσικές διαστάσεις του συστήματος πλέγματος γείωσης μειώνονται σε μέγεθος κατά τον ίδιο λόγο κλίμακας, συμπεριλαμβανομένης της διαμέτρου των αγωγών του πλέγματος και του βάθους στο οποίο τοποθετείται το πλέγμα, ενώ το σχήμα των δυναμικών επιφανειών και των ροών ρεύματος παραμένει αναλλοίωτο. Επίσης η αγωγιμότητα του εκάστοτε διαλύματος που καθορίζεται από την πυκνότητά του, καθώς και το ρεύμα που εφαρμόζεται στο πλέγμα γείωσης μειώνονται κατά τον ίδιο λόγο κλίμακας που μειώθηκαν και οι διαστάσεις. Στη συνέχεια απαντώνται τα ερωτήματα περί του μεγέθους και του σχήματος που θα πρέπει να έχουν οι ηλεκτρολυτικές δεξαμενές ώστε να μην επηρεάζεται σημαντικά το πεδίο γύρω από το πλέγμα, και αν υπάρχει κάποια επιρροή, ποια είναι αυτή σε σχέση με την περίπτωση πλήρους κλίμακας, όπου το έδαφος στο οποίο βυθίζεται

το πλέγμα είναι πρακτικά ημισφαιρικό. Τα σημαντικότερα στοιχεία τα οποία παρατηρούμε είναι τα εξής:

- Το ιδανικό σχήμα δεξαμενής για να παραμένει όσο το δυνατόν ανεπηρέαστο το πεδίο γύρω από το τετραγωνικό πλέγμα γείωσης είναι το ημισφαιρικό. Επειδή ωστόσο είναι δύσκολη η κατασκευή και στερέωση μια ημισφαιρικής δεξαμενής, χρησιμοποιήθηκε μια δεύτερη δεξαμενή, σε σχήμα κύβου, ελαφρώς μεγαλύτερου βάρους. Μέσα σ' αυτήν στερεώθηκε η πρώτη δεξαμενή, τοποθετώντας άμμο στα τοιχώματα μεταξύ των δύο δεξαμενών.
- Ο λόγος των διαστάσεων της ημισφαιρικής δεξαμενής προς τις διαστάσεις του μεγαλύτερου εξεταζόμενου πλέγματος γείωσης μπορεί να φτάσει σε μια ελάχιστη τιμή περί το 2-3 χωρίς να εμφανιστεί σημαντικό σφάλμα στις μετρήσεις.
- Ο μηχανισμός στήριξης του πλέγματος γείωσης αποτελείται από ένα μεταλλικό τετραγωνικό πλαίσιο, το οποίο στο συγκεκριμένο πείραμα βοήθησε και στην κατασκευή του πλέγματος. Το μέγεθος του πλαισίου έπρεπε να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να είναι δυνατή η στερέωσή του στην περιφέρεια της δεξαμενής.
- Το πλέγμα γείωσης κρεμόταν με τη βοήθεια πετονιάς (μονωτικό υλικό) από το πλαίσιο, σε σημεία κατάλληλα ώστε να μην παραμορφωθεί το σχήμα του πλέγματος, ενώ το βάθος και η θέση προσαρμόζονταν μηχανοκίνητα
- Τα άκρα του πλέγματος ήταν διπλωμένα προς τα άνω και συνδέονταν με την πηγή τάσης με τη βοήθεια καλωδίου το οποίο ήταν μονωμένο εκτός του σημείου σύνδεσης με το πλέγμα. Το σημείο αυτό βρισκόταν οριακά κάτω από την επιφάνεια του νερού και η σύνδεση γινόταν με τη βοήθεια βίδας.
- Η δεξαμενή, καθώς και το σύστημα στήριξης, ήταν γειωμένα καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα.



Εικόνα 3.3: Πειραματική διάταξη 1 [16]

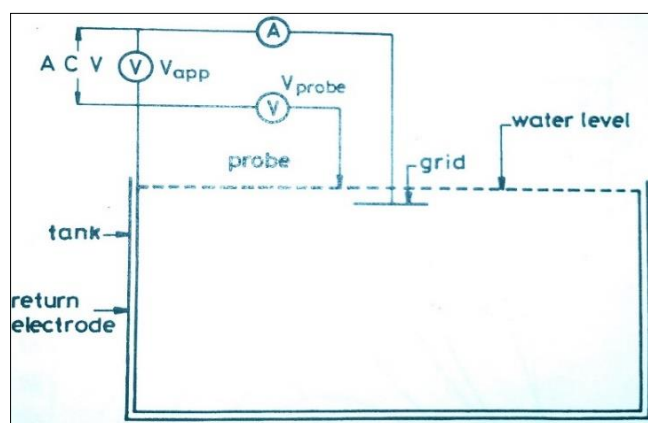
Η εργασία των A. El-Morshedy, A.G. Zeitoun και M.M. Ghourab με τίτλο “*Modelling of Substation Grounding Grids*”[17] πραγματεύεται δοκιμές σε μοντέλα κλίμακας πλεγμάτων γείωσης με σκοπό να προσδιοριστούν μεγέθη, όπως η ενεργός αντίσταση ως προς τη γη και η κατανομή των επιφανειακών δυναμικών σε περίπτωση σφάλματος στη γείωση.

Τονίζεται αρχικά ότι είναι μη πρακτικό να γίνει η μελέτη των παραμέτρων του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιώντας πλέγματα πλήρους κλίμακας, για λόγους οικονομίας, καλύτερου ελέγχου των συνθηκών διεξαγωγής του πειράματος, καθώς και λόγω της ανομοιογένειας του εδάφους ως προς την αγωγιμότητα και τα στοιχεία του. Σημειώνεται επίσης ότι, ενώ οι διαστάσεις του πλέγματος μειώνονται κατά τον ίδιο λόγο κλίμακας, η ποσοστιαία μεταβολή της τιμής των δυναμικών στο πλέγμα, το σχήμα των δυναμικών επιφανειών και των ροών ρεύματος παραμένει αναλλοίωτο. Έτσι, κρίνεται ιδιαίτερα συμφέρουσα, αλλά και αξιόπιστη η μελέτη του προβλήματος με τη χρήση μοντέλων κλίμακας.

Τα σημαντικότερα σημεία όσον αφορά το στήσιμο της διάταξης και των συνθηκών του πειράματος είναι τα εξής:

- Η ηλεκτρολυτική δεξαμενή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα είχε σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου και διαστάσεις 1,70m x 1,00m x 1,10m με αγωγή εσωτερικά τοιχώματα.
- Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε νερό βρύσης, το οποίο αναπαριστά την ομογενή γη, με ειδική αντίσταση που μετρήθηκε στα 27Ωm.
- Το πλέγμα τοποθετήθηκε οριακά κάτω από την επιφάνεια του νερού. Η στερέωση του πλέγματος έγινε με τη βοήθεια πετονιάς, που συνέδεε τα άκρα της δεξαμενής με τα άκρα του πλέγματος, στο κέντρο της δεξαμενής.
- Οι μετρήσεις λαμβάνονταν με τη βοήθεια probe, που βρισκόταν μέσα σε πλαστικό σωλήνα και μόνο η άκρη του ήταν γυμνή και βυθισμένη ελάχιστα μέσα στο νερό.
- Ο μηχανισμός στήριξης του probe αποτελούνταν από ένα ξύλινο πλαίσιο σε σχήμα-T που επέτρεπε την οριζόντια και κάθετη κίνηση του probe σε σταθερό βάθος, σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του πλέγματος.
- Η εφαρμοζόμενη τάση στο πλέγμα ήταν 220V AC. Ως ηλεκτρόδιο επιστροφής χρησιμοποιήθηκε η ίδια η δεξαμενή.
- Ο λόγος κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1:100, ωστόσο αυτός εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της εκάστοτε δεξαμενής, ώστε να αποφεύγονται τα φαινόμενα από την επίδραση των τοιχωμάτων της περιορισμένης σε μέγεθος δεξαμενής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι μέγιστες διαστάσεις πλέγματος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ήταν 25cm x 25cm. Ο λόγος των διατομών των αγωγών του πλέγματος δεν είχε ιδιαίτερη σημασία.

Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται η διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 3.4: Πειραματική διάταξη 2 [17]

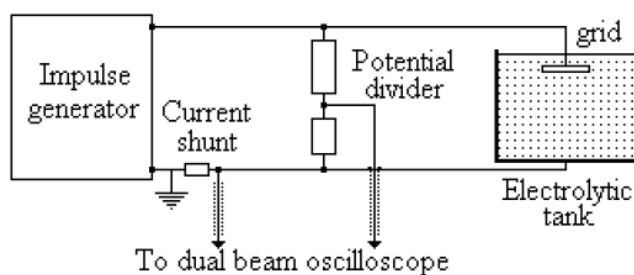
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις αυτές είχαν αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές που έφταναν μέχρι και το 9%. Από τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν ορισμένα συμπεράσματα, μεταξύ των οποίων και ότι η αντίσταση του πλέγματος μειώνεται με την αύξηση του βάθους βύθισης του πλέγματος.

3.2.1.2. Μελέτη μεταβατικής αντίστασης πλεγμάτων γείωσης

Οι I.F. Gonos, F.V. Topalis και I.A. Stathopoulos στην εργασία τους με τίτλο “*Modelling of a Grounding Grid using an Electrolytic Tank*” [18] ερευνούν τη μεταβατική αντίσταση πλεγμάτων γείωσης υπό την επίδραση κεραυνικού πλήγματος, χρησιμοποιώντας μοντέλα κλίμακας (εν προκειμένω ηλεκτρολυτική δεξαμενή).

Αρχικά, τονίζεται ότι η αρκετά χαμηλότερη τιμή της αντίστασης συστημάτων γείωσης σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης έναντι της μεταβατικής αντίστασης της ίδιας γείωσης, καθώς και οι διάφοροι κίνδυνοι που υπάρχουν κατά την επιβολή κεραυνικού ρεύματος στο σύστημα γείωσης, καθιστά αναγκαία τη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης. Επισημαίνεται επίσης πως η συγκεκριμένη μελέτη είναι πολύ πιο εύκολο και οικονομικό να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας μοντέλα κλίμακας στο χώρο ενός εργαστηρίου υψηλών τάσεων. Τέλος, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο ένα κεραυνικό πλήγμα επηρεάζει την αντίσταση ενός συστήματος γείωσης: το πολύ υψηλό κεραυνικό ρεύμα (έως 100kA ή και περισσότερο) με το υψηλό φάσμα συχνοτήτων, το οποίο οδηγεί σε μείωση του ηλεκτρικού μήκους των αγωγών του πλέγματος, η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου στην αύξηση των τιμών αντίστασης και επαγωγής των αγωγών, η μείωση της μεταβατικής αντίστασης της γείωσης λόγω της αύξησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του συστήματος γείωσης και ο ιονισμός του εδάφους είναι μερικά από φαινόμενα που αναλύονται.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 3.5: Πειραματική διάταξη 3 [18]

Τα σημαντικότερα σημεία στα οποία εστιάζουμε είναι τα εξής:

- Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων κυματομορφής $8/20\mu\text{s}$ με μέγιστη τιμή ρεύματος στα 25 kA. Η καταγραφή των μετρήσεων έγινε μέσω παλμογράφου, ενώ ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών κρούσεων ήταν τουλάχιστον 1 min.
- Παρότι το ιδανικό σχήμα ηλεκτρολυτικής δεξαμενής για τη διεξαγωγή του συγκεκριμένου πειράματος είναι το ημισφαιρικό, πρακτικές δυσκολίες επιτρέπουν τη χρήση κυλινδρικής ή ορθογώνιας δεξαμενής. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ορθογώνια δεξαμενή της οποίας οι διαστάσεις ήταν $1,5\text{m} \times 1,5\text{m} \times 1,0\text{m}$.
- Για την προσομοίωση του πολυστρωματικού από πλευράς ειδικής αντίστασης εδάφους, μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο δύο στρωμάτων, εκ των οποίων το κάτω αποτελείτο από ένα gel χαμηλότερης πάντα ειδικής αντίστασης από το επάνω, το οποίο μπορούσε να είναι κάποιο διάλυμα νερού. Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε μόνο διάλυμα νερού βρύσης με αλάτι (ομογενής γη), του οποίου η ειδική αντίσταση μπορούσε να μεταβληθεί μεταβάλλοντας την αλατότητα του νερού. Συγκεκριμένα, η αγωγιμότητα του νερού ρυθμίστηκε στα $2,5 \text{ mS/cm}$.
- 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 και το βάθος της δεξαμενής δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από το μισό της πλευρικής διάστασης της δεξαμενής.
- Με βάση τους παραπάνω περιορισμούς, ο λόγος κλίμακας που επιλέχτηκε, με βάση και τις διαστάσεις της δεξαμενής, ήταν 1:100. Τα πλέγματα είχαν διαστάσεις $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ και τοποθετήθηκαν στο κέντρο της δεξαμενής σε βάθος 2cm από την επιφάνεια.
- Η μηχανική υποστήριξη των πλεγμάτων έγινε με πετονιά, προκειμένου να επιτευχθεί η οριζόντια θέση του πλέγματος με τη μικρότερη δυνατή παραμόρφωση της διάταξής του.
- Ο υπολογισμός της μεταβατικής αντίστασης του πλέγματος έγινε μέσω των μετρήσεων που καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας τέσσερις διαφορετικές

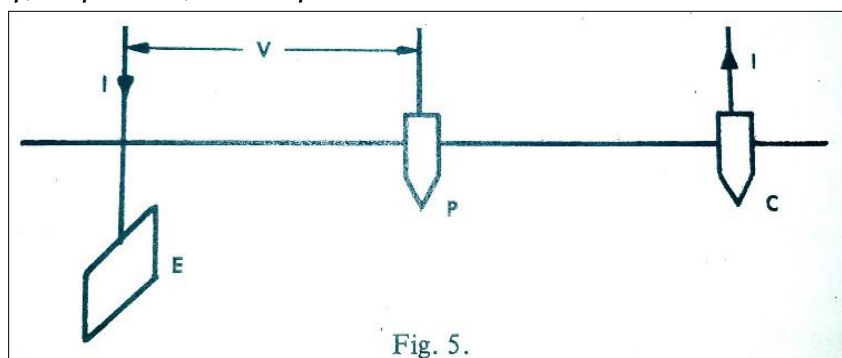
παραμέτρους για τον ορισμό της αντίστασης, οι οποίες αναφέρθηκαν νωρίτερα (Εξισώσεις 3.5-3.8).

Ανάμεσα στα συμπεράσματα της πειραματικής αυτής μελέτης ήταν ότι οι παράμετροι της αντίστασης είχαν μεγαλύτερες τιμές στα εξωτερικά από ότι στα εσωτερικά σημεία του πλέγματος, με αποκλίσεις που δεν ξεπερνούσαν το 4% μεταξύ των διαφόρων σημείων.

3.2.1.3. Μελέτη συμπεριφοράς ηλεκτροδίου γείωσης

Στο άρθρο με τίτλο “*Modelling of a Grounding Electrode*” των D. Mukhedkar, Y. Gervais και J.P. DeJean [19] παρουσιάζεται μια πειραματική τεχνική μοντελοποίησης ενός ηλεκτροδίου γείωσης σε ανομοιογενές έδαφος και τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αναλυτικές μεθόδους. Έτσι δίνεται μια περιγραφή του φυσικού μοντέλου και συζητείται η επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου. Τα σημαντικότερα σημεία ενδιαφέροντος είναι τα εξής:

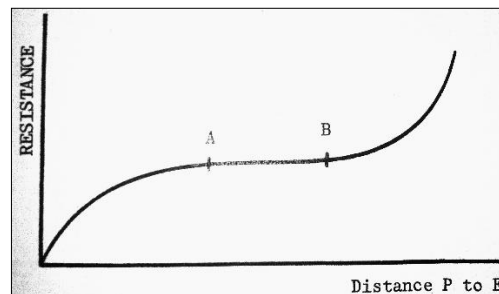
- Η ανομοιογενής ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να προσομοιωθεί με τη βοήθεια μιας δεξαμενής κατασκευασμένης από τσιμέντο, ο πυθμένας της οποίας είναι υπερυψωμένος με αποτέλεσμα να έχουμε δύο στρώσεις «εδάφους» διαφορετικής ειδικής αντίστασης: η πάνω στρώση συνίσταται από υγρό (νερό στο πείραμα αυτό, καθώς ο συνδυασμός στρώσεων νερού-τσιμέντου είναι αντιπροσωπευτικός ως προς την ειδική αντίσταση για προσομοίωση της γης) του οποίου τα χαρακτηριστικά (αγωγιμότητα, πυκνότητα, κτλ.) μπορούν να ρυθμιστούν, και η κάτω στρώση από τσιμέντο με γνωστά χαρακτηριστικά.
- Η μέθοδος για την εύρεση της αντίστασης των εξεταζόμενων ηλεκτροδίων γείωσης παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.6: Αναπαράσταση μεθόδου εύρεσης αντίστασης ηλεκτροδίου γείωσης [19]

Ρεύμα I εγχέεται μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης (E) και του ηλεκτροδίου ρεύματος (C). Η τάση V μετράται μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης (E) και του ηλεκτροδίου τάσης (P). Η γραφική παράσταση του λόγου V/I , δηλαδή της αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης, ως προς την απόσταση μεταξύ (P) και

(E) είναι αυτή που μας δίνει την πραγματική αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης, ως το μήκος του οριζοντίου τμήματος (AB), όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.5: Καμπύλη εύρεσης πραγματικής αντίστασης ηλεκτροδίου γείωσης [19]

- Το μέγεθος της δεξαμενής είναι 1,2m x 1,8m x 1m. Από το 1m ύψους της δεξαμενής, η στρώση τσιμέντου καταλαμβάνει τα 75cm, ενώ η πάνω στρώση νερού κυμαίνεται από τα 10cm έως τα 22,5cm. Η επιλογή του πλάτους (1,2m) έγινε με κριτήριο την αποφυγή ηλεκτρικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων που θα εισέρχονται στο νερό κάθε φορά.
- Το ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετείται στο κέντρο της δεξαμενής, σε ύψος που καθορίζεται από το πάχος της στρώσης νερού.
- Το δοκίμιο παρέμεινε τουλάχιστον 3 ώρες σε ηρεμία μετά από κάθε αλλαγή στη σύσταση του διαλύματος νερού.
- Οι αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές των αντιστάσεων των ηλεκτροδίων γείωσης κυμαίνονται από 5 έως 10%.

Τέλος, στο άρθρο “*Grounding Electrode Potential Gradients from Model Tests*” από τους H.R. Armstrong και L.J. Simpkin [20] γίνεται προσπάθεια μελέτης των μέσων που μπορούν να χρησιμεύσουν στον περιορισμό της επίδρασης του πεδίου (δυναμικές γραμμές) που αναπτύσσεται γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης. Για τους ίδιους λόγους με αυτούς που εξηγήσαμε εκτενώς και προηγουμένως, επιλέχθηκαν τα μοντέλα κλίμακας για τη διεξαγωγή του πειράματος, καθώς και η χρήση δεξαμενής στην οποία τοποθετήθηκε διάλυμα αλατόνευρου, προσομοιώνοντας έτσι το περιβάλλον ενός σχετικά ομογενούς εδάφους στο οποίο είναι βυθισμένα τα ηλεκτρόδια γείωσης πλήρους κλίμακας. Αξίζει να αναφερθούν τα παρακάτω στοιχεία της πειραματικής διαδικασίας:

- Η δεξαμενή που χρησιμοποιήθηκε είχε σχήμα σχεδόν ημισφαιρικό.
- Το μέγεθος της δεξαμενής ξεπερνούσε οριακά σε διάμετρο τα 6m, μέγεθος που κρίθηκε κατάλληλο με βάση τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν.
- Προσομοιώνοντας μια σειρά 16 ηλεκτροδίων γείωσης μήκους 3m, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν λόγο κλίμακας 1:20, δηλαδή περί τα 15cm μήκος, ενώ δεν δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο λόγο των διατομών των ηλεκτροδίων.
- Δεν κρίθηκε απαραίτητη η διατήρηση σταθερής αγωγιμότητας στο διάλυμα. Αντίθετα η στάθμη του διαλύματος αλατόνευρου χρειάστηκε να κρατηθεί

σταθερή για πρακτικούς λόγους. Έτσι, οποιαδήποτε προσθήκη νερού για τη διατήρηση της στάθμης δεν συνοδεύτηκε απαραίτητα και με την προσθήκη άλατος. Αντ' αυτού, γινόταν συνεχής καταγραφή της αγωγιμότητας του διαλύματος και με τύπο που έδινε τον κατάλληλο συντελεστή διόρθωσης υπολογιζόταν η επίδραση της στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

- Η τροφοδότηση του μοντέλου ηλεκτροδίου γείωσης έγινε μέσω καλωδίου που εκκινούσε από αγείωτο μετασχηματιστή απομόνωσης, για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο να λειτουργήσει η δεξαμενή ως το ηλεκτρόδιο γείωσης. Η επιστροφή στον μετασχηματιστή έγινε μέσω καλωδίου που ήταν συνδεδεμένο με χάλκινη ράβδο τοποθετημένη στην εξωτερική περιφέρεια της δεξαμενής.
- Οι μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια βολτομέτρου υψηλής αντίστασης, τοποθετημένου ανάμεσα στο μοντέλο και σε επιλεγμένα σημεία της επιφάνειας του ηλεκτρολύτη.

Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και είχαν να κάνουν με το στήσιμο της διάταξης είναι τα εξής:

- Για να περιοριστούν τα σφάλματα σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές σε επίπεδα κάτω του 5%, θα πρέπει η δεξαμενή να είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με το μοντέλο.
- Ατέλειες τόσο στο σχήμα της δεξαμενής (όχι ακριβώς ημισφαιρικό, καθώς αποτελούνταν από αρκετά κομμάτια) καθώς και στην ομοιογένεια του διαλύματος, επίσης οδηγούν σε μεγαλύτερα σφάλματα.
- Ιδανικά θα ήταν επιθυμητή η λήψη επιστροφής από ολόκληρη την εξωτερική επιφάνεια της ημισφαιρικής δεξαμενής. Ένας δακτύλιος συνδεδεμένος σε αρκετά σημεία με τη περιφέρεια της ράβδου θα έφερνε σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα.

3.2.2. Πειράματα σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας κτιρίων με μοντέλα κλίμακας

Εκτός από τα υπό κλίμακα πειράματα σε περιβάλλον δεξαμενής, ιδιαίτερα χρήσιμη αποδείχτηκε και η μελέτη υπό κλίμακα πειραμάτων που αναφέρονταν σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας κτιρίων. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των πειραμάτων ήταν η εστίασή τους όχι τόσο στον προσδιορισμό της αντίστασης των ηλεκτροδίων ή του πλέγματος γείωσης, αλλά στην εύρεση των παραμέτρων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που σχηματίζεται γύρω από τους αγωγούς. Για το σκοπό αυτό, δεν ήταν επαρκής η μείωση όλων των διαστάσεων του χρησιμοποιούμενου μοντέλου κατά ένα σταθερό λόγο κλίμακας. Η ανάγκη προσδιορισμού κι άλλων μεγεθών πέραν των μηκών του μοντέλου, μερικά από τα

οποία ήταν και χρονομεταβλητά, καθώς και των παραγώγων αυτών, οδήγησε στη χρήση της δεύτερης μεθόδου της Θεωρίας της Ομοιότητας, αυτής των «Νόμων υπό κλίμακα».

Στα άρθρα των W. Zischank, F. Heidler, J. Wiesinger, K. Stimper, A. Kern και E. SeEVERS, με τίτλο “Magnetic Fields and Induced Voltages in case of a Direct Strike – Comparison of Results obtained from Measurements at a Scaled Building to those of IEC 62305-4” [22] και “Magnetic Fields and Induced Voltages inside LPZ 1 Measured at a 1:6 Scale Model Building” [21], το θέμα μελέτης ήταν κοινό: η εύρεση των επαγόμενων τάσεων, μαγνητικών πεδίων και των παραγώγων αυτών για κεραυνικό πλήγμα σε σύστημα γείωσης κτιρίου με ενισχυμένο οπλισμό. Όπως σημειώσαμε τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν πάνω σε μοντέλο ενός αντίστοιχου κτιρίου, οι διαστάσεις του οποίου είχαν μειωθεί κατά έναν σταθερό λόγο κλίμακας (1:6). Στα περισσότερα από τα πειράματα σε δεξαμενή που εξετάσαμε, τα μεταβατικά φαινόμενα, καθώς και οι επιδράσεις από ένα φαινόμενο όπως το κεραυνικό πλήγμα είχαν αγνοηθεί. Γι’ αυτό στα συγκεκριμένα πειράματα, για τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, πέρα από τη γεωμετρία τους, ήταν ανάγκη να προσδιοριστούν και οι λόγοι κλίμακας για όλες τις φυσικές ποσότητες που σχετίζονταν με το πείραμα με τη βοήθεια των «Νόμων υπό κλίμακα». Όπως έχουμε περιγράψει και στο Κεφάλαιο 1^ο, ο προσδιορισμός των λόγων κλίμακας των φυσικών μεγεθών γίνεται με τη βοήθεια των εξισώσεων του ηλεκτρομαγνητισμού και μετασχηματισμών αυτών. Συγκεκριμένα λοιπόν για τα πειράματα στα οποία αναφερόμαστε, με γεωμετρικό λόγο κλίμακας 1:6, οι λόγοι κλίμακας των υπολοίπων μεγεθών προκύπτουν όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Φυσική ποσότητα	Λόγος κλίμακας
Χρόνος	$f_t = f_g = 1:6$
Ρεύμα	$f_I = f_g = 1:6$
Παράγωγος ρεύματος	$f_{dI/dt} = f_I/f_t = 1$
Μαγνητικό πεδίο	$f_H = f_I/f_g = 1$
Παράγωγος μαγνητικού πεδίου	$f_{dH/dt} = f_I/f_g/f_t = f_I/f_g^2 = 6$
Τάση	$f_U = f_g = 1:6$

Πίνακας 3.2: Λόγοι κλίμακας των μεγεθών του πειράματος [21]

Επιλέγοντας μια συγκεκριμένη μορφή κρουστικού ρεύματος για την προσομοίωση του κεραυνού (π.χ. 200kA με 10/350μs), είναι πλέον αναγκαία η προσαρμογή σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα των αντίστοιχων παραμέτρων για το πείραμα. Έτσι, η μέγιστη ένταση του κρουστικού ρεύματος που επιβλήθηκε στο μοντέλο κτιρίου, οι χρόνοι καθώς επίσης και οι τάσεις για τα αποτελέσματα που ελήφθησαν υποβιάστηκαν έξι φορές, ενώ οι εντάσεις μαγνητικού πεδίου παρέμειναν οι ίδιες και οι χρονικές παράγωγοι αυτών εξαπλασιάστηκαν.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτούς του πολλαπλασιασμούς, ωστόσο, έδωσαν μη τυποποιημένες κυματομορφές που δεν μπορούσαν να παραχθούν από τη διαθέσιμη γεννήτρια. Με βάση τη τιμή κρουστικού ρεύματος που μπορούσε να παραχθεί από τη διαθέσιμη γεννήτρια, υπολογίστηκε ο συντελεστής διόρθωσης για την θεωρητική τιμή η οποία θα έπρεπε να είχε χρησιμοποιηθεί. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι του κρουστικού ρεύματος που εφαρμόστηκε στο μοντέλο κτιρίου κλίμακας 1:6 που περιγράψαμε για συγκεκριμένες μορφές κρουστικών, στο πρωτότυπο (1:1), θεωρητικά στο μοντέλο (1:6) και πρακτικά αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα [21].

		$i_{max}(kA)$	$T_1(\mu s)$	$T_2(\mu s)$
Πρωτεύον θετικό κρουστικό πλήγμα	Κλίμακα 1:1	200	10	350
	Κλίμακα 1:6	33,3	1,67	58,3
	Πείραμα	18	1,8	57
Πρωτεύον αρνητικό κρουστικό πλήγμα	Κλίμακα 1:1	-100	1	200
	Κλίμακα 1:6	-16,7	0,167	33,3
	Πείραμα	-5,5	0,25	12

Πίνακας 3.3: Παράμετροι των ρευμάτων δοκιμών [21]

Έτσι, όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, πολλαπλασιάστηκαν όχι μόνο με τον λόγο κλίμακας του Πίνακα 3.2, αλλά και με τους αντίστοιχους συντελεστές διόρθωσης που προκύπτουν από τον Πίνακα 3.3. Για παράδειγμα, η διαδικασία εύρεσης της πραγματικής τιμής τάσης ανηγμένης στο πρωτότυπο (1:1) για το πείραμα που περιγράψαμε είναι η ακόλουθη:

- Πολλαπλασιασμός της μετρούμενης τιμής με 1/6.
- Διόρθωση της προκύπτουσας τιμής για το θετικό κρουστικό ρεύμα, ώστε να ληφθεί υπόψη η μειωμένη τιμή μεγίστου των 18kA και η ελαφρώς μειωμένη τιμή του χρόνου μετώπου των 1,8μs. Πολλαπλασιασμός δηλαδή με

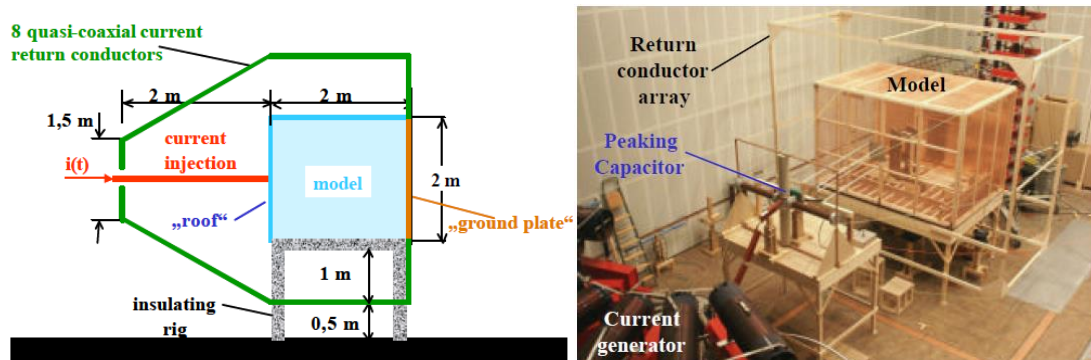
$$\frac{33,3kA}{18kA} \cdot \frac{1,8\mu s}{1,67\mu s} = 2.$$

- Διόρθωση της νέας προκύπτουσας τιμής για το αρνητικό κρουστικό ρεύμα ώστε να ληφθεί υπόψη η μειωμένη τιμή μεγίστου των -5,5kA και η μειωμένη τιμή του χρόνου μετώπου των 0,25μs. Πολλαπλασιασμός δηλαδή με

$$\frac{16,7kA}{5,5kA} \cdot \frac{0,25\mu s}{0,167\mu s} = 4,55.$$

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την εύρεση των πραγματικών τιμών τόσο της έντασης του μαγνητικού πεδίου όσο και των παραγώγων αυτής.

Στις Εικόνες 3.7 και 3.8 που ακολουθούν παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του συγκεκριμένου πειράματος, καθώς και μια φωτογραφία της ίδιας της διάταξης.



Εικόνες 3.7-3.8: Πειραματική διάταξη στο εργαστήριο και σχηματική αναπαράστασή της [22]

Συμπερασματικά, στα συγκεκριμένα πειράματα διαπιστώσαμε μια διαφορετική προσέγγιση, μέσω της εφαρμογής των Νόμων υπό κλίμακα αντί της Θεωρίας της Ομοιότητας για τη δημιουργία των μοντέλων κλίμακας. Αυτή η προσέγγιση λαμβάνει υπόψη το πεδίο του χρόνου, και αντίστοιχα τη μέγιστη συχνότητα ανάλυσης, σε αντίθεση με τις αναλύσεις που περιγράψαμε για πειράματα σε δεξαμενή. Υιοθέτησαν δε αυτή τη μεθοδολογία για να επεξεργαστούν χρονομεταβλητά μεγέθη.

Κεφάλαιο 4^ο

Πειραματικό μέρος

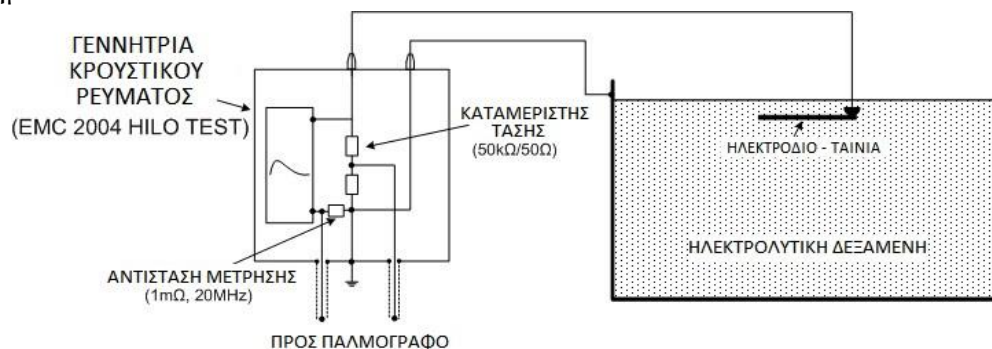
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, τα όργανα και ο διαθέσιμος εξοπλισμός για τη διεξαγωγή του πειράματός μας, ενώ στη συνέχεια θα αναλυθεί βήμα προς βήμα η πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε προκειμένου να φτάσουμε στη λήψη των μετρήσεων και στην εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων από αυτές.

4.1. Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των δοκιμών μας είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Κρουστική γεννήτρια ρεύματος
- Παλμογράφος
- Ομοαξονικά καλώδια
- Αγωγιμόμετρο/Διάλυμα για τη βαθμονόμηση του αγωγιμομέτρου
- Υγρόμετρο-θερμόμετρο
- Αγωγοί για τη σύνδεση των δοκιμίων και της δεξαμενής με τη γεννήτρια
- Δεξαμενή
- Δοκίμια

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 4.1: Πειραματική διάταξη

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε κάθε στοιχείο της διάταξης ξεχωριστά.

4.1.1. Κρουστική Γεννήτρια Ρεύματος

Η κρουστική γεννήτρια HILO/TEST:EMC-2004 είναι μια κρουστική γεννήτρια ρεύματος που χρησιμοποιεί το σύστημα EMC 2004 το οποίο έχει σχεδιαστεί για δοκιμές υψηλής τάσης/υψηλών ρευμάτων σε ηλεκτρικά εξαρτήματα, προστασίες από υπερτάσεις και ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η γεννήτρια παράγει κρουστικά ρεύματα με κυματομορφή 8/20 μ s και μέγιστη τιμή ρεύματος που κυμαίνεται από 0,5 έως 25 kA. Η γεννήτρια διαθέτει δύο εξόδους, οι οποίες μέσω ενός καταμεριστή με λόγο καταμερισμού 1000:1 και μιας αντίστασης μέτρησης 1m Ω μας δίνουν αντιστοίχως την τάση και το ρεύμα εξόδου υποβαθμισμένα σε επίπεδα κατάλληλα ώστε να μετρηθούν από τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης (παλμογράφος). Έτσι, εάν για παράδειγμα το πραγματικό ρεύμα εξόδου είναι 5kA, στην έξοδο της γεννήτριας και συνεπώς στον παλμογράφο θα λάβουμε 5V \rightarrow 5A.

Η γεννήτρια HILO-TEST:EMC-2004 δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας, επεξεργασίας και εκτέλεσης αυτόματων διαδικασιών δοκιμών ("Test Procedure"), επιτρέπει ωστόσο και την εκτέλεση χειροκίνητων δοκιμών ("Manual Test"). Στο πείραμά μας χρησιμοποιήσαμε τις δεύτερες, καθώς επιθυμούσαμε να λάβουμε καθορισμένες μετρήσεις οι οποίες δεν εμφάνιζαν κάποια περιοδικότητα.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αναλυτικά στοιχεία της κρουστικής γεννήτριας ρεύματος του πειράματος. (Πίνακας 4.1)

LCD μονάδα ελεγχόμενη από μικροεπεξεργαστή	8*40 χαρακτήρες
Parallel printer interface for on-line documentation	25-way 'D' υποδοχή
Οπτική διεπαφή 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, προσαρμόσιμη	0,2 – 10 kV, \pm 2%
Πολικότητα παλμού εξόδου	POS/NEG/ALT
Μέγιστη αποθηκευόμενη 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 ενδείξεις σύμφωνα με VDE 0104	24 V = 230V, 60W
Κύρια 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

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

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η κρουστική γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.



Εικόνες 4.2-4.3: Κρουστική γεννήτρια ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004

Γυρνώντας το κλειδί που βρίσκεται στο κάτω αριστερό άκρο του ταμπλό της γεννήτριας, η συσκευή ενεργοποιείται. Στην κεντρική 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 αναμμένη είναι η πράσινη ένδειξη, τόσο στο ταμπλό της γεννήτριας, όσο και στο επάνω μέρος της (*Εικόνα 4.5*).



Εικόνα 4.4: Εμπρόσθιο ταμπλό γεννήτριας

Όπως έχουμε σημειώσει, στο πείραμά μας όλες οι δοκιμές έγιναν χειροκίνητα (“Manual Test”). Μόλις το επιλέξουμε πατώντας το αντίστοιχο κουμπί, ανάβει η κόκκινη ένδειξη, κάτι που σημαίνει πως οποιαδήποτε στιγμή το σύστημα μπορεί να τεθεί υπό τάση. Στην κεντρική 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 (8/20 μ s). (*Εικόνα 4.4*)



Εικόνα 4.5: Ρύθμιση τάσης φόρτισης της γεννήτριας υπό τάση

Ρυθμίζουμε την τάση φόρτισης μέσω της ροδέλας, με την επιλογή Start πραγματοποιείται η φόρτιση και τελικά πατώντας την επιλογή Trigger γίνεται η έγχυση του κρουστικού ρεύματος στο ηλεκτρόδιο.

4.1.2. Παλμογράφος

Ο παλμογράφος Tektronix TDS 2014C, που είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της εταιρίας, διαθέτει 4 κανάλια, ενώ διαθέτει και θύρα USB για τη διασύνδεση με εκτυπωτή ή αποθηκευτικού μέσου (USB Flash Drive). Να σημειώσουμε εδώ ότι για τις μετρήσεις μας χρησιμοποιήσαμε τα κανάλια CH2 και CH3. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο παλμογράφος (Εικόνα 4.6), καθώς και ένα πίνακας με τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 4.2).



Εικόνα 4.6: Εμπρόσθια όψη παλμογράφου Tektronix TDS 2014C

Οθόνη (QVGA LCD)	TFT
Εύρος ζώνης	100 MHz
Κανάλια	4
Εξωτερική είσοδος ενεργοποίησης	Περιλαμβάνεται
Ρυθμός δειγματοληψίας σε κάθε κανάλι	2 GS/s
Μήκος εγγραφής	2,5000 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 13Vp-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

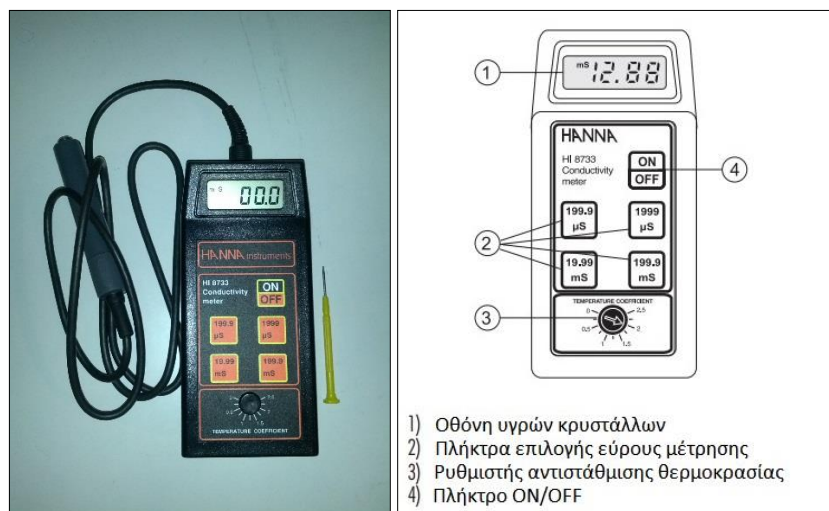
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά παλμογράφου Tektronix TDS 2014C

4.1.3. Ομοαξονικά καλώδια (διαφορικό probe)

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

4.1.4. Αγωγιμόμετρο-Διαλύματα βαθμονόμησης

Για την καταγραφή της αγωγιμότητας του διαλύματος νερού μέσα στη δεξαμενή μας χρησιμοποιήσαμε το αγωγιμόμετρο HANNA Instruments 8733, το οποίο φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. (Εικόνα 4.7)



Εικόνα 4.7: Αγωγιμόμετρο HANNA Instruments 8733 και λειτουργική περιγραφή

Απαραίτητη για τη σωστή ρύθμιση του αγωγιμομέτρου είναι η χρήση των πρότυπων διαλυμάτων βαθμονόμησης, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Διαλύματα βαθμονόμησης

Αναλόγως με το εύρος τιμών των αγωγιμοτήτων που θέλουμε να μετρήσουμε και την κλίμακα του οργάνου που θα χρησιμοποιήσουμε επιλέγεται το κατάλληλο διάλυμα βαθμονόμησης. Έτσι, για σχετικά χαμηλές τιμές αγωγιμότητας, όπως αυτές κάτω από τις οποίες διεξήχθη το πείραμά μας, 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 μετρήσει τη θερμοκρασία του διαλύματος με τη βοήθεια θερμομέτρου, εντοπισμός της αντίστοιχης τιμής 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 πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του αγωγιμομέτρου HI 8733.

Εύρος	0,0 ως 199,9 / 0 ως 1999 μ S/cm 0,00 ως 19,99 / 0,0 ως 199,9 mS/cm
Ανάλυση	0,1 / 1 μ S/cm 0,01 / 0,1 mS/cm
Ακρίβεια (στους 20°C)	\pm 1% σε πλήρη κλίμακα, εξαιρουμένου σφάλματος probe
Τυπική EMC απόκλιση	\pm 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	1x 9V αλκαλική/ περί 100hrs συνεχούς χρήσης
Διαστάσεις	164 x 76 x 45 mm
Βάρος	250 g

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά αγωγιμομέτρου HI 8733

4.1.5. Υγρόμετρο-Θερμόμετρο

Για την καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών υγρασίας, πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς και για την ρύθμιση του αγωγιμομέτρου σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράψαμε προηγουμένως, γίνεται χρήση του υγρομέτρου Testo 511 και του θερμομέτρου OMEGAETTE HH314. Στις *Εικόνες 4.9 και 4.10* που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δύο συσκευές.



Εικόνες 4.9-4.10: Θερμόμετρο OMEGAETTE και υγρόμετρο Testo 511

4.1.6. Αγωγοί για τη σύνδεση δοκιμίων και δεξαμενής με τη γεννήτρια

Για την μετάδοση του κρουστικού ρεύματος από τη γεννήτρια στο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε αγωγός με διατομή 4mm², ενώ στην επιστροφή συνδέθηκε το σώμα της δεξαμενής με τον άλλο δέκτη της γεννήτριας με αγωγό διατομής 50mm².

4.1.7. Δεξαμενή

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μια μεταλλική δεξαμενή μέσα στην οποία ήταν τοποθετημένο το ηλεκτρολυτικό διάλυμα, ενώ οι διαστάσεις της ήταν 2m X 1m X 0,5m. Οι διαστάσεις αυτές εξυπηρετούν αφενός τη μετακίνηση και τοποθέτησή της στο χώρο του εργαστηρίου και αφετέρου επαρκούν για τη λήψη μετρήσεων σε κατάλληλα δοκίμια, το μέγεθος των οποίων θα επιλεγεί βάσει αυτών των διαστάσεων, όπως θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα παρακάτω.

4.1.8. Δοκίμια

Τα δοκίμια είναι εκείνα τα ηλεκτρόδια πάνω στα οποία εφαρμόζονται τα κρουστικά ρεύματα της γεννήτριας και τα αντικείμενα ουσιαστικά των μετρήσεών μας. Το υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν ήταν ο χαλκός. Για τις ανάγκες του πειράματος ήταν αναγκαία η χρησιμοποίηση δοκιμίων διαφορετικών διαστάσεων, έτσι ώστε, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, να επιβεβαιωθούν ή όχι τα συμπεράσματα και οι τύποι στους οποίους καταλήξαμε μέσω της θεωρητικής μελέτης που έχουμε ήδη πραγματοποιήσει.

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

- 2cm X 20cm
- 3cm X 30cm
- 4cm X 40cm
- 6cm X 60cm

Στην *Εικόνα 4.11* παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια-ταινίες.



Εικόνα 4.11: Τα τέσσερα χρησιμοποιηθέντα ηλεκτρόδια-ταινίες

Αρχικά υπήρξε σκέψη για χρησιμοποίηση δύο επιπλέον δοκιμίων, 1cm X 10cm και 7cm X 70cm. Ωστόσο, το μέγεθος και των δύο αυτών δοκιμίων τελικά κρίθηκε ακατάλληλο για τις ανάγκες του πειράματός μας, καθώς το πρώτο θα ήταν εξαιρετικά μικρό, ενώ το δεύτερο θεωρείται δεδομένο ότι θα εμφάνιζε σε πολύ

μεγαλύτερο βαθμό τα ίδια προβλήματα που παρουσίασε το 6x60cm, και τα οποία θα περιγράψουμε στη συνέχεια (περιορισμός λόγω διαστάσεων δεξαμενής).

4.2. Πειραματική διαδικασία

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε βήμα προς βήμα την πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε για την εκτέλεση του πειράματός μας, παρουσιάζοντας πίνακες με τις μετρήσεις και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία. Τα παλμογραφήματα των μετρήσεων θα παρουσιαστούν ξεχωριστά στο τέλος, σε ειδικό παράρτημα.

4.2.1. Στάδιο προετοιμασίας

Σε πρώτο στάδιο πρέπει να επιλέξουμε τις αγωγιμότητες για τις οποίες θα πραγματοποιήσουμε τις δοκιμές μας. Το θαλασσινό νερό έχει αγωγιμότητα περί τα 5 S/m (Siemens ανά μέτρο). Για να μπορέσουμε να επιβεβαιώσουμε τους θεωρητικούς τύπους στους οποίους καταλήξαμε στο προηγούμενο κομμάτι της εργασίας μας, θα πρέπει να εκτελέσουμε το πείραμα τουλάχιστον σε 2 διαφορετικές αγωγιμότητες. Επειδή ωστόσο μεγαλύτερες τιμές αγωγιμότητας συνεπάγονται εντονότερα φαινόμενα ιονισμού, και σε συνδυασμό με το περιορισμένο μέγεθος της δεξαμενής μας ως προς αυτά, επιλέξαμε χαμηλότερες τιμές αγωγιμότητας από τις κοινές τιμές του θαλασσινού νερού. Συγκεκριμένα επιλέξαμε τις τιμές 1 S/m και 2 S/m για πρακτικούς λόγους (ο διπλάσιος λόγος τους μας διευκολύνει στις συγκρίσεις μας). Επίσης, για λόγους ευκολίας κρίναμε συνετό να εκτελέσουμε τις δοκιμές σε όλα τα ηλεκτρόδια κρατώντας σταθερή την αγωγιμότητα στην πρώτη τιμή (1 S/m) και έπειτα να τις επαναλάβουμε για διπλάσια τιμή αγωγιμότητας (2 S/m), παρά να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις αλλάζοντας κάθε φορά την αγωγιμότητα για κάθε ηλεκτρόδιο.

Αρχικά λοιπόν πρέπει να γεμίσουμε τη δεξαμενή μας με διάλυμα νερού αγωγιμότητας 1 S/m. Για να πετύχουμε κάτι τέτοιο 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 1kg ιωδιούχου αλατιού μέσα σε νερό και περιχύσαμε το διάλυμα στη δεξαμενή, αναδεύοντας εκ νέου το τελικό διάλυμα. Μετρώντας τη νέα αγωγιμότητα του συνολικού διαλύματος με το αγωγιμόμετρο -αφού πρώτα το βαθμονομήσαμε- επαναλάβαμε το τελευταίο βήμα όσες φορές ήταν αναγκαίο μέχρις ότου το συνολικό διάλυμα

της δεξαμενής να αποκτήσει αγωγιμότητα τιμής περί το 1 S/m. Η ακριβής τιμή της αγωγιμότητας του διαλύματος καταγράφεται σε κάθε μέτρηση (αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος προκαλούσαν ανεπαίσθητες αλλαγές και στην τιμή της αγωγιμότητας). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε μόλις δύο φορές, μία για κάθε αγωγιμότητα, καθώς δεν αλλάξαμε το νερό σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση.

Επόμενο βήμα της προετοιμασίας για την εκτέλεση του πειράματος αποτελεί το στήσιμο της πειραματικής διάταξης. Αρχικά συνδέουμε το ηλεκτρόδιο για το οποίο θέλουμε να πραγματοποιήσουμε τις 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, ίση απόσταση από τα πλαϊνά τοιχώματα, βάθος ανάλογο με το μήκος του ηλεκτροδίου). Για να επιτύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικά μέσα:

- ο 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 4.12)



Εικόνα 4.12: Μηχανισμός στήριξης ηλεκτροδίου μέσα στη δεξαμενή

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι για το βάθος του ηλεκτροδίου, παρόλο που δεν υπεισέρχεται στους λόγους κλίμακας που προέκυψαν από τις σχέσεις που χρησιμοποιήσαμε για την ταινία γείωσης, 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 2.9).

- ο Για την ισορρόπηση του δοκιμίου σε θέση ώστε να μην επηρεάζεται από το καλώδιο χρησιμοποιήσαμε μια ξύλινη κατασκευή σε σχήμα μονόζυγου (Εικόνα 4.13). Αυτό μας 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.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται ο μηχανισμός μηχανικής στήριξης που περιγράψαμε παραπάνω και η συνολική σύνδεση της πειραματικής διάταξης. (Εικόνες 4.13-4.14)



Εικόνες 4.13-4.14: Μηχανισμός στήριξης του καλωδίου τροφοδότησης και συνολική εικόνα της διάταξης

Αφού ολοκληρωθεί το στήσιμο της πειραματικής διάταξης, σειρά έχει η καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών υγρασίας, πίεσης και θερμοκρασίας πριν την έναρξη των μετρήσεων με τη βοήθεια του υγρομέτρου και θερμομέτρου. 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 επαναλαμβανόταν πριν την έναρξη των μετρήσεων κάθε μέρας. Εκτός του ελέγχου της τιμής της αγωγιμότητας του διαλύματος, πριν την έναρξη των μετρήσεων κάθε μέρας, αλλά και σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκειά της, πραγματοποιούνταν 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 εκκινήσουμε τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων.

4.2.2. Στάδιο λήψης μετρήσεων

Πριν παρουσιάσουμε τους πίνακες με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λάβαμε, θα πρέπει να εξηγήσουμε τη λογική με την οποία επιλέξαμε να πάρουμε τις μετρήσεις μας για συγκεκριμένα ηλεκτρόδια σε συγκεκριμένες τιμές ρεύματος.

Η επιλογή των τιμών αυτών στηρίχτηκε ασφαλώς στους θεωρητικούς τύπους που θέλουμε να επιβεβαιώσουμε πειραματικά, σχετικοί με τους λόγους κλίμακας των μεγεθών που υπεισέρχονται στο πρόβλημά μας. Συγκεκριμένα, αποδείξαμε 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 και συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων για σταθερό μήκος ηλεκτροδίου.

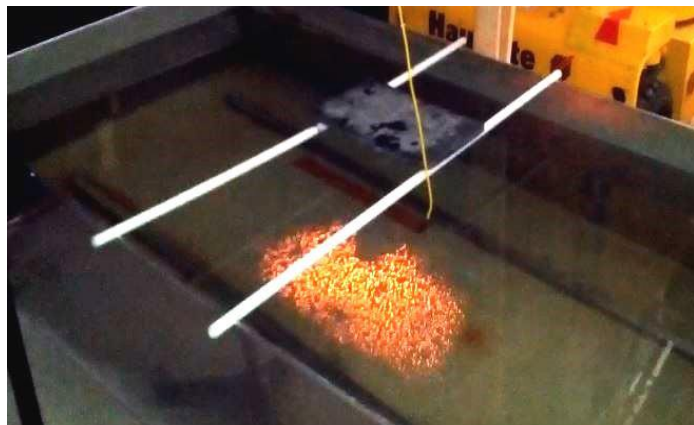
❖ 1^ο Σενάριο Σύγκρισης: Σταθερή αγωγιμότητα σ

Για τις συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων, ξεκινώντας για μια συγκεκριμένη τιμή αγωγιμότητας (π.χ. 1 S/m), θεωρώντας ότι με σταθερή αγωγιμότητα παραμένει σταθερή και η κρίσιμη ένταση ιονισμού ($K_{E_0} = K_\rho = 1$), η παραπάνω σχέση παίρνει τη απλούστερη μορφή $K_l^2 = K_{I_m}$. Συνεπώς, οι τιμές ρεύματος στις οποίες θέλουμε να πάρουμε τις 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. Με αυτό τον τρόπο είναι σαφή τα βήματα τα οποία ακολουθήσαμε για να βρούμε τις επιθυμητές τιμές μετρούμενου ρεύματος εξόδου.

- ✓ Υπολογίσαμε για κάθε ηλεκτρόδιο το λόγο μήκους του ως προς τα υπόλοιπα. Προφανώς για κάθε ζεύγος ηλεκτροδίων γίνεται μία φορά η σύγκριση (μεγαλύτερο προς μικρότερο)
- ✓ Επιλέξαμε 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 100 A, ωστόσο αυτό θα μπορούσε να αλλάξει ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε ηλεκτροδίου (σε περιπτώσεις που δεν προέκυπταν επαρκείς μετρήσεις, το βήμα μειωνόταν στα 50 A)
- ✓ 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} .

Να σημειωθεί εδώ ότι το ρεύμα I_m είναι το μέγιστο του ρεύματος που διαρρέει το δοκίμιο και όχι το μέγιστο ρεύμα που δίνει η γεννήτρια, καθώς η συμμετοχή του δοκιμίου στο κύκλωμα οδηγεί σε μείωση της έντασης του ρεύματος. Έτσι, μπορεί στην οθόνη της γεννήτριας να αναγράφονται κρουστικά ρεύματα από 0,5-25 kA με βήμα 100 A, ωστόσο πρόκειται για τα αντίστοιχα ρεύματα βραχυκυκλώματος και στην πραγματικότητα το φάσμα των μετρούμενων κρουστικών ρευμάτων που μπορούμε να λάβουμε είναι αρκετά μικρότερο και διαφέρει ανάλογα με την αντίσταση του ηλεκτροδίου.

Επαναλαμβάνοντας τα παραπάνω βήματα για κάθε δοκίμιο εκτός του 6x60cm, του οποίου οι απαιτούμενες τιμές προκύπτουν από τους λόγους με τα προηγούμενα, λαμβάνουμε επαρκείς μετρήσεις ώστε να είναι δυνατές οι συγκρίσεις μεταξύ όλων των ηλεκτροδίων μεταξύ τους. Για κάθε μετρούμενη τιμή ρεύματος που έπρεπε να λάβουμε, επαναλαμβάνουμε τη μέτρηση 5 φορές και υπολογίζουμε τον μέσο όρο



Εικόνα 4.15: Ηλεκτρική διάσπαση μεταξύ ηλεκτροδίου-δεξαμενής

των μετρήσεών μας ως την τελική μετρούμενη τιμή, για λόγους επαναληψιμότητας και ακρίβειας.

Ένα σημαντικό στοιχείο που περιορίσε τον αριθμό των δυνατών συγκρίσεων, άρα και μετρήσεων, ήταν η ηλεκτρική διάσπαση μεταξύ των ηλεκτροδίων και της δεξαμενής στις πολύ υψηλές τιμές κρουστικών ρευμάτων. Το φαινόμενο

εμφανιζόταν ως πολλοί μικροί σπινθηρισμοί στον πυθμένα της δεξαμενής (Εικόνα 4.15), καθώς και επάνω στο ηλεκτρόδιο στις αιχμές του, και μας ανάγκαζε να σταματήσουμε σε εκείνο το σημείο τις μετρήσεις για το συγκεκριμένο δοκίμιο προκειμένου να μην υπάρξει αλλοίωση των πειραματικών μας αποτελεσμάτων.

❖ *2^ο Σενάριο Σύγκρισης: Σταθερό μήκος ηλεκτροδίου 1*

Για συγκρίσεις μεταξύ των δύο αγωγιμοτήτων για το ίδιο ηλεκτρόδιο επανερχόμαστε στον τύπο $K_{E_0} K_l^2 = K_\rho K_{I_m}$. Αυτή τη φορά παραμένουν σταθερά τα μήκη ($K_l^2 = 1$). Κάνοντας την παραδοχή ότι η κρίσιμη ένταση ιονισμού E_0 παραμένει σταθερή για τα εύρη αγωγιμοτήτων που διερευνήσαμε (δηλαδή για $K_{E_0} = 1$) θα έχουμε :

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

Συνεπώς, για διπλάσια τιμή αγωγιμότητας θα πρέπει να λάβουμε μετρήσεις στις διπλάσιες τιμές μετρούμενου ρεύματος για το ίδιο ηλεκτρόδιο. Έτσι, με βάση τις τιμές ρεύματος στις οποίες πήραμε μετρήσεις σε κάθε ηλεκτρόδιο για $\sigma=1$ S/m (ξεκινώντας από τις μικρότερες), καταλήξαμε στις τιμές ρεύματος που έπρεπε να πάρουμε μετρήσεις για $\sigma=2$ S/m, οι οποίες είναι ακριβώς διπλάσιες σε κάθε περίπτωση. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία κατά τη λήψη των μετρήσεων, ολοκληρώσαμε την πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο.

Κεφάλαιο 5^ο

Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λάβαμε με βάση τη διαδικασία που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών, τονίζοντας τα σημαντικότερα από τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου γίνονται προτάσεις για το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί το υπάρχον υλικό σε επόμενες εργασίες.

5.1. Πίνακες αποτελεσμάτων

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεών μας, οι λόγοι των μηκών, ρευμάτων και αντιστάσεων μεταξύ των ηλεκτροδίων, καθώς και τα ποσοστά απόκλισης τους από της θεωρητικές τιμές, για καθεμία από τις δύο αγωγιμότητες και για κάθε ένα από τους δύο ορισμούς της μεταβατικής αντίστασης. Για την εξαγωγή των λόγων αντιστάσεων K_Z θεωρήσαμε δύο περιπτώσεις, την (α) περίπτωση για την οποία ο λόγος των δύο διαφορετικών αγωγιμοτήτων ήταν πάντοτε ακριβώς ίσος με 2, και την (β) κατά την οποία λαμβάναμε το λόγο αγωγιμοτήτων από τις ακριβείς ενδείξεις του αγωγιμομέτρου, όπως καταγράφηκαν πριν από κάθε μέτρηση. Να σημειωθεί ότι στους πίνακες που ακολουθούν, για τις συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων, ο δείκτης των ρευμάτων υποδηλώνει το μήκος του ηλεκτροδίου στο οποίο αναφερόμαστε σε cm, ενώ στις συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων υποδηλώνει την αγωγιμότητα στην οποία αντιστοιχίζεται το συγκεκριμένο ρεύμα σε S/m.

Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της απόκλισης των διαφόρων λόγων κλίμακας ήταν ο εξής:

$$\Delta K(\%) = \frac{K_{\theta\epsilon\omega\rho.} - K_{\pi\epsilon\iota\rho.}}{K_{\theta\epsilon\omega\rho.}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

5.1.1. ΣΥΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

5.1.1.1. Για $\sigma=1$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

➤ 6x60 – 2x20 → $K_I = 3$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
450	50	9	444,8	50,3	8,8429	-1,745	0,333	0,318	2,1870	5,9141	0,3697	10,940	16,124
900	100	9	896	98,9	9,0596	0,663	0,333	0,318	2,1696	5,8900	0,3683	10,509	15,673
1350	150	9	1358	148,2	9,1632	1,814	0,333	0,318	2,2533	5,8731	0,3836	15,099	20,478
1800	200	9	1800	198	9,0909	1,010	0,333	0,318	2,1511	5,8990	0,3646	9,397	14,509
2250	250	9	2260	248,8	9,0836	0,929	0,333	0,318	2,1911	5,8682	0,3733	12,019	17,253
2700	300	9	2700	300	9,0000	0,000	0,333	0,318	2,1155	5,9333	0,3565	6,966	11,965
3150	350	9	3144	349,6	8,9931	-0,076	0,333	0,318	2,1374	5,9382	0,3599	7,982	13,028
3600	400	9	3604	400,8	8,9920	-0,089	0,333	0,318	2,1154	5,9581	0,3550	6,515	11,493
4050	450	9	4056	451,2	8,9893	-0,118	0,333	0,318	2,1065	5,9929	0,3515	5,450	10,378
Μέσος Όρος					9,0238	0,265					0,3647	9,430	14,544

➤ 6x60 – 3x30 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	401,6	102,8	3,9066	-2,335	0,500	0,478	2,2151	4,0000	0,5537	10,757	15,933
800	200	4	803,2	198,8	4,0402	1,006	0,500	0,478	2,1762	4,0563	0,5365	7,303	12,318
1200	300	4	1184	300,8	3,9361	-1,596	0,500	0,478	2,1993	4,0293	0,5458	9,168	14,269
1600	400	4	1604	399,2	4,0180	0,451	0,500	0,478	2,1620	3,9980	0,5407	8,159	13,213
2000	500	4	2004	500	4,008	0,200	0,500	0,478	2,1636	4,0000	0,5409	8,184	13,239
2400	600	4	2400	600	4,0000	0,000	0,500	0,478	2,1666	3,9667	0,5462	9,244	14,349
2800	700	4	2796	699,2	3,9988	-0,029	0,500	0,478	2,1344	4,0160	0,5314	6,298	11,265
3200	800	4	3200	800	4,0000	0,000	0,500	0,478	2,1275	4,0150	0,5298	5,978	10,930
3600	900	4	3604	897,6	4,0151	0,379	0,500	0,478	2,1154	4,0018	0,5286	5,724	10,665
4000	1000	4	3992	1010	3,9524	-1,188	0,500	0,478	2,1042	3,9762	0,5291	5,839	10,785
Μέσος Όρος					3,9875	-0,311					0,5383	7,665	12,696

➤ 6x60 – 4x40 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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	233,2	98,2	2,3747	5,544	0,667	0,667	2,2024	2,9369	0,7499	12,487	12,487
450	200	2,25	444,8	198,4	2,2419	-0,358	0,667	0,667	2,1870	2,9839	0,7329	9,944	9,944
675	300	2,25	674,4	298	2,2630	0,582	0,667	0,667	2,1737	3,0121	0,7216	8,253	8,253
900	400	2,25	896	400	2,2400	-0,444	0,667	0,667	2,1696	3,0000	0,7232	8,482	8,482
1125	500	2,25	1112	499,2	2,2275	-0,997	0,667	0,667	2,1762	3,0008	0,7252	8,784	8,784
1350	600	2,25	1358	600,8	2,2603	0,459	0,667	0,667	2,2533	2,9960	0,7521	12,816	12,816
1575	700	2,25	1556	700,8	2,2203	-1,319	0,667	0,667	2,1696	2,9795	0,7282	9,231	9,231
1800	800	2,25	1800	798,4	2,2545	0,200	0,667	0,667	2,1511	3,0110	0,7144	7,162	7,162
2025	900	2,25	2028	896	2,2633	0,595	0,667	0,667	2,1499	2,9955	0,7177	7,655	7,655

2250	1000	2,25	2260	1000,4	2,2590	0,404	0,667	0,667	2,1912	2,9988	0,7306	9,601	9,601
2475	1100	2,25	2480	1100	2,2545	0,202	0,667	0,667	2,1290	3,0073	0,7079	6,194	6,194
2700	1200	2,25	2700	1200	2,2500	0,000	0,667	0,667	2,1155	2,9867	0,7083	6,250	6,250
2925	1300	2,25	2924	1300	2,2492	-0,034	0,667	0,667	2,1477	3,0062	0,7144	7,167	7,167
3150	1400	2,25	3144	1400	2,2457	-0,190	0,667	0,667	2,1374	3,0000	0,7124	6,870	6,870
3375	1500	2,25	3380	1500	2,2533	0,148	0,667	0,667	2,1159	3,0133	0,7022	5,331	5,331
3600	1600	2,25	3604	1600	2,2525	0,111	0,667	0,667	2,1154	2,9650	0,7134	7,020	7,020
3825	1700	2,25	3832	1704	2,2488	-0,052	0,667	0,667	2,1043	2,9765	0,7069	6,049	6,049
Μέσος Όρος					2,2564	0,285					0,7212	8,1939	8,1939

➤ 4x40 – 2x20 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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)
200	50	4	198,4	50,3	3,9443	-1,392	0,500	0,478	2,9838	5,9141	0,5045	0,906	5,621
400	100	4	400	98,9	4,0444	1,112	0,500	0,478	3,0000	5,8900	0,5093	1,868	6,628
600	150	4	600,8	148,2	4,0539	1,350	0,500	0,478	2,9960	5,8731	0,5101	2,024	6,791
800	200	4	798,4	198	4,0323	0,808	0,500	0,478	3,0110	5,8990	0,5104	2,086	6,856
1000	250	4	1000,4	248,8	4,0209	0,523	0,500	0,478	2,9988	5,8682	0,5110	2,206	6,982
1200	300	4	1200	300	4,0000	0,000	0,500	0,478	2,9866	5,9333	0,5033	0,674	5,379
1400	350	4	1400	349,6	4,0045	0,114	0,500	0,478	3,0000	5,9382	0,5052	1,040	5,762
1600	400	4	1600	400,8	3,9920	-0,200	0,500	0,478	2,9650	5,9581	0,4976	-0,471	4,180
2000	500	4	2004	501,6	3,9952	-0,120	0,500	0,478	2,9940	5,9729	0,5012	0,253	4,938
2400	600	4	2404	601,6	3,9960	-0,100	0,500	0,478	2,9783	5,9840	0,4977	-0,456	4,195
2800	700	4	2800	699,2	4,0045	0,114	0,500	0,478	2,9771	5,9382	0,5013	0,271	4,956
Μέσος Όρος					4,0080	0,201					0,5047	0,945	5,662

➤ 4x40 – 3x30 → $K_I = 1,333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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)	
177,78	100	1,78	171,2	102,8	1,6653	-6,323	0,500	0,478	2,9813	4,0000	0,74533	-0,623	4,021	
355,56	200	1,78	352	198,8	1,7706	-0,402	0,500	0,478	3,0114	4,0563	0,74238	-1,015	3,610	
533,33	300	1,78	535,2	300,8	1,7792	0,083	0,500	0,478	3,0007	4,0293	0,74474	-0,701	3,939	
711,11	400	1,78	710,4	399,2	1,7795	0,100	0,500	0,478	2,9842	3,9980	0,74643	-0,476	4,175	
888,89	500	1,78	880	500	1,7600	-1,000	0,500	0,478	2,9864	4,0000	0,74659	-0,455	4,197	
1066,67	600	1,78	1062	600	1,7700	-0,437	0,500	0,478	3,0019	3,9667	0,75678	0,904	5,619	
1244,44	700	1,78	1240	699,2	1,7734	-0,243	0,500	0,478	2,9806	4,0160	0,74219	-1,041	3,583	
1422,22	800	1,78	1420	800	1,7750	-0,156	0,500	0,478	3,0056	4,0150	0,7486	-0,187	4,477	
1600	900	1,78	1600	897,6	1,7825	0,267	0,500	0,478	2,9650	4,0018	0,74092	-1,211	3,406	
1777,78	1000	1,78	1784	1010	1,7663	-0,644	0,500	0,478	2,9955	3,9762	0,75335	0,447	5,141	
Μέσος Όρος					1,7622	-0,876						0,74673	-0,4358	4,2167

➤ 3x30 – 2x20 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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	224,8	98,9	2,2730	1,022	0,667	0,667	4,0640	5,8900	0,6899	3,499	3,499	
450	200	2,25	448	198	2,2626	0,561	0,667	0,667	4,0000	5,8990	0,6780	1,712	1,712	
675	300	2,25	675,2	300	2,2506	0,030	0,667	0,667	3,9751	5,9333	0,6699	0,495	0,495	
900	400	2,25	897,6	400,8	2,2395	-0,466	0,667	0,667	4,0017	5,9581	0,6716	0,748	0,748	
1125	500	2,25	1130	501,6	2,2527	0,124	0,667	0,667	4,0000	5,9729	0,6696	0,454	0,454	
1350	600	2,25	1350	601,6	2,2440	-0,266	0,667	0,667	4,0000	5,9840	0,6684	0,267	0,267	
1575	700	2,25	1576	699,2	2,2540	0,178	0,667	0,667	3,9644	5,9382	0,6676	0,143	0,143	
Μέσος Όρος					2,2538	0,169						0,6736	1,045	1,045

5.1.1.2. Για $\sigma=1 \text{ S/m}$ και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

➤ 6x60 – 2x20 → $K_I = 3$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
$I_{60} (A)$	$I_{20} (A)$	K_I	$I_{60} (A)$	$I_{20} (A)$	K_I		(α)	(β)	$Z_{60} (\Omega)$	$Z_{20} (\Omega)$	K_Z	(α)	(β)
450	50	9	444,8	50,3	8,8429	-1,745	0,333	0,318	1,8848	5,5008	0,3426	2,797	7,601
900	100	9	896	98,9	9,0596	0,663	0,333	0,318	1,8839	5,5744	0,3379	1,388	6,125
1350	150	9	1358	148,2	9,1632	1,814	0,333	0,318	1,9057	5,5169	0,3454	3,632	8,474
1800	200	9	1800	198	9,0909	1,010	0,333	0,318	1,8444	5,5677	0,3312	-0,617	4,027
2250	250	9	2260	248,8	9,0836	0,929	0,333	0,318	1,8371	5,6013	0,3279	-1,603	2,995
2700	300	9	2700	300	9,0000	0,000	0,333	0,318	1,8014	5,6667	0,3179	-4,627	-0,171
3150	350	9	3144	349,6	8,9931	-0,076	0,333	0,318	1,8142	5,6522	0,3209	-3,705	0,795
3600	400	9	3604	400,8	8,9920	-0,089	0,333	0,318	1,8135	5,7186	0,3171	-4,860	-0,415
4050	450	9	4056	451,2	8,9893	-0,118	0,333	0,318	1,7761	5,7270	0,3101	-6,959	-2,611
Μέσος Όρος					9,0238	0,265					0,3279	-1,617	2,980

➤ 6x60 – 3x30 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
$I_{60} (A)$	$I_{30} (A)$	K_I	$I_{60} (A)$	$I_{30} (A)$	K_I		(α)	(β)	$Z_{60} (\Omega)$	$Z_{30} (\Omega)$	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	401,6	102,8	3,9066	-2,335	0,500	0,478	1,8924	3,7665	0,5024	0,486	5,182
800	200	4	803,2	198,8	4,0402	1,006	0,500	0,478	1,9173	3,8471	0,4983	-0,323	4,335
1200	300	4	1184	300,8	3,9361	-1,596	0,500	0,478	1,8986	3,8138	0,4978	-0,433	4,219
1600	400	4	1604	399,2	4,0180	0,451	0,500	0,478	1,8952	3,7174	0,5098	1,966	6,731
2000	500	4	2004	500	4,008	0,200	0,500	0,478	1,8642	3,7680	0,4947	-1,047	3,577
2400	600	4	2400	600	4,0000	0,000	0,500	0,478	1,8600	3,7200	0,5000	0,000	4,673

2800	700	4	2796	699,2	3,9988	-0,029	0,500	0,478	1,8397	3,8158	0,4821	-3,571	0,935
3200	800	4	3200	800	4,0000	0,000	0,500	0,478	1,8250	3,8400	0,4752	-4,948	-0,506
3600	900	4	3604	897,6	4,0151	0,379	0,500	0,478	1,8135	3,7790	0,4799	-4,019	0,466
4000	1000	4	3992	1010	3,9524	-1,188	0,500	0,478	1,7956	3,7624	0,4772	-4,550	-0,090
Μέσος Όρος					3,9875	-0,311					0,4917	-1,643	2,952

➤ 6x60 – 4x40 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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	233,2	98,2	2,3747	5,544	0,667	0,667	1,9176	2,6680	0,7187	7,814	7,814
450	200	2,25	444,8	198,4	2,2419	-0,358	0,667	0,667	1,8848	2,7218	0,6925	3,878	3,878
675	300	2,25	674,4	298	2,2630	0,582	0,667	0,667	1,8481	2,7329	0,6762	1,440	1,440
900	400	2,25	896	400	2,2400	-0,444	0,667	0,667	1,8839	2,7640	0,6815	2,239	2,239
1125	500	2,25	1112	499,2	2,2275	-0,997	0,667	0,667	1,8992	2,7532	0,6898	3,477	3,477
1350	600	2,25	1358	600,8	2,2603	0,459	0,667	0,667	1,9057	2,7297	0,6981	4,723	4,723
1575	700	2,25	1556	700,8	2,2203	-1,319	0,667	0,667	1,8714	2,6998	0,6931	3,979	3,979
1800	800	2,25	1800	798,4	2,2545	0,200	0,667	0,667	1,8444	2,7956	0,6597	-1,035	-1,035
2025	900	2,25	2028	896	2,2633	0,595	0,667	0,667	1,8895	2,7723	0,6815	2,236	2,236
2250	1000	2,25	2260	1000,4	2,2590	0,404	0,667	0,667	1,8372	2,7749	0,6620	-0,690	-0,690
2475	1100	2,25	2480	1100	2,2545	0,202	0,667	0,667	1,8014	2,7600	0,6527	-2,093	-2,093
2700	1200	2,25	2700	1200	2,2500	0,000	0,667	0,667	1,8413	2,6967	0,6828	2,422	2,422
2925	1300	2,25	2924	1300	2,2492	-0,034	0,667	0,667	1,8142	2,7600	0,6573	-1,399	-1,399
3150	1400	2,25	3144	1400	2,2457	-0,190	0,667	0,667	1,7988	2,7429	0,6558	-1,627	-1,627
3375	1500	2,25	3380	1500	2,2533	0,148	0,667	0,667	1,8135	2,8053	0,6464	-3,031	-3,031
3600	1600	2,25	3604	1600	2,2525	0,111	0,667	0,667	1,7995	2,7200	0,6616	-0,758	-0,758
3825	1700	2,25	3832	1704	2,2488	-0,052	0,667	0,667	1,7761	2,7606	0,6433	-3,491	-3,491
Μέσος Όρος					2,2564	0,285					0,6737	1,063	1,063

➤ 4x40 – 2x20 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{40} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{40} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{40} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200	50	4	198,4	50,3	3,9443	-1,392	0,500	0,478	2,7217	5,5008	0,4947	-1,041	3,584
400	100	4	400	98,9	4,0444	1,112	0,500	0,478	2,7640	5,5744	0,4958	-0,833	3,801
600	150	4	600,8	148,2	4,0539	1,350	0,500	0,478	2,7296	5,5169	0,4947	-1,042	3,582
800	200	4	798,4	198	4,0323	0,808	0,500	0,478	2,7955	5,5677	0,5021	0,422	5,115
1000	250	4	1000,4	248,8	4,0209	0,523	0,500	0,478	2,7748	5,6013	0,4954	-0,920	3,710
1200	300	4	1200	300	4,0000	0,000	0,500	0,478	2,6966	5,6667	0,4758	-4,824	-0,376
1400	350	4	1400	349,6	4,0045	0,114	0,500	0,478	2,7428	5,6522	0,4852	-2,945	1,590
1600	400	4	1600	400,8	3,9920	-0,200	0,500	0,478	2,7200	5,7186	0,4756	-4,871	-0,426
2000	500	4	2004	501,6	3,9952	-0,120	0,500	0,478	2,7705	5,7018	0,4858	-2,821	1,720
2400	600	4	2404	601,6	3,9960	-0,100	0,500	0,478	2,7487	5,7114	0,4812	-3,746	0,752
2800	700	4	2800	699,2	4,0045	0,114	0,500	0,478	2,7485	5,6979	0,4823	-3,524	0,984
Μέσος Όρος					4,0080	0,201					0,4881	-2,376	2,185

➤ 4x40 – 3x30 → $K_I = 1,333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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)
177,77	100	1,78	171,2	102,8	1,6653	-6,323	0,500	0,478	2,7570	3,7665	0,7319	-2,403	2,157
355,56	200	1,78	352	198,8	1,7706	-0,402	0,500	0,478	2,7000	3,8471	0,7018	-6,423	-2,050
533,33	300	1,78	535,2	300,8	1,7792	0,083	0,500	0,478	2,7862	3,8138	0,7305	-2,591	1,960
711,11	400	1,78	710,4	399,2	1,7795	0,100	0,500	0,478	2,7027	3,7174	0,7270	-3,062	1,468
888,89	500	1,78	880	500	1,7600	-1,000	0,500	0,478	2,7409	3,7680	0,7274	-3,011	1,521
1066,67	600	1,78	1062	600	1,7700	-0,437	0,500	0,478	2,8060	3,7200	0,7543	0,574	5,274
1244,44	700	1,78	1240	699,2	1,7734	-0,243	0,500	0,478	2,7161	3,8158	0,7118	-5,092	-0,657
1422,22	800	1,78	1420	800	1,7750	-0,156	0,500	0,478	2,7696	3,8400	0,7212	-3,831	0,663
1600	900	1,78	1600	897,6	1,7825	0,267	0,500	0,478	2,7200	3,7790	0,7197	-4,030	0,454
1777,78	1000	1,78	1784	1010	1,7663	-0,644	0,500	0,478	2,8341	3,7624	0,7532	0,436	5,129
Μέσος Όρος					1,7622	-0,876					0,7279	-2,943	1,592

➤ 3x30 – 2x20 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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_0 (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
225	100	2,25	224,8	98,9	2,2730	1,022	0,667	0,667	3,8007	5,5744	0,6818	2,272	2,272
450	200	2,25	448	198	2,2626	0,561	0,667	0,667	3,7767	5,5677	0,6783	1,751	1,751
675	300	2,25	675,2	300	2,2506	0,030	0,667	0,667	3,7855	5,6667	0,6680	0,206	0,206
900	400	2,25	897,6	400,8	2,2395	-0,466	0,667	0,667	3,7789	5,7186	0,6608	-0,876	-0,876
1125	500	2,25	1130	501,6	2,2527	0,124	0,667	0,667	3,8300	5,7018	0,6717	0,761	0,761
1350	600	2,25	1350	601,6	2,2440	-0,266	0,667	0,667	3,8518	5,7114	0,6744	1,162	1,162
1575	700	2,25	1576	699,2	2,2540	0,178	0,667	0,667	3,8071	5,6979	0,6681	0,223	0,223
Μέσος Όρος					2,2538	0,169					0,6719	0,785	0,785

5.1.1.3. Για $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

➤ 6x60 – 2x20 → $K_I = 3$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
450	50	9	441,6	52,96	8,3383	-7,351	0,333	0,327	1,2119	2,8776	0,4211	26,349	28,744
900	100	9	900,8	99,4	9,0623	0,693	0,333	0,327	1,2189	2,8893	0,4218	26,560	28,959
1350	150	9	1348	150	8,9866	-0,148	0,333	0,327	1,2195	2,9067	0,4195	25,875	28,261
1800	200	9	1800	198,8	9,0543	0,604	0,333	0,327	1,2066	2,9537	0,4085	22,557	24,881
2250	250	9	2260	250,4	9,0255	0,284	0,333	0,327	1,2123	2,9393	0,4124	23,743	26,089
2700	300	9	2700	302	8,9403	-0,662	0,333	0,327	1,1940	2,9563	0,4039	21,173	23,470
3150	350	9	3140	351,6	8,9306	-0,771	0,333	0,327	1,2050	2,9863	0,4035	21,060	23,355
Μέσος Όρος					8,9054	-1,050					0,4130	23,902	26,251

➤ **6x60 – 3x30 → $K_I = 2$**

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	400,8	100,4	3,9904	-0,239	0,500	0,491	1,1956	1,9912	0,6004	20,087	22,363
800	200	4	801,6	200,8	3,9920	-0,199	0,500	0,491	1,2155	2,0438	0,5947	18,950	21,205
1200	300	4	1200	299,6	4,0053	0,134	0,500	0,491	1,2166	2,0134	0,6042	20,860	23,151
1600	400	4	1600	400,8	3,9920	-0,200	0,500	0,491	1,2150	2,0200	0,6014	20,299	22,580
2000	500	4	2000	499,2	4,0064	0,160	0,500	0,491	1,2040	2,0192	0,5962	19,253	21,514
2400	600	4	2400	601,6	3,9893	-0,266	0,500	0,491	1,1983	2,0246	0,5918	18,377	20,621
2800	700	4	2800	700	4,0000	0,000	0,500	0,491	1,1971	2,0286	0,5901	18,028	20,266
3200	800	4	3200	800	4,0000	0,000	0,500	0,491	1,2025	2,0200	0,5952	19,059	21,316
Μέσος Όρος					3,9969	-0,076					0,5968	19,364	21,627

➤ **6x60 – 4x40 → $K_I = 1,5$**

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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	100,92	2,2116	-1,704	0,667	0,654	1,1917	1,5379	0,7749	16,242	18,446
450	200	2,25	441,6	202,4	2,1818	-3,030	0,667	0,654	1,2119	1,5771	0,7684	15,273	17,458
675	300	2,25	674,4	300,4	2,2450	-0,222	0,667	0,654	1,2099	1,5846	0,7635	14,540	16,711
900	400	2,25	900,8	400,8	2,2475	-0,111	0,667	0,654	1,2189	1,5888	0,7671	15,077	17,259
1125	500	2,25	1120	499,2	2,2435	-0,285	0,667	0,654	1,2250	1,5897	0,7705	15,585	17,776
1350	600	2,25	1348	600,8	2,2436	-0,281	0,667	0,654	1,2195	1,5872	0,7683	15,257	17,442
1575	700	2,25	1580	700	2,2571	0,317	0,667	0,654	1,2126	1,5971	0,7592	13,890	16,049
1800	800	2,25	1800	800	2,2500	0,000	0,667	0,654	1,2066	1,6000	0,7541	13,125	15,270
2025	900	2,25	2032	899,2	2,2597	0,435	0,667	0,654	1,1948	1,6014	0,7461	11,921	14,042
2250	1000	2,25	2260	1000	2,2600	0,444	0,667	0,654	1,2124	1,5960	0,7596	13,946	16,106
2475	1100	2,25	2472	1100	2,2472	-0,121	0,667	0,654	1,1893	1,5818	0,7518	12,780	14,918
2700	1200	2,25	2700	1200	2,2500	0,000	0,667	0,654	1,1940	1,5867	0,7525	12,885	15,025
2925	1300	2,25	2920	1300	2,2461	-0,171	0,667	0,654	1,1972	1,5877	0,7540	13,113	15,258
3150	1400	2,25	3140	1400	2,2428	-0,317	0,667	0,654	1,2050	1,5714	0,7668	15,032	17,213
Μέσος Όρος					2,2418	-0,360					0,7612	14,190	16,355

➤ 4x40 – 2x20 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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)
200	50	4	202,4	52,96	3,8217	-4,456	0,500	0,500	1,5770	2,8776	0,5480	9,609	9,609
400	100	4	400,8	99,4	4,0321	0,805	0,500	0,500	1,5888	2,8893	0,5498	9,978	9,978
600	150	4	600,8	150	4,0053	0,133	0,500	0,500	1,5872	2,9067	0,5460	9,212	9,212
800	200	4	800	198,8	4,0241	0,604	0,500	0,500	1,6000	2,9537	0,5416	8,338	8,338
1000	250	4	1000	250,4	3,9936	-0,160	0,500	0,500	1,5960	2,9393	0,5429	8,597	8,597
1200	300	4	1200	302	3,9735	-0,662	0,500	0,500	1,5866	2,9563	0,5367	7,342	7,342
1400	350	4	1400	351,6	3,9817	-0,455	0,500	0,500	1,5714	2,9863	0,5262	5,241	5,241
1600	400	4	1600	401,6	3,9840	-0,398	0,500	0,500	1,5875	2,9681	0,5348	6,970	6,970
2000	500	4	2000	500	4,0000	0,000	0,500	0,500	1,5900	2,9280	0,5430	8,607	8,607
Μέσος Όρος					3,9796	-0,510					0,5410	8,210	8,210

➤ 4x40 – 3x30 → $K_I = 1,333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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)
177,78	100	1,78	180	100,44	1,7921	0,806	0,750	0,750	1,5800	1,9912	0,7934	5,797	5,797
355,56	200	1,78	356,8	200,8	1,7768	-0,050	0,750	0,750	1,5964	2,0438	0,7810	4,145	4,145
533,33	300	1,78	532,8	299,6	1,7783	0,033	0,750	0,750	1,5855	2,0134	0,7875	5,005	5,005
711,11	400	1,78	716	400,8	1,7864	0,487	0,750	0,750	1,5921	2,0200	0,7882	5,096	5,096
888,89	500	1,78	888	499,2	1,7788	0,060	0,750	0,750	1,5990	2,0192	0,7919	5,591	5,591
1066,67	600	1,78	1068	601,6	1,7752	-0,141	0,750	0,750	1,5917	2,0246	0,7862	4,828	4,828
1244,44	700	1,78	1244	700	1,7771	-0,036	0,750	0,750	1,5819	2,0286	0,7798	3,981	3,981
1422,22	800	1,78	1420	800	1,7750	-0,156	0,750	0,750	1,5746	2,0200	0,7795	3,937	3,937
1600	900	1,78	1600	899,2	1,7793	0,089	0,750	0,750	1,5875	1,9973	0,7948	5,975	5,975
1777,78	1000	1,78	1780	1000	1,7800	0,125	0,750	0,750	1,5888	2,0080	0,7912	5,496	5,496
Μέσος Όρος					1,6014	0,122					0,7873	4,985	4,985

➤ 3x30 – 2x20 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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	225,2	99,4	2,2655	0,693	0,667	0,667	2,0071	2,8893	0,6946	4,199	4,199
450	200	2,25	450,4	198,8	2,2655	0,693	0,667	0,667	2,0142	2,9537	0,6819	2,288	2,288
675	300	2,25	674,4	302	2,2331	-0,751	0,667	0,667	2,0195	2,9563	0,6831	2,472	2,472
900	400	2,25	899,2	401,6	2,2390	-0,487	0,667	0,667	1,9973	2,9681	0,6729	0,939	0,939
1125	500	2,25	1124	500	2,2480	-0,089	0,667	0,667	2,0000	2,9280	0,6830	2,459	2,459
1350	600	2,25	1350	599,2	2,2530	0,134	0,667	0,667	2,0088	2,9306	0,6854	2,824	2,824
1575	700	2,25	1574	700	2,2485	-0,063	0,667	0,667	1,9974	2,9200	0,6840	2,609	2,609
Μέσος Όρος					2,2504	0,019					0,6836	2,541	2,541

5.1.1.4. Για $\sigma=2$ S/m και $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

➤ 6x60 – 2x20 → $K_I = 3$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{20} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{20} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{20} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
450	50	9	441,6	52,96	8,3383	-7,351	0,333	0,327	0,7391	2,4547	0,3011	-9,667	-7,954
900	100	9	900,8	99,4	9,0623	0,693	0,333	0,327	0,7371	2,4346	0,3027	-9,169	-7,448
1350	150	9	1348	150	8,9866	-0,148	0,333	0,327	0,7270	2,4480	0,2969	-10,906	-9,218
1800	200	9	1800	198,8	9,0543	0,604	0,333	0,327	0,7044	2,5231	0,2791	-16,242	-14,654
2250	250	9	2260	250,4	9,0255	0,284	0,333	0,327	0,6973	2,5176	0,2769	-16,903	-15,327
2700	300	9	2700	302	8,9403	-0,662	0,333	0,327	0,6933	2,5113	0,2760	-17,173	-15,603
3150	350	9	3140	351,6	8,9306	-0,771	0,333	0,327	0,7031	2,4937	0,2819	-15,406	-13,802
Μέσος Όρος					8,9054	-1,050					0,2878	-13,638	-12,001

➤ **6x60 – 3x30 → $K_I = 2$**

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_{60} (A)	I_{30} (A)	K_I	I_{60} (A)	I_{30} (A)	K_I		(α)	(β)	Z_{60} (Ω)	Z_{30} (Ω)	K_Z	(α)	(β)
400	100	4	400,8	100,4	3,9904	-0,239	0,500	0,491	0,7245	1,6129	0,4492	-10,156	-8,452
800	200	4	801,6	200,8	3,9920	-0,199	0,500	0,491	0,7584	1,6733	0,4532	-9,343	-7,625
1200	300	4	1200	299,6	4,0053	0,134	0,500	0,491	0,7200	1,6475	0,4370	-12,596	-10,939
1600	400	4	1600	400,8	3,9920	-0,200	0,500	0,491	0,7550	1,6647	0,4535	-9,291	-7,572
2000	500	4	2000	499,2	4,0064	0,160	0,500	0,491	0,7040	1,6474	0,4273	-14,534	-12,914
2400	600	4	2400	601,6	3,9893	-0,266	0,500	0,491	0,7383	1,6197	0,4558	-8,830	-7,101
2800	700	4	2800	700	4,0000	0,000	0,500	0,491	0,7057	1,6389	0,4306	-13,877	-12,245
3200	800	4	3200	800	4,0000	0,000	0,500	0,491	0,7075	1,6450	0,4301	-13,982	-12,351
Μέσος Όρος						3,9969	-0,076				0,4421	-11,576	-9,899

➤ **6x60 – 4x40 → $K_I = 1,5$**

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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	100,92	2,2116	-1,704	0,667	0,654	0,7275	1,1851	0,6139	-7,906	-6,161
450	200	2,25	441,6	202,4	2,1818	-3,030	0,667	0,654	0,7391	1,2292	0,6012	-9,807	-8,097
675	300	2,25	674,4	300,4	2,2450	-0,222	0,667	0,654	0,7259	1,1505	0,6310	-5,345	-3,551
900	400	2,25	900,8	400,8	2,2475	-0,111	0,667	0,654	0,7371	1,1916	0,6185	-7,211	-5,452
1125	500	2,25	1120	499,2	2,2435	-0,285	0,667	0,654	0,7357	1,1923	0,6170	-7,442	-5,688
1350	600	2,25	1348	600,8	2,2436	-0,281	0,667	0,654	0,7270	1,1851	0,6134	-7,981	-6,237
1575	700	2,25	1580	700	2,2571	0,317	0,667	0,654	0,7392	1,1794	0,6267	-5,983	-4,201
1800	800	2,25	1800	800	2,2500	0,000	0,667	0,654	0,7044	1,1780	0,5980	-10,300	-8,599
2025	900	2,25	2032	899,2	2,2597	0,435	0,667	0,654	0,7224	1,2028	0,6006	-9,909	-8,201
2250	1000	2,25	2260	1000	2,2600	0,444	0,667	0,654	0,6973	1,2320	0,5660	-15,096	-13,486
2475	1100	2,25	2472	1100	2,2472	-0,121	0,667	0,654	0,6860	1,1818	0,5805	-12,920	-11,269
2700	1200	2,25	2700	1200	2,2500	0,000	0,667	0,654	0,6933	1,1767	0,5892	-11,615	-9,939
2925	1300	2,25	2920	1300	2,2461	-0,171	0,667	0,654	0,7068	1,1815	0,5982	-10,263	-8,562
3150	1400	2,25	3140	1400	2,2428	-0,317	0,667	0,654	0,7031	1,1629	0,6047	-9,294	-7,575
Μέσος Όρος						2,2418	-0,360				0,6042	-9,362	-7,644

➤ 4x40 – 2x20 → $K_I = 2$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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)
200	50	4	202,4	52,96	3,8217	-4,456	0,500	0,500	1,2292	2,4547	0,5007	0,155	0,155
400	100	4	400,8	99,4	4,0321	0,805	0,500	0,500	1,1916	2,4346	0,4894	-2,110	-2,110
600	150	4	600,8	150	4,0053	0,133	0,500	0,500	1,1850	2,4480	0,4841	-3,179	-3,179
800	200	4	800	198,8	4,0241	0,604	0,500	0,500	1,1780	2,5231	0,4668	-6,624	-6,624
1000	250	4	1000	250,4	3,9936	-0,160	0,500	0,500	1,2320	2,5176	0,4893	-2,128	-2,128
1200	300	4	1200	302	3,9735	-0,662	0,500	0,500	1,1767	2,5113	0,4685	-6,289	-6,289
1400	350	4	1400	351,6	3,9817	-0,455	0,500	0,500	1,1628	2,4937	0,4663	-6,738	-6,738
1600	400	4	1600	401,6	3,9840	-0,398	0,500	0,500	1,1425	2,5219	0,4530	-9,394	-9,394
2000	500	4	2000	500	4,0000	0,000	0,500	0,500	1,1980	2,4960	0,4799	-4,006	-4,006
Μέσος Όρος						3,9796	-0,510				0,4776	-4,479	-4,479

➤ 4x40 – 3x30 → $K_I = 1,333$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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)
177,78	100	1,78	180	100,44	1,7921	0,806	0,750	0,750	1,1933	1,6129	0,7398	-1,351	-1,351
355,56	200	1,78	356,8	200,8	1,7768	-0,050	0,750	0,750	1,1748	1,6733	0,7021	-6,382	-6,382
533,33	300	1,78	532,8	299,6	1,7783	0,033	0,750	0,750	1,1831	1,6475	0,7181	-4,246	-4,246
711,11	400	1,78	716	400,8	1,7864	0,487	0,750	0,750	1,1888	1,6647	0,7141	-4,780	-4,780
888,89	500	1,78	888	499,2	1,7788	0,060	0,750	0,750	1,1387	1,6474	0,6912	-7,837	-7,837
1066,67	600	1,78	1068	601,6	1,7752	-0,141	0,750	0,750	1,1535	1,6197	0,7122	-5,038	-5,038
1244,44	700	1,78	1244	700	1,7771	-0,036	0,750	0,750	1,1929	1,6389	0,7279	-2,947	-2,947
1422,22	800	1,78	1420	800	1,7750	-0,156	0,750	0,750	1,1690	1,6450	0,7106	-5,247	-5,247
1600	900	1,78	1600	899,2	1,7793	0,089	0,750	0,750	1,1425	1,6192	0,7055	-5,922	-5,922
1777,78	1000	1,78	1780	1000	1,7800	0,125	0,750	0,750	1,1596	1,6440	0,7053	-5,957	-5,957
Μέσος Όρος						1,6014	0,122				0,7127	-4,971	-4,970

➤ 3x30 – 2x20 → $K_I = 1,5$

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			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	225,2	99,4	2,2655	0,693	0,667	0,667	1,6163	2,4346	0,6639	-0,415	-0,415
450	200	2,25	450,4	198,8	2,2655	0,693	0,667	0,667	1,6376	2,5231	0,6490	-2,642	-2,642
675	300	2,25	674,4	302	2,2331	-0,751	0,667	0,667	1,6298	2,5113	0,6490	-2,645	-2,645
900	400	2,25	899,2	401,6	2,2390	-0,487	0,667	0,667	1,6192	2,5219	0,6420	-3,691	-3,691
1125	500	2,25	1124	500	2,2480	-0,089	0,667	0,667	1,6512	2,4960	0,6615	-0,766	-0,766
1350	600	2,25	1350	599,2	2,2530	0,134	0,667	0,667	1,6148	2,4833	0,6502	-2,460	-2,460
1575	700	2,25	1574	700	2,2485	-0,063	0,667	0,667	1,6416	2,5600	0,6412	-3,808	-3,808
Μέσος Όρος					2,2504	0,019					0,6510	-2,346	-2,346

5.1.2. ΣΥΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΩΝ

5.1.2.1. Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

➤ Για το ηλεκτρόδιο 6x60cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
450	225	2	441,6	233,2	1,893	-5,317	0,500	0,531	1,2119	2,2024	0,5502	10,058	3,670
800	400	2	801,6	401,6	1,996	-0,199	0,500	0,531	1,2155	2,2151	0,5487	9,751	3,382
900	450	2	900,8	444,8	2,025	1,259	0,500	0,531	1,2189	2,1871	0,5573	11,467	4,998
1350	675	2	1348	674,4	1,998	-0,059	0,500	0,531	1,2195	2,1738	0,5610	12,208	5,696
1600	800	2	1600	803,2	1,992	-0,398	0,500	0,531	1,2150	2,1763	0,558	11,658	5,178
1800	900	2	1800	896	2,008	0,446	0,500	0,531	1,2067	2,1696	0,5561	11,232	4,776
2250	1125	2	2260	1112	2,032	1,619	0,500	0,531	1,2123	2,1763	0,5570	11,420	4,953
2400	1200	2	2400	1184	2,027	1,351	0,500	0,531	1,1983	2,1993	0,5448	8,973	2,649
2700	1350	2	2700	1358	1,988	-0,589	0,500	0,531	1,1940	2,2533	0,5299	5,984	-0,167
3200	1600	2	3200	1604	1,995	-0,249	0,500	0,531	1,2025	2,1621	0,5561	11,235	4,779
Μέσος Όρος													
					1,995	-0,214					0,5553	10,398	3,9913

➤ Για το ηλεκτρόδιο 4x40cm

$I_{θεωρ.}$			$I_{πειρ.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{πειρ.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200	100	2	202,4	98,2	2,061	3,055	0,500	0,521	1,5770	2,9369	0,5369	7,399	3,083
400	200	2	400,8	198,4	2,020	1,008	0,500	0,521	1,5888	2,9839	0,5324	6,494	2,215
600	300	2	600,8	298	2,016	0,805	0,500	0,521	1,5872	3,0121	0,5269	5,390	1,156
800	400	2	800	400	2,000	0,000	0,500	0,521	1,6000	3,0000	0,5333	6,667	2,381
1000	500	2	998,4	499,2	2,000	0,000	0,500	0,521	1,5960	3,0008	0,5318	6,372	2,098
1200	600	2	1200	600,8	1,997	-0,133	0,500	0,521	1,5866	2,9960	0,5296	5,919	1,663
1400	700	2	1400	700,8	1,998	-0,114	0,500	0,521	1,5714	2,9795	0,5274	5,484	1,246
1600	800	2	1600	798,4	2,004	0,200	0,500	0,521	1,5875	3,0110	0,5272	5,446	1,209
2000	1000	2	2000	1000,4	1,999	-0,040	0,500	0,521	1,5900	2,9988	0,5302	6,042	1,782
Μέσος Όρος					2,011	0,531					0,5306	6,1347	1,8703

➤ Για το ηλεκτρόδιο 3x30cm

$I_{θεωρ.}$			$I_{πειρ.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{πειρ.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200	100	2	200,8	102,8	1,953	-2,335	0,500	0,495	2,0438	4,0000	0,5109	2,191	3,146
400	200	2	400,8	198,8	2,016	0,805	0,500	0,495	2,0199	4,0563	0,4979	-0,405	0,526
450	225	2	450,4	224,8	2,004	0,178	0,500	0,495	2,0142	4,0641	0,4956	-0,877	0,049
600	300	2	601,6	300,8	2,000	0,000	0,500	0,495	2,0246	4,0293	0,5024	0,495	1,434
800	400	2	800	399,2	2,004	0,200	0,500	0,495	2,0200	3,9980	0,5052	1,051	1,995
900	450	2	899,2	448	2,007	0,357	0,500	0,495	1,9973	4,0000	0,4993	-0,133	0,800
1000	500	2	1000	500	2,000	0,000	0,500	0,495	2,0080	4,0000	0,502	0,400	1,338
1200	600	2	1200	600	2,000	0,000	0,500	0,495	2,0033	3,9667	0,5050	1,008	1,952
1350	675	2	1350	675,2	1,999	-0,030	0,500	0,495	2,0089	3,9751	0,5053	1,073	2,018
1400	700	2	1400	699,2	2,002	0,114	0,500	0,495	2,0028	4,0160	0,4987	-0,257	0,676
1800	900	2	1800	897,6	2,005	0,267	0,500	0,495	2,0155	4,0018	0,5036	0,733	1,674
Μέσος Όρος					1,999	-0,040					0,5023	0,480	1,419

➤ Για το ηλεκτρόδιο 2x20cm

$I_{θεωρ.}$			$I_{πειρ.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{πειρ.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
100	50	2	99,4	50,32	1,975	-1,232	0,500	0,498	2,8893	5,9141	0,4885	-2,291	-1,834
200	100	2	198,8	98,88	2,010	0,526	0,500	0,498	2,9537	5,8900	0,5014	0,297	0,765
300	150	2	302	148,2	2,037	1,889	0,500	0,498	2,9563	5,8731	0,5033	0,672	1,142
400	200	2	401,6	198	2,028	1,414	0,500	0,498	2,9681	5,8990	0,5031	0,632	1,102
500	250	2	500	248,8	2,009	0,482	0,500	0,498	2,9280	5,8682	0,4989	-0,207	0,259
600	300	2	599,2	300	1,997	-0,133	0,500	0,498	2,9306	5,9333	0,4939	-1,217	-0,755
700	350	2	700	349,6	2,002	0,114	0,500	0,498	2,9200	5,9382	0,4917	-1,654	-1,194
800	400	2	800	400,8	1,996	-0,200	0,500	0,498	2,9300	5,9581	0,4917	-1,646	-1,187
900	450	2	899,2	451,2	1,992	-0,355	0,500	0,498	2,9493	5,9929	0,4921	-1,574	-1,114
1000	500	2	1000	501,6	1,993	-0,319	0,500	0,498	2,9480	5,9729	0,4935	-1,287	-0,826
1200	600	2	1200	601,6	1,994	-0,266	0,500	0,498	2,9400	5,9840	0,4913	-1,739	-1,280
1400	700	2	1400	699,2	2,002	0,114	0,500	0,498	2,9257	5,9382	0,4926	-1,461	-1,001
Μέσος Όρος					2,003	0,170					0,4973	-0,956	-0,494

5.1.2.2. Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

➤ Για το ηλεκτρόδιο 6x60cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
450	225	2	441,6	233,2	1,893	-5,317	0,500	0,531	0,7391	1,9177	0,3854	-22,914	-27,387
800	400	2	801,6	401,6	1,996	-0,199	0,500	0,531	0,7584	1,8924	0,4007	-19,840	-24,492
900	450	2	900,8	444,8	2,025	1,259	0,500	0,531	0,7371	1,8849	0,3910	-21,786	-26,325
1350	675	2	1348	674,4	1,998	-0,059	0,500	0,531	0,7270	1,8482	0,3933	-21,327	-25,893
1600	800	2	1600	803,2	1,992	-0,398	0,500	0,531	0,7550	1,9173	0,3937	-21,245	-25,815
1800	900	2	1800	896	2,008	0,446	0,500	0,531	0,7044	1,8839	0,3739	-25,215	-29,556
2250	1125	2	2260	1112	2,032	1,619	0,500	0,531	0,6973	1,8993	0,3671	-26,567	-30,829
2400	1200	2	2400	1184	2,027	1,351	0,500	0,531	0,7383	1,8986	0,3888	-22,225	-26,739
2700	1350	2	2700	1358	1,988	-0,589	0,500	0,531	0,6933	1,9057	0,3638	-27,238	-31,460
3200	1600	2	3200	1604	1,995	-0,249	0,500	0,531	0,7075	1,8953	0,3732	-25,340	-29,673
Μέσος Όρος					1,995	-0,214					0,3831	-23,370	-27,817

➤ Για το ηλεκτρόδιο 4x40cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z $\theta\epsilon\omega\rho.$		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200	100	2	202,4	98,2	2,061	3,055	0,500	0,521	1,2292	2,6680	0,4607	-7,853	-11,556
400	200	2	400,8	198,4	2,020	1,008	0,500	0,521	1,1916	2,7218	0,4378	-12,438	-15,956
600	300	2	600,8	298	2,016	0,805	0,500	0,521	1,1851	2,7329	0,4336	-13,272	-16,757
800	400	2	800	400	2,000	0,000	0,500	0,521	1,1780	2,7640	0,4262	-14,761	-18,186
1000	500	2	998,4	499,2	2,000	0,000	0,500	0,521	1,2320	2,7532	0,4474	-10,504	-14,100

1200	600	2	1200	600,8	1,997	-0,133	0,500	0,521	1,1766	2,7297	0,4310	-13,788	-17,252
1400	700	2	1400	700,8	1,998	-0,114	0,500	0,521	1,1628	2,6998	0,4307	-13,855	-17,316
1600	800	2	1600	798,4	2,004	0,200	0,500	0,521	1,1425	2,7956	0,4086	-18,264	-21,548
2000	1000	2	2000	1000,4	1,999	-0,040	0,500	0,521	1,1980	2,7749	0,4317	-13,654	-17,123
Μέσος Όρος						2,011	0,531				0,4342	-13,154	-16,643

➤ Για το ηλεκτρόδιο 3x30cm

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$			$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
200	100	2	200,8	102,8	1,953	-2,335	0,500	0,495	1,6733	3,7665	0,4442	-11,149	-10,318
400	200	2	400,8	198,8	2,016	0,805	0,500	0,495	1,6646	3,8471	0,4327	-13,458	-12,649
450	225	2	450,4	224,8	2,004	0,178	0,500	0,495	1,6376	3,8007	0,4308	-13,824	-13,018
600	300	2	601,6	300,8	2,000	0,000	0,500	0,495	1,6196	3,8138	0,4246	-15,063	-14,269
800	400	2	800	399,2	2,004	0,200	0,500	0,495	1,6450	3,7174	0,4425	-11,498	-10,671
900	450	2	899,2	448	2,007	0,357	0,500	0,495	1,6192	3,7768	0,4287	-14,254	-13,453
1000	500	2	1000	500	2,000	0,000	0,500	0,495	1,6440	3,7680	0,4363	-12,739	-11,923
1200	600	2	1200	600	2,000	0,000	0,500	0,495	1,6867	3,7200	0,4534	-9,319	-8,472
1350	675	2	1350	675,2	1,999	-0,030	0,500	0,495	1,6148	3,7855	0,4265	-14,685	-13,888
1400	700	2	1400	699,2	2,002	0,114	0,500	0,495	1,6657	3,8158	0,4365	-12,694	-11,878
1800	900	2	1800	897,6	2,005	0,267	0,500	0,495	1,6355	3,7790	0,4328	-13,439	-12,630
Μέσος Όρος						1,999	-0,040				0,4353	-12,920	-12,106

➤ Για το ηλεκτρόδιο 2x20cm

$I_{θεωρ.}$			$I_{πειρ.}$			Απόκλιση K_I (%)	K_Z θεωρ.		$Z_{πειρ.}$			Απόκλιση K_Z (%)	
I_2 (A)	I_1 (A)	K_I	I_2 (A)	I_1 (A)	K_I		(α)	(β)	Z_2 (Ω)	Z_1 (Ω)	K_Z	(α)	(β)
100	50	2	99,4	50,32	1,975	-1,232	0,500	0,498	2,4346	5,5008	0,4425	-11,482	-11,068
200	100	2	198,8	98,88	2,010	0,526	0,500	0,498	2,5231	5,5744	0,4526	-9,475	-9,052
300	150	2	302	148,2	2,037	1,889	0,500	0,498	2,5112	5,5169	0,4551	-8,961	-8,535
400	200	2	401,6	198	2,028	1,414	0,500	0,498	2,5219	5,5677	0,4529	-9,409	-8,985
500	250	2	500	248,8	2,009	0,482	0,500	0,498	2,4960	5,6013	0,4456	-10,878	-10,461
600	300	2	599,2	300	1,997	-0,133	0,500	0,498	2,4833	5,6667	0,4382	-12,354	-11,944
700	350	2	700	349,6	2,002	0,114	0,500	0,498	2,5600	5,6522	0,4529	-9,415	-8,992
800	400	2	800	400,8	1,996	-0,200	0,500	0,498	2,5300	5,7186	0,4424	-11,516	-11,103
900	450	2	899,2	451,2	1,992	-0,355	0,500	0,498	2,5000	5,7270	0,4365	-12,693	-12,286
1000	500	2	1000	501,6	1,993	-0,319	0,500	0,498	2,4560	5,7018	0,4307	-13,851	-13,449
1200	600	2	1200	601,6	1,994	-0,266	0,500	0,498	2,5300	5,7114	0,4429	-11,406	-10,992
1400	700	2	1400	699,2	2,002	0,114	0,500	0,498	2,4971	5,6979	0,4382	-12,349	-11,940
Μέσος Όρος					2,003	0,170					0,4442	-11,149	-10,734

5.2. Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Μελετώντας τους συγκεντρωτικούς πίνακες που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οδηγηθήκαμε σε ορισμένες παρατηρήσεις. Αυτές οι παρατηρήσεις προέκυψαν ως αποτέλεσμα δύο ειδών συγκρίσεων ανάμεσα στα θεωρητικές μετρήσεις τις οποίες αναμέναμε και τις πειραματικές μετρήσεις που λάβαμε: τις συγκρίσεις μεταξύ των τεσσάρων ηλεκτροδίων και τις συγκρίσεις μεταξύ των δύο αγωγιμοτήτων στις οποίες εκτελέστηκε το πείραμα. Επίσης για κάθε σύγκριση τα συμπεράσματα στα οποία οδηγηθήκαμε ήταν διαφορετικά ανάλογα με τον ορισμό της μεταβατικής αντίστασης που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, πέραν των πειραματικών τιμών των μετρήσεων που λάβαμε, από τη μελέτη και σύγκριση των μορφών των παλμογραφημάτων παρατηρήσαμε επίσης κάποια στοιχεία που μπορούν να μας οδηγήσουν σε επιπλέον συμπεράσματα.

Έτσι είχαμε το διαχωρισμό των εξής περιπτώσεων.

5.2.1. Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων

- Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$, όταν η αγωγιμότητα είναι $\sigma=1$ S/m:
 - Σε όλες τις περιπτώσεις είναι $K_{Z_A} < K_{Z_B}$
 - Όλες οι αποκλίσεις στα $K_{Z_A} < 10\%$
 - Όλες οι αποκλίσεις στα $K_I < 1\%$
 - Τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στα K_{Z_A} και K_{Z_B} τις λαμβάνουμε για τις συγκρίσεις 6x60-2x20, 6x60-3x30 και 6x60-4x40, με τιμές απόκλισης που προσεγγίζουν το 10-15%, ενώ για τις υπόλοιπες συγκρίσεις ο λόγος των μεταβατικών αντιστάσεων, και ειδικότερα τα K_{Z_A} είναι αρκετά μικρότερα, της τάξης του 1%.

- Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$, όταν η αγωγιμότητα είναι $\sigma=2$ S/m:
 - Και πάλι σε όλες τις περιπτώσεις είναι $K_{Z_A} < K_{Z_B}$
 - Οι αποκλίσεις στα K_{Z_A} είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που λάβαμε για $\sigma=1$ S/m
 - Όλες οι αποκλίσεις στα $K_I < 1\%$
 - Τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στα K_{Z_A} και K_{Z_B} τις λαμβάνουμε και πάλι για τις συγκρίσεις 6x60-2x20, 6x60-3x30 και 6x60-4x40, αυτή τη φορά όμως με τιμές απόκλισης που προσεγγίζουν το 15-25%, αρκετά

μεγαλύτερες δηλαδή από αυτές για υποδιπλάσια αγωγιμότητα, ενώ για τις υπόλοιπες συγκρίσεις ο λόγος των μεταβατικών αντιστάσεων είναι και σε αυτή την περίπτωση μικρότερος, φτάνοντας μέχρι και το 8%. Αν και μεγαλύτερη απ' ότι για αγωγιμότητα $\sigma=1$ S/m, η συγκεκριμένη τιμή απόκλισης θεωρείται ανεκτή.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις, μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρότι σε όλες τις μετρήσεις παρατηρούμε ότι $K_{Z_A} < K_{Z_B}$, δεν κρίνεται αναγκαίο να λάβουμε υπόψη την 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. Έτσι αρκεί να λάβουμε υπόψη το θεωρητικό λόγο που είναι 2.
- 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.
- Οι σημαντικά μεγαλύτερες αποκλίσεις των λόγων αντίστασης στο ηλεκτρόδιο $6\text{cm} \times 60\text{cm}$, και για τις δύο αγωγιμότητες, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει πρόβλημα λόγω των διαστάσεων του συγκεκριμένου ηλεκτροδίου. Πράγματι, στα παλμογραφήματα που λάβαμε για το συγκεκριμένο δοκίμιο (Παράρτημα) αρχίζει να γίνεται εμφανής η επίδραση των τοιχωμάτων στο πείραμά μας. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του ηλεκτροδίου μας, τόσο περισσότερο μας επηρεάζει το περιορισμένο μέγεθος της δεξαμενής, της οποίας τα τοιχώματα θα έπρεπε ιδανικά να εκτείνονται απεριόριστα σε σχέση με το ηλεκτρόδιο. Ειδικότερα για μεγαλύτερη αγωγιμότητα ($\sigma=2$ S/m στην περίπτωση μας) η επίδραση αυτή είναι ακόμα πιο έντονη, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η μέγιστη διάσταση ηλεκτροδίου το οποίο μπορούμε να ελέγξουμε.

➤ Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$, όταν η αγωγιμότητα είναι $\sigma=1$ S/m:

- Σε σύγκριση με τον ορισμό για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$, οι λόγοι μεταβατικών αντιστάσεων K_{Z_A} και K_{Z_B} έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές, ακόμα και για το μεγαλύτερο ηλεκτρόδιο $6\text{cm} \times 60\text{cm}$, φτάνοντας μέχρι το 3% περίπου.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι $K_{Z_A} > K_{Z_B}$

- Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$, όταν η αγωγιμότητα είναι $\sigma=2 \text{ S/m}$:
 - Τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στα K_{Z_A} και K_{Z_B} τις λαμβάνουμε για τις συγκρίσεις 6x60-2x20, 6x60-3x30 και 6x60-4x40, με τιμές απόκλισης που φτάνουν μέχρι το 12%, ενώ για τις υπόλοιπες συγκρίσεις ο λόγος των μεταβατικών αντιστάσεων παρουσιάζει αρκετά μικρότερες αποκλίσεις μέχρι 5%, δηλαδή τιμές πολύ ικανοποιητικές.

Μελετώντας συνολικά τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως, για τη σύγκριση μεταξύ ηλεκτροδίων, ο δεύτερος ορισμός της μεταβατικής αντίστασης (ο λόγος της τάσης στο σημείο όπου το ρεύμα παίρνει τη μέγιστη τιμή του προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος, δηλαδή $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$) μας δίνει αρκετά πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τον πρώτο ορισμό. Ειδικότερα για το ηλεκτρόδιο 6x60cm ο δεύτερος ορισμός είναι ο μοναδικός που μας δίνει αποτελέσματα μέσα σε αποδεκτά πλαίσια.

5.2.2. Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων

➤ Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω ορισμό, οι αποκλίσεις στους λόγους μεταξύ αγωγιμοτήτων, για το ίδιο ηλεκτρόδιο κάθε φορά, είναι αρκετά μεγάλες αλλά μέσα σε αποδεκτά πλαίσια για τα τρία μικρότερα ηλεκτρόδια (2x20, 3x30, 4x40). Ωστόσο, για τον ηλεκτρόδιο διαστάσεων 6x60cm οι αποκλίσεις είναι πολύ μεγάλες και τα αποτελέσματα δεν μπορούν να χαρακτηριστούν αξιόπιστα.

➤ Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

Ο συγκεκριμένος ορισμός για την μεταβατική αντίσταση φαίνεται να μας δίνει εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον προηγούμενο, ακόμα και για το ηλεκτρόδιο των 6x60cm. Ειδικότερα, οι λόγοι K_{Z_B} δεν αποκλίνουν από τις θεωρητικές τιμές σε ποσοστό μεγαλύτερο του 4%.

Γενικότερα, σε αυτές τις συγκρίσεις έχει θεωρηθεί ότι η κρίσιμη ένταση έναρξης του φαινομένου του ιονισμού είναι σταθερή. Αν κρίνουμε ωστόσο από τις μεγάλες αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούμε το δεύτερο ορισμό της μεταβατικής αντίστασης, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ενδεχομένως να υπάρχει εξάρτηση από την αγωγιμότητα του διαλύματος σ ,

και επομένως θα πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση της παραμέτρου E_0 και σε επόμενη ανάλυση θα πρέπει πιθανώς ο λόγος των κρίσιμων εντάσεων ιονισμού K_{E_0} να είναι διάφορος της μονάδας.

Έγινε μια πρώτη διερεύνηση από εμπειρικούς τύπους που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και συνδέουν το E_0 με το σ , προσδιορίστηκαν οι λόγοι K_{E_0} και βάσει αυτών τα αντίστοιχα επίπεδα ρεύματος για τις συγκρίσεις, αλλά δε διαπιστώθηκε μεταβολή στην τιμή της αντίστασης που καταγράφαμε, δηλαδή δε γινόταν εμφανής η επίδραση της παραμέτρου αυτής στις συγκεκριμένες μετρήσεις. Για υψηλότερες αγωγιμότητες πρέπει να διερευνηθεί.

5.2.3. Συγκρίσεις παλμογραφημάτων

Μελετώντας τις κυματομορφές των μετρήσεων που λάβαμε, οδηγηθήκαμε σε δύο βασικά συμπεράσματα:

➤ Επίδραση των τοιχωμάτων για το ηλεκτρόδιο 6x60cm

Όπως έχουμε ήδη επισημάνει, το μεγαλύτερο εκ των ηλεκτροδίων που εξετάστηκαν, με διαστάσεις 6cm x 60cm, για αγωγιμότητα διαλύματος $\sigma=2$ S/m (Παράρτημα), παρουσίασε μια ανωμαλία στη μορφή των καμπυλών τόσο του ρεύματος εξόδου όσο και της τάσης εξόδου. Συγκεκριμένα, είχαμε μια απότομη αλλαγή στην κλίση της καμπύλης του ρεύματος εξόδου, γεγονός που οδήγησε και σε σημαντική παραμόρφωση της καμπύλης της τάσης εξόδου (αφού $V = L \cdot \frac{dI}{dt}$). Όπως αναλύσαμε και νωρίτερα, το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται λόγω του μεγέθους του ηλεκτροδίου. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του ηλεκτροδίου μας, τόσο περισσότερο μας επηρεάζει το περιορισμένο μέγεθος της δεξαμενής, της οποίας τα τοιχώματα θα έπρεπε ιδανικά να βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από το ηλεκτρόδιο. Για να επιβεβαιώσουμε αυτή μας τη θεώρηση, υποβάλαμε το ηλεκτρόδιο των 7x70cm, το οποίο δεν χρησιμοποιήθηκε στο πείραμά μας, σε μερικές δοκιμαστικές μετρήσεις, για την ίδια τιμή αγωγιμότητας νερού. Πράγματι, διαπιστώσαμε ότι το ίδιο πρόβλημα εμφανιζόταν και σε αυτές τις μετρήσεις μας, και μάλιστα σε εντονότερο βαθμό.

Άρα συμπεραίνουμε ότι στην αγωγιμότητα 2 αρχίζει να γίνεται εμφανής η επίδραση των τοιχωμάτων της δεξαμενής στο ηλεκτρόδιο 6cmx60cm. Παρόλα αυτά οι μετρήσεις του ηλεκτροδίου 6x60cm για αγωγιμότητα $\sigma=2$ S/m συμπεριλήφθηκαν στους πίνακες αποτελεσμάτων που παρουσιάσαμε, διότι η

αλλοίωση φαίνεται να επηρεάζει την ουρά της κυματομορφής και όχι το μέτωπο βάσει του οποίου γίνεται ο υπολογισμός της αντίστασης.

➤ Λειτουργία Κρουστικής Γεννήτριας

Ένα φαινόμενο που παρατηρήσαμε σε όλα τα παλμογραφήματά μας ήταν η αλλαγή της κυματομορφής του παραγόμενου ρεύματος για διαφορετικά μεγέθη δοκιμών, ουσιαστικά δηλαδή για διαφορετικές τιμές των R και L μεγεθών τους. Συγκεκριμένα παρατηρήσαμε ότι για μικρότερες τιμές αντίστασης R του ηλεκτροδίου (μεγαλύτερες διαστάσεις), η κυματομορφή παρουσίαζε μεγαλύτερο χρόνο ανόδου. Με άλλα λόγια παρατηρήσαμε ένα «πλάτεμα» της κυματομορφής του ρεύματος στην έξοδο καθώς προχωρούσαμε σε μεγαλύτερα στο μέγεθος ηλεκτρόδια.

Πράγματι, για τις γεννήτριες εκθετικών κρουστικών ρευμάτων, όπως η γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμά μας, αποδεικνύεται ότι κατά την εκφόρτιση της, στην περίπτωση κριτικής απόσβεσης, έχουμε:

$$T_{\eta} = 4,9 \cdot \frac{L}{R_{o\lambda}}$$

όπου T_{η} είναι ο χρόνος ημίσεως εύρους, L η παράσιτη αυτεπαγωγή (ομοαξονικά καλώδια, εσωτερικό κύκλωμα γεννήτριας) και $R_{o\lambda}$ η συνολική αντίσταση που «βλέπει» η κρουστική γεννήτρια (ηλεκτρόδιο και εσωτερικές αντιστάσεις της γεννήτριας). Συνεπώς, για μικρότερη αντίσταση ηλεκτροδίου, κρατώντας σταθερά τα υπόλοιπα μεγέθη, ο χρόνος ανόδου αυξάνεται.

Συνολικά, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της θεωρίας της ομοιότητας μέσω της Διαστατικής Ανάλυσης έδωσε γενικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς επαληθεύθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό για την πλειοψηφία των μετρήσεων οι αναμενόμενοι λόγοι κλίμακας. Φυσικά, όπως επισημάνθηκε, συναντήσαμε μεγαλύτερες αποκλίσεις ειδικότερα για τις πιο ακραίες συνθήκες (υψηλότερη αγωγιμότητα, μεγαλύτερα ηλεκτρόδια). Οι αποκλίσεις αυτές φανερώνουν ότι οι εξαρτήσεις μεταξύ ορισμένων μεγεθών, που δεν λήφθηκαν υπόψη, πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.

5.3. Επόμενη μέρα

Μελετώντας τα επεξεργασμένα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν οδηγηθήκαμε σε ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία αναφέρθηκαν. Ωστόσο, οι σημαντικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων που σημειώθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις κάνουν φανερή την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης του συγκεκριμένου θέματος, ώστε να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα, καθώς και για να μελετηθούν πτυχές του πειράματος που δεν εξετάστηκαν σε βάθος. Συγκεκριμένα:

- ✓ Απαραίτητο κρίνεται να διεξαχθούν μετρήσεις σε μεγαλύτερες αγωγιμότητες από αυτές που εξετάσαμε. Το θαλασσινό νερό λαμβάνει τιμές αγωγιμότητας περί τα 5-6 S/m. Σκοπός του πειράματος ήταν μια αρχική μελέτη σε χαμηλές αγωγιμότητες, ωστόσο για να προκύψουν πιο χρήσιμα συμπεράσματα θα πρέπει να συνδεθούν τα παρόντα αποτελέσματα με αυτά ενός πειράματος για πιο κοντινές στο θαλασσινό νερό αγωγιμότητες.
- ✓ Ιδιαίτερα χρήσιμη θα μπορούσε να φανεί η διερεύνηση της επίδρασης του E_0 στις μετρήσεις. Όπως έχει σημειωθεί, η τιμή του E_0 θεωρήθηκε σταθερή μεταξύ διαφορετικών αγωγιμοτήτων (λόγος κλίμακας ίσος με τη μονάδα), καθώς παρατηρήσαμε μια αρκετά μεγάλη σταθερότητα στις τιμές αντίστασης που έδινε το κάθε ηλεκτρόδιο ανεξαρτήτως των απαιτούμενων εγχεόμενων ρευμάτων που προέκυπταν με διαφορετικές θεωρήσεις της κρίσιμης έντασης ιονισμού E_0 . Για υψηλότερες ή και πολύ χαμηλότερες αγωγιμότητες, ωστόσο, κάτι τέτοιο μπορεί να μην ισχύει.
- ✓ Για την περιοχή των μετρήσεων του συγκεκριμένου πειράματος (εύρος των εγχεόμενων ρευμάτων και των αγωγιμοτήτων) δεν έγινε εμφανής η επίδραση του φαινομένου του ιονισμού, καθώς δεν παρατηρήθηκε αισθητή μείωση της μεταβατικής αντίστασης με την αύξηση του εγχεόμενου κρουστικού ρεύματος. Σε υψηλότερες αγωγιμότητες, ανάλογα και με τις συνθήκες του πειράματος θεωρείται πιθανότερο να εμφανιστεί αυτή η επίδραση.
- ✓ Σημαντικό ρόλο θα μπορούσε να παίζει μια αύξηση του μεγέθους της δεξαμενής. Η εμφάνιση του φαινομένου της διάσπασης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων περιορίσε το πλήθος των δεδομένων που μπορέσαμε να λάβουμε. Μια ηλεκτρολυτική δεξαμενή μεγαλύτερου μεγέθους θα μπορούσε όχι μόνο να αυξήσει το πλήθος των μετρήσεων λόγω της επίδρασης των τοιχωμάτων σε μεγαλύτερα εγχεόμενα ρεύματα, αλλά και να δώσει τη δυνατότητα χρήσης μεγαλύτερων ηλεκτροδίων, ή και συνδυασμένων γεωμετριών αυτών (π.χ. σταυρός), και διερεύνησης των εναλλακτικών ορισμών που αναφέρθηκαν για αυτές τις γεωμετρίες (χαρακτηριστικές διαστάσεις h και s).

- ✓ Ως επακόλουθο της λήψης μεγαλύτερου πλήθους μετρήσεων σε μεγαλύτερες τιμές αγωγιμότητας και για μεγαλύτερα και διαφορετικών γεωμετριών ηλεκτρόδια, θα μπορούσε να γίνει η γραφική απεικόνιση των αδιάστατων παραμέτρων Π_1 και Π_2 , ώστε να πραγματοποιηθούν οι συγκρίσεις με τα αντίστοιχα διαγράμματα που έχουν προκύψει από πλήθος πειραματικών περιπτώσεων, όπως τα δεδομένα των Διαγραμμάτων 3.1 έως 3.4. Κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατό για το συγκεκριμένο πείραμα, καθώς ο αριθμός των δεδομένων δεν ήταν επαρκής και η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε ήταν μόλις μία (ηλεκτρόδιο-ταινία).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 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
- [2] E.M. Thomson, "Grounding concepts for a marine lightning protection system", Marine Lightning Protection Inc., 2005
- [3] Γ.Κ. Πολίτης και Γ.Ν. Λαμπρινίδης, «Η υδροδυναμική της πρόωσης του πλοίου», Εκδόσεις ΑΣΤΕΡΟΣ, Αθήνα, 1993
- [4] R. Frentzel, "Use of Similarity Relations in the Analysis of Lightning-Induced Transient Phenomena", ETEP, Vol. 7, No. 2, May/June 1997
- [5] A.A. Sonin, "The Physical Basis of Dimensional Analysis", Second Edition, Department of Mechanical Engineering MIT, 2001
- [6] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", ANSI/IEEE std 80-2000, 2000
- [7] Π. Ντοκόπουλος, "Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 2005
- [8] I.F. Gonos, "Experimental study of transient behavior of grounding grids using scale model", Measurement science and Technology. 17 (2006)
- [9] Φ.Η. Ασημακοπούλου, «Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους», Αθήνα, Ιούνιος 2009
- [10] Δ.Π. Βάρλα, «Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2004
- [11] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, January 2007
- [12] L. Grcev, "Modeling of Grounding Electrodes under Lightning Currents, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, August 2009
- [13] L. Grcev, "Time- and Frequency-Dependent Lightning Surge Characteristics of Grounding Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009
- [14] 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
- [15] W.A. Chisolm and W. Janischewskyj, "Lightning Surge Response of Ground Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989
- [16] R. Caldecott and D.G. Kasten, "Scale Model Studies of Station Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 102, No. 3, March 1983
- [17] A. El-Morshedy, A.G. Zeitoun and M.M. Ghourab, "Modelling of substation grounding grids", IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. C, No. 5, July 1986

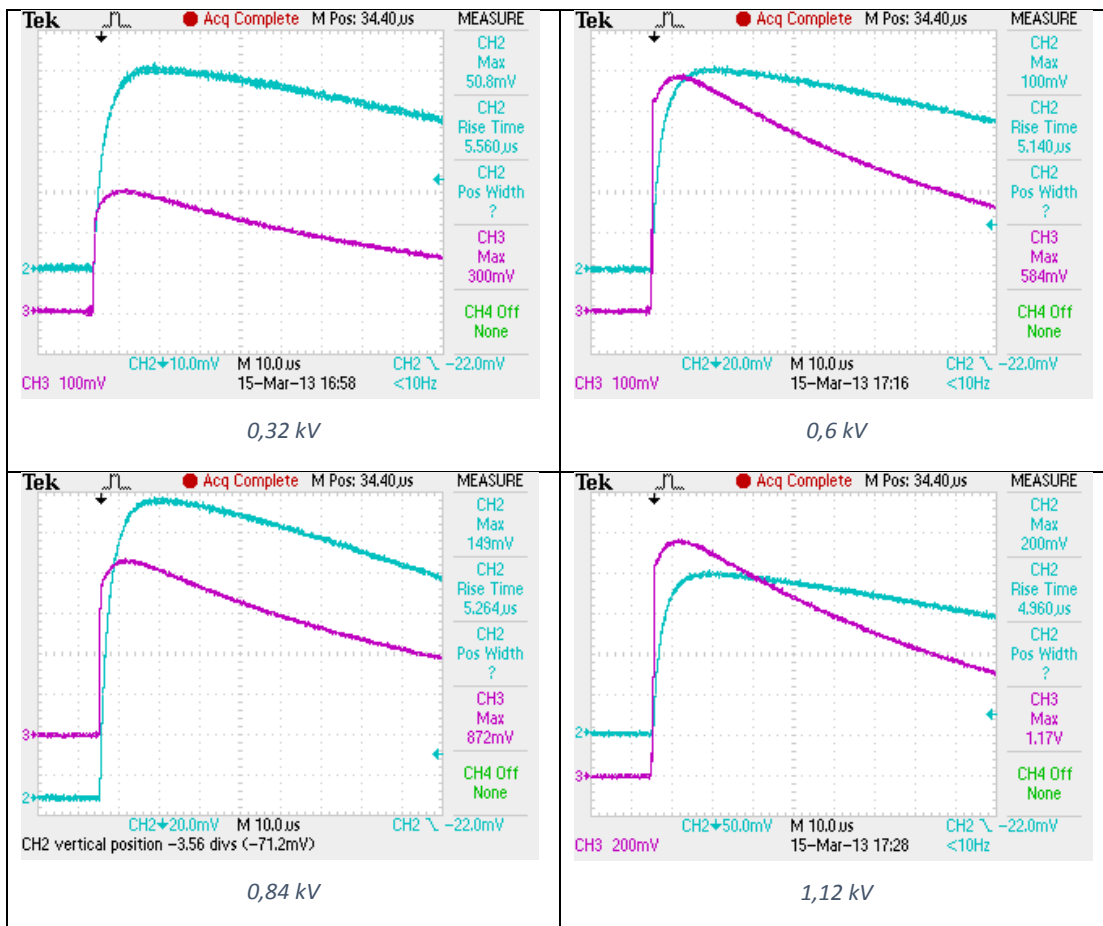
- [18] I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, F.V. Topalis: “Modelling of a Grounding Grid using an Electrolytic Tank”, Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering, Bangalore, India, August 19-24, 2001
- [19] D. Mukhedkar, Y. Gervais and J.P. DeJean, “Modelling of a Grounding Electrode”, IEEE PES Summer Meeting, San Francisco , California, July 9-14, 1972
- [20] H.R. Armstrong and L.J. Simpkin, “Grounding Electrode Potential Gradients from Model Tests”, AIEE Fall General Meeting, Chicago, Ill., October 1960
- [21] A. Kern, F. Heidler, M. Seevers, W. Zischank, “Magnetic Fields and Induced Voltages in case of a Direct Strike – Comparison of Results obtained from Measurements at a Scaled Building to those of IEC 62305-4”, International Conference on Lightning Protection, Avignon, September 2004
- [22] W. Zischank, F. Heidler, J. Wiesinger, K. Stimper, A. Kern, E. Seevers, “Magnetic Fields and Induced Voltages inside LPZ 1 Measured at a 1:6 Scale Model Building”, International Conference on Lightning Protection, Avignon, September 2004

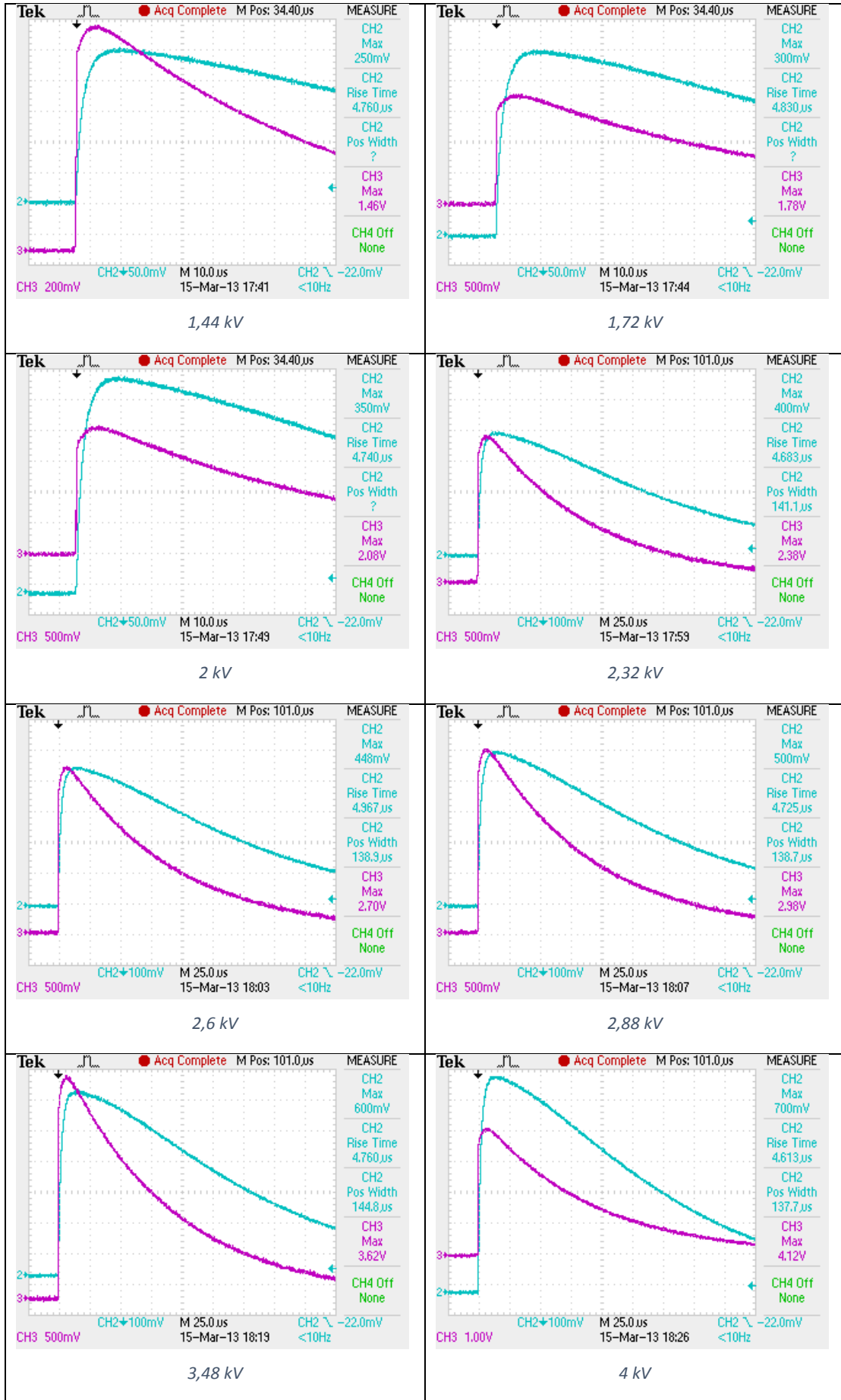
Παράρτημα

Παλμογραφήματα

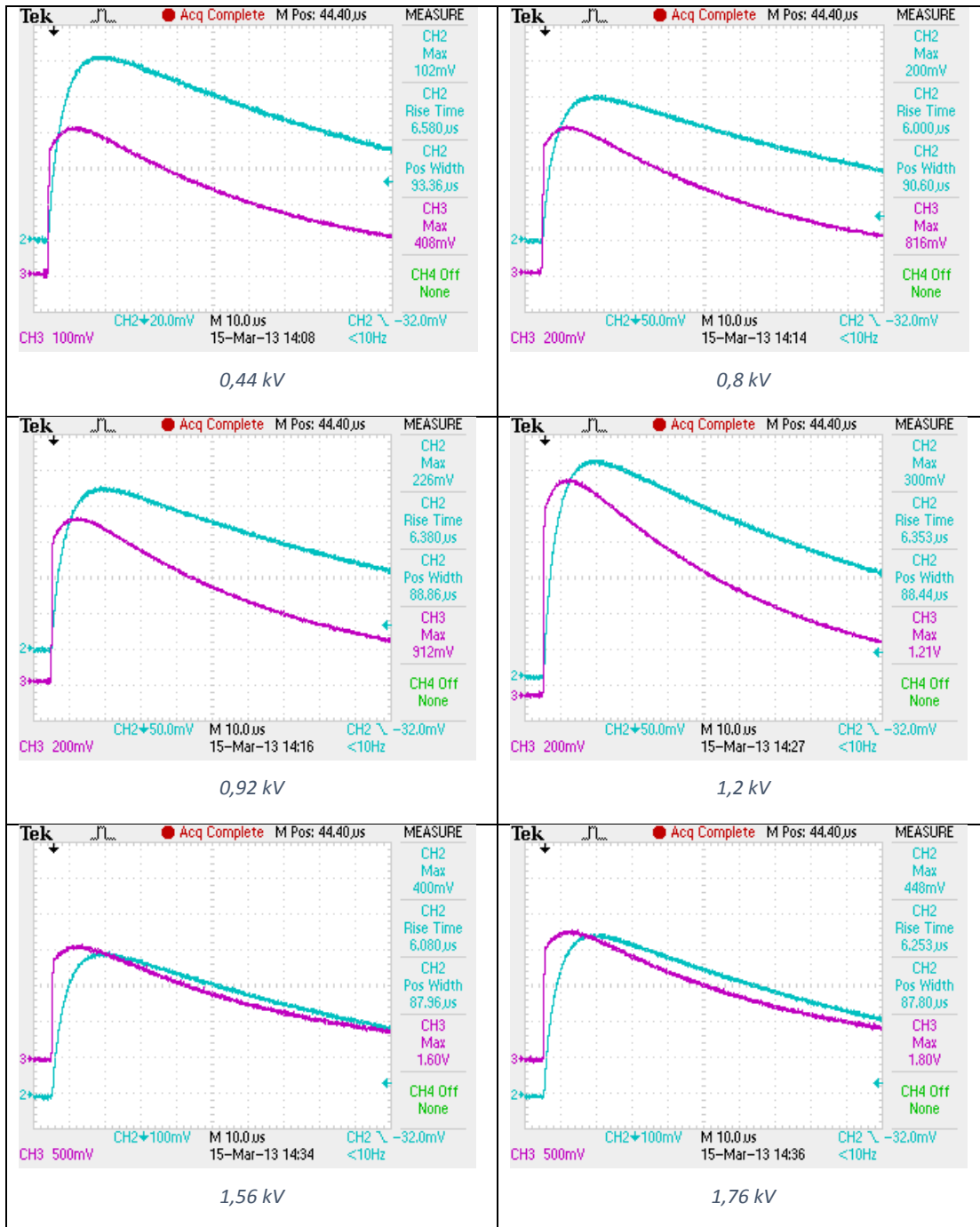
Παρακάτω παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Παρότι για κάθε τάση φόρτισης πραγματοποιήθηκαν 5 επαναλήψεις, για πρακτικούς λόγους παρουσιάζουμε το παλμογράφημα μιας μόνο εκ των επαναλήψεων. Καταγράψαμε με τη βοήθεια των ομοαξονικών καλωδίων μέσω παλμογράφου τις κυματομορφές της κρουστικού ρεύματος (CH2) και της κρουστικού τάσης (CH3). Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται τα στοιχεία της εκάστοτε μέτρησης και οι συνθήκες περιβάλλοντος. Επίσης η αναγραφόμενη τάση κάτω από κάθε παλμογράφημα είναι η τάση φόρτισης της γεννήτριας σε κάθε περίπτωση.

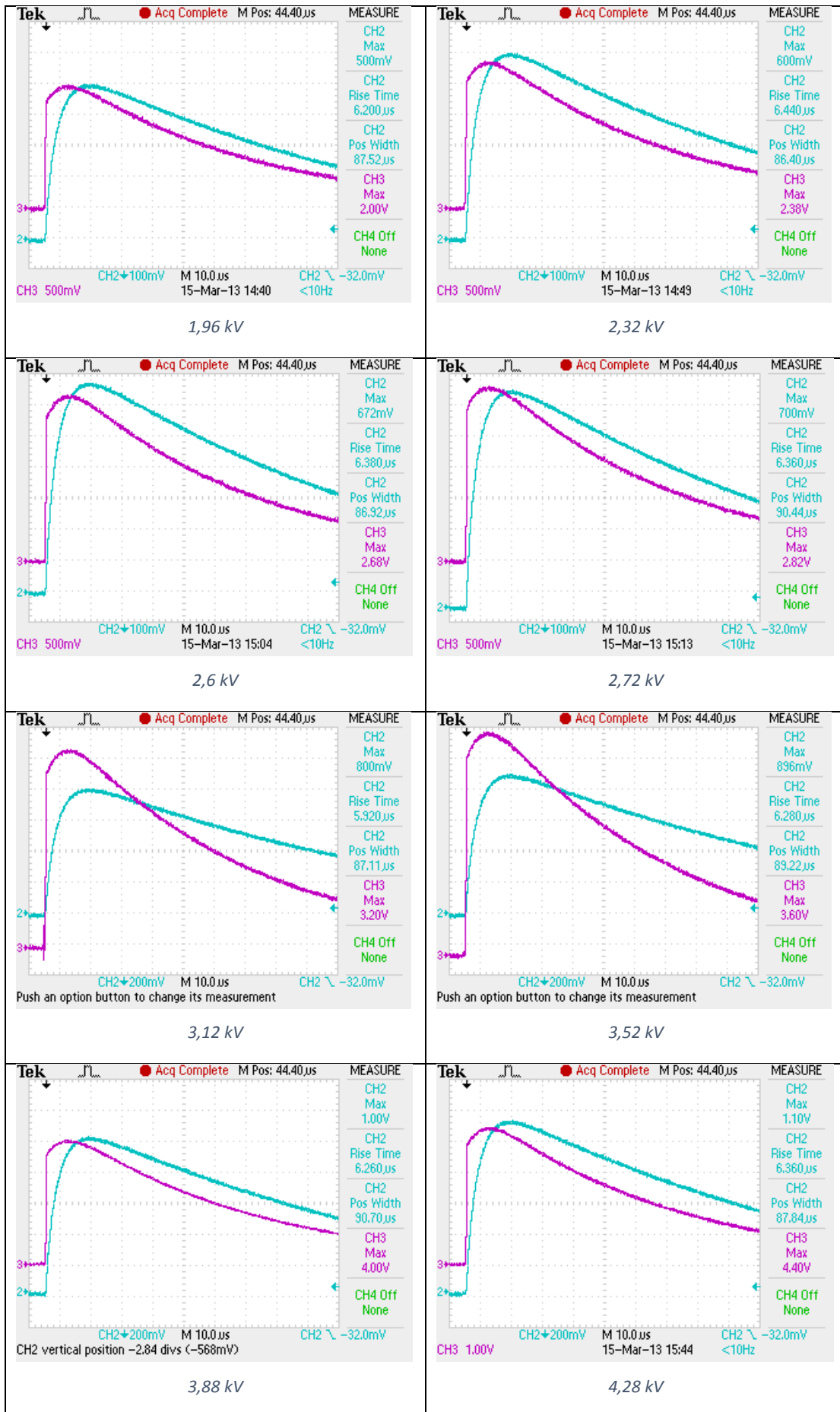
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
2cm x 20cm	10,7 mS/cm	20,2°C	42%	978 mbar





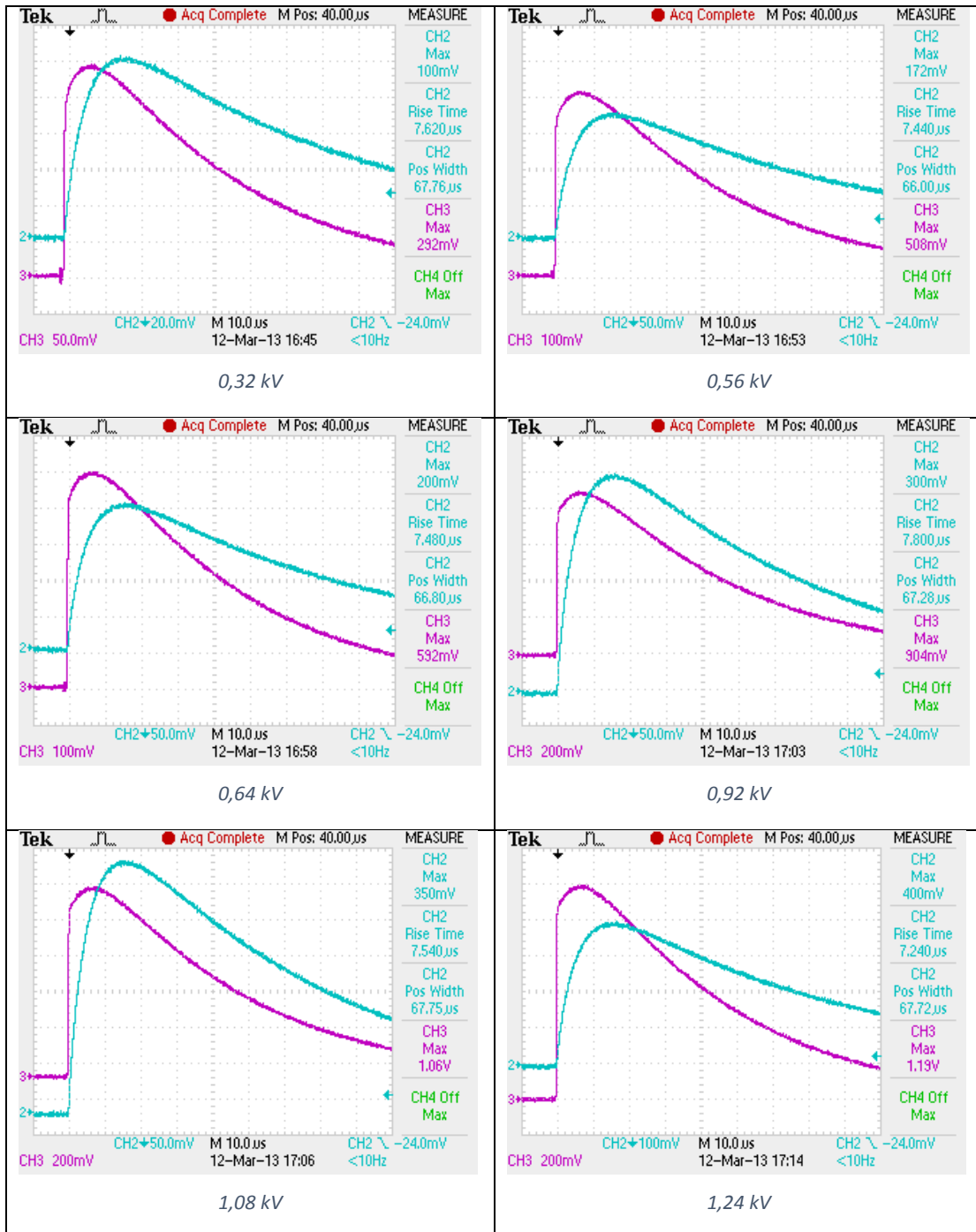
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
3cm x 30cm	10,7 mS/cm	20,2°C	42%	978 mbar

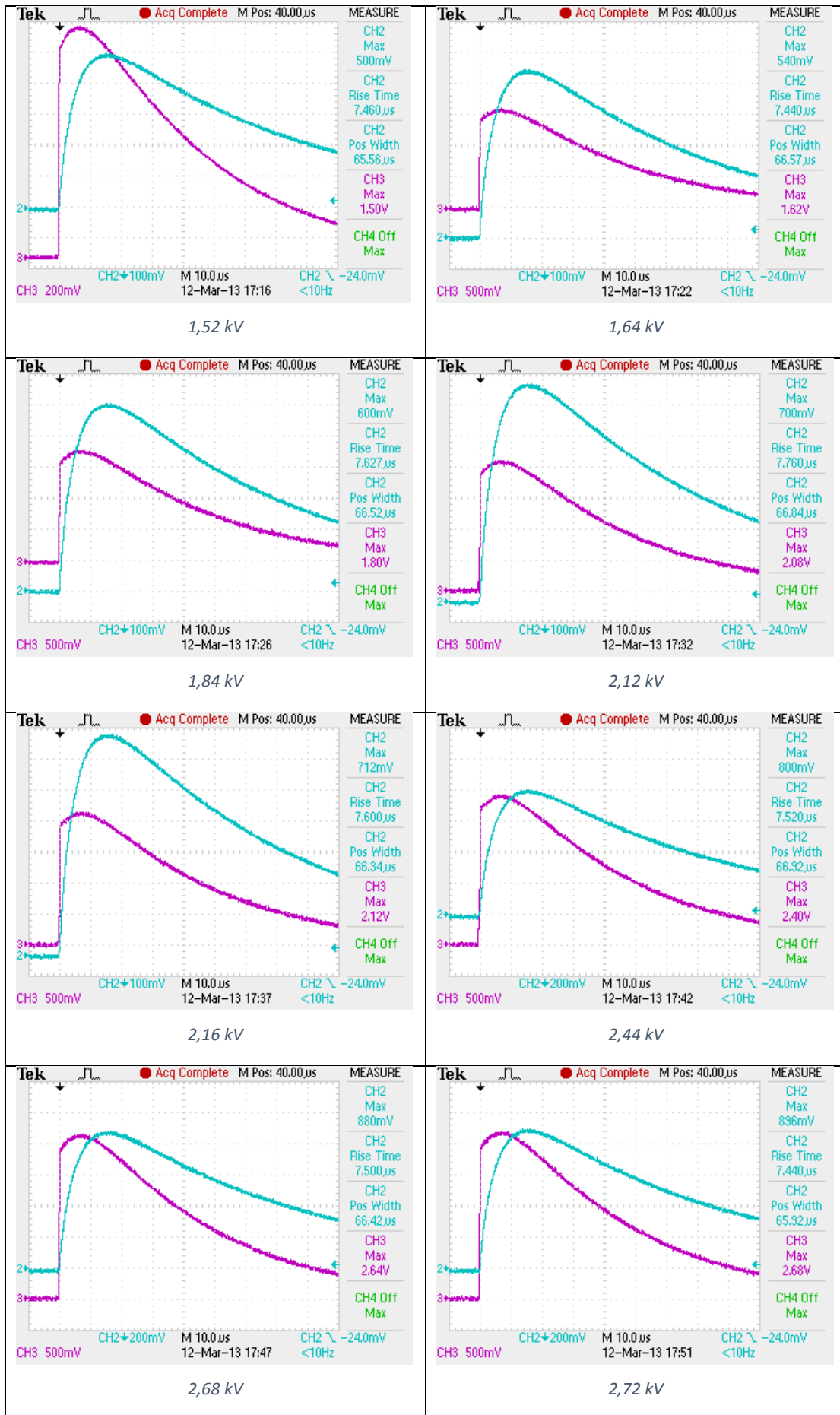


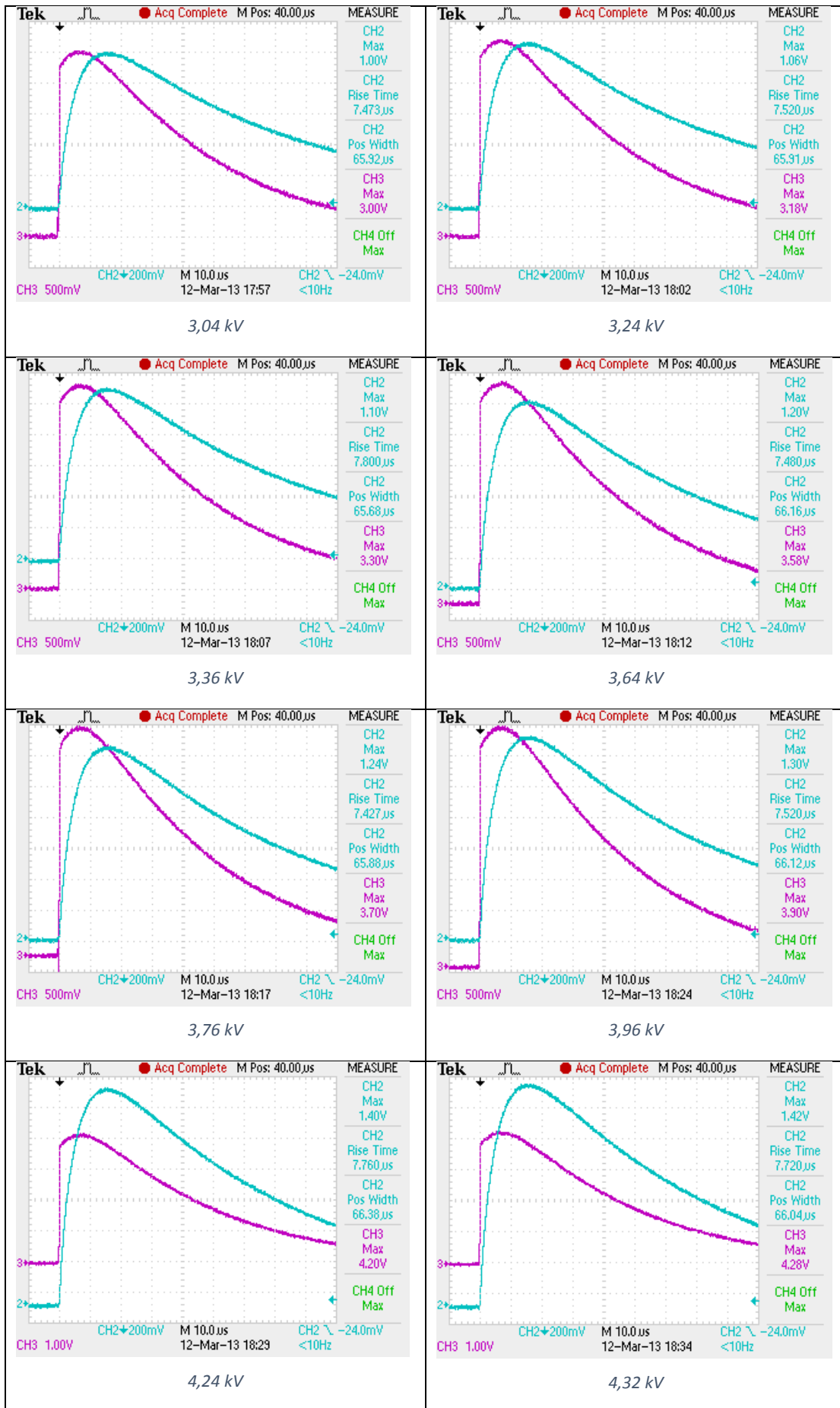


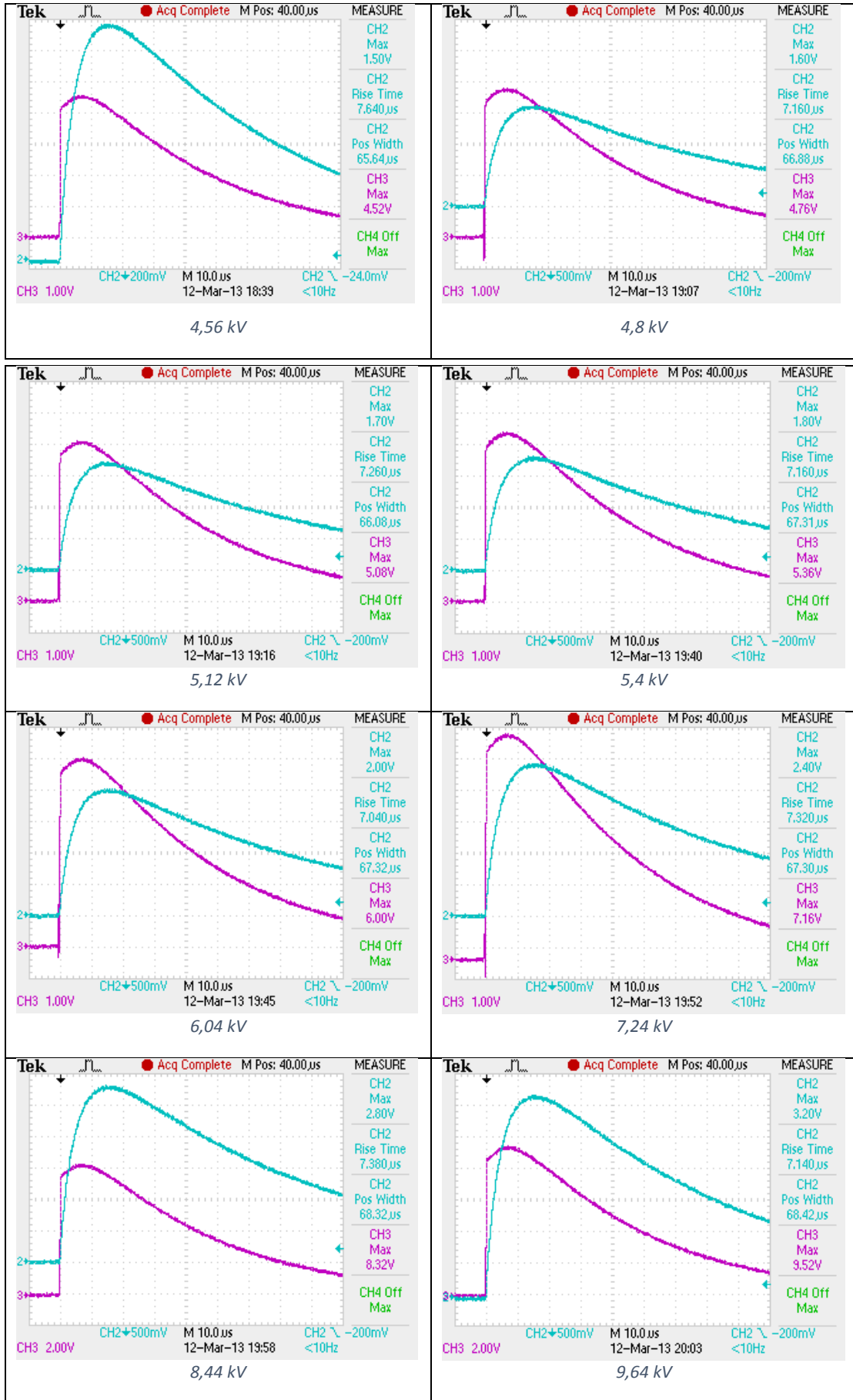


Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
4cm x 40cm	11,2 mS/cm	20,4°C	46%	983 mbar

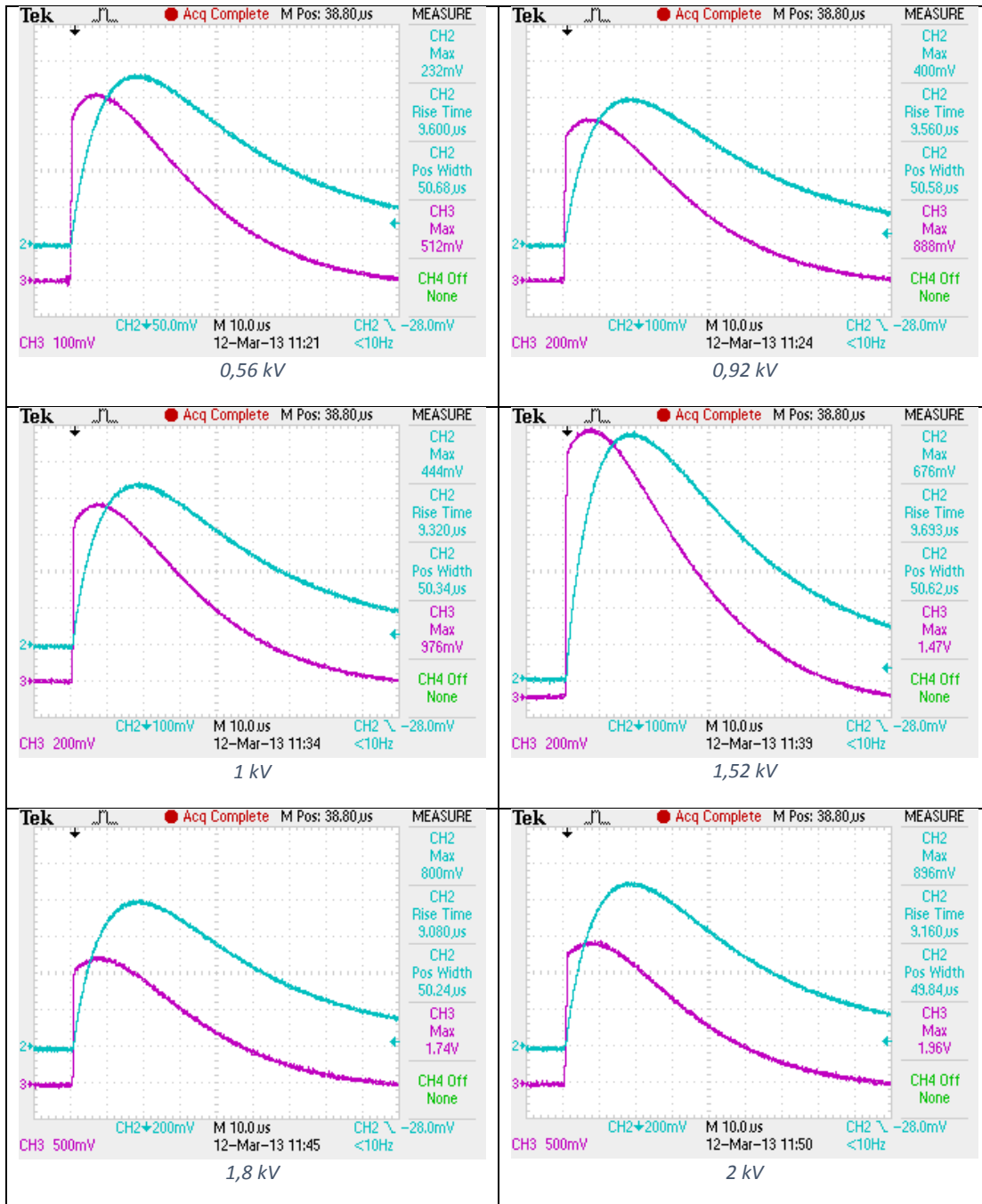


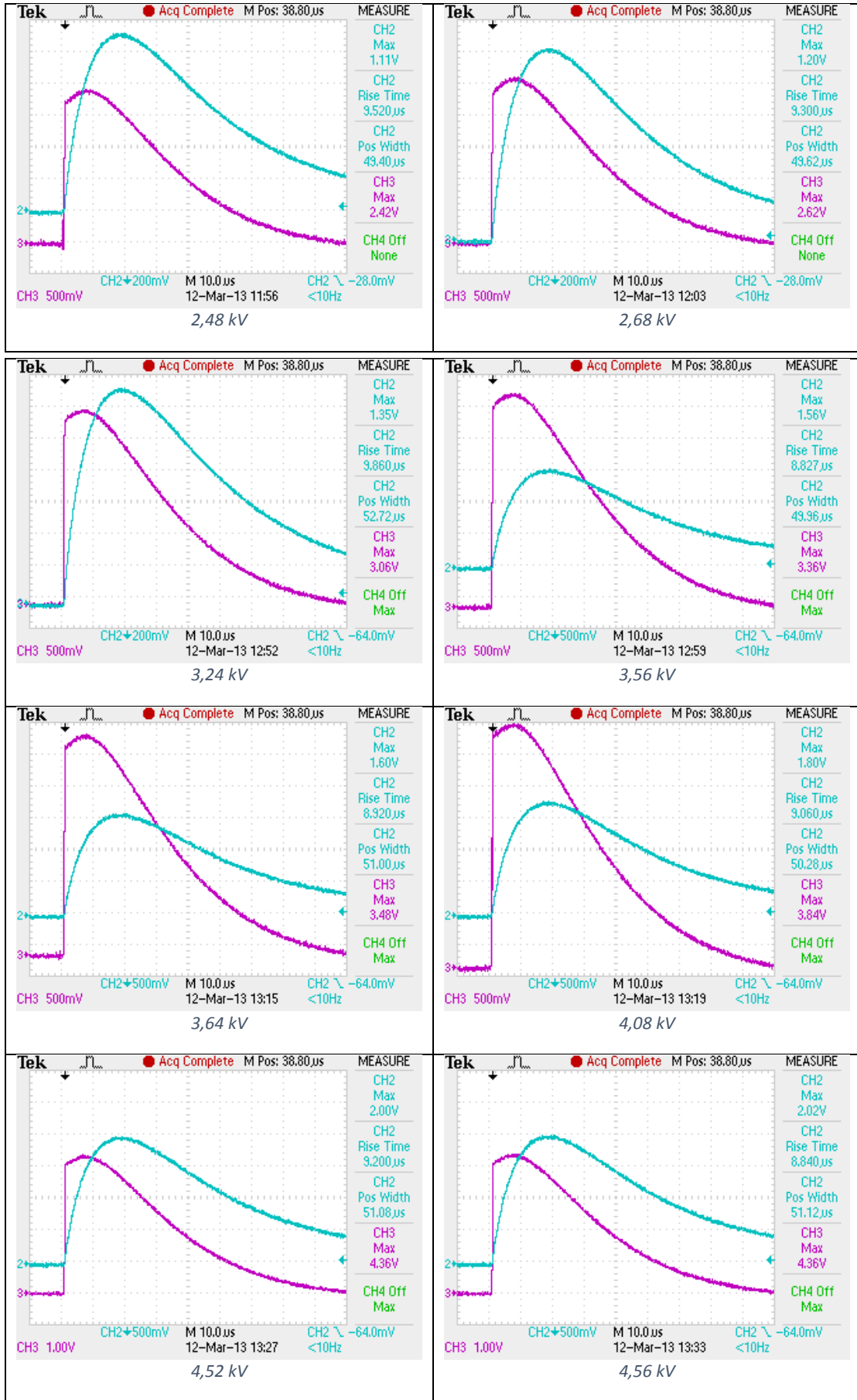


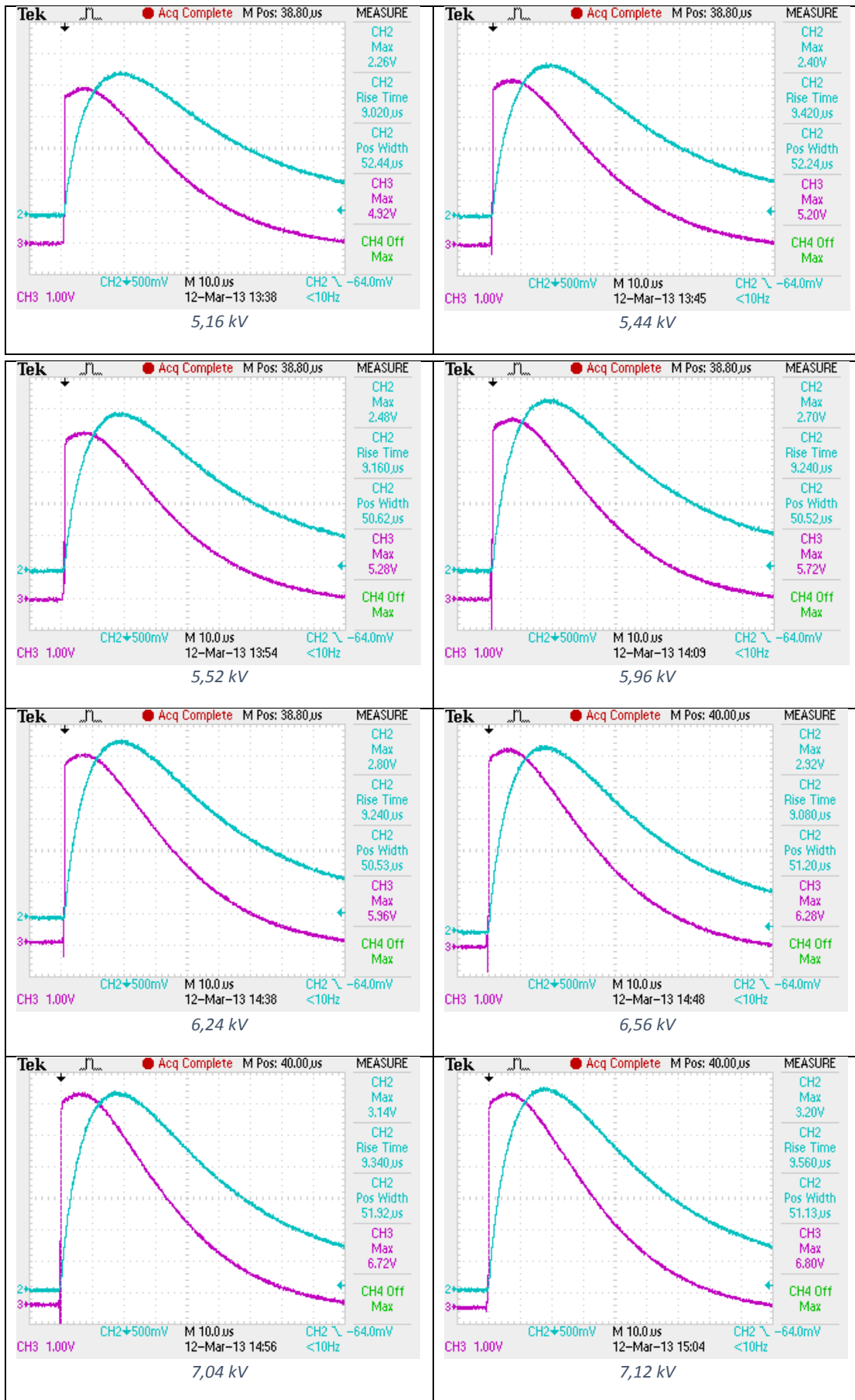


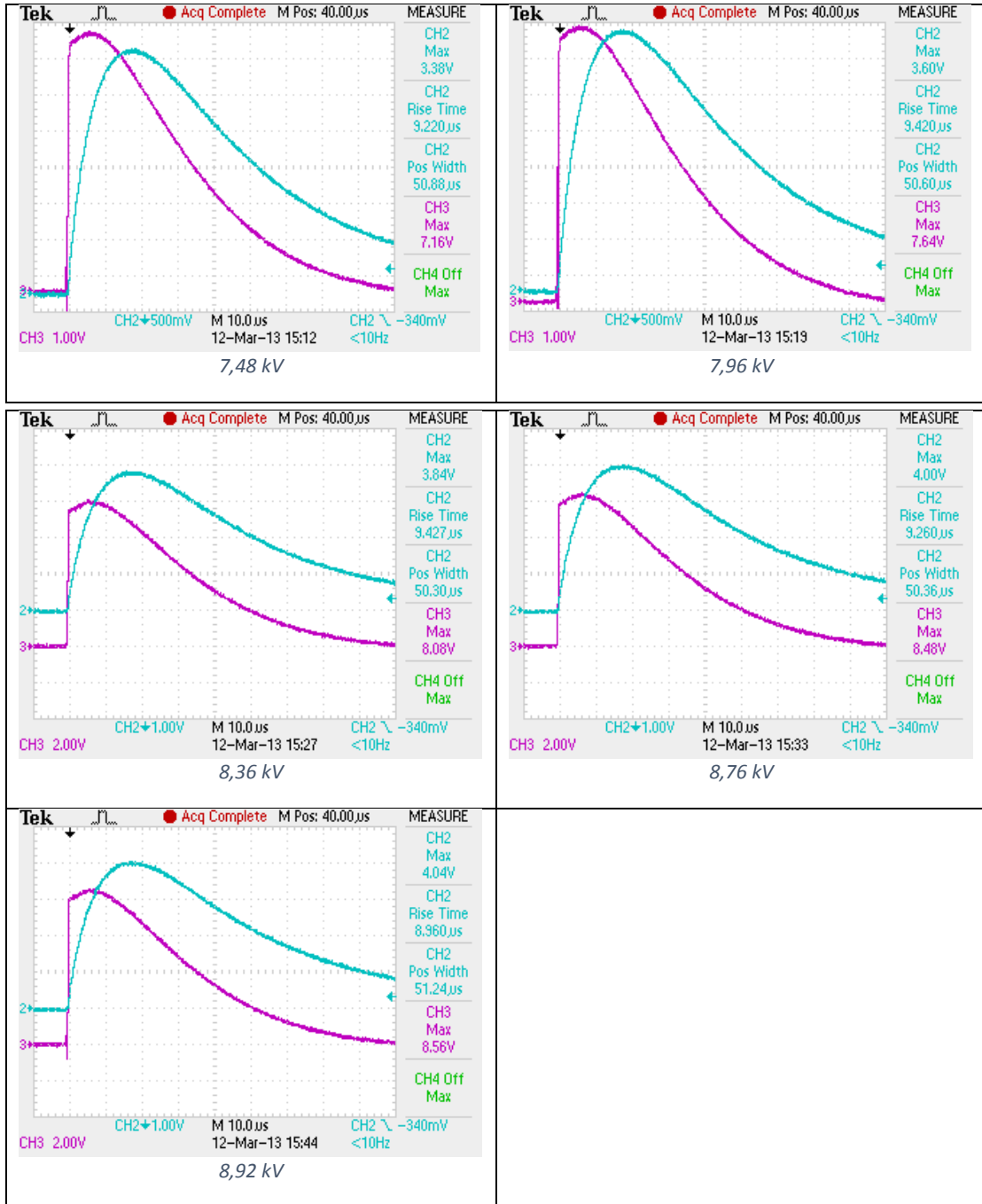


Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
6cm x 60cm	11,2 mS/cm	20,4°C	46%	983 mbar

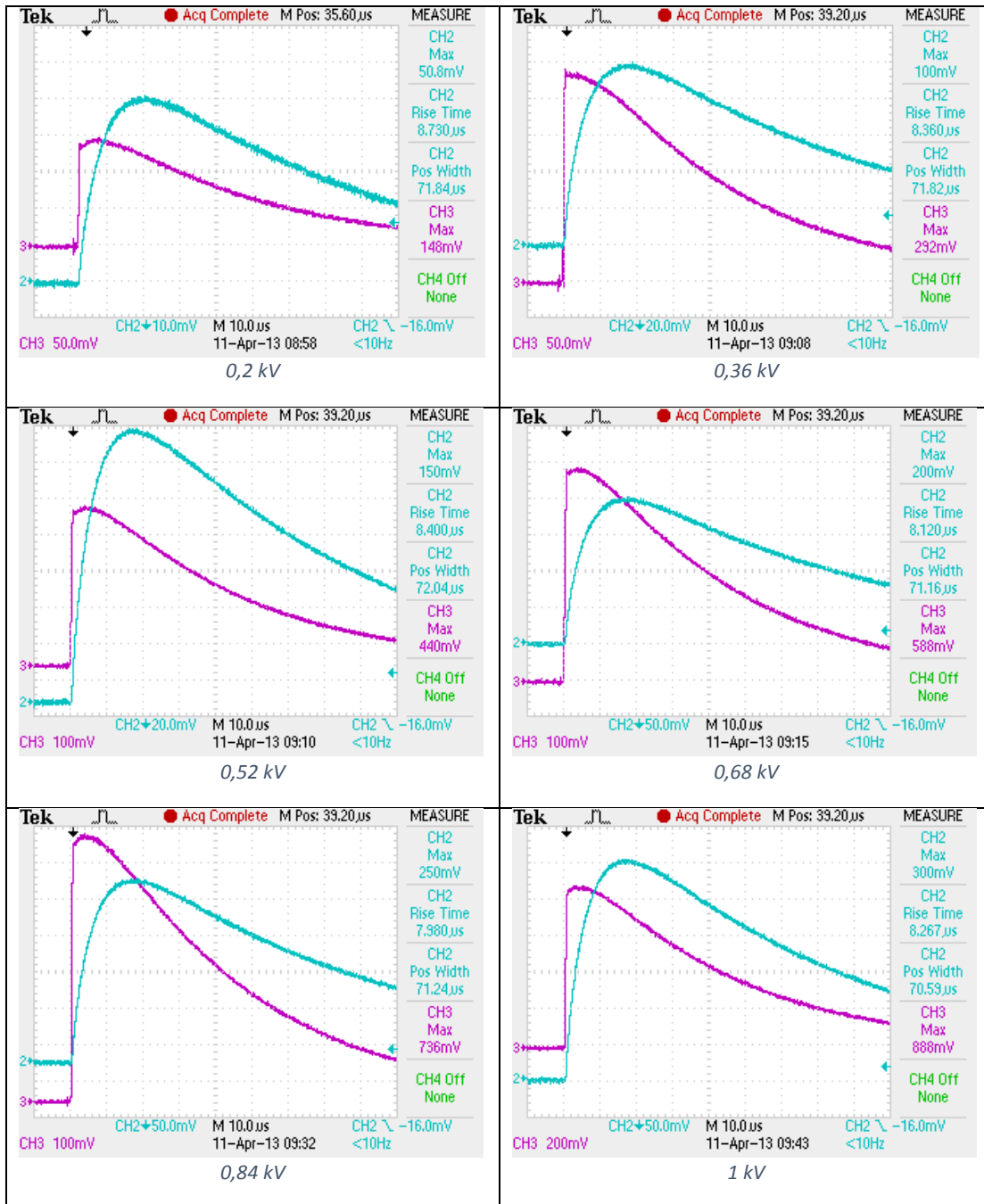


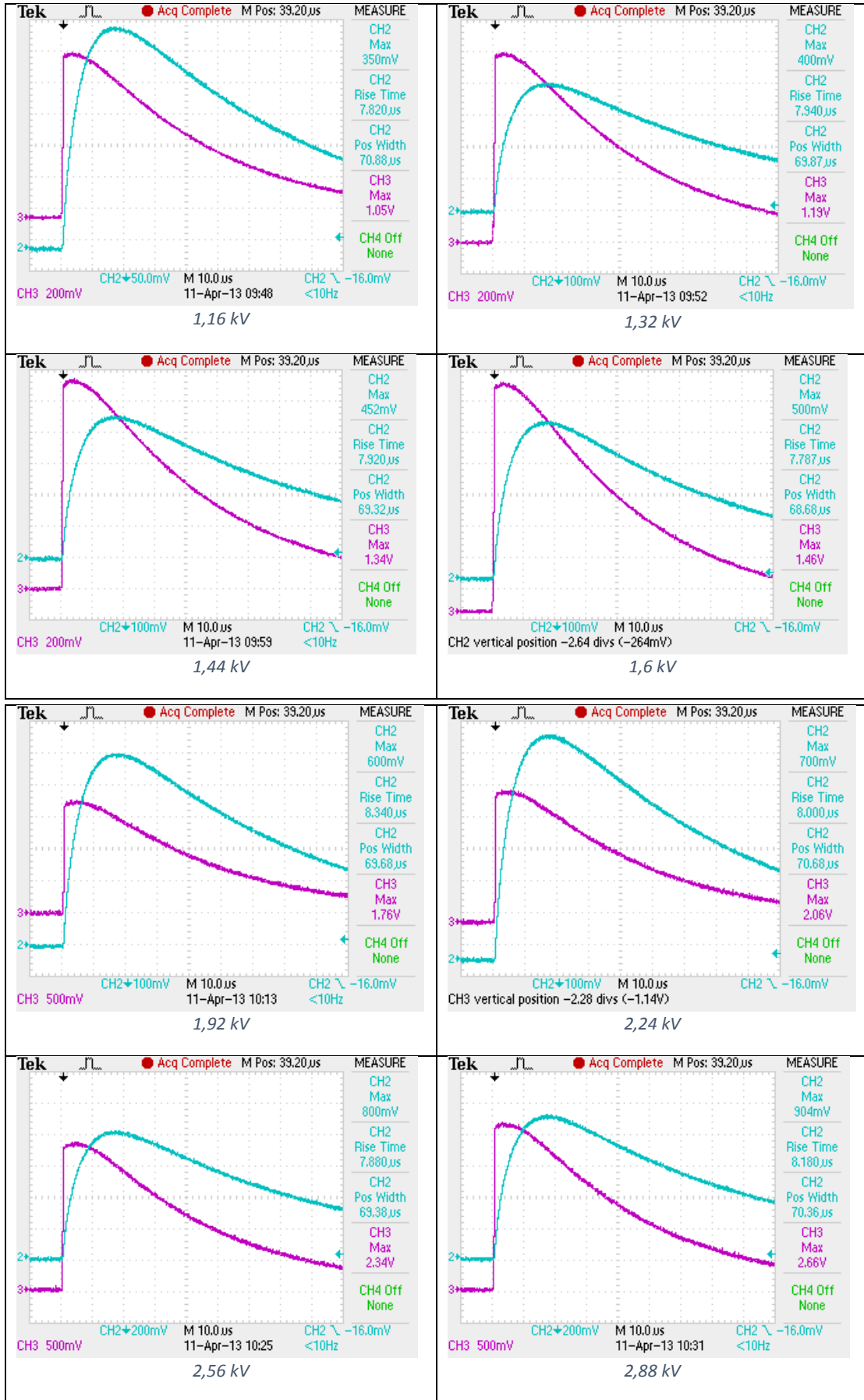


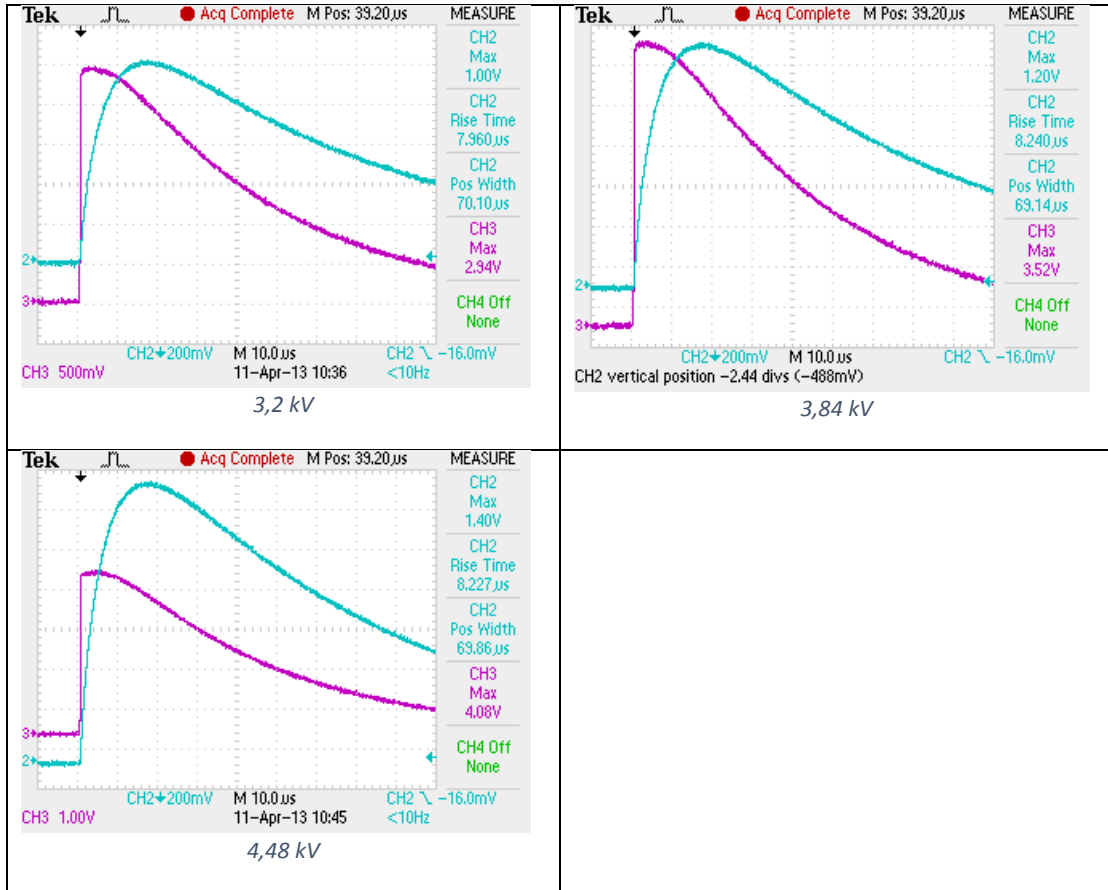




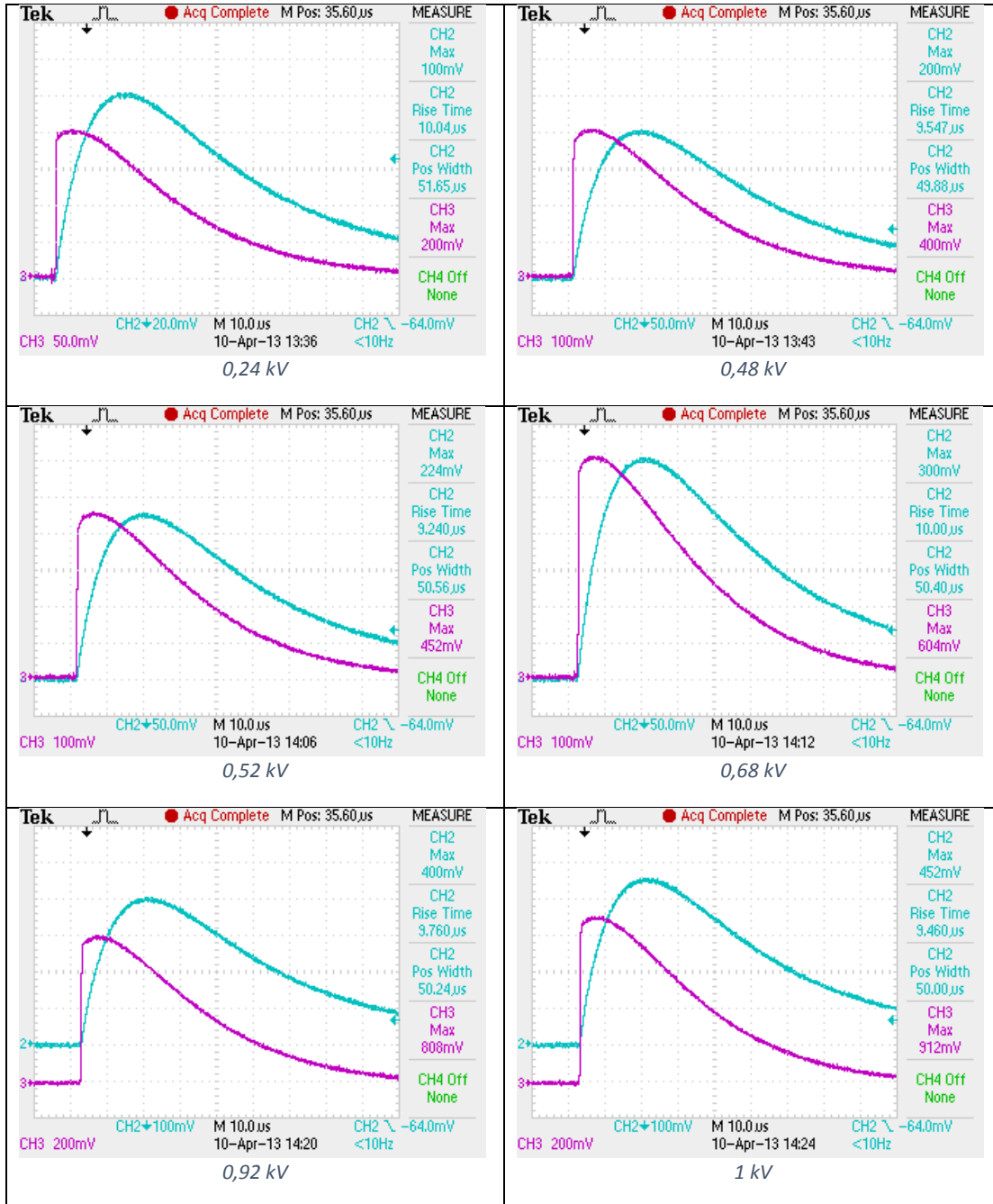
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
2cm x 20cm	21,5 mS/cm	20,2°C	42%	978 mbar

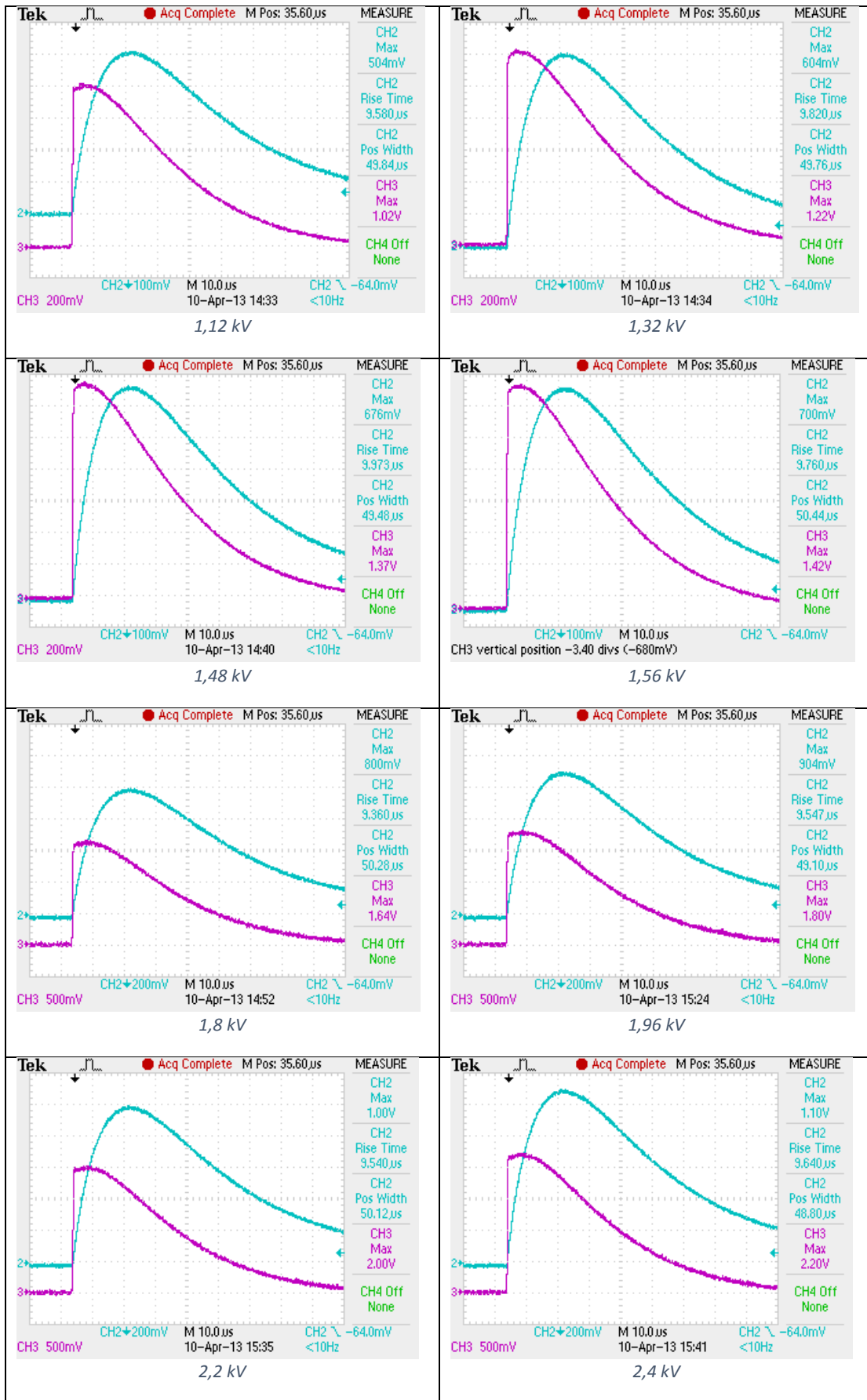


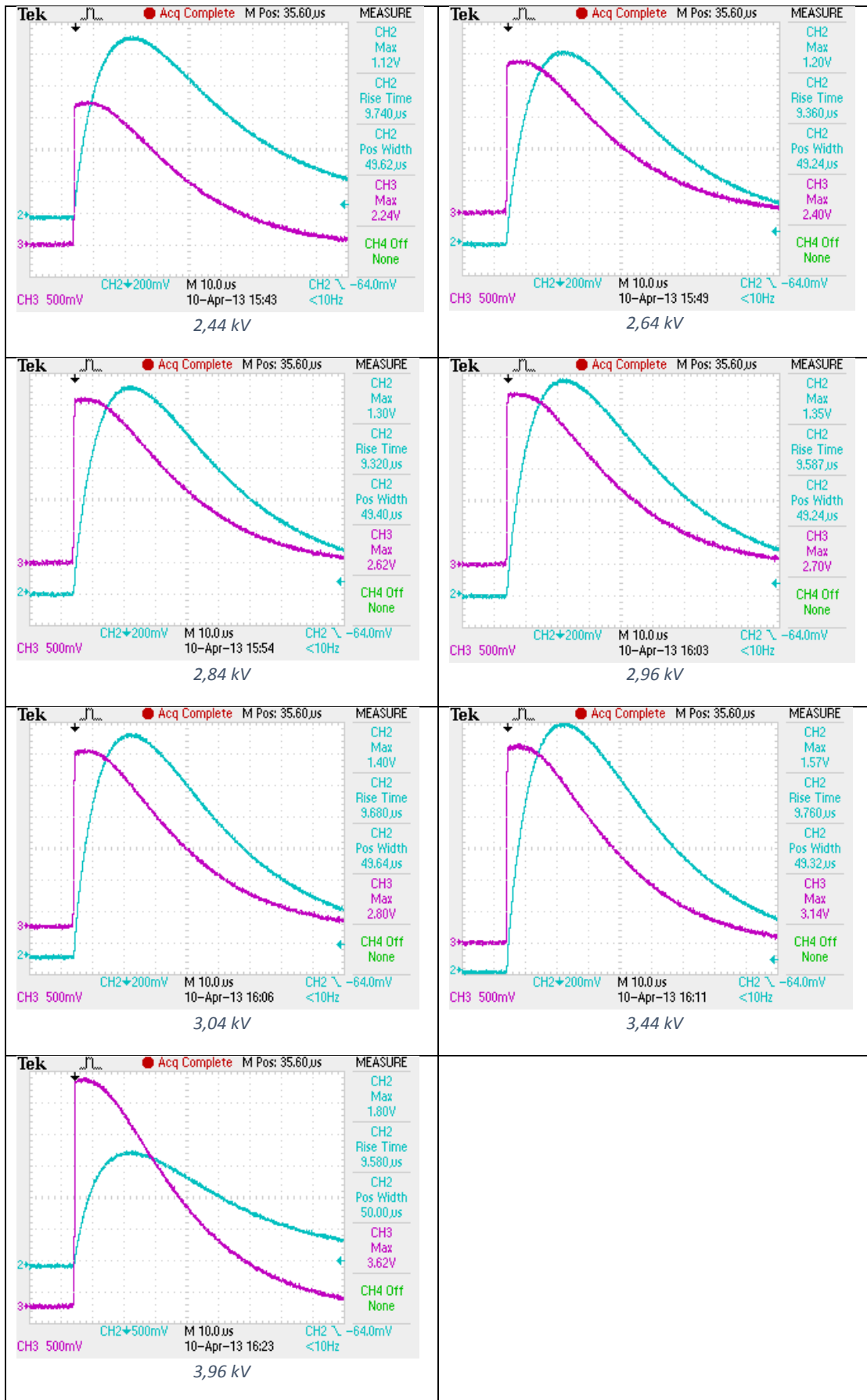




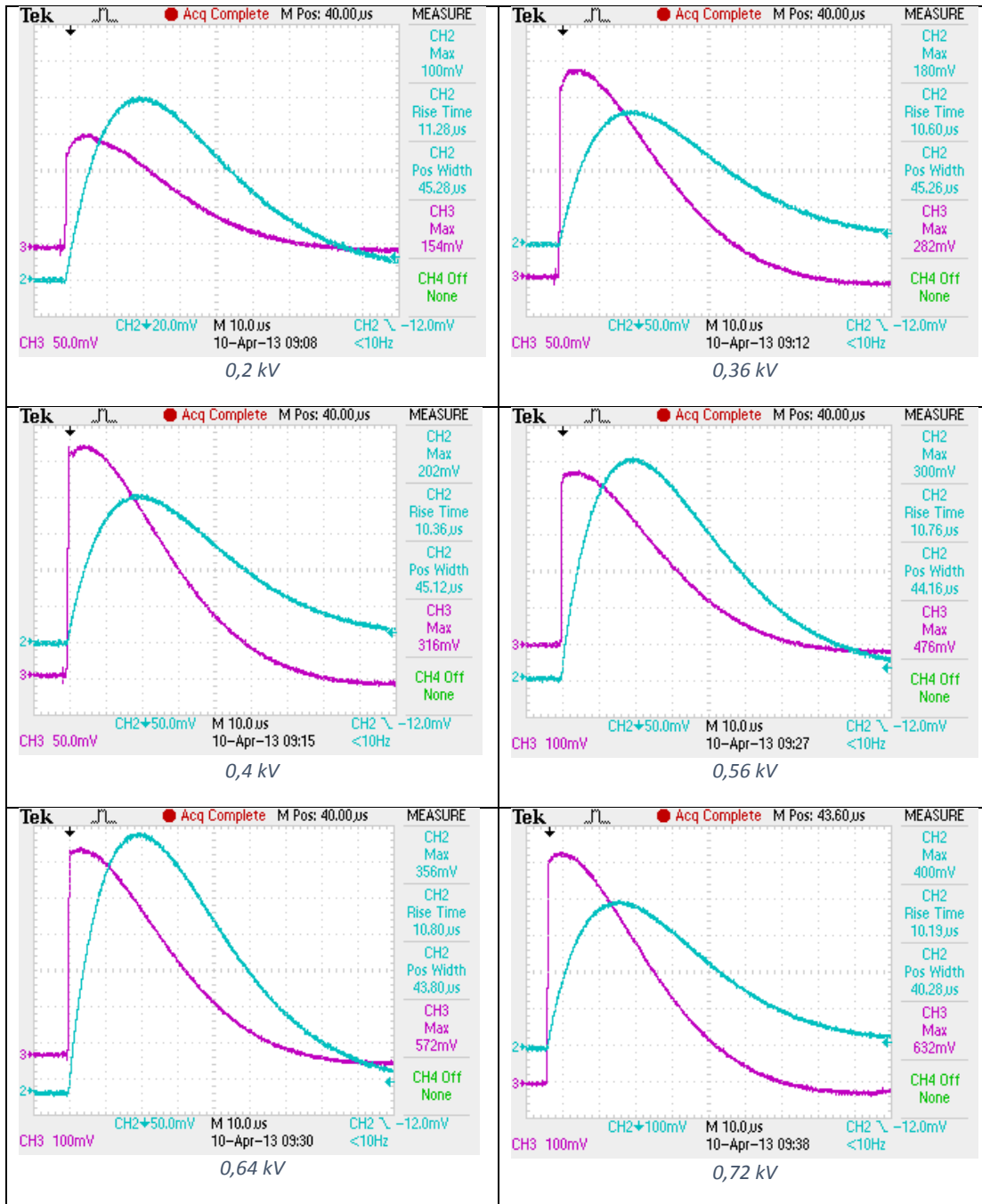
Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
3cm x 30cm	21,6 mS/cm	20,4°C	46%	983 mbar

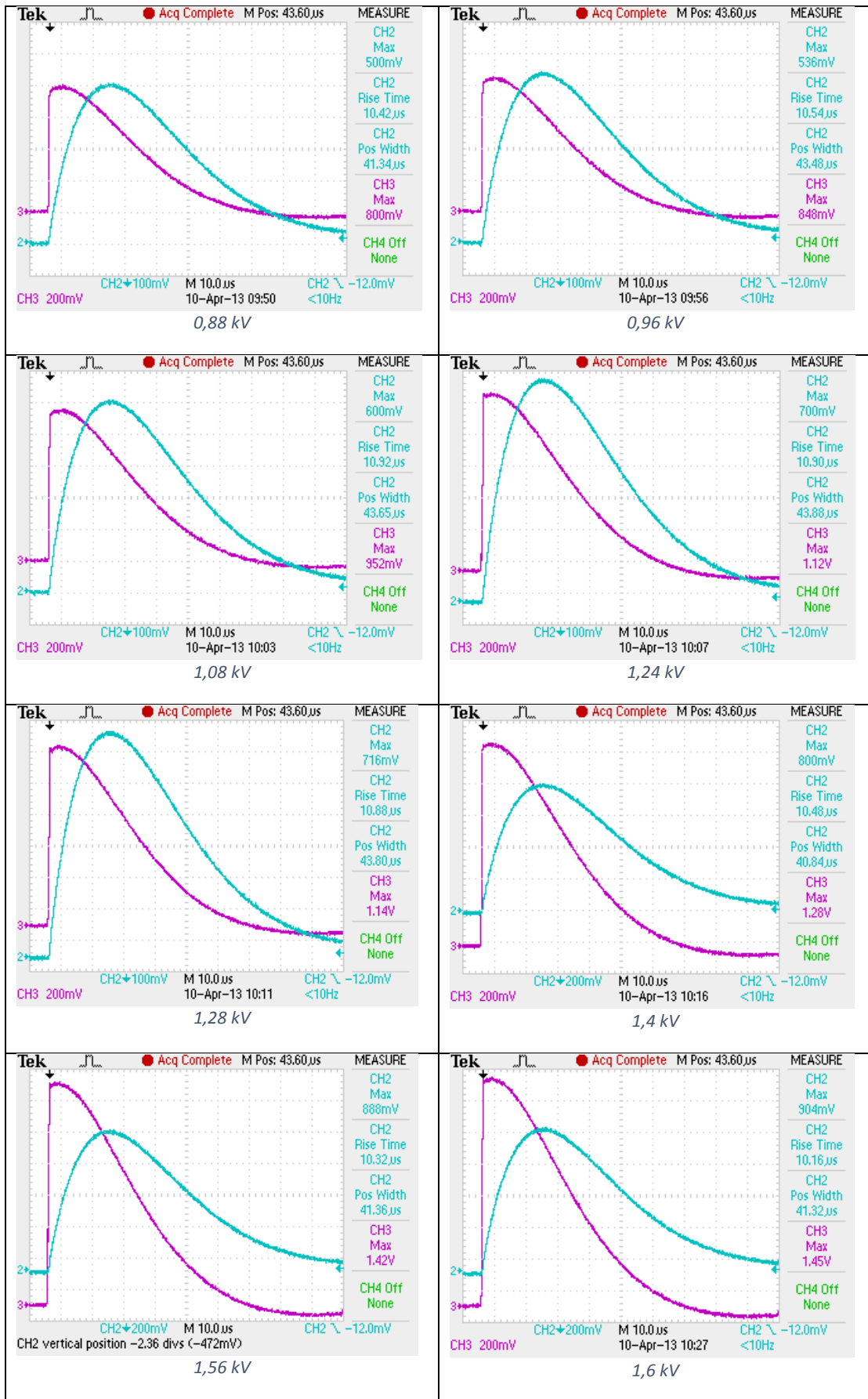


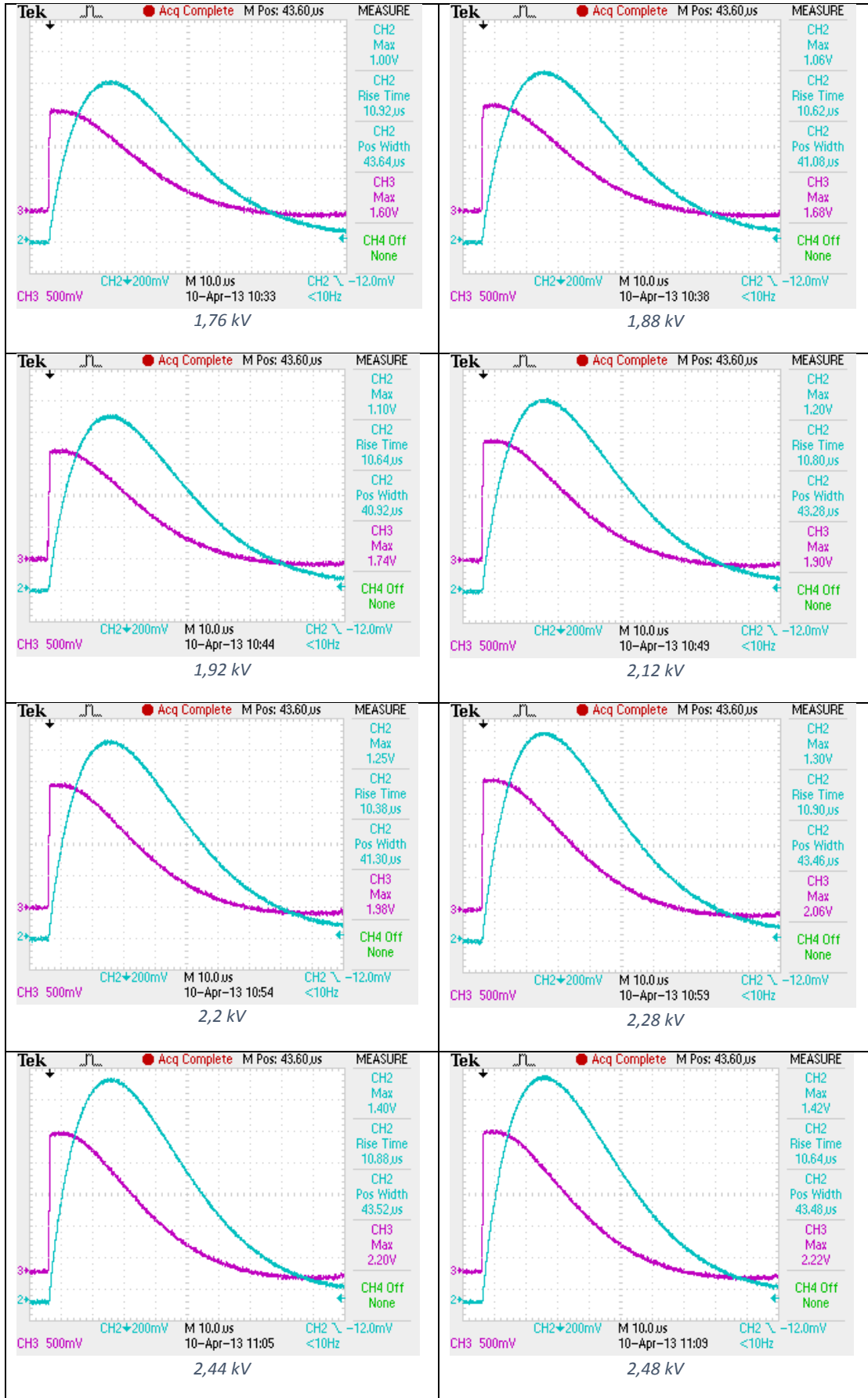


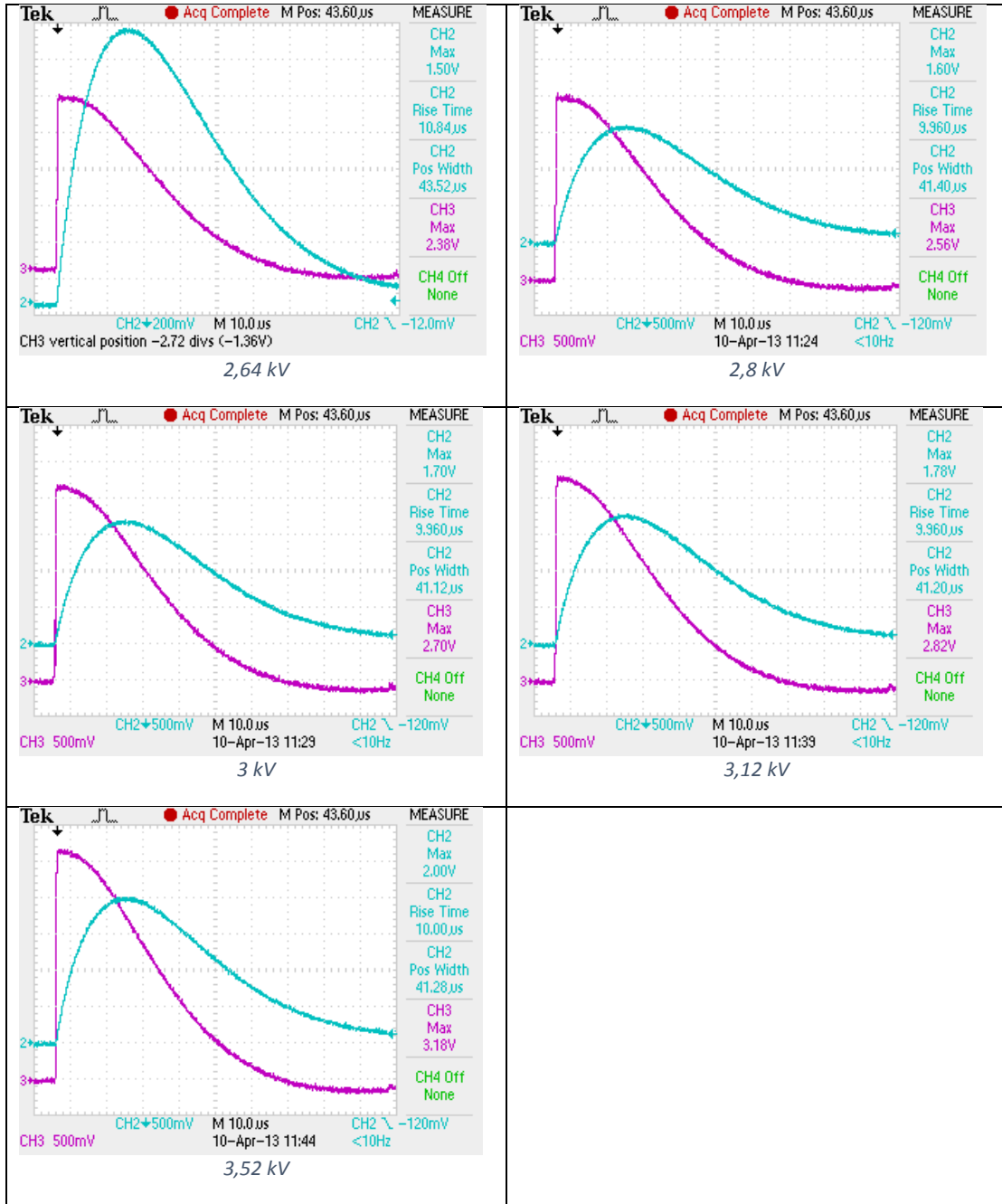


Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
4cm x 40cm	21,5 mS/cm	20,4°C	46%	983 mbar

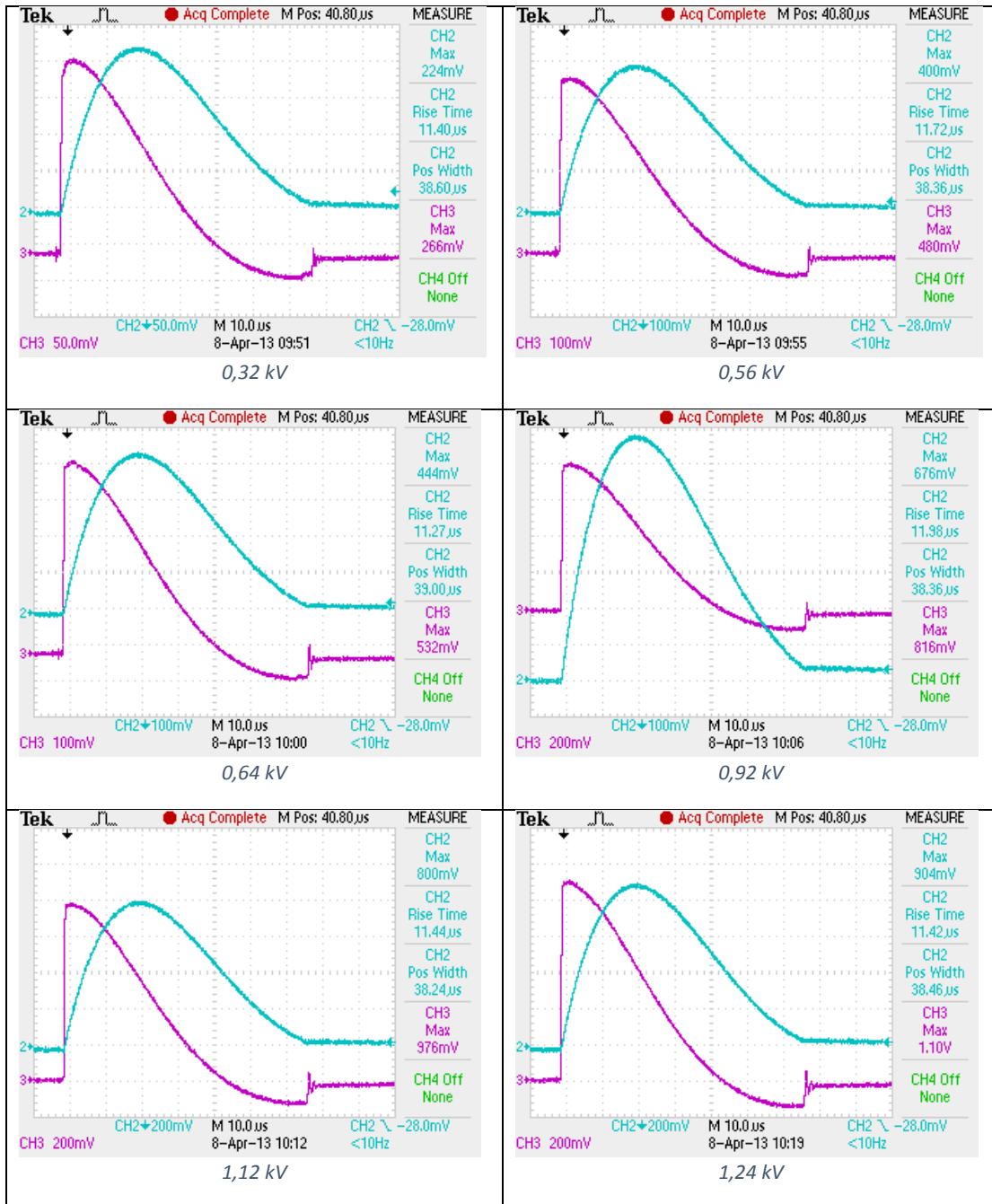


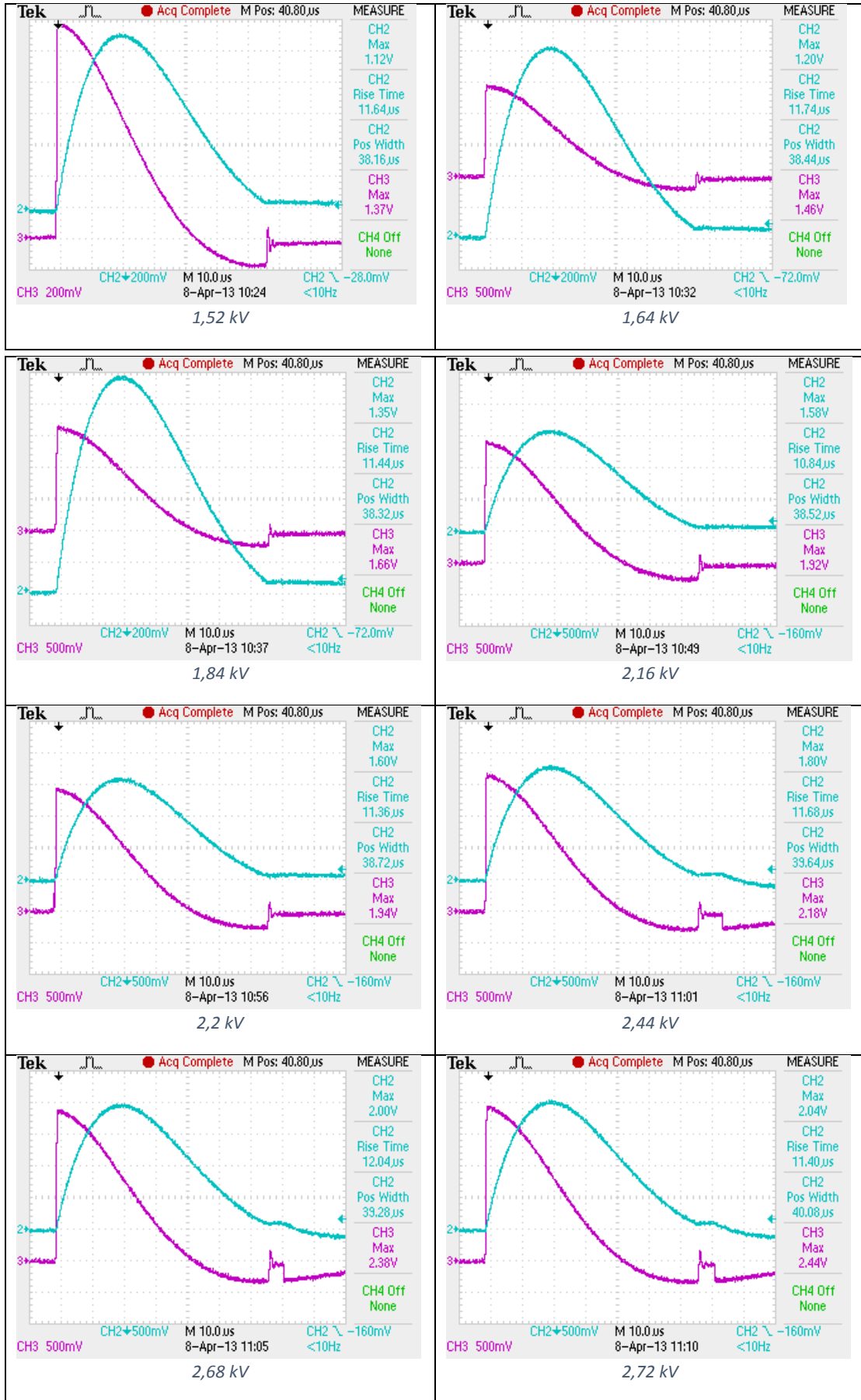


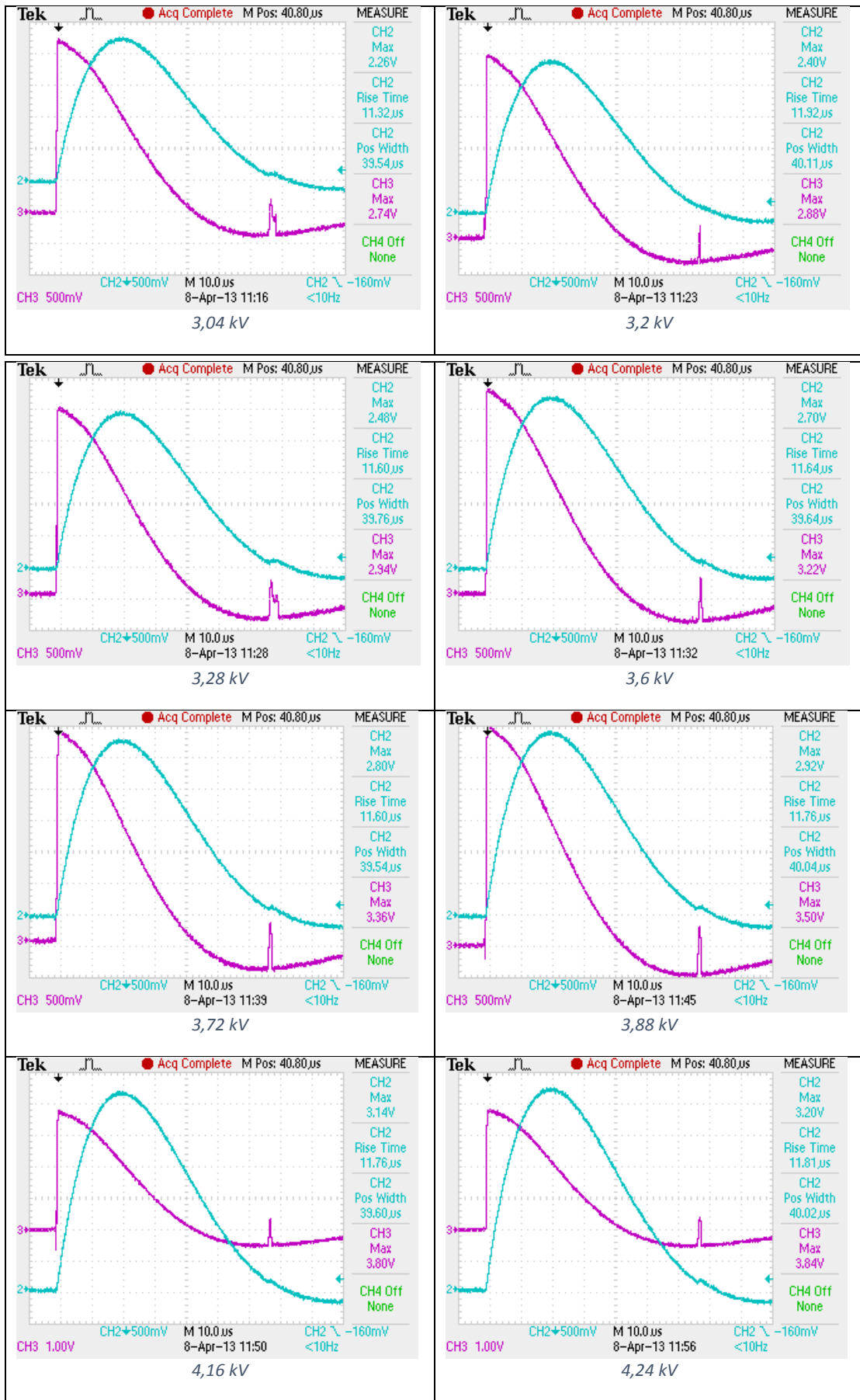




Ηλεκτρόδιο	Αγωγιμότητα σ	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Υγρασία περιβάλλοντος	Πίεση περιβάλλοντος
6cm x 60cm	21,1 mS/cm	20,4°C	54,5%	983 mbar










Πίνακες μετρήσεων

Στη συνέχεια του παραρτήματος παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες με όλες τις μετρήσεις που λάβαμε κατά την εκτέλεση του πειράματος (5 επαναλήψεις για κάθε μέτρηση). Από αυτά τα δεδομένα προέκυψαν τα συγκεντρωτικά, επεξεργασμένα αποτελέσματα των πινάκων του Κεφαλαίου 5. Για την καλύτερη κατανόηση των δεδομένων, για κάθε ηλεκτρόδιο έχουν χρωματιστεί διαφορετικά οι τιμές εκείνες στις οποίες ελήφθησαν μετρήσεις που εξυπηρετούν τις συγκρίσεις με διαφορετικά ηλεκτρόδια. Οι τιμές που δεν έχουν χρωματιστεί είναι αυτές στις οποίες η μέτρηση εξυπηρετεί τη σύγκριση μεταξύ των δύο αγωγιμοτήτων για το ίδιο ηλεκτρόδιο. Πέραν των καταγραφόμενων τιμών 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.

Να επισημάνουμε εδώ ότι οι τιμές που παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες δεν είναι οι απευθείας ενδείξεις του παλμογράφου (όπως για τα παλμογραφήματα) αλλά τα πραγματικά μεγέθη της γεννήτριας, τα οποία έχουν προκύψει από τον παλμογράφο με τις αντίστοιχες αναγωγές του καταμεριστή τάσης στο εσωτερικό της γεννήτριας. Όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά στο 4^ο Κεφάλαιο, ο συγκεκριμένος καταμεριστής υποβαθμίζει την τάση με λόγο 1000:1 και τα 25kA ρεύματος σε περίπου 25V καταγραφόμενα από τον παλμογράφο μέσω του διαφορικού probe.

Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$ σε αγωγιμότητα $\sigma=1 \text{ S/m}$




➤ Ηλεκτρόδιο 2cm x 20cm: Αγωγιμότητα $\sigma=10,7 \text{ mS/cm}$, $P=978\text{mbar}$, $T=20,2\text{C}$, $\text{Hum}\%= 42\%$

-  : σύγκριση με 30x3
-  : σύγκριση με 40x4
-  : σύγκριση με 60x6

	0,32 kV		0,60 kV		0,84 kV		1,12 kV		1,44 kV		1,72 kV		2,00 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,0516	0,300	0,0984	0,580	0,147	0,864	0,198	1,17	0,248	1,46	0,300	1,78	0,350	2,08
2η επανάληψη	0,0492	0,292	0,0976	0,584	0,148	0,872	0,200	1,17	0,248	1,46	0,298	1,78	0,348	2,06
3η επανάληψη	0,0508	0,300	0,0992	0,584	0,149	0,872	0,196	1,16	0,250	1,46	0,298	1,76	0,350	2,08
4η επανάληψη	0,0492	0,296	0,1000	0,584	0,149	0,872	0,198	1,17	0,248	1,46	0,298	1,78	0,350	2,08
5η επανάληψη	0,0508	0,300	0,0992	0,580	0,148	0,872	0,198	1,17	0,250	1,46	0,306	1,80	0,350	2,08
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,05032	0,2976	0,09888	0,5824	0,1482	0,8704	0,198	1,168	0,2488	1,46	0,300	1,78	0,3496	2,076
Τυπική απόκλιση	0,00096	0,0032	0,00082	0,0020	0,0007	0,0032	0,001	0,004	0,0001	0	0,003	0,01	0,0008	0,008
Αντίσταση Z (Ω)	5,9141		5,8899		5,8731		5,8989		5,8681		5,9333		5,9382	

	2,32 kV		2,6 kV		2,88 kV		3,48 kV		4,00 kV		4,52 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,400	2,38	0,448	2,70	0,500	2,98	0,600	3,60	0,700	4,20	Διάσπαση	
2η επανάληψη	0,400	2,40	0,452	2,70	0,504	2,98	0,604	3,60	0,704	4,16		
3η επανάληψη	0,400	2,38	0,452	2,70	0,504	3,00	0,600	3,62	0,700	4,12		
4η επανάληψη	0,404	2,40	0,452	2,70	0,500	3,00	0,600	3,58	0,696	4,12		
5η επανάληψη	0,400	2,38	0,452	2,72	0,500	3,02	0,604	3,60	0,696	4,16		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,4008	2,388	0,4512	2,704	0,5016	2,996	0,6016	3,60	0,6992	4,152	-	-
Τυπική απόκλιση	0,0016	0,009	0,0016	0,008	0,0019	0,015	0,0019	0,01	0,0029	0,030	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	5,9580		5,9929		5,9728		5,9840		5,9382		-	

➤ Ηλεκτρόδιο 3cm x 30cm: Αγωγιμότητα $\sigma=10,7$ mS/cm , P=978mbar , T=20,2C , Hum%= 42%




 : σύγκριση με 20x2
 : σύγκριση με 40x4
 : σύγκριση με 60x6

	0,44 kV		0,80 kV		0,92 kV		1,20 kV		1,56 kV		1,76 kV		1,96 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,103	0,408	0,196	0,800	0,226	0,912	0,302	1,22	0,404	1,60	0,448	1,80	0,50	2,00
2η επανάληψη	0,104	0,416	0,202	0,808	0,224	0,912	0,302	1,22	0,396	1,58	0,448	1,80	0,50	2,00
3η επανάληψη	0,103	0,416	0,198	0,808	0,224	0,912	0,300	1,21	0,396	1,58	0,448	1,80	0,50	2,00
4η επανάληψη	0,102	0,408	0,200	0,816	0,226	0,920	0,300	1,21	0,400	1,60	0,448	1,78	0,50	2,00
5η επανάληψη	0,102	0,408	0,198	0,800	0,224	0,912	0,300	1,20	0,400	1,62	0,448	1,78	0,50	2,00
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,1028	0,4112	0,1988	0,8064	0,2248	0,9136	0,3008	1,212	0,3992	1,596	0,448	1,792	0,50	2,00
Τυπική απόκλιση	0,0007	0,0039	0,0020	0,0059	0,0009	0,0032	0,0009	0,007	0,0029	0,014	0	0,009798	0	0
Αντίσταση Z (Ω)	4,0000		4,0563		4,0640		4,0292		3,9980		4,0000		4,0000	

	2,32 kV		2,60 kV		2,72 kV		3,12 kV		3,52 kV		3,88 kV		4,28 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,596	2,36	0,672	2,68	0,700	2,76	0,800	3,20	0,896	3,58	1,00	4,00	1,10	4,40
2η επανάληψη	0,600	2,38	0,680	2,70	0,700	2,82	0,808	3,22	0,896	3,56	1,00	4,04	1,10	4,40
3η επανάληψη	0,600	2,38	0,668	2,68	0,700	2,82	0,792	3,20	0,896	3,60	1,02	4,04	1,11	4,44
4η επανάληψη	0,600	2,38	0,680	2,68	0,700	2,82	0,800	3,24	0,896	3,60	1,02	4,00	1,10	4,40
5η επανάληψη	0,604	2,40	0,676	2,68	0,696	2,82	0,800	3,20	0,904	3,62	1,01	4,00	1,10	4,40
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,600	2,38	0,6752	2,684	0,6992	2,808	0,800	3,212	0,8976	3,592	1,01	4,016	1,102	4,408
Τυπική απόκλιση	0,002	0,01	0,0046	0,008	0,0016	0,024	0,005	0,016	0,0032	0,020	0,01	0,019	0,004	0,016
Αντίσταση Z (Ω)	3,9667		3,9751		4,0160		4,0150		4,0017		3,9762		4,0000	

	4,40 kV		4,64 kV		5,04 kV		5,24 kV		5,40 kV		6,04 kV		7,24 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,13	4,52	1,20	4,80	1,30	5,20	1,35	5,40	1,40	5,56	1,58	6,24	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,13	4,52	1,20	4,80	1,30	5,20	1,35	5,40	1,40	5,60	1,58	6,24		
3η επανάληψη	1,13	4,52	1,20	4,80	1,30	5,20	1,35	5,40	1,40	5,60	1,58	6,24		
4η επανάληψη	1,13	4,52	1,20	4,80	1,30	5,20	1,35	5,40	1,40	5,60	1,58	6,24		
5η επανάληψη	1,13	4,52	1,20	4,80	1,30	5,20	1,35	5,40	1,41	5,64	1,56	6,28		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,13	4,52	1,20	4,80	1,30	5,20	1,35	5,40	1,402	5,60	1,576	6,248	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,02	0,008	0,016	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	4,0000		4,0000		4,0000		4,0000		3,9942		3,9644		-	

➤ Ηλεκτρόδιο 4cm x 40cm: Αγωγιμότητα $\sigma=11,2 \text{ mS/cm}$, P=983mbar , T=20,4C , Hum%= 46%

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

	0,32 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,92 kV		1,08 kV		1,24 kV		1,52 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,1000	0,292	0,172	0,516	0,198	0,596	0,298	0,896	0,352	1,07	0,404	1,22	0,500	1,50
2η επανάληψη	0,0984	0,290	0,170	0,508	0,198	0,592	0,296	0,896	0,350	1,06	0,396	1,19	0,500	1,50
3η επανάληψη	0,0992	0,290	0,170	0,508	0,198	0,588	0,298	0,896	0,350	1,05	0,404	1,21	0,496	1,50
4η επανάληψη	0,0964	0,284	0,172	0,508	0,198	0,592	0,300	0,904	0,354	1,06	0,396	1,19	0,504	1,50
5η επανάληψη	0,0970	0,286	0,172	0,512	0,200	0,592	0,298	0,896	0,354	1,06	0,400	1,19	0,496	1,49
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,0982	0,2884	0,1712	0,5104	0,1984	0,592	0,298	0,8976	0,352	1,06	0,400	1,20	0,4992	1,498
Τυπική απόκλιση	0,0013	0,0029	0,0009	0,0032	0,0008	0,002	0,001	0,0032	0,001	0,01	0,003	0,01	0,0029933	0,004
Αντίσταση Z (Ω)	2,9368		2,9813		2,9838		3,0120		3,0113		3,0000		3,0008	




	1,64 kV		1,84 kV		2,12 kV		2,16 kV		2,44 kV		2,68 kV		2,72 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,532	1,59	0,600	1,80	0,700	2,08	0,712	2,12	0,800	2,40	0,88	2,64	0,896	2,68
2η επανάληψη	0,540	1,62	0,604	1,80	0,700	2,10	0,708	2,12	0,800	2,40	0,88	2,64	0,896	2,68
3η επανάληψη	0,540	1,62	0,600	1,80	0,700	2,08	0,712	2,12	0,800	2,42	0,88	2,62	0,896	2,68
4η επανάληψη	0,532	1,60	0,600	1,80	0,700	2,08	0,712	2,12	0,800	2,42	0,88	2,62	0,896	2,70
5η επανάληψη	0,532	1,60	0,600	1,80	0,704	2,10	0,708	2,12	0,792	2,38	0,88	2,62	0,896	2,68
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,5352	1,606	0,6008	1,80	0,7008	2,088	0,7104	2,12	0,7984	2,404	0,88	2,628	0,896	2,684
Τυπική απόκλιση	0,0039	0,012	0,0016	0	0,0016	0,009	0,0019	0	0,0032	0,015	0	0,009	0	0,008
Αντίσταση Z (Ω)	3,0007		2,9960		2,9794		2,9842		3,0110		2,9863		2,9955	

	3,04 kV		3,24 kV		3,36 kV		3,64 kV		3,76 kV		3,96 kV		4,24 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,000	3,00	1,06	3,18	1,10	3,30	1,20	3,58	1,24	3,70	1,30	3,88	1,40	4,20
2η επανάληψη	1,000	3,00	1,06	3,18	1,10	3,32	1,20	3,58	1,24	3,70	1,30	3,90	1,40	4,20
3η επανάληψη	1,000	3,00	1,07	3,20	1,10	3,32	1,20	3,58	1,24	3,70	1,30	3,92	1,40	4,20
4η επανάληψη	0,992	2,98	1,06	3,20	1,10	3,30	1,20	3,58	1,24	3,70	1,30	3,92	1,40	4,20
5η επανάληψη	1,010	3,02	1,06	3,18	1,10	3,30	1,20	3,60	1,24	3,68	1,30	3,92	1,40	4,20
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,0004	3,00	1,062	3,188	1,10	3,308	1,20	3,584	1,24	3,696	1,30	3,908	1,40	4,20
Τυπική απόκλιση	0,0057	0,01	0,004	0,009	0	0,009	0	0,008	0	0,008	0	0,016	0	0
Αντίσταση Z (Ω)	2,998		3,0018		3,0072		2,9867		2,9806		3,0061		3,0000	

	4,32 kV		4,56 kV		4,80 kV		5,12 kV		5,4 kV		6,04 kV		7,24 kV	
	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}
1η επανάληψη	1,42	4,28	1,50	4,52	1,60	4,72	1,70	5,08	1,78	5,32	2,00	6,00	2,40	7,16
2η επανάληψη	1,42	4,28	1,50	4,52	1,60	4,72	1,70	5,08	1,80	5,36	2,00	6,00	2,40	7,16
3η επανάληψη	1,43	4,28	1,50	4,52	1,60	4,76	1,70	5,08	1,78	5,36	2,00	6,00	2,42	7,20
4η επανάληψη	1,43	4,28	1,50	4,52	1,60	4,76	1,70	5,08	1,78	5,32	2,02	6,00	2,42	7,16
5η επανάληψη	1,42	4,28	1,50	4,52	1,60	4,76	1,72	5,04	1,78	5,36	2,00	6,00	2,38	7,12
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,424	4,28	1,50	4,52	1,60	4,744	1,704	5,072	1,784	5,344	2,004	6,00	2,404	7,16
Τυπική απόκλιση	0,005	0	0	0	0	0,019	0,008	0,016	0,008	0,019	0,008	0	0,015	0,02
Αντίσταση Z (Ω)	3,0056		3,0133		2,9650		2,9765		2,9955		2,9940		2,9783	

	8,44 kV		9,64 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	2,80	8,32	3,20	9,52
2η επανάληψη	2,80	8,40	3,18	9,52
3η επανάληψη	2,80	8,32	3,20	9,52
4η επανάληψη	2,80	8,32	3,20	9,52
5η επανάληψη	2,80	8,32	3,20	9,52
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	2,80	8,336	3,196	9,52
Τυπική απόκλιση	0	0,032	0,008	0
Αντίσταση Z (Ω)	2,9771		2,9787	

➤ Ηλεκτρόδιο 6cm x 60cm: Αγωγιμότητα $\sigma=11,2 \text{ mS/cm}$, $P=983\text{mbar}$, $T=20,4\text{C}$, $\text{Hum}\%= 46\%$

-  : σύγκριση με 20x2
-  : σύγκριση με 30x3
-  : σύγκριση με 40x4

	0,56 kV		0,92 kV		1,00 kV		1,52 kV		1,80 kV		2,00 kV		2,48 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,230	0,508	0,396	0,888	0,444	0,976	0,676	1,47	0,800	1,74	0,896	1,96	1,11	2,42
2η επανάληψη	0,234	0,516	0,400	0,888	0,444	0,968	0,680	1,47	0,808	1,76	0,896	1,94	1,11	2,42
3η επανάληψη	0,232	0,512	0,404	0,896	0,444	0,976	0,668	1,46	0,808	1,76	0,896	1,94	1,11	2,42
4η επανάληψη	0,234	0,512	0,404	0,888	0,444	0,968	0,672	1,46	0,800	1,74	0,896	1,94	1,12	2,42
5η επανάληψη	0,236	0,520	0,404	0,888	0,448	0,976	0,676	1,47	0,800	1,74	0,896	1,94	1,11	2,42
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,2332	0,5136	0,4016	0,8896	0,4448	0,9728	0,6744	1,466	0,8032	1,748	0,896	1,944	1,112	2,42
Τυπική απόκλιση	0,0020	0,0041	0,0032	0,0032	0,0016	0,0039	0,0040	0,005	0,0039	0,009	0	0,008	0,004	0
Αντίσταση Z (Ω)	2,2024		2,2151		2,1870		2,1737		2,1762		2,1696		2,1762	




	2,68 kV		3,24 kV		3,56 kV		3,64 kV		4,08 kV		4,52 kV		4,56 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,20	2,62	1,35	3,06	1,56	3,36	1,60	3,48	1,80	3,84	2,00	4,36	2,02	4,36
2η επανάληψη	1,20	2,62	1,36	3,06	1,56	3,38	1,60	3,48	1,80	3,88	2,00	4,32	2,02	4,36
3η επανάληψη	1,20	2,62	1,36	3,06	1,56	3,38	1,60	3,46	1,80	3,88	2,02	4,36	2,04	4,36
4η επανάληψη	1,20	2,60	1,36	3,06	1,54	3,38	1,62	3,46	1,80	3,88	2,00	4,32	2,02	4,36
5η επανάληψη	1,12	2,56	1,36	3,06	1,56	3,38	1,60	3,46	1,80	3,88	2,00	4,32	2,04	4,36
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,184	2,604	1,358	3,06	1,556	3,376	1,604	3,468	1,80	3,872	2,004	4,336	2,028	4,36
Τυπική απόκλιση	0,032	0,023	0,004	0	0,008	0,008	0,008	0,009	0	0,016	0,008	0,019	0,009	0
Αντίσταση Z (Ω)	2,1993		2,2533		2,169		2,1620		2,1511		2,1636		2,1499	

	5,16 kV		5,44 kV		5,52 kV		5,96 kV		6,24 kV		6,56 kV		7,04 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	2,26	4,92	2,40	5,20	2,48	5,28	2,70	5,72	2,80	5,96	2,92	6,28	3,16	6,72
2η επανάληψη	2,26	4,96	2,40	5,20	2,48	5,28	2,70	5,72	2,80	6,00	2,94	6,28	3,14	6,72
3η επανάληψη	2,26	4,96	2,40	5,20	2,48	5,28	2,70	5,68	2,80	5,96	2,92	6,28	3,14	6,72
4η επανάληψη	2,26	4,96	2,40	5,20	2,48	5,28	2,70	5,72	2,80	5,96	2,92	6,28	3,14	6,72
5η επανάληψη	2,26	4,96	2,40	5,20	2,48	5,28	2,70	5,72	2,78	5,96	2,92	6,28	3,14	6,72
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	2,26	4,952	2,40	5,20	2,48	5,28	2,70	5,712	2,796	5,968	2,924	6,28	3,144	6,72
Τυπική απόκλιση	0	0,016	0	0	0	0	0	0,016	0,008	0,016	0,008	0	0,008	0
Αντίσταση Z (Ω)	2,1911		2,1667		2,1290		2,1155		2,1344		2,1477		2,13740	

	7,12 kV		7,48 kV		7,96 kV		8,36 kV		8,76 kV		8,92 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	3,20	6,80	3,38	7,16	3,60	7,64	3,84	8,08	4,00	8,48	4,04	8,48
2η επανάληψη	3,20	6,80	3,38	7,16	3,60	7,64	3,84	8,08	4,00	8,40	4,04	8,56
3η επανάληψη	3,20	6,80	3,38	7,16	3,60	7,64	3,84	8,00	4,00	8,40	4,04	8,56
4η επανάληψη	3,20	6,80	3,38	7,16	3,62	7,60	3,84	8,08	4,00	8,40	4,08	8,56
5η επανάληψη	3,20	6,84	3,38	7,12	3,60	7,60	3,80	8,08	3,96	8,32	4,08	8,56
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	3,20	6,808	3,38	7,152	3,604	7,624	3,832	8,064	3,992	8,40	4,056	8,544
Τυπική απόκλιση	0	0,016	0	0,016	0,008	0,019	0,016	0,032	0,016	0,05	0,019	0,032
Αντίσταση Z (Ω)	2,1275		2,1159		2,1154		2,1043		2,1042		2,1065	

Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$ σε αγωγιμότητα $\sigma=1$ S/m




➤ Ηλεκτρόδιο 2cm x 20cm: Αγωγιμότητα $\sigma=10,7$ mS/cm , P=978mbar , T=20,2C , Hum%= 42%

-  : σύγκριση με 30x3
-  : σύγκριση με 40x4
-  : σύγκριση με 60x6

	0,32 kV		0,60 kV		0,84 kV		1,12 kV		1,44 kV		1,72 kV		2,00 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,0516	0,276	0,0984	0,560	0,147	0,816	0,198	1,120	0,248	1,400	0,300	1,70	0,350	1,94
2η επανάληψη	0,0492	0,272	0,0976	0,556	0,148	0,808	0,200	1,104	0,248	1,416	0,298	1,72	0,348	2,00
3η επανάληψη	0,0508	0,280	0,0992	0,556	0,149	0,816	0,196	1,112	0,250	1,376	0,298	1,72	0,350	1,96
4η επανάληψη	0,0492	0,280	0,1000	0,540	0,149	0,832	0,198	1,096	0,248	1,400	0,298	1,68	0,350	2,00
5η επανάληψη	0,0508	0,276	0,0992	0,544	0,148	0,816	0,198	1,080	0,250	1,376	0,306	1,68	0,350	1,98
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,05032	0,2768	0,09888	0,5512	0,1482	0,8176	0,198	1,1024	0,2488	1,3936	0,300	1,70	0,3496	1,976
Τυπική απόκλιση	0,00096	0,0029	0,00081	0,0077	0,0007	0,0078	0,001	0,0137	0,0009	0,0155	0,003	0,02	0,0008	0,023
Αντίσταση Z (Ω)	5,5007		5,5744		5,5168		5,5676		5,6012		5,6667		5,6521	

	2,32 kV		2,6 kV		2,88 kV		3,48 kV		4,00 kV		4,52 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,400	2,32	0,448	2,60	0,500	2,88	0,600	3,46	0,700	4,00	Διάσπαση	
2η επανάληψη	0,400	2,26	0,452	2,60	0,504	2,82	0,604	3,40	0,704	4,00		
3η επανάληψη	0,400	2,30	0,452	2,58	0,504	2,86	0,600	3,42	0,700	4,04		
4η επανάληψη	0,404	2,26	0,452	2,56	0,500	2,86	0,600	3,46	0,696	3,92		
5η επανάληψη	0,400	2,32	0,452	2,58	0,500	2,88	0,604	3,44	0,696	3,96		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,4008	2,292	0,4512	2,584	0,5016	2,86	0,6016	3,436	0,6992	3,984	-	-
Τυπική απόκλιση	0,0016	0,027	0,0016	0,015	0,0019	0,02	0,0019	0,023	0,0029	0,040	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	5,7185		5,7269		5,7017		5,7114		5,6979		-	

➤ Ηλεκτρόδιο 3cm x 30cm: Αγωγιμότητα $\sigma=10,7 \text{ mS/cm}$, P=978mbar , T=20,2C , Hum%= 42%




-  : σύγκριση με 20x2
-  : σύγκριση με 40x4
-  : σύγκριση με 60x6

	0,44 kV		0,80 kV		0,92 kV		1,20 kV		1,56 kV		1,76 kV		1,96 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,103	0,38	0,196	0,760	0,226	0,864	0,302	1,128	0,404	1,52	0,448	1,68	0,500	1,92
2η επανάληψη	0,104	0,392	0,202	0,768	0,224	0,840	0,302	1,152	0,396	1,46	0,448	1,68	0,500	1,88
3η επανάληψη	0,103	0,388	0,198	0,760	0,224	0,856	0,300	1,144	0,396	1,50	0,448	1,70	0,500	1,88
4η επανάληψη	0,102	0,396	0,200	0,776	0,226	0,856	0,300	1,152	0,400	1,42	0,448	1,70	0,500	1,86
5η επανάληψη	0,102	0,380	0,198	0,760	0,224	0,856	0,300	1,160	0,400	1,52	0,448	1,70	0,500	1,88
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,1028	0,3872	0,1988	0,7648	0,2248	0,8544	0,3008	1,1472	0,3992	1,484	0,448	1,692	0,500	1,884
Τυπική απόκλιση	0,0007	0,0064	0,0020	0,0064	0,0009	0,0078	0,0009	0,0108	0,0029	0,038	0	0,009	0	0,019
Αντίσταση Z (Ω)	3,76653		3,8470		3,8007		3,8138		3,7174		3,7767		3,768	

	2,32 kV		2,60 kV		2,72 kV		3,12 kV		3,52 kV		3,88 kV		4,28 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,596	2,18	0,672	2,56	0,700	2,62	0,800	3,10	0,896	3,44	1,00	3,76	1,10	4,12
2η επανάληψη	0,600	2,24	0,680	2,56	0,700	2,70	0,808	3,04	0,896	3,36	1,00	3,84	1,10	4,16
3η επανάληψη	0,600	2,28	0,668	2,60	0,700	2,68	0,792	3,00	0,896	3,42	1,02	3,88	1,11	4,16
4η επανάληψη	0,600	2,22	0,680	2,48	0,700	2,64	0,800	3,12	0,896	3,38	1,02	3,80	1,10	4,16
5η επανάληψη	0,604	2,24	0,676	2,58	0,696	2,70	0,800	3,10	0,904	3,36	1,01	3,72	1,10	4,16
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,600	2,232	0,6752	2,556	0,6992	2,668	0,800	3,072	0,8976	3,392	1,01	3,80	1,102	4,152
Τυπική απόκλιση	0,002	0,032	0,0046	0,040	0,0016	0,032	0,005	0,044	0,0032	0,032	0,01	0,05	0,004	0,016
Αντίσταση Z (Ω)	3,7200		3,7855		3,8157		3,8400		3,7789		3,7623		3,7676	

	4,40 kV		4,64 kV		5,04 kV		5,24 kV		5,40 kV		6,04 kV		7,24 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,13	4,32	1,20	4,52	1,30	5,04	1,35	5,24	1,40	5,28	1,58	6,00	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,13	4,36	1,20	4,56	1,30	5,00	1,35	5,20	1,40	5,40	1,58	6,08		
3η επανάληψη	1,13	4,36	1,20	4,52	1,30	4,80	1,35	5,16	1,40	5,40	1,58	6,00		
4η επανάληψη	1,13	4,36	1,20	4,52	1,30	5,00	1,35	5,20	1,40	5,36	1,58	5,88		
5η επανάληψη	1,13	4,24	1,20	4,6	1,30	5,00	1,35	5,20	1,41	5,40	1,56	6,04		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,13	4,328	1,20	4,544	1,30	4,968	1,35	5,20	1,402	5,368	1,576	6,00	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,046	0	0,032	0	0,085	0	0,02	0,004	0,046	0,008	0,06	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	3,8301		3,7867		3,8215		3,8518		3,8288		3,8071		-	

➤ Ηλεκτρόδιο 4cm x 40cm: Αγωγιμότητα $\sigma=11,2$ mS/cm , P=983mbar , T=20,4C , Hum%= 46%

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

	0,32 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,92 kV		1,08 kV		1,24 kV		1,52 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,1000	0,262	0,172	0,484	0,198	0,548	0,298	0,816	0,352	0,976	0,404	1,144	0,500	1,368
2η επανάληψη	0,0984	0,266	0,170	0,472	0,198	0,528	0,296	0,816	0,350	0,960	0,396	1,104	0,500	1,344
3η επανάληψη	0,0992	0,264	0,170	0,476	0,198	0,548	0,298	0,816	0,350	0,936	0,404	1,120	0,496	1,400
4η επανάληψη	0,0964	0,258	0,172	0,444	0,198	0,540	0,300	0,808	0,354	0,936	0,396	1,104	0,504	1,384
5η επανάληψη	0,0970	0,260	0,172	0,484	0,200	0,536	0,298	0,816	0,354	0,944	0,400	1,056	0,496	1,376
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,0982	0,262	0,1712	0,472	0,1984	0,540	0,298	0,8144	0,352	0,9504	0,400	1,1056	0,4992	1,3744
Τυπική απόκλιση	0,0013	0,002	0,0009	0,014	0,0008	0,007	0,001	0,0032	0,001	0,0155	0,003	0,0288	0,0030	0,0185
Αντίσταση Z (Ω)	2,6680		2,7570		2,7217		2,7328		2,7000		2,7640		2,7532	




	1,64 kV		1,84 kV		2,12 kV		2,16 kV		2,44 kV		2,68 kV		2,72 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,532	1,496	0,600	1,64	0,700	1,88	0,712	1,88	0,800	2,22	0,88	2,40	0,896	2,50
2η επανάληψη	0,540	1,520	0,604	1,64	0,700	1,96	0,708	1,90	0,800	2,24	0,88	2,42	0,896	2,46
3η επανάληψη	0,540	1,480	0,600	1,64	0,700	1,92	0,712	1,98	0,800	2,22	0,88	2,42	0,896	2,50
4η επανάληψη	0,532	1,480	0,600	1,66	0,700	1,86	0,712	1,94	0,800	2,24	0,88	2,42	0,896	2,46
5η επανάληψη	0,532	1,480	0,600	1,62	0,704	1,84	0,708	1,90	0,792	2,24	0,88	2,40	0,896	2,50
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,5352	1,4912	0,6008	1,64	0,7008	1,892	0,7104	1,92	0,7984	2,232	0,88	2,412	0,896	2,484
Τυπική απόκλιση	0,0039	0,0156	0,0016	0,01	0,0016	0,043	0,0019	0,03	0,0032	0,009	0	0,009	0	0,019
Αντίσταση Z (Ω)	2,7862		2,7296		2,6997		2,7027		2,7956		2,7409		2,7723	

	3,04 kV		3,24 kV		3,36 kV		3,64 kV		3,76 kV		3,96 kV		4,24 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,000	2,78	1,06	2,96	1,10	3,04	1,20	3,22	1,24	3,32	1,30	3,58	1,40	3,84
2η επανάληψη	1,000	2,82	1,06	3,04	1,10	3,14	1,20	3,24	1,24	3,30	1,30	3,52	1,40	3,84
3η επανάληψη	1,000	2,74	1,07	2,98	1,10	3,04	1,20	3,32	1,24	3,46	1,30	3,60	1,40	3,84
4η επανάληψη	0,992	2,78	1,06	2,94	1,10	3,00	1,20	3,24	1,24	3,40	1,30	3,60	1,40	3,84
5η επανάληψη	1,010	2,76	1,06	2,98	1,10	2,96	1,20	3,16	1,24	3,36	1,30	3,64	1,40	3,84
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,0004	2,776	1,062	2,98	1,10	3,036	1,20	3,236	1,24	3,368	1,30	3,588	1,40	3,84
Τυπική απόκλιση	0,0057	0,026	0,004	0,03	0	0,059	0	0,051	0	0,057	0	0,039	0	0
Αντίσταση Z (Ω)	2,7748		2,8060		2,7600		2,6967		2,7161		2,7600		2,7428	

	4,32 kV		4,56 kV		4,80 kV		5,12 kV		5,4 kV		6,04 kV		7,24 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,42	4,04	1,50	4,24	1,60	4,28	1,70	4,72	1,78	5,16	2,00	5,56	2,40	6,72
2η επανάληψη	1,42	3,88	1,50	4,24	1,60	4,40	1,70	4,60	1,80	5,08	2,00	5,64	2,40	6,72
3η επανάληψη	1,43	3,92	1,50	4,20	1,60	4,40	1,70	4,80	1,78	5,00	2,00	5,64	2,42	6,40
4η επανάληψη	1,43	3,88	1,50	4,20	1,60	4,24	1,70	4,68	1,78	5,00	2,02	5,44	2,42	6,52
5η επανάληψη	1,42	4,00	1,50	4,16	1,60	4,44	1,72	4,72	1,78	5,04	2,00	5,48	2,38	6,68
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,424	3,944	1,50	4,208	1,60	4,352	1,704	4,704	1,784	5,056	2,004	5,552	2,404	6,608
Τυπική απόκλιση	0,005	0,065	0	0,030	0	0,077	0,008	0,064	0,008	0,059	0,008	0,081	0,014	0,127
Αντίσταση Z (Ω)	2,7696		2,8053		2,7200		2,7605		2,8340		2,7704		2,7487	

	8,44 kV		9,64 kV	
	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}
1η επανάληψη	2,80	7,68	3,20	8,72
2η επανάληψη	2,80	7,76	3,18	8,72
3η επανάληψη	2,80	7,60	3,20	8,64
4η επανάληψη	2,80	7,76	3,20	8,96
5η επανάληψη	2,80	7,68	3,20	8,96
	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}
	2,80	7,696	3,196	8,80
Τυπική απόκλιση	0	0,059	0,008	0,13
Αντίσταση Z (Ω)	2,7485		2,7534	

➤ **Ηλεκτρόδιο 6cm x 60cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=11,2 \text{ mS/cm}$, $P=983\text{mbar}$, $T=20,4\text{C}$, $\text{Hum}\%= 46\%$

 : σύγκριση με 20x2
 : σύγκριση με 30x3
 : σύγκριση με 40x4

	0,56 kV		0,92 kV		1,00 kV		1,52 kV		1,80 kV		2,00 kV		2,48 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,230	0,428	0,396	0,784	0,444	0,816	0,676	1,216	0,800	1,52	0,896	1,70	1,11	2,14
2η επανάληψη	0,234	0,448	0,400	0,768	0,444	0,832	0,680	1,240	0,808	1,58	0,896	1,70	1,11	2,20
3η επανάληψη	0,232	0,436	0,404	0,728	0,444	0,856	0,668	1,272	0,808	1,56	0,896	1,70	1,11	2,18
4η επανάληψη	0,234	0,456	0,404	0,760	0,444	0,840	0,672	1,216	0,800	1,50	0,896	1,64	1,12	1,98
5η επανάληψη	0,236	0,468	0,404	0,760	0,448	0,848	0,676	1,288	0,800	1,54	0,896	1,70	1,11	2,06
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,2332	0,4472	0,4016	0,760	0,4448	0,8384	0,6744	1,2464	0,8032	1,54	0,896	1,688	1,112	2,112
Τυπική απόκλιση	0,0020	0,0141	0,0032	0,018	0,0016	0,0137	0,0040	0,0292	0,0039	0,03	0	0,024	0,004	0,081
Αντίσταση Z (Ω)	1,9176		1,8924		1,8849		1,8481		1,9173		1,8839		1,8992	




	2,68 kV		3,24 kV		3,56 kV		3,64 kV		4,08 kV		4,52 kV		4,56 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,20	2,30	1,35	2,58	1,56	2,84	1,60	3,06	1,80	3,36	2,00	3,76	2,02	3,88
2η επανάληψη	1,20	2,32	1,36	2,56	1,56	2,90	1,60	3,12	1,80	3,30	2,00	3,76	2,02	3,92
3η επανάληψη	1,20	2,32	1,36	2,62	1,56	2,92	1,60	2,98	1,80	3,26	2,02	3,56	2,04	3,72
4η επανάληψη	1,20	2,28	1,36	2,56	1,54	2,84	1,62	2,94	1,80	3,16	2,00	3,80	2,02	3,84
5η επανάληψη	1,12	2,02	1,36	2,62	1,56	3,06	1,60	3,10	1,80	3,52	2,00	3,80	2,04	3,80
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,184	2,248	1,358	2,588	1,556	2,912	1,604	3,04	1,80	3,32	2,004	3,736	2,028	3,832
Τυπική απόκλιση	0,032	0,115	0,004	0,027	0,008	0,080	0,008	0,07	0	0,12	0,008	0,089	0,009	0,068
Αντίσταση Z (Ω)	1,8986		1,9057		1,8714		1,8952		1,8444		1,8642		1,8895	

	5,16 kV		5,44 kV		5,52 kV		5,96 kV		6,24 kV		6,56 kV		7,04 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάλληψη	2,26	4,08	2,40	4,44	2,48	4,68	2,70	4,84	2,80	4,96	2,92	5,44	3,16	5,72
2η επανάλληψη	2,26	4,20	2,40	4,28	2,48	4,68	2,70	4,68	2,80	5,16	2,94	5,04	3,14	5,80
3η επανάλληψη	2,26	4,08	2,40	4,52	2,48	4,60	2,70	4,92	2,80	5,16	2,92	5,48	3,14	5,44
4η επανάλληψη	2,26	4,12	2,40	4,56	2,48	4,56	2,70	4,96	2,80	5,12	2,92	5,44	3,14	5,76
5η επανάλληψη	2,26	4,28	2,40	4,52	2,48	4,68	2,70	4,92	2,78	5,32	2,92	5,52	3,14	5,80
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	2,26	4,152	2,40	4,464	2,48	4,64	2,70	4,864	2,796	5,144	2,924	5,384	3,144	5,704
Τυπική απόκλιση	0	0,077	0	0,100	0	0,05	0	0,100	0,008	0,115	0,008	0,174	0,008	0,135
Αντίσταση Z (Ω)	1,8371		1,8600		1,8709		1,8014		1,8397		1,8413		1,8142	

	7,12 kV		7,48 kV		7,96 kV		8,36 kV		8,76 kV		8,92 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάλληψη	3,20	5,80	3,38	6,04	3,60	6,48	3,84	6,96	4,00	7,36	4,04	7,04
2η επανάλληψη	3,20	5,92	3,38	6,20	3,60	6,80	3,84	6,72	4,00	7,04	4,04	7,36
3η επανάλληψη	3,20	5,80	3,38	5,96	3,60	6,72	3,84	6,96	4,00	7,20	4,04	7,06
4η επανάλληψη	3,20	5,76	3,38	6,16	3,62	6,12	3,84	6,72	4,00	7,12	4,08	7,20
5η επανάλληψη	3,20	5,92	3,38	6,04	3,60	6,56	3,80	7,12	3,96	7,12	4,08	7,36
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	3,20	5,84	3,38	6,08	3,604	6,536	3,832	6,896	3,992	7,168	4,056	7,204
Τυπική απόκλιση	0	0,06	0	0,08	0,008	0,236	0,016	0,155	0,016	0,108	0,019	0,139
Αντίσταση Z (Ω)	1,8250		1,7988		1,8135		1,7995		1,7955		1,7761	

Για $Z = \frac{V_{max}}{I_{max}}$ σε αγωγιμότητα $\sigma=2 \text{ S/m}$

➤ Ηλεκτρόδιο 2cm x 20cm: Αγωγιμότητα $\sigma=21,5 \text{ mS/cm}$, $P=978\text{mbar}$, $T=20,2\text{C}$, $\text{Hum}\%= 42\%$




-  : σύγκριση με 30x3
-  : σύγκριση με 40x4
-  : σύγκριση με 60x6

	0,20 kV		0,36 kV		0,52 kV		0,68 kV		0,84 kV		1,00 kV		1,16 kV	
	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)
1η επανάληψη	0,0524	0,150	0,0976	0,284	0,149	0,436	0,200	0,584	0,250	0,736	0,304	0,904	0,352	1,05
2η επανάληψη	0,0552	0,160	0,1010	0,290	0,150	0,440	0,200	0,588	0,250	0,736	0,300	0,888	0,350	1,05
3η επανάληψη	0,0532	0,152	0,0992	0,284	0,150	0,432	0,198	0,588	0,252	0,736	0,302	0,888	0,352	1,05
4η επανάληψη	0,0508	0,148	0,0992	0,286	0,150	0,436	0,198	0,588	0,250	0,736	0,302	0,896	0,352	1,05
5η επανάληψη	0,0532	0,152	0,1000	0,292	0,151	0,436	0,198	0,588	0,250	0,736	0,302	0,888	0,352	1,05
	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)
	0,05296	0,1524	0,0994	0,2872	0,150	0,436	0,1988	0,5872	0,2504	0,736	0,302	0,8928	0,3516	1,05
Τυπική απόκλιση	0,0014	0,0040	0,0011	0,0032	0,001	0,002	0,0009	0,0016	0,0008	0	0,001	0,0064	0,0008	0
Αντίσταση Z (Ω)	2,8776		2,8893		2,9067		2,9537		2,9392		2,9562		2,9863	

	1,32 kV		1,44 kV		1,60 kV		1,92 kV		2,24 kV		2,56 kV		2,88 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,400	1,19	0,452	1,34	0,500	1,46	0,596	1,76	0,700	2,06	0,800	2,34	0,896	2,66
2η επανάληψη	0,404	1,20	0,452	1,34	0,496	1,46	0,600	1,74	0,700	2,04	0,800	2,34	0,904	2,66
3η επανάληψη	0,400	1,19	0,448	1,32	0,504	1,47	0,600	1,76	0,700	2,04	0,800	2,32	0,896	2,64
4η επανάληψη	0,404	1,19	0,448	1,32	0,500	1,47	0,600	1,76	0,700	2,04	0,800	2,36	0,904	2,66
5η επανάληψη	0,400	1,19	0,452	1,32	0,500	1,46	0,600	1,76	0,700	2,04	0,800	2,36	0,896	2,64
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,4016	1,192	0,4504	1,328	0,500	1,464	0,5992	1,756	0,700	2,044	0,800	2,344	0,8992	2,652
Τυπική απόκλιση	0,0019	0,004	0,0019	0,009	0,002	0,004	0,0016	0,008	0	0,008	0	0,0149	0,0039	0,009
Αντίσταση Z (Ω)	2,9681		2,9484		2,9280		2,9305		2,9200		2,9300		2,9492	

	3,20 kV		3,84 kV		4,48 kV		5,12 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,00	2,96	1,20	3,52	1,40	4,08	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,00	2,94	1,20	3,52	1,40	4,08		
3η επανάληψη	1,00	2,94	1,20	3,54	1,40	4,12		
4η επανάληψη	1,00	2,94	1,20	3,54	1,40	4,12		
5η επανάληψη	1,00	2,96	1,20	3,52	1,40	4,08		
	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}
	1,00	2,948	1,20	3,528	1,40	4,096	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,009	0	0,009	0	0,019	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	2,9480		2,9400		2,9257		-	

➤ **Ηλεκτρόδιο 3cm x 30cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=21,6 \text{ mS/cm}$, $P=983\text{mbar}$, $T=20,4\text{C}$, $\text{Hum}\%= 46\%$




 : σύγκριση με 20x2
 : σύγκριση με 40x4
 : σύγκριση με 60x6

	0,24 kV		0,48 kV		0,52 kV		0,68 kV		0,92 kV		1,00 kV		1,12 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,0992	0,200	0,202	0,416	0,224	0,452	0,300	0,604	0,404	0,816	0,452	0,912	0,496	1,00
2η επανάληψη	0,1000	0,198	0,202	0,412	0,226	0,452	0,300	0,608	0,404	0,816	0,452	0,912	0,496	1,00
3η επανάληψη	0,1000	0,200	0,200	0,412	0,224	0,448	0,300	0,604	0,400	0,808	0,452	0,904	0,496	1,00
4η επανάληψη	0,1020	0,202	0,200	0,412	0,226	0,452	0,302	0,604	0,400	0,808	0,452	0,912	0,504	1,02
5η επανάληψη	0,1010	0,200	0,200	0,400	0,226	0,456	0,296	0,596	0,396	0,800	0,444	0,896	0,504	1,02
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,10044	0,200	0,2008	0,4104	0,2252	0,452	0,2996	0,6032	0,4008	0,8096	0,4504	0,9072	0,4992	1,008
Τυπική απόκλιση	0,00096	0,001	0,0009	0,0054	0,0009	0,002	0,0019	0,0039	0,0030	0,0060	0,0032	0,0064	0,0039	0,009
Αντίσταση Z (Ω)	1,9912		2,0438		2,0071		2,0133		2,0199		2,0142		2,0192	

	1,32 kV		1,48 kV		1,56 kV		1,80 kV		1,96 kV		2,20 kV		2,40 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,604	1,22	0,676	1,37	0,700	1,42	0,800	1,64	0,896	1,78	1,00	2,02	1,10	2,22
2η επανάληψη	0,604	1,22	0,672	1,36	0,700	1,42	0,800	1,64	0,904	1,80	1,00	2,00	1,10	2,22
3η επανάληψη	0,604	1,22	0,672	1,35	0,700	1,42	0,800	1,60	0,896	1,80	1,00	2,00	1,10	2,20
4η επανάληψη	0,596	1,21	0,676	1,37	0,700	1,42	0,800	1,60	0,896	1,78	1,00	2,02	1,10	2,20
5η επανάληψη	0,600	1,22	0,676	1,36	0,700	1,42	0,800	1,60	0,904	1,82	1,00	2,00	1,10	2,20
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,6016	1,218	0,6744	1,362	0,700	1,42	0,800	1,616	0,8992	1,796	1,00	2,008	1,10	2,208
Τυπική απόκλιση	0,0032	0,004	0,0019	0,007	0	0	0	0,019	0,0039	0,015	0	0,009	0	0,009
Αντίσταση Z (Ω)	2,0246		2,0195		2,0285		2,0200		1,9973		2,0080		2,0072	

	2,44 kV		2,64 kV		2,84 kV		2,96 kV		3,04 kV		3,44 kV		3,96 kV		4,4 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,12	2,24	1,20	2,42	1,30	2,62	1,35	2,72	1,40	2,80	1,57	3,14	1,80	3,64	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,12	2,24	1,20	2,40	1,30	2,62	1,35	2,72	1,40	2,80	1,58	3,14	1,80	3,64		
3η επανάληψη	1,13	2,24	1,20	2,40	1,30	2,64	1,35	2,70	1,40	2,80	1,58	3,16	1,80	3,62		
4η επανάληψη	1,12	2,26	1,20	2,40	1,30	2,62	1,35	2,72	1,40	2,80	1,57	3,14	1,80	3,62		
5η επανάληψη	1,13	2,26	1,20	2,40	1,30	2,62	1,35	2,70	1,40	2,82	1,57	3,14	1,80	3,62		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,124	2,248	1,20	2,404	1,30	2,624	1,35	2,712	1,40	2,804	1,574	3,144	1,80	3,628	-	-
Τυπική απόκλιση	0,005	0,009	0	0,008	0	0,008	0	0,009	0	0,008	0,004	0,008	0	0,009	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	2,0000		2,0033		2,0184		2,0089		2,0028		1,9974		2,0155		-	

➤ **Ηλεκτρόδιο 4cm x 40cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=21,5 \text{ mS/cm}$, $P=983\text{mbar}$, $T=20,4\text{C}$, $\text{Hum}\%= 46\%$

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




	0,20 kV		0,36 kV		0,40 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,72 kV		0,88 kV	
	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)
1η επανάληψη	0,1030	0,158	0,178	0,288	0,202	0,316	0,304	0,484	0,356	0,572	0,400	0,632	0,504	0,800
2η επανάληψη	0,1010	0,156	0,182	0,290	0,204	0,322	0,296	0,468	0,360	0,576	0,404	0,640	0,500	0,800
3η επανάληψη	0,1030	0,158	0,180	0,280	0,202	0,320	0,298	0,472	0,358	0,568	0,396	0,636	0,496	0,792
4η επανάληψη	0,0976	0,150	0,180	0,284	0,202	0,318	0,300	0,476	0,356	0,568	0,404	0,640	0,500	0,792
5η επανάληψη	0,1000	0,154	0,180	0,280	0,202	0,320	0,304	0,480	0,354	0,564	0,400	0,636	0,496	0,784
	$I_{\text{m μέσο}}$ (kA)	$V_{\text{m μέσο}}$ (kV)	$I_{\text{m μέσο}}$ (kA)	$V_{\text{m μέσο}}$ (kV)	$I_{\text{m μέσο}}$ (kA)	$V_{\text{m μέσο}}$ (kV)	$I_{\text{m μέσο}}$ (kA)	$V_{\text{m μέσο}}$ (kV)	$I_{\text{m μέσο}}$ (kA)	$V_{\text{m μέσο}}$ (kV)	$I_{\text{m μέσο}}$ (kA)	$V_{\text{m μέσο}}$ (kV)	$I_{\text{m μέσο}}$ (kA)	$V_{\text{m μέσο}}$ (kV)
	0,10092	0,1552	0,180	0,2844	0,2024	0,3192	0,3004	0,476	0,3568	0,5696	0,4008	0,6368	0,4992	0,7936
Τυπική απόκλιση	0,00202	0,0030	0,001	0,0040	0,0008	0,002	0,0032	0,005	0,0020	0,0040	0,0030	0,0030	0,0030	0,0059
Αντίσταση Z (Ω)	1,5378		1,5800		1,5770		1,5845		1,5964		1,5888		1,5897	

	0,96 kV		1,08 kV		1,24 kV		1,28 kV		1,40 kV		1,56 kV		1,60 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,536	0,848	0,604	0,952	0,704	1,13	0,716	1,14	0,800	1,28	0,888	1,42	0,904	1,45
2η επανάληψη	0,532	0,848	0,600	0,960	0,700	1,12	0,716	1,14	0,800	1,28	0,888	1,42	0,896	1,44
3η επανάληψη	0,528	0,840	0,600	0,952	0,692	1,11	0,716	1,14	0,800	1,28	0,888	1,42	0,896	1,43
4η επανάληψη	0,536	0,848	0,600	0,952	0,700	1,11	0,716	1,14	0,800	1,28	0,888	1,42	0,904	1,44
5η επανάληψη	0,532	0,840	0,600	0,952	0,704	1,12	0,716	1,14	0,800	1,28	0,888	1,42	0,896	1,44
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,5328	0,8448	0,6008	0,9536	0,700	1,118	0,716	1,14	0,800	1,28	0,888	1,42	0,8992	1,44
Τυπική απόκλιση	0,0030	0,0039	0,0016	0,0032	0,004	0,007	0	0	0	0	0	0	0,0039	0,01
Αντίσταση Z (Ω)	1,5855		1,5872		1,5971		1,5921		1,6000		1,5991		1,6014	

	1,76 kV		1,88 kV		1,92 kV		2,12 kV		2,20 kV		2,28 kV		2,44 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,00	1,60	1,06	1,68	1,10	1,74	1,20	1,90	1,25	1,98	1,30	2,06	1,40	2,20
2η επανάληψη	1,00	1,60	1,06	1,68	1,10	1,72	1,20	1,90	1,25	1,96	1,30	2,06	1,40	2,20
3η επανάληψη	1,00	1,60	1,07	1,70	1,10	1,76	1,20	1,92	1,24	1,96	1,30	2,06	1,40	2,20
4η επανάληψη	1,00	1,58	1,07	1,72	1,10	1,74	1,20	1,90	1,24	1,98	1,30	2,06	1,40	2,20
5η επανάληψη	1,00	1,60	1,08	1,72	1,10	1,74	1,20	1,90	1,24	1,96	1,30	2,08	1,40	2,20
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,00	1,596	1,068	1,70	1,10	1,74	1,20	1,904	1,244	1,968	1,30	2,064	1,40	2,20
Τυπική απόκλιση	0	0,008	0,007	0,01	0	0,01	0	0,008	0,004	0,009	0	0,008	0	0
Αντίσταση Z (Ω)	1,5960		1,5917		1,5818		1,5867		1,5819		1,5876		1,5714	

	2,48 kV		2,64 kV		2,80 kV		3,00 kV		3,12 kV		3,52 kV		4,28 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,42	2,22	1,50	2,38	1,60	2,56	1,70	2,70	1,78	2,82	2,00	3,18	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,42	2,24	1,50	2,36	1,60	2,52	1,70	2,70	1,78	2,84	2,00	3,18		
3η επανάληψη	1,42	2,24	1,50	2,38	1,60	2,52	1,70	2,70	1,78	2,82	2,00	3,18		
4η επανάληψη	1,42	2,24	1,50	2,36	1,60	2,56	1,70	2,70	1,78	2,84	2,00	3,18		
5η επανάληψη	1,42	2,24	1,50	2,36	1,60	2,54	1,70	2,70	1,78	2,82	2,00	3,18		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,42	2,236	1,50	2,368	1,60	2,54	1,70	2,70	1,78	2,828	2,00	3,18	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,008	0	0,009	0	0,01	0	0	0	0,009	0	0	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	1,5746		1,5787		1,5875		1,5882		1,5887		1,5900		-	

➤ Ηλεκτρόδιο 6cm x 60cm: Αγωγιμότητα $\sigma=21,1 \text{ mS/cm}$, P=983mbar , T=20,4C , Hum%= 54,5%

-  : σύγκριση με 20x2
-  : σύγκριση με 30x3
-  : σύγκριση με 40x4

	0,32 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,92 kV		1,12 kV		1,24 kV		1,52 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,220	0,260	0,400	0,480	0,444	0,532	0,676	0,816	0,800	0,976	0,896	1,10	1,12	1,37
2η επανάληψη	0,224	0,266	0,404	0,480	0,440	0,544	0,676	0,816	0,808	0,976	0,896	1,09	1,12	1,37
3η επανάληψη	0,220	0,264	0,396	0,476	0,440	0,528	0,672	0,808	0,792	0,976	0,904	1,10	1,12	1,38
4η επανάληψη	0,226	0,268	0,404	0,484	0,440	0,532	0,672	0,816	0,808	0,976	0,904	1,10	1,12	1,37
5η επανάληψη	0,226	0,272	0,400	0,476	0,444	0,540	0,676	0,824	0,800	0,968	0,904	1,10	1,12	1,37
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,2232	0,266	0,4008	0,4792	0,4416	0,5352	0,6744	0,816	0,8016	0,9744	0,9008	1,098	1,12	1,372
Τυπική απόκλιση	0,0027	0,004	0,0029	0,0029	0,0019	0,0058	0,0019	0,005	0,0059	0,0032	0,0039	0,004	0	0,004
Αντίσταση Z (Ω)	1,1917		1,1956		1,2119		1,2099		1,2155		1,2189		1,2250	




	1,64 kV		1,84 kV		2,16 kV		2,20 kV		2,44 kV		2,68 kV		2,72 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,20	1,46	1,34	1,64	1,58	1,92	1,60	1,96	1,80	2,18	2,00	2,38	2,04	2,44
2η επανάληψη	1,20	1,46	1,35	1,66	1,58	1,92	1,60	1,92	1,80	2,18	2,00	2,42	2,04	2,42
3η επανάληψη	1,20	1,46	1,35	1,64	1,58	1,92	1,60	1,94	1,80	2,16	2,00	2,40	2,04	2,42
4η επανάληψη	1,20	1,46	1,35	1,64	1,58	1,90	1,60	1,96	1,80	2,16	2,00	2,42	2,02	2,42
5η επανάληψη	1,20	1,46	1,35	1,64	1,58	1,92	1,60	1,94	1,80	2,18	2,00	2,42	2,02	2,44
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,20	1,46	1,348	1,644	1,58	1,916	1,60	1,944	1,80	2,172	2,00	2,408	2,032	2,428
Τυπική απόκλιση	0	0	0,004	0,008	0	0,008	0	0,015	0	0,009	0	0,016	0,009	0,009
Αντίσταση Z (Ω)	1,2167		1,2195		1,2126		1,2150		1,2067		1,2040		1,1948	

	3,04 kV		3,20 kV		3,28 kV		3,60 kV		3,72 kV		3,88 kV		4,16 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	2,26	2,74	2,40	2,90	2,48	2,94	2,70	3,22	2,80	3,36	2,92	3,50	3,14	3,80
2η επανάληψη	2,26	2,74	2,40	2,88	2,48	2,94	2,70	3,24	2,80	3,36	2,92	3,48	3,14	3,80
3η επανάληψη	2,26	2,74	2,40	2,86	2,46	2,92	2,70	3,20	2,80	3,34	2,92	3,50	3,14	3,76
4η επανάληψη	2,26	2,74	2,40	2,86	2,46	2,96	2,70	3,22	2,80	3,34	2,92	3,48	3,14	3,80
5η επανάληψη	2,26	2,74	2,40	2,88	2,48	2,94	2,70	3,24	2,80	3,36	2,92	3,52	3,14	3,76
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	2,26	2,74	2,40	2,876	2,472	2,94	2,70	3,224	2,80	3,352	2,92	3,496	3,14	3,784
Τυπική απόκλιση	0	0	0	0,015	0,009	0,01	0	0,014	0	0,009	0	0,015	0	0,019
Αντίσταση Z (Ω)	1,2123		1,1983		1,1893		1,1940		1,1971		1,1972		1,2050	

	4,24 kV		4,80 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	3,20	3,84	Διάσπαση	
2η επανάληψη	3,20	3,84		
3η επανάληψη	3,20	3,88		
4η επανάληψη	3,20	3,84		
5η επανάληψη	3,20	3,84		
	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}	I _{m μέσο}	V _{m μέσο}
	3,20	3,848	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,016	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	1,2025		-	

Για $Z = \frac{V@I_{max}}{I_{max}}$ σε αγωγιμότητα $\sigma=2 \text{ S/m}$

➤ Ηλεκτρόδιο 2cm x 20cm: Αγωγιμότητα $\sigma=21,5 \text{ mS/cm}$, $P=978\text{mbar}$, $T=20,2\text{C}$, $\text{Hum}\%= 42\%$




-  : σύγκριση με 30x3
-  : σύγκριση με 40x4
-  : σύγκριση με 60x6

	0,20 kV		0,36 kV		0,52 kV		0,68 kV		0,84 kV		1,00 kV		1,16 kV	
	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)
1η επανάληψη	0,0524	0,126	0,0976	0,240	0,149	0,376	0,200	0,500	0,250	0,628	0,304	0,776	0,352	0,848
2η επανάληψη	0,0552	0,140	0,1010	0,252	0,150	0,368	0,200	0,484	0,250	0,644	0,300	0,776	0,350	0,896
3η επανάληψη	0,0532	0,132	0,0992	0,234	0,150	0,376	0,198	0,520	0,252	0,608	0,302	0,760	0,352	0,872
4η επανάληψη	0,0508	0,120	0,0992	0,250	0,150	0,352	0,198	0,504	0,250	0,640	0,302	0,776	0,352	0,880
5η επανάληψη	0,0532	0,132	0,1000	0,234	0,151	0,364	0,198	0,500	0,250	0,632	0,302	0,704	0,352	0,888
	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)	I_m μέσο (kA)	V_m μέσο (kV)
	0,05296	0,130	0,0994	0,242	0,150	0,3672	0,1988	0,5016	0,2504	0,6304	0,302	0,7584	0,3516	0,8768
Τυπική απόκλιση	0,00142	0,006	0,0011	0,007	0,001	0,0089	0,0009798	0,0114	0,0008	0,0125	0,001	0,0278	0,0008	0,0164
Αντίσταση Z (Ω)	2,4546		2,4346		2,4480		2,5231		2,5175		2,5112		2,4937	

	1,32 kV		1,44 kV		1,60 kV		1,92 kV		2,24 kV		2,56 kV		2,88 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,400	1,024	0,452	1,160	0,500	1,256	0,596	1,52	0,700	1,80	0,800	2,04	0,896	2,26
2η επανάληψη	0,404	1,008	0,452	1,128	0,496	1,264	0,600	1,50	0,700	1,74	0,800	2,04	0,904	2,24
3η επανάληψη	0,400	1,024	0,448	1,152	0,504	1,224	0,600	1,46	0,700	1,82	0,800	2,02	0,896	2,28
4η επανάληψη	0,404	1,016	0,448	1,144	0,500	1,240	0,600	1,46	0,700	1,80	0,800	1,98	0,904	2,18
5η επανάληψη	0,400	0,992	0,452	1,144	0,500	1,256	0,600	1,50	0,700	1,80	0,800	2,04	0,896	2,28
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,4016	1,0128	0,4504	1,1456	0,500	1,248	0,5992	1,488	0,700	1,792	0,800	2,024	0,8992	2,248
Τυπική απόκλιση	0,0019	0,0119	0,0019	0,0106	0,002	0,014	0,0016	0,024	0	0,027	0	0,023	0,0039	0,037
Αντίσταση Z (Ω)	2,5219		2,5435		2,4960		2,4833		2,5600		2,5300		2,5000	

	3,20 kV		3,84 kV		4,48 kV		5,12 kV	
	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}	I _{max}	V _{max}
1η επανάληψη	1,00	2,50	1,20	3,06	1,40	3,40	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,00	2,46	1,20	3,00	1,40	3,40		
3η επανάληψη	1,00	2,48	1,20	3,04	1,40	3,56		
4η επανάληψη	1,00	2,46	1,20	3,06	1,40	3,60		
5η επανάληψη	1,00	2,38	1,20	3,02	1,40	3,52		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,00	2,456	1,20	3,036	1,40	3,496	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,041	0	0,023	0	0,082	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	2,4560		2,5300		2,4971		-	

➤ Ηλεκτρόδιο 3cm x 30cm: Αγωγιμότητα $\sigma=21,6 \text{ mS/cm}$, $P=983\text{mbar}$, $T=20,4\text{C}$, $\text{Hum}\%= 46\%$



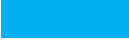
-  : σύγκριση με 20x2
-  : σύγκριση με 40x4
-  : σύγκριση με 60x6

	0,24 kV		0,48 kV		0,52 kV		0,68 kV		0,92 kV		1,00 kV		1,12 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,0992	0,156	0,202	0,336	0,224	0,376	0,300	0,496	0,404	0,688	0,452	0,752	0,496	0,832
2η επανάληψη	0,1000	0,152	0,202	0,340	0,226	0,368	0,300	0,496	0,404	0,664	0,452	0,736	0,496	0,816
3η επανάληψη	0,1000	0,168	0,200	0,336	0,224	0,352	0,300	0,496	0,400	0,656	0,452	0,728	0,496	0,824
4η επανάληψη	0,1020	0,166	0,200	0,348	0,226	0,360	0,302	0,488	0,400	0,680	0,452	0,736	0,504	0,808
5η επανάληψη	0,1010	0,168	0,200	0,320	0,226	0,364	0,296	0,492	0,396	0,648	0,444	0,736	0,504	0,832
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,10044	0,162	0,2008	0,336	0,2252	0,364	0,2996	0,4936	0,4008	0,6672	0,4504	0,7376	0,4992	0,8224
Τυπική απόκλιση	0,0009	0,006	0,0009	0,009	0,0009	0,008	0,0019	0,0032	0,0029	0,0148	0,0032	0,0078	0,0039	0,0093
Αντίσταση Z (Ω)	1,6129		1,6733		1,6163		1,6475		1,6646		1,6376		1,6474	

	1,32 kV		1,48 kV		1,56 kV		1,80 kV		1,96 kV		2,20 kV		2,40 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,604	0,992	0,676	1,112	0,700	1,176	0,800	1,32	0,896	1,44	1,00	1,70	1,10	1,88
2η επανάληψη	0,604	0,960	0,672	1,088	0,700	1,160	0,800	1,32	0,904	1,52	1,00	1,64	1,10	1,78
3η επανάληψη	0,604	0,960	0,672	1,064	0,700	1,136	0,800	1,32	0,896	1,48	1,00	1,56	1,10	1,80
4η επανάληψη	0,596	0,984	0,676	1,136	0,700	1,120	0,800	1,30	0,896	1,42	1,00	1,64	1,10	1,82
5η επανάληψη	0,600	0,976	0,676	1,096	0,700	1,144	0,800	1,32	0,904	1,42	1,00	1,68	1,10	1,84
	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)
	0,6016	0,9744	0,6744	1,0992	0,700	1,1472	0,800	1,316	0,8992	1,456	1,00	1,644	1,10	1,824
Τυπική απόκλιση	0,0032	0,0128	0,0019	0,0240	0	0,0193	0	0,008	0,0039	0,038	0	0,048	0	0,034
Αντίσταση Z (Ω)	1,6196		1,6298		1,6388		1,6450		1,6192		1,6440		1,6581	

	2,44 kV		2,64 kV		2,84 kV		2,96 kV		3,04 kV		3,44 kV		3,96 kV		4,4 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,20	2,06	1,30	2,12	1,35	2,20	1,40	2,32	1,57	2,60	1,80	2,96	1,20	2,06	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,20	2,04	1,30	2,16	1,35	2,14	1,40	2,34	1,58	2,58	1,80	2,96	1,20	2,04		
3η επανάληψη	1,20	2,02	1,30	2,18	1,35	2,24	1,40	2,32	1,58	2,62	1,80	2,98	1,20	2,02		
4η επανάληψη	1,20	2,02	1,30	2,10	1,35	2,14	1,40	2,36	1,57	2,50	1,80	3,04	1,20	2,02		
5η επανάληψη	1,20	1,98	1,30	2,20	1,35	2,18	1,40	2,32	1,57	2,62	1,80	2,78	1,20	1,98		
	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)	I _m μέσο (kA)	V _m μέσο (kV)
	1,20	2,024	1,30	2,152	1,35	2,18	1,40	2,332	1,574	2,584	1,80	2,944	1,20	2,024	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,026	0	0,037	0	0,03	0	0,016	0,005	0,044	0	0,087	0	0,026	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	1,6867		1,6553		1,6148		1,6657		1,6416		1,6356		1,6867		-	

➤ **Ηλεκτρόδιο 4cm x 40cm:** Αγωγιμότητα $\sigma=21,5 \text{ mS/cm}$, $P=983\text{mbar}$, $T=20,4\text{C}$, $\text{Hum}\%= 46\%$

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




	0,20 kV		0,36 kV		0,40 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,72 kV		0,88 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,1030	0,124	0,178	0,220	0,202	0,246	0,304	0,356	0,356	0,412	0,400	0,460	0,504	0,584
2η επανάληψη	0,1010	0,116	0,182	0,214	0,204	0,250	0,296	0,344	0,360	0,428	0,404	0,468	0,500	0,584
3η επανάληψη	0,1030	0,128	0,180	0,224	0,202	0,252	0,298	0,336	0,358	0,400	0,396	0,488	0,496	0,600
4η επανάληψη	0,0976	0,116	0,180	0,208	0,202	0,244	0,300	0,344	0,356	0,420	0,404	0,492	0,500	0,592
5η επανάληψη	0,1000	0,114	0,180	0,208	0,202	0,252	0,304	0,348	0,354	0,436	0,400	0,480	0,496	0,616
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,10092	0,1196	0,180	0,2148	0,2024	0,2488	0,3004	0,3456	0,3568	0,4192	0,4008	0,4776	0,4992	0,5952
Τυπική απόκλιση	0,00202	0,0054	0,001	0,0064	0,0008	0,0032	0,0032	0,0064	0,0020	0,0124	0,0029	0,0120	0,0029	0,0119
Αντίσταση Z (Ω)	1,1850		1,1933		1,2292		1,1504		1,1748		1,1916		1,1923	

	0,96 kV		1,08 kV		1,24 kV		1,28 kV		1,40 kV		1,56 kV		1,60 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,536	0,624	0,604	0,680	0,704	0,832	0,716	0,856	0,800	0,968	0,888	1,008	0,904	1,104
2η επανάληψη	0,532	0,624	0,600	0,728	0,700	0,840	0,716	0,864	0,800	0,968	0,888	1,024	0,896	1,088
3η επανάληψη	0,528	0,616	0,600	0,704	0,692	0,832	0,716	0,832	0,800	0,952	0,888	1,016	0,896	1,032
4η επανάληψη	0,536	0,656	0,600	0,736	0,700	0,800	0,716	0,864	0,800	0,904	0,888	1,016	0,904	1,104
5η επανάληψη	0,532	0,632	0,600	0,712	0,704	0,824	0,716	0,840	0,800	0,920	0,888	0,992	0,896	1,080
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,5328	0,6304	0,6008	0,712	0,700	0,8256	0,716	0,8512	0,800	0,9424	0,888	1,0112	0,8992	1,0816
Τυπική απόκλιση	0,0030	0,0137	0,0016	0,019	0,004	0,0137	0	0,0129	0	0,0259	0	0,0108	0,0039	0,0264
Αντίσταση Z (Ω)	1,1831		1,1850		1,1794		1,1888		1,1780		1,1387		1,2028	

	1,76 kV		1,88 kV		1,92 kV		2,12 kV		2,20 kV		2,28 kV		2,44 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,00	1,22	1,06	1,22	1,10	1,32	1,20	1,34	1,25	1,52	1,30	1,58	1,40	1,64
2η επανάληψη	1,00	1,20	1,06	1,14	1,10	1,26	1,20	1,38	1,25	1,46	1,30	1,52	1,40	1,70
3η επανάληψη	1,00	1,24	1,07	1,26	1,10	1,30	1,20	1,46	1,24	1,48	1,30	1,48	1,40	1,60
4η επανάληψη	1,00	1,24	1,07	1,28	1,10	1,30	1,20	1,44	1,24	1,50	1,30	1,54	1,40	1,56
5η επανάληψη	1,00	1,26	1,08	1,26	1,10	1,32	1,20	1,44	1,24	1,46	1,30	1,56	1,40	1,64
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,00	1,232	1,068	1,232	1,10	1,30	1,20	1,412	1,244	1,484	1,30	1,536	1,40	1,628
Τυπική απόκλιση	0	0,020	0,007	0,049	0	0,02	0	0,045	0,004	0,023	0	0,034	0	0,046
Αντίσταση Z (Ω)	1,2320		1,1535		1,1818		1,1767		1,1929		1,1815		1,1628	

	2,48 kV		2,64 kV		2,80 kV		3,00 kV		3,12 kV		3,52 kV		4,28 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,50	1,78	1,60	1,80	1,70	1,92	1,78	2,12	2,00	2,48	1,50	1,78	Διάσπαση	
2η επανάληψη	1,50	1,80	1,60	1,74	1,70	1,90	1,78	1,98	2,00	2,40	1,50	1,80		
3η επανάληψη	1,50	1,82	1,60	1,84	1,70	1,96	1,78	2,02	2,00	2,42	1,50	1,82		
4η επανάληψη	1,50	1,76	1,60	1,84	1,70	2,06	1,78	2,16	2,00	2,34	1,50	1,76		
5η επανάληψη	1,50	1,80	1,60	1,92	1,70	1,96	1,78	2,04	2,00	2,34	1,50	1,80		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,50	1,792	1,60	1,828	1,70	1,96	1,78	2,064	2,00	2,396	1,50	1,792	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,020	0	0,058	0	0,05	0	0,066	0	0,052	0	0,020	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	1,1947		1,1425		1,1529		1,1595		1,1980		1,1947		-	

➤ Ηλεκτρόδιο 6cm x 60cm: Αγωγιμότητα $\sigma=21,1$ mS/cm , P=983mbar , T=20,4C , Hum%= 54,5%

-  : σύγκριση με 20x2
-  : σύγκριση με 30x3
-  : σύγκριση με 40x4

	0,32 kV		0,56 kV		0,64 kV		0,92 kV		1,12 kV		1,24 kV		1,52 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	0,220	0,162	0,400	0,312	0,444	0,308	0,676	0,480	0,800	0,624	0,896	0,696	1,12	0,808
2η επανάληψη	0,224	0,168	0,404	0,284	0,440	0,332	0,676	0,488	0,808	0,608	0,896	0,672	1,12	0,808
3η επανάληψη	0,220	0,166	0,396	0,308	0,440	0,328	0,672	0,512	0,792	0,624	0,904	0,608	1,12	0,856
4η επανάληψη	0,226	0,164	0,404	0,276	0,440	0,332	0,672	0,472	0,808	0,600	0,904	0,656	1,12	0,808
5η επανάληψη	0,226	0,152	0,400	0,272	0,444	0,332	0,676	0,496	0,800	0,584	0,904	0,688	1,12	0,840
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	0,2232	0,1624	0,4008	0,2904	0,4416	0,3264	0,6744	0,4896	0,8016	0,608	0,9008	0,664	1,12	0,824
Τυπική απόκλιση	0,0027	0,0055	0,0030	0,0165	0,0019	0,0093	0,0019	0,0137	0,0059	0,015	0,0039	0,031	0	0,020
Αντίσταση Z (Ω)	0,7275		0,7245		0,7391		0,7259		0,7584		0,7371		0,7357	

	1,64 kV		1,84 kV		2,16 kV		2,20 kV		2,44 kV		2,68 kV		2,72 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	1,20	0,92	1,34	1,040	1,58	1,20	1,60	1,24	1,80	1,24	2,00	1,26	2,04	1,42
2η επανάληψη	1,20	0,88	1,35	1,020	1,58	1,14	1,60	1,22	1,80	1,36	2,00	1,48	2,04	1,56
3η επανάληψη	1,20	0,86	1,35	0,940	1,58	1,18	1,60	1,22	1,80	1,24	2,00	1,36	2,04	1,48
4η επανάληψη	1,20	0,84	1,35	0,920	1,58	1,12	1,60	1,16	1,80	1,14	2,00	1,46	2,02	1,38
5η επανάληψη	1,20	0,82	1,35	0,980	1,58	1,20	1,60	1,20	1,80	1,36	2,00	1,48	2,02	1,50
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	1,20	0,864	1,348	0,980	1,58	1,168	1,60	1,208	1,80	1,268	2,00	1,408	2,032	1,468
Τυπική απόκλιση	0	0,034	0,004	0,045	0	0,032	0	0,027	0	0,083	0	0,086	0,009	0,062
Αντίσταση Z (Ω)	0,7200		0,7270		0,7392		0,7550		0,7044		0,7040		0,7224	

	3,04 kV		3,20 kV		3,28 kV		3,60 kV		3,72 kV		3,88 kV		4,16 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	2,26	1,60	2,40	1,84	2,48	1,68	2,70	1,94	2,80	1,94	2,92	2,08	3,14	2,28
2η επανάληψη	2,26	1,62	2,40	1,80	2,48	1,60	2,70	1,90	2,80	1,98	2,92	2,00	3,14	2,24
3η επανάληψη	2,26	1,60	2,40	1,74	2,46	1,72	2,70	1,88	2,80	1,96	2,92	2,08	3,14	2,12
4η επανάληψη	2,26	1,62	2,40	1,66	2,46	1,80	2,70	1,78	2,80	2,02	2,92	2,06	3,14	2,28
5η επανάληψη	2,26	1,44	2,40	1,82	2,48	1,68	2,70	1,86	2,80	1,98	2,92	2,10	3,14	2,12
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	2,26	1,576	2,40	1,772	2,472	1,696	2,70	1,872	2,80	1,976	2,92	2,064	3,14	2,208
Τυπική απόκλιση	0	0,068	0	0,065	0,009	0,065	0	0,053	0	0,026	0	0,034	0	0,073
Αντίσταση Z (Ω)	0,6973		0,7383		0,6860		0,6933		0,7057		0,7068		0,7031	

	4,24 kV		4,80 kV	
	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)	I _{max} (kA)	V _{max} (kV)
1η επανάληψη	3,20	2,36	Διάσπαση	
2η επανάληψη	3,20	2,16		
3η επανάληψη	3,20	2,28		
4η επανάληψη	3,20	2,32		
5η επανάληψη	3,20	2,20		
	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)	I _{m μέσο} (kA)	V _{m μέσο} (kV)
	3,20	2,264	-	-
Τυπική απόκλιση	0	0,074	-	-
Αντίσταση Z (Ω)	0,7075		-	