



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

**Πειραματική μελέτη μεταβατικής συμπεριφοράς
κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης εγκιβωτισμένων σε
βελτιωτικά υλικά εδάφους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λεάρτ Α. Τόσκα

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Αθήνα, Μάρτιος 2015



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

192

**Πειραματική μελέτη μεταβατικής συμπεριφοράς
κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης εγκιβωτισμένων σε
βελτιωτικά υλικά εδάφους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λεάρτ Α. Τόσκα

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τηνη Μαρτίου 2015.

.....
Ι.Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Φ.Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ι.Φ. Γκόνογ
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2015

.....
Λεάρτ Α. Τόσκα
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Λεάρτ Α. Τόσκα, 2015

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.

«Αφιερώνεται στην οικογένειά μου και στον παππού μου Hajdar Shrata για τις συμβουλές που μου έχει δώσει »

«I kushtohet familjes time dhe gjyshit tim Hajdar Shrata për këshillat që më ka dhënë»

“Ο ανώτερος άνθρωπος είναι σκληρός με τον εαυτό του, ο κατώτερος άνθρωπος είναι σκληρός με τους άλλους ”

Κορφούκιος

“He who is not courageous enough to take risks will accomplish nothing in life”

Muhammad Ali

“Δεν νικήσαμε το βουνό αλλά τους εαυτούς μας”

Edmund Hillary

“Το κράτος είναι φτιαγμένο για τον άνθρωπο και όχι ο άνθρωπος για το κράτος”

Albert Einstein

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	V
Λέξεις Κλειδιά	V
Abstract	VI
Key Words	VI
Πρόλογος	VII
Κεφάλαιο 1-Συστήματα Γείωσης	1
1.1 Ο ρόλος της γείωσης	1
1.2 Είδη γείωσης.....	2
1.2.1 Γείωση λειτουργίας.....	2
1.2.2 Γείωση προστασίας.....	3
1.2.3 Γείωση ασφαλείας.....	4
1.3 Μέθοδοι γείωσης.....	5
1.4 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης.....	7
1.4.1 Γειωτής ράβδου.....	10
1.4.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινου.....	10
1.4.3 Γειωτής πλάκας.....	10
1.4.4 Ακτινικός γειωτής	11
1.4.5 Γειωτής πλέγματος.....	11
1.4.6 Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής.....	11
1.4.7 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές	11
1.4.8 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης.....	12
1.4.9 Θεμελιακή γείωση.....	12

1.5	Ειδική αντίσταση εδάφους	12
1.6	Αντίσταση γείωσης	16
1.6.1	Θεωρητική προσέγγιση	17
1.6.2	Πειραματικός υπολογισμός	18
Κεφάλαιο 2-Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης		25
2.1	Γενικά	25
2.2	Κρουστική σύνθετη αντίσταση.....	26
2.3	Μέθοδοι και μοντέλα προσομοίωσης	28
2.3.1	Κυκλωματική προσέγγιση	28
2.3.2	Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.....	30
2.3.3	Υβριδική προσέγγιση	32
2.3.4	Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς.....	33
2.4	Ιονισμός εδάφους.....	34
2.4.1	Μοντελοποίηση του φαινομένου	35
2.4.1.1	Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων	36
2.4.1.2	Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης.....	37
2.4.1.3	Μοντέλο διατήρησης ενέργειας	39
2.5	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	40
Κεφάλαιο 3-Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους		49
3.1	Γενικά	49
3.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	50
Κεφάλαιο 4-Πειραματική Διάταξη.....		63
4.1	Τοποθεσία πειραματικής διάταξης.....	63

4.2	Εξοπλισμός	67
4.2.1	Κρουστική γεννήτρια ρεύματος.....	67
4.2.2	Παλμογράφος.....	70
4.2.3	Ομοαξονικά καλώδια	71
4.2.4	Βενζινογεννήτρια.....	71
4.2.5	Σταθεροποιητής τάσης	71
4.2.6	Διαφορικό probe	72
4.3	Διεξαγωγή των μετρήσεων.....	73
Κεφάλαιο 5-Παρουσίαση Μετρήσεων.....		77
5.1	Φυσικό έδαφος.....	77
5.2	Σκυρόδεμα	84
5.3	Μπετονίτης	96
5.4	Χημικό υλικό Α.....	108
5.5	Χημικό υλικό Β.....	121
Κεφάλαιο 6-Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα.....		129
6.1	Φυσικό έδαφος.....	129
6.2	Σκυρόδεμα	131
6.3	Μπετονίτης	132
6.4	Χημικό υλικό Α.....	134
6.5	Χημικό υλικό Β.....	135
6.6	Γενικά συμπεράσματα-Σύγκριση.....	137
6.7	Επόμενη μέρα	141
Παράρτημα		142

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αμιγώς πειραματική και σχετίζεται με τη μεταβατική συμπεριφορά κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης περιμετρικά των οποίων έχουν προστεθεί βελτιωτικά υλικά εδάφους. Η γείωση μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης είναι ιδιαίτερα σημαντική και πρέπει να πληροί αυστηρές προϋποθέσεις. Με την προσθήκη βελτιωτικών υλικών εδάφους μπορούμε είτε να πετύχουμε περαιτέρω βελτίωση σε ένα ήδη αποδεκτό σύστημα γείωσης είτε να καταστήσουμε αποδεκτό ένα σύστημα γείωσης σε μια περιοχή όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι σχετικά υψηλή. Η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για τις ανάγκες της έρευνας εγκαταστάθηκε το 2011 από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων ΕΜΠ στα πλαίσια διερεύνησης της συμπεριφοράς συγκεκριμένων βελτιωτικών υλικών εδάφους. Ενώ κατά τη διάρκεια αυτών των τεσσάρων ετών έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά πειράματα στη συγκεκριμένη διάταξη, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται για πρώτη φορά μια πειραματική προσέγγιση της μεταβατικής συμπεριφοράς. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται σε κάθε ένα από τα πέντε ηλεκτρόδια γείωσης που περιλαμβάνει η πειραματική διάταξη επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να προκύψουν ουσιαστικά συμπεράσματα τόσο μεμονωμένα όσο και στο σύνολό τους. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να αποτελέσει μια πρώτη πειραματική προσέγγιση της μεταβατικής συμπεριφοράς της εν λόγω διάταξης και φυσικά να δημιουργήσει το έναυσμα για περαιτέρω εμβάθυνση σε ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα γείωσης, κάθετο ηλεκτρόδιο γείωσης, μεταβατική αντίσταση, ειδική αντίσταση εδάφους, βελτιωτικά υλικά εδάφους.

Abstract

This diploma thesis contains an experimental research about the transient behavior of vertical grounding rods driven in different ground enhancing compounds. The grounding system of an establishment is very important and should satisfy very strict standards. By using ground enhancing compounds we can ameliorate an already acceptable grounding system or make acceptable a grounding system in a region with high soil resistivity. The five vertical grounding rods under test were installed in 2011 from the High Voltage Laboratory of NTUA for investigating the behavior of different ground enhancing compounds. From 2011 many experiments have been carried out in this testing field but this diploma thesis is the first effort of an experimental approach of the transient behavior. All measurements realized in each one from the five vertical grounding electrodes are elaborated so we can have significant conclusions. The aim of this diploma thesis is to give a first experimental approach of the transient behavior and certainly to create new ideas for the future of this interesting research.

Key Words

Grounding system, vertical grounding electrode, impedance, specific soil resistance, ground enhancing compounds.

Πρόλογος

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μια προσπάθεια διερεύνησης της μεταβατικής συμπεριφοράς μιας πειραματικής διάταξης κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης εγκιβωτισμένα σε βελτιωτικά υλικά εδάφους. Ενώ στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες, είναι η πρώτη φορά που γίνεται μια προσέγγιση της μεταβατικής συμπεριφοράς της. Η δυσκολία ενός τέτοιου εγχειρήματος είναι κυρίως πρακτική. Τα πειράματα πραγματοποιούνται σε εξωτερικό χώρο και ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι ιδιαίτερα ογκώδης και βαρύς. Είναι λοιπόν προφανής η δυσκολία της μεταφοράς και της δημιουργίας του πειραματικού κυκλώματος. Ένας ακόμη αξιοσημείωτος παράγοντας που δυσκολεύει το εγχείρημα είναι οι καιρικές συνθήκες όπως μια απρόβλεπτη βροχόπτωση ή μια καλοκαιρινή μέρα με ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη η θεωρητική επεξεργασία δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία στην κατανόησή της είναι όμως ιδιαίτερα χρονοβόρα λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων.

Η διπλωματική εργασία διαμορφώνεται σε έξι κεφάλαια όπως αυτά περιγράφονται στη συνέχεια.

Στο **κεφάλαιο 1** γίνεται μια γενική αναφορά στο ρόλο που επιτελεί το σύστημα γείωσης σε μια εγκατάσταση και στις προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί. Αναφέρονται τα είδη γειώσεων που εφαρμόζονται στην πράξη καθώς και οι κατηγορίες κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Τέλος, ορίζεται η ειδική αντίσταση του εδάφους καθώς και η αντίσταση γείωσης τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

Στο **κεφάλαιο 2** ορίζεται η κρουστική σύνθετη αντίσταση που αποτελεί και το θεωρητικό υπόβαθρο για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Αναφέρονται περιληπτικά κάποια κλασικά θεωρητικά μοντέλα που προσομοιώνουν την μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και τέλος γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε έρευνες σχετικές με την μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης.

Στο **κεφάλαιο 3** γίνεται μια σύντομη αναφορά στα βελτιωτικά υλικά εδάφους και στον τρόπο που αυτά χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια πλούσια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε έρευνες σχετικές με τα βελτιωτικά υλικά εδάφους.

Στο **κεφάλαιο 4** γίνεται μια εκτενής περιγραφή της πειραματικής διάταξης και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων. Είναι το πρώτο κεφάλαιο στο οποίο πραγματοποιείται μια ουσιαστική εισαγωγή στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα που ελήφθησαν ανά υλικό και ανά ημερομηνία και κάποια αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν κατόπιν επεξεργασίας. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια της παρουσίασης και μόνο της πληροφορίας που έχει καταγραφεί. Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω του μεγάλου τους αριθμού τοποθετήθηκαν μόνο κάποια ενδεικτικά παλμογραφήματα και όχι όλα.

Στο **κεφάλαιο 6** γίνεται μια περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 προκειμένου να προκύψουν κάποια ουσιαστικά συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα παρουσιάζονται πρώτα ανά υλικό και στη συνέχεια συνολικά προκειμένου να γίνει και μια ποιοτική σύγκριση μεταξύ τους. Τέλος, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στην επόμενη μέρα του πειράματος και προτείνονται συγκεκριμένα βήματα για τη συνέχιση της έρευνας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον κ. Βασίλειο Π. Ανδροβιτσάνεα, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την συνεχή καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράστασή του, καθώς και για την ουσιαστική βοήθεια που πρόθυμα και ακούραστα μου παρείχε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Επίκουρο Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την αμέριστη συμπαράσταση και επιστημονική βοήθεια, που μου προσέφερε με προθυμία, όποτε του τη ζήτησα, σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του

Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την αμέριστη επιστημονική βοήθεια και ηθική συμπαράσταση καθόλη τη διάρκεια διεξαγωγής της και για το άριστο εργασιακό περιβάλλον που διασφάλισε.

Τον κ. Αριστείδη Γιάννακα, ο οποίος στάθηκε ακούραστος συμπαραστάτης και συνεργάτης στη διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντός, και εκτός εργαστηρίου.

Την κα Ελένη Π. Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την άμεση και ουσιαστική ανταπόκρισή της κάθε φορά που απαιτήθηκε η επιστημονική βοήθειά της, καθώς και όλα τα στελέχη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για την συμβολή τους στη δημιουργία ενός ευχάριστου, δημιουργικού και παραγωγικού εργασιακού κλίματος, και ιδιαιτέρως την κα Βασιλική Κονταργύρη, την κα Νικολέτα Ηλία, τον κ. Χρήστο Ηλία και την κα. Χρύσα Σιγάλα.

Κεφάλαιο 1

Συστήματα Γείωσης

1.1 Ο ρόλος της γείωσης

Είναι γνωστό ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Ωστόσο η ροή του ρεύματος προς το σημείο αυτό πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία του συστήματος και σε όλες τις περιπτώσεις την ελάχιστη πτώση δυναμικού. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης στο ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει τις πιθανότητες ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς [5].

Στην περίπτωση που ένα σύστημα είναι εξ ολοκλήρου απομονωμένο, προκειμένου να βρίσκεται σε πλήρη προστασία, η εφαρμογή συστήματος γείωσης δεν είναι αναγκαία για την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [5]. Ωστόσο, στην πράξη τα συστήματα δεν είναι απομονωμένα αλλά βρίσκονται σε επαφή με εξωτερικούς μηχανισμούς σύζευξης, επομένως στην περίπτωση εμφάνισης κεραυνού παρατηρείται ανύψωση του δυναμικού και ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ του συστήματος και του εξωτερικού χώρου, προκαλώντας σημαντικές καταστροφές και πιθανόν τραυματισμούς. Για την αποφυγή των φαινομένων που αναφέρθηκαν ανωτέρω, επιβάλλεται η δημιουργία και η εγκατάσταση συστημάτων γείωσης για τη μεταφορά του ρεύματος που φέρει ο κεραυνός στη γη.

Συνεπώς, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης συνοψίζεται στα ακόλουθα [1]:

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

Συστήματα Γείωσης

Η μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης και η ανάπτυξη εξειδικευμένων μοντέλων προσομοίωσής τους αποτελεί ένα καινοτόμο και αρκετά περίπλοκο θέμα, το οποίο απασχολεί μεγάλη ομάδα ερευνητών. Ιδιαίτερα σημαντικό και κρίσιμο θέμα αποτελεί η μελέτη της μεταβατικής κατάστασης των συστημάτων γείωσης, η οποία συνοδεύεται από υψηλές τάσεις και επικίνδυνα ηλεκτρικά φαινόμενα. Η μη γραμμική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης στη μεταβατική κατάσταση, αποτελεί ένα δύσκολο ζήτημα εξαιτίας της εξαιρετικά σύνθετης διεργασίας. Ωστόσο γίνονται προσπάθειες προσέγγισης του φαινομένου και ανάπτυξης κατάλληλων μοντέλων για τη μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς αυτής.

1.2 Είδη γείωσης

Οι γείωσεις ανάλογα με το λειτουργικό τους σκοπό σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση διακρίνονται σε τρία βασικά είδη:

- Γείωση λειτουργίας
- Γείωση προστασίας
- Γείωση ασφαλείας

1.2.1 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 όπως αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως κατά την εκδήλωση σφαλμάτων προς γη [2]. Η γείωση λειτουργίας διακρίνεται σε:

- **Άμεση**, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση, πλην της αντίστασης γείωσης.
- **Έμμεση**, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Συστήματα Γείωσης

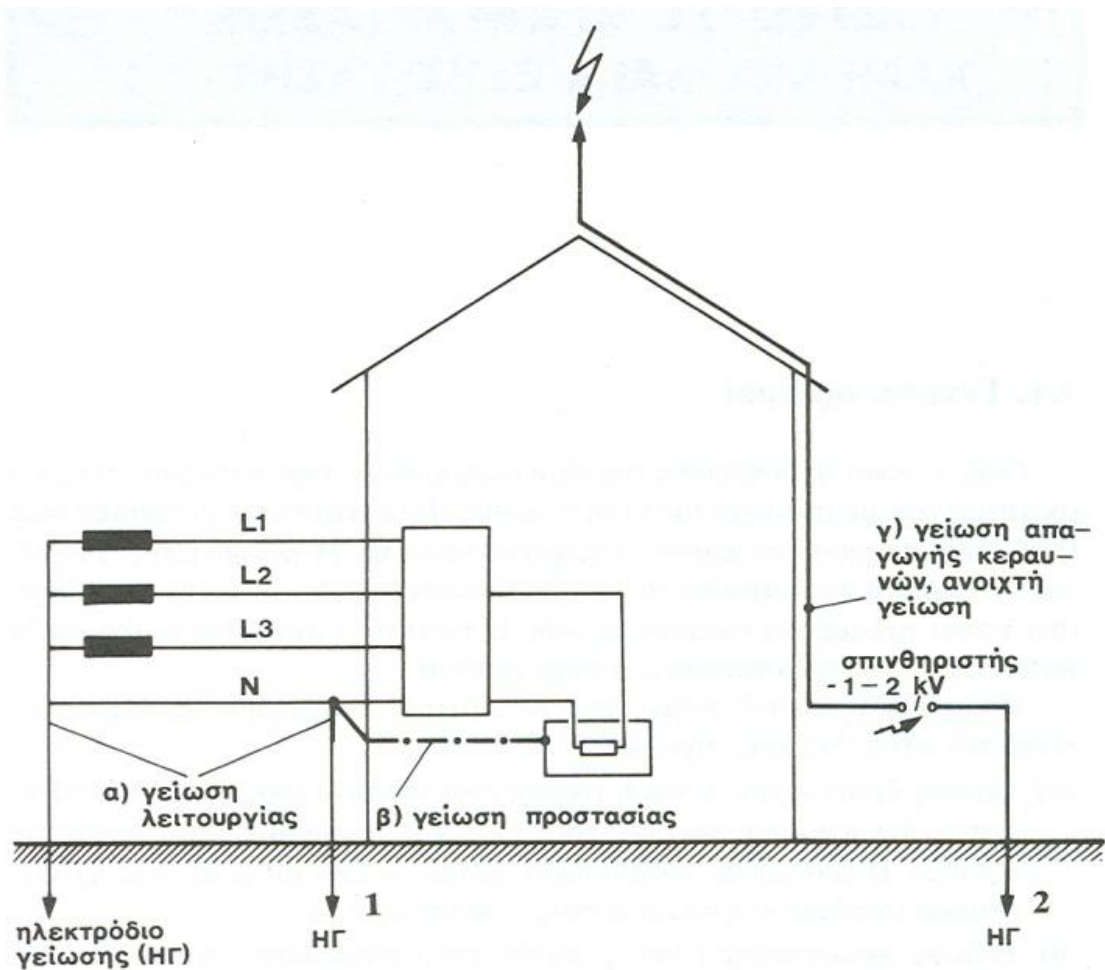
Αξίζει να σημειωθεί ότι αν μια διάταξη γείωσης προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα ως γείωση λειτουργίας και προστασίας, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις απαιτήσεις σχεδιασμού που αφορούν τη γείωση προστασίας. Σε αυτήν την περίπτωση η ίδια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) [2].

1.2.2 Γείωση προστασίας

Καλείται, η χωρίς παρεμβολή άλλων αντιστάσεων γείωση κάθε αγωγίμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου, που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγωγίμα μέρη μιας εγκατάστασης ή κατασκευής, τα οποία δε συμμετέχουν στη λειτουργία της (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδύων και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ.) και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά [2].

Τέτοιου είδους γείωση εφαρμόζεται υποχρεωτικά σε κάθε εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την προστασία των ανθρώπων από την ανάπτυξη επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών, τα οποία σε κανονική λειτουργία δεν είναι υπό τάση (Σχήμα 1.1). Τα υλικά κατασκευής της επιβάλλεται να εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια συνεχή λειτουργία της, τη διέλευση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ή διαρροών προς τη γη, την αντοχή της σε φαινόμενα διάβρωσης και σε μηχανικές καταπονήσεις. Μία διάταξη γείωσης προστασίας ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση αντικεραυνικής προστασίας, όταν βέβαια πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν κυρίως την τιμή της αντίστασης η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από 1Ω και τον τύπο των γειωτών της εγκατάστασης. Κατάλληλοι γειωτές θεωρούνται η θεμελιακή γείωση, ένας δακτύλιος κατά δυνατότητα κλειστός γύρω από το κτίριο ή δύο τουλάχιστον μεμονωμένοι γειωτές ράβδων βάθους 9m ή ταινιών μήκους 20m (βάθος $>0,5m$) [2]. Η γείωση προστασίας γίνεται είτε με ουδετέρωση είτε με άμεση γείωση (απευθείας αγωγήμη σύνδεση στο σύστημα γείωσης). Η ουδετέρωση είναι η αγωγήμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό.

Συστήματα Γείωσης



Σχήμα 1.1: Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης [2]

1.2.3 Γείωση ασφαλείας

Γείωση ασφαλείας ονομάζεται κάθε γείωση μιας εγκατάστασης που χρησιμεύει για να διοχετεύονται προς τη γη ρεύματα σφάλματος από εξωτερικά ατμοσφαιρικά αίτια όπως οι κερανοί (Σχήμα 1.1) και χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκομένων στον προστατευόμενο χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικεραυνών, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοικτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη [2].

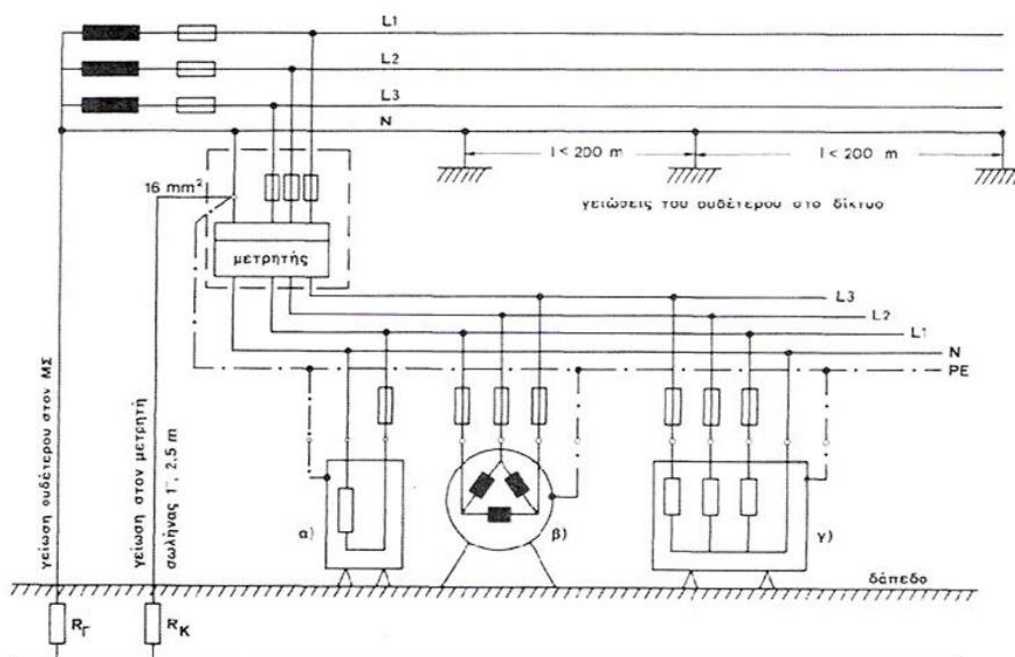
Συστήματα Γείωσης

1.3 Μέθοδοι γείωσης

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι ακόλουθες [5]:

➤ Η *ουδετέρωση*, είναι η σύνδεση των μεταλλικών μερών των συσκευών με αγωγό προστασίας που συνδέεται με τον ουδέτερο στον πίνακα παροχής. Ο ουδέτερος συνδέεται και με το ηλεκτρόδιο γείωσης στο σημείο παροχής πριν από το μετρητή (Σχήμα 1.2).

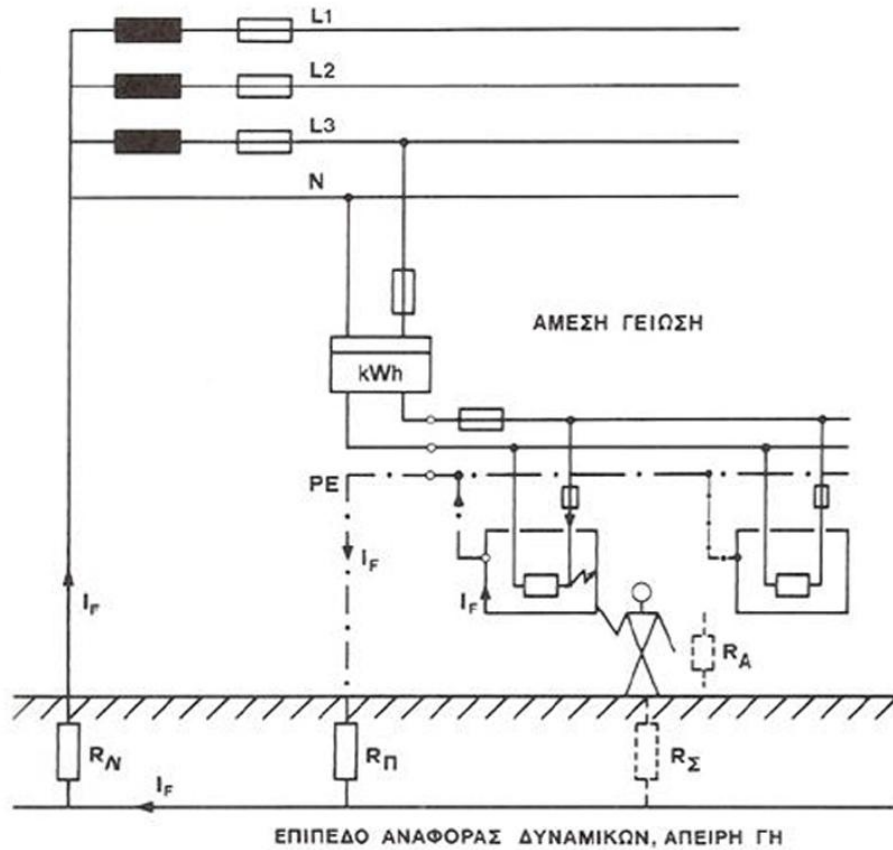
Η μέθοδος αυτή είναι εξίσου αποτελεσματική, όπως και η άμεση γείωση, αλλά απαιτεί μικρότερη αντίσταση γείωσης και χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, ειδικότερα σε αστικές περιοχές.



Σχήμα 1.2: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με ουδετέρωση [5]

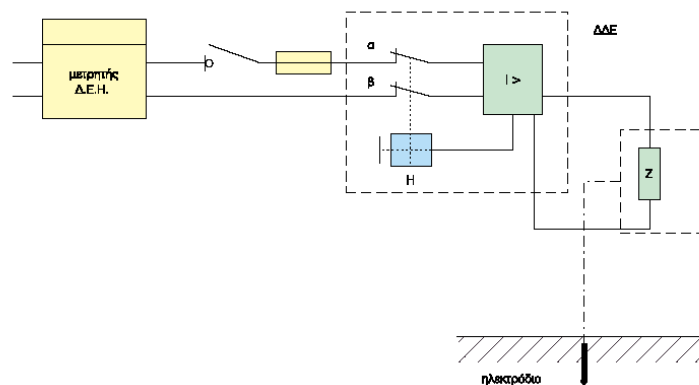
➤ Η *άμεση γείωση*, δηλαδή η απευθείας αγωγίμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης του αγωγού γης, το οποίο είναι συνδεδεμένο με κάποιο αγωγίμο υλικό τοποθετημένο μέσα στη γη όπως πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο, κλπ. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται το σχέδιο ενός συστήματος άμεσης γείωσης.

Συστήματα Γείωσης



Σχήμα 1.3: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με άμεση γείωση [5]

➤ Μέσω διακόπτη διαφυγής έντασης για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης (Σχήμα 1.4).

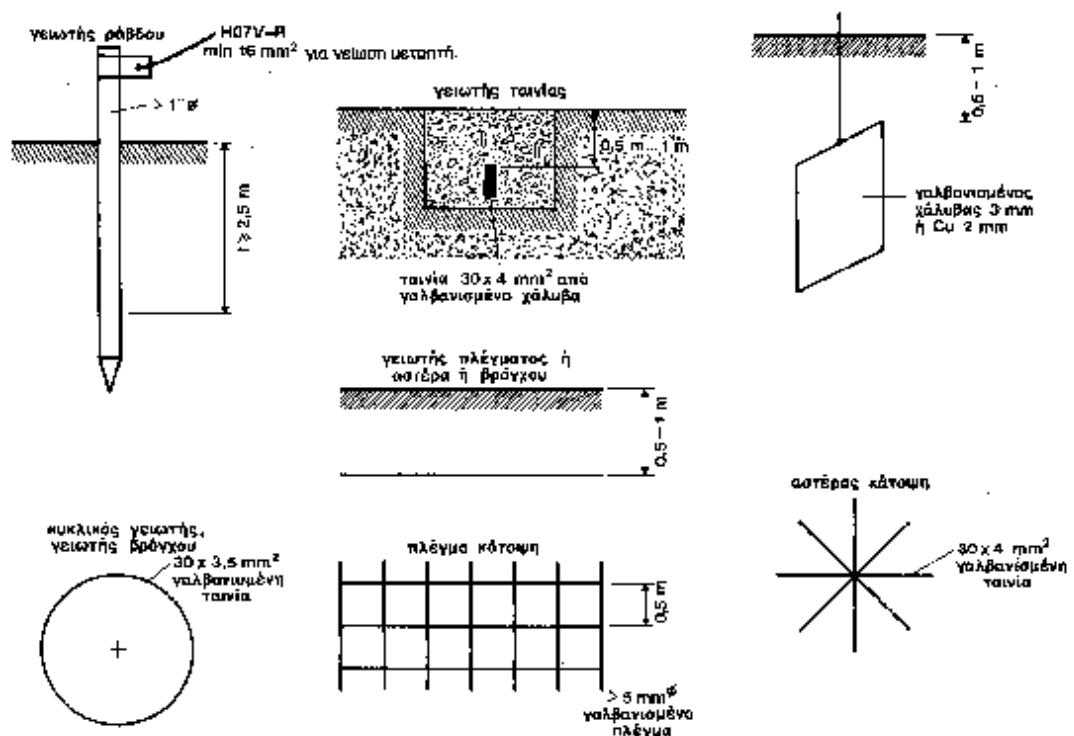


Σχήμα 1.4: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης [5]

Συστήματα Γείωσης

1.4 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης

Τα ηλεκτρόδια γείωσης έχουν τις μορφές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.5. Οι ελάχιστες διαστάσεις των ηλεκτροδίων γείωσης δίνονται στον Πίνακα 1.1 κατά VDE 0141 [2]. Οι εξισώσεις από τις οποίες προκύπτουν οι αντιστάσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 1.2. [2].



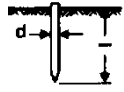
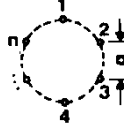
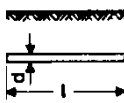
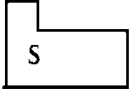
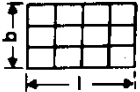
Σχήμα 1.5: Μορφές ηλεκτροδίων γείωσης [2]

Μορφή γειωτή	Υλικό		
	Χάλυβας γαλβανισμένος (με 70 μm στρώμα)	Χάλυβας επιχαλκωμένος	Χαλκός
Ταινία	100mm ² ελάχιστο πάχος 3mm	50mm ² ελάχιστο πάχος 2mm	50mm ² ελάχιστο πάχος 2mm
Ράβδος στρογγυλή	78mm ² = 10 φ	50mm ² χάλυβα	35mm ²
Σωλήνας	Ονομαστική διάμετρος 1" (εσωτερική διάμετρος), ελάχιστο		Εσωτερική διάμετρος 20mm, ελάχιστο

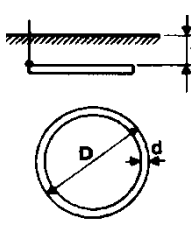
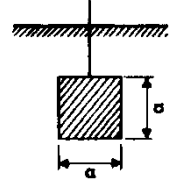
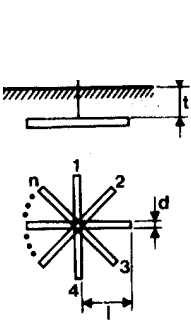
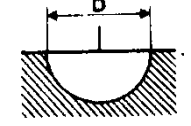
Συστήματα Γείωσης

	πάχος 2mm		πάχος 2mm
Ράβδος L, U, T, I για πάσσαλο-γειώσεις	100mm ² , ελάχιστο πάχος 3mm.	50mm ² στρογγυλή ράβδος	35mm ² , ελάχιστο πάχος 3mm.
Πλάκα	Ελάχιστο πάχος 3mm		Ελάχιστο πάχος 2mm

Πίνακας 1.1: Ελάχιστες διατομές ηλεκτροδίων γειωτών, κατά VDE 0141 [2]

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m} *$	$R_A \cong \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασάλων $a \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{a}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1.2$ $R_{A1} = \text{αντίσταση ενός πασάλου}$	$K = (1 \dots 1.5)$ 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 $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S}$		$R_4 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\rho}{D}$
	Πλέγμα σε βάθος 0,5 - 1,0m $D = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot l}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot d} + \frac{\rho}{l \cdot g} \quad l \cdot g$ =συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot D}$

Συστήματα Γείωσης

	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{8 \cdot D}{d}$ $\cdot \left(1 + \frac{\ln \frac{2 \cdot D}{t}}{\ln \frac{8 \cdot D}{d}} \right)$	$R = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot D} **$
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m ²]		$R = \frac{\rho}{4.5 \cdot \alpha} ***$
	<p>n=2</p> <p>n=3</p> <p>n=4</p> <p>n=5</p>	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0.27 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0.25 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0.22 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{0.09 \cdot t \cdot d} \right)$	
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi \cdot D} ****$	
<p>* Όπου εμφανίζεται το πάχος του αγωγού d, αυτό είναι το ισοδύναμο πάχος</p> $d = \sqrt{4 \cdot \frac{A}{\pi}}, \text{ όπου } A \text{ η διατομή του αγωγού.}$ <p>** Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος</p> $D = 0,33 \cdot U, \text{ } U \text{ το μήκος αγωγού.}$ <p>*** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $a = \sqrt{S}$, 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>			

Πίνακας 1.2: Τύποι για αντιστάσεις γειωτών [2]

Συστήματα Γείωσης

1.4.1 Γειωτής ράβδου

Είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μίας ίντσας ή μία ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, π.χ. U, L, T ή I-προφίλ. Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20°) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος σε βάθος, π.χ. 2.5m με σφυρί χεριού, ή με μηχανικό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους (Πίνακας 1.1) και δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Εφόσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, γιατί αντέχουν στη διάβρωση [2].

1.4.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινο

Πρόκειται για ταινία ή συρματόσχοινο που τοποθετείται σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 0,5m. Το βάθος που προτιμάται συνήθως είναι από 0,7 έως 1m, για να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμα ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η τελευταία γείωση λέγεται γειωτής βρόχου. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Για το ίδιο μήκος ταινίας ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Δεν συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης γιατί διαβρώνεται εύκολα. Γι' αυτό το λόγο δεν το συνιστούν και οι κανονισμοί VDE 100. Μία περίπτωση του γειωτή ταινίας είναι η θεμελιακή γείωση, που θα εξετάσουμε σε επόμενη παράγραφο [2].

1.4.3 Γειωτής πλάκας

Πρόκειται για πλάκα μορφής παραλληλογράμμου η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνειά της κατακόρυφη. Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1m. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι γαλβανισμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3mm ή χαλκός ή μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2mm [2].

Συστήματα Γείωσης

1.4.4 Ακτινικός γειωτής

Είναι ταινίες ή ράβδοι που διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες (Πίνακας 1.1). Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0,8m. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια, όπως στο γειωτή ταινίας [2].

1.4.5 Γειωτής πλέγματος

Πλέγμα από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους από 0,7 έως 2m που τοποθετείται οριζόντια σε βάθος από 0,5 έως 1m (Πίνακας 1.1). 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. Επιτρέπονται, προφανώς, και ανοίγματα μικρότερα από 0,7m, αυτά όμως δεν έχουν μικρότερες βηματικές τάσεις απ' ότι τα πλέγματα με ανοίγματα 0,7m [2].

1.4.6 Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής

Επιτρέπεται χωρίς ιδιαίτερη άδεια, η χρησιμοποίηση μεταλλικών δικτύων ύδρευσης σαν γειωτές για εγκαταστάσεις με τάσεις ως προς γη μικρότερες των 250V, εφόσον υπάρχει η 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 μόνιμως ο μετρητής με χάλκινο σύρμα H03V-U και διατομή τουλάχιστον 6 mm² [2].

Προσοχή: Κατά VDE 100 δεν επιτρέπεται η παράλληλη σύνδεση γειωτών από χαλκό με το δίκτυο ύδρευσης διότι σχηματίζονται ηλεκτροχημικά στοιχεία με αποτέλεσμα τη διάβρωση του σιδήρου.

1.4.7 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές

Γίνεται διάκριση στους γειωτές ανάλογα με το βάθος τους, σε:

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

Συστήματα Γείωσης

Στους βαθείς γειωτές η αντίσταση μεταβάλλεται λιγότερο με το χρόνο απ' ό τι στους επιφανειακούς, επειδή η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους δεν μεταβάλλονται πολύ σε μεγάλα βάθη [2].

1.4.8 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης

Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης που προεξέχει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά υλικά 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 τη διατομή του ουδετέρου, όχι όμως μικρότερη των 16mm^2 (H07V-U). Σε εγκαταστάσεις αλεξικεραύνου η ελάχιστη διατομή για χαλκό είναι 50mm^2 . Η σύνδεση του ουδετέρου του Μ/Σ με το γειωτή γίνεται με καλώδια H07-R (πριν ΝΥΑ) 25mm^2 τουλάχιστον [2].

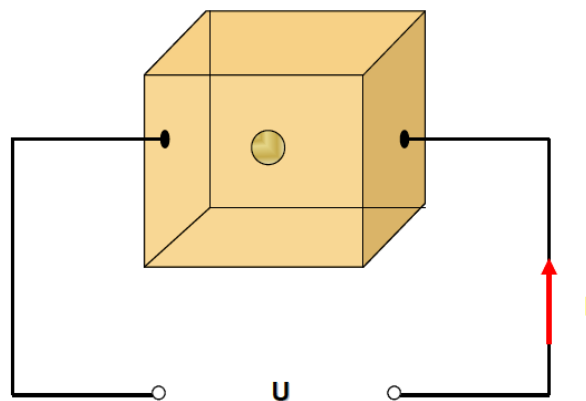
1.4.9 Θεμελιακή γείωση

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 [2].

1.5 Ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) ορίζεται ως η αντίσταση που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}^3$) από το υλικό του εδάφους, όταν τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου (Σχήμα 1.6) [5]. Το είδος, το εμβαδόν της επιφάνειας και το βάθος του ηλεκτροδίου γειώσεως εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και την επιδιωκόμενη τιμή της αντίστασης γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων, όπως εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή κλπ. με μεγάλο εύρος τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική

Συστήματα Γείωσης



Σχήμα 1.6 Ειδική αντίσταση εδάφους [5]

αντίσταση του ρ μετρούμενη συνήθως σε Ωm . Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική, περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [3].

Ειδικότερα, 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 αγώγιμο ηλεκτρολύτη, μπορεί να συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2), θειικό χαλκό (CuSO_4), ή θειικό μαγνήσιο (MgSO_4) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Οι διακυμάνσεις αυτού του είδους μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος [3].

Συμπερασματικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι οι εξής [4]:

1. Είδος του εδάφους

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται οι ειδικές αντιστάσεις για διάφορα εδάφη σε αύξουσα σειρά ξεκινώντας από $30\Omega\text{m}$ και φτάνοντας μέχρι τα $3000\Omega\text{m}$.

Συστήματα Γείωσης

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ρ_E (Ωm)
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος,	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

Πίνακας 1.3: Ενδεικτικές ειδικές αντιστάσεις εδαφών [2]

2. Υγρασία

Η αντίσταση μειώνεται αυξανομένης της υγρασίας του εδάφους. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το έδαφος μπορεί να ξηραίνεται επιφανειακά, αλλά σε βάθος κάτω του μισού μέτρου διατηρείται συνήθως υγρό όλες τις εποχές του έτους. Έτσι, σε πασσαλωμένους γειωτές ράβδου 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.

3. Θερμοκρασία και πίεση

Η μεταβολή της αντίστασης του εδάφους με τη θερμοκρασία φθάνει περίπου το 130% κατά τη διάρκεια του έτους. Από τον Ιανουάριο έως τον Φεβρουάριο είναι υψηλότερη και από τον Ιούλιο έως τον Αύγουστο χαμηλότερη. Η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ παρουσιάζει ραγδαία αύξηση όταν η θερμοκρασία λαμβάνει τιμές κάτω των 0°C.

Όσον αφορά την επίδραση της πίεσης, έχει παρατηρηθεί ότι υψηλότερες πιέσεις, που οφείλονται σε πιο συμπαγείς δομές του εδάφους, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης.

4. Μορφή της τάσης

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

Συστήματα Γείωσης

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

5. Ένταση του πεδίου

Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου όταν αυτή υπερβαίνει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με το είδος του εδάφους, αλλά συνήθως είναι της τάξης μερικών kV/cm . Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, θα δημιουργηθούν τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, τα οποία οδηγούν σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα τόξα θα εκδηλώνονται σε εκείνη την περιοχή όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θα ξεπερνά την κρίσιμη τιμή. Σε όλο τον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη.

Τέλος, έχει προκύψει από έρευνες ότι η επίδραση της υγρασίας και της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μεγαλύτερη σε μικρά βάθη (0,5 έως 1m) παρά σε μεγάλα βάθη. Έτσι, ο γειωτής ράβδου που είναι σε μεγάλο βάθος, σε σύγκριση με ένα επιφανειακό γειωτή, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της σταθερότητας της αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους [4].

Μια από τις δημοφιλέστερες μεθόδους μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι η μέθοδος των τεσσάρων σημείων ή αλλιώς μέθοδος Wenner [8]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε μια ευθεία γραμμή και ισαπέχοντα το ένα από το άλλο απόσταση a (Σχήμα 1.7). Τα τέσσερα αυτά ηλεκτρόδια βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος μόνο στο κάτω άκρο τους και το άνω άκρο τους συνδέεται σε ένα μετρητικό όργανο, το γειωσόμετρο. Το ρεύμα κυκλοφορεί μεταξύ των δύο ακραίων ηλεκτροδίων και μετριέται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια. Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

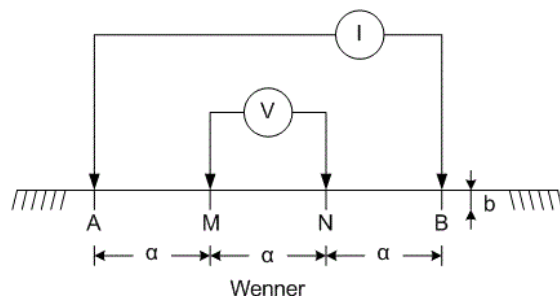
$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (1.1)$$

όπου R είναι η φαινόμενη αντίσταση και b το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια. Όταν $a \gg b$ τότε η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στην ακόλουθη:

Συστήματα Γείωσης

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (1.2)$$

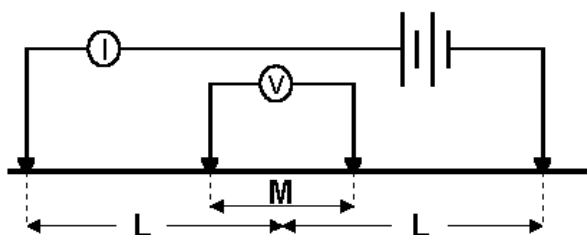
όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους, R η ένδειξη του οργάνου και a η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων [8].



Σχήμα 1.7 Μέθοδος Wenner [8]

Μια άλλη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι η μέθοδος Schlumberger [9]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η απόσταση μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της τάσης, δεν πρέπει να είναι υποχρεωτικά ίση με την απόσταση a σε αντίθεση με τη μέθοδο Wenner, καθώς επίσης η διάταξη των σημείων τοποθέτησης των ηλεκτροδίων είναι δυνατό να μην είναι σε ευθεία γραμμή. Η ειδική αντίσταση εδάφους σύμφωνα με τη μέθοδο Schlumberger δίνεται από τη σχέση (αναφορικά με το Σχήμα 1.8):

$$\rho = R \cdot \pi \cdot \left(L^2 - \frac{M^2}{4} \right) \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.8 Μέθοδος Schlumberger [9]

1.6 Αντίσταση γείωσης

Η αντίσταση γείωσης ορίζεται ως η ηλεκτρική αντίσταση του όγκου του εδάφους που περιέχει το ηλεκτρόδιο γείωσης. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές προσεγγίσεις του μεγέθους.

Συστήματα Γείωσης

1.6.1 Θεωρητική προσέγγιση

Οι εξισώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν κυρίως την αντίσταση γείωσης γειωτών ράβδου που είναι και το αντικείμενο το οποίο πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική. Ωστόσο στη βιβλιογραφία [10] μπορούν να αναζητηθούν και εξισώσεις που δίνουν τη θεωρητική αντίσταση γείωσης για άλλους τύπους γειωτών.

Μία κάθετη ράβδος γείωσης είναι ένας απομονωμένος κύλινδρος συνεπώς το πρόβλημα της αντίστασης γείωσης ανάγεται ουσιαστικά στο πρόβλημα υπολογισμού της χωρητικότητας ενός απομονωμένου κυλίνδρου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μεγάλο συγκρινόμενο με την ακτίνα του. Για την περίπτωση αυτή έχει δοθεί από τον E.Hallen η ακόλουθη εξίσωση [11]:

$$\frac{C}{L} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1,22741}{4\lambda^2} + \frac{2,17353}{8\lambda^3} + \frac{11,0360}{16\lambda^4} \dots \quad (1.4)$$

όπου

$$\lambda = \ln(2L/a)$$

$2L$ = το μήκος του μεμονωμένου κυλίνδρου (σε cm)

a = η ακτίνα του κυλίνδρου (σε cm)

C = η χωρητικότητα (σε F)

Η μετατροπή μιας εξίσωσης για τη χωρητικότητα σε μια εξίσωση για την αντίσταση γείωσης μπορεί να γίνει θεωρώντας την απλή περίπτωση δύο παραλλήλων πλακών, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή και το φαινόμενο των άκρων μπορεί να αμεληθεί. Μετά τον υπολογισμό των αναπτυγμάτων της προηγούμενης εξίσωσης, προκύπτει για την αντίσταση ενός κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου (για το οποίο θεωρείται ότι $L/r_1 > 10$, όπου L το μήκος και r_1 η ακτίνα του) ο ακόλουθος τύπος [10]:

$$R_1 = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) \quad (1.5)$$

όπου ρ_2 είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους που περικλείει το ηλεκτρόδιο.

Για ηλεκτρόδια εγκιβωτισμένα σε μπετόν ή κάποιο βελτιωτικό υλικό γείωσης [12, 13], η αντίσταση είναι:

Συστήματα Γείωσης

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) - \frac{\rho_1}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_2} - 1 \right) + \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_2} - 1 \right) \quad (1.6)$$

Η εξίσωση (1.6) παριστάνει το συνδυασμό δύο αντιστάσεων, της αντίστασης του όγκου που δημιουργείται από το βελτιωτικό υλικό ακτίνας r_2 , το οποίο είναι θαμμένο σε έδαφος ειδικής αντίστασης ρ_2 και της αντίστασης ενός εσωτερικού τμήματος της ακτίνας r_2 , το οποίο περιέχει ένα μεταλλικό πυρήνα ακτίνας r_1 .

Εφαρμόζοντας αλγεβρικές μεθόδους, η εξίσωση (1.6) μπορεί να γραφεί ως:

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2) \quad (1.7)$$

1.6.2 Πειραματικός υπολογισμός

Το ένα από τα δύο άκρα μεταξύ των οποίων μετριέται η αντίσταση γείωσης είναι γνωστό καθώς αυτό είναι το ένα άκρο του συστήματος γείωσης. Το άλλο άκρο όμως δεν είναι σαφώς καθορισμένο και πρέπει να διευκρινίζεται ανάλογα με την περίπτωση. Συνήθως αρκεί μια πεπερασμένη απόσταση πολλαπλάσια του μήκους του ηλεκτροδίου έτσι ώστε το 98% της αντίστασης γείωσης να βρίσκεται εντός της καθορισμένης περιοχής. Η αντίδραση του εδάφους μπορεί χωρίς σημαντικό σφάλμα να αγνοηθεί εκτός αν η αντίστασή του είναι εξαιρετικά χαμηλή. Η μέτρηση γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα ώστε να αποφεύγεται η πόλωση του εδάφους. Μια πρακτική και αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης της αντίστασης μιας γείωσης είναι αυτή της “πτώσης δυναμικού” [6].

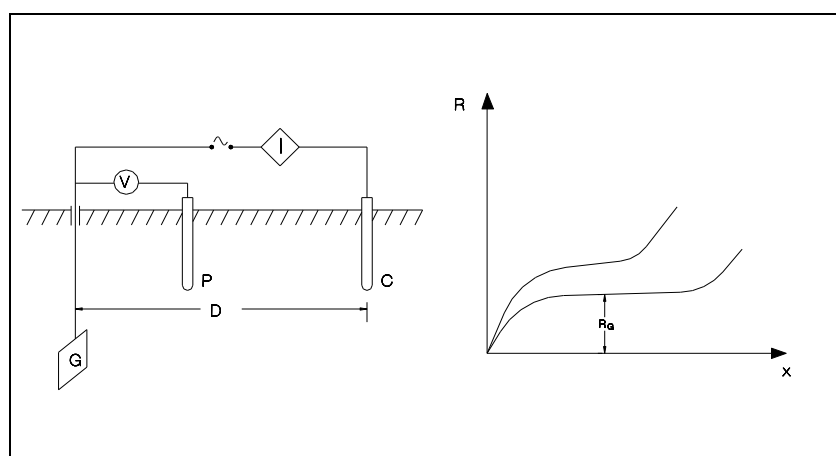
Η μέθοδος εφαρμόζεται σε όλες τις μετρήσεις αντιστάσεων γείωσης. Ουσιαστικά βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης δυναμικού κατά μήκος του εδάφους που προκαλείται από ένα ρεύμα που εγχέεται στο έδαφος σε κάποιο άλλο σημείο. Έτσι ένα ρεύμα έντασης I περνά από το έδαφος μέσω του ηλεκτροδίου γείωσης και επιστρέφει από ένα ηλεκτρόδιο σε κάποιο απομακρυσμένο σημείο. Καθώς το ρεύμα περνά από τον όγκο του εδάφους προκαλεί μια πτώση του δυναμικού. Η πτώση αυτή του δυναμικού μετράται με ένα δεύτερο ηλεκτρόδιο το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στο σύστημα γείωσης και το ηλεκτρόδιο του ρεύματος σε απόσταση x . Ο λόγος U_x/I συναρτήσει της απόστασης x δίνει γραφήματα παρόμοια με αυτά του Σχήματος 1.9. Αν η απόσταση D του Σχήματος 1.9 γίνει αρκετά μεγάλη τότε το μεγαλύτερο τμήμα

Συστήματα Γείωσης

της γραφικής παράστασης τείνει να γίνει επίπεδο. Έχει συμφωνηθεί η τιμή της αντίστασης του επίπεδου τμήματος ενός τέτοιου γραφήματος να θεωρείται ως αντίσταση γείωσης [6].

Υπάρχουν δυο είδη γειώσεων, οι σημειακές (π.χ. ραβδοειδής γειωτής) και οι εκτεταμένες (π.χ. τρίγωνο).

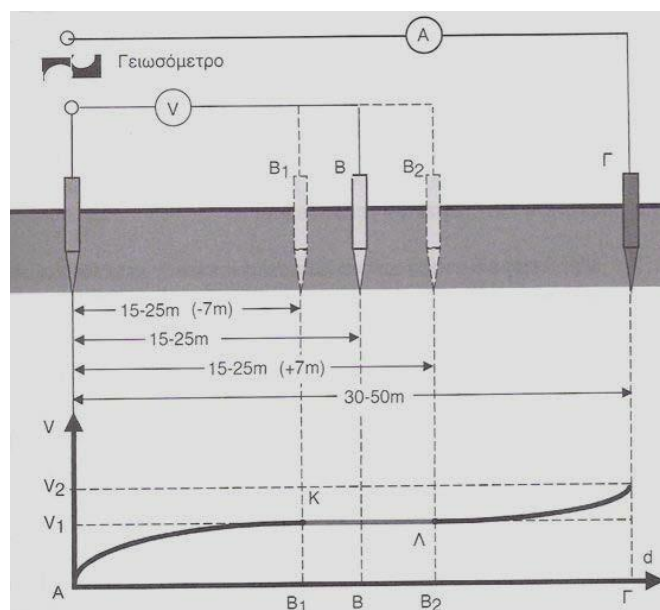
Για τη μέτρηση των σημειακών γειώσεων χρησιμοποιούνται δυο βοηθητικά ηλεκτρόδια του γειωσομέτρου και πραγματοποιείται η συνδεσμολογία του Σχήματος 1.10, όπου A είναι το προς μέτρηση σύστημα γείωσης, B και Γ τα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Το ηλεκτρόδιο Γ τοποθετείται σε απόσταση 30 ως 50m από το σημείο A,



Σχήμα 1.9 Μέτρηση αντίστασης γείωσης [6]

ενώ το B σε απόσταση $AG/2$. Με αυτήν τη διάταξη λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση με τις συγκεκριμένες αποστάσεις και κατόπιν λαμβάνονται 2 έως 6 μετρήσεις μετακινώντας το B έως 7m προς το Γ και 7m προς το A, με βήμα περίπου 2m. Αν η διαφορά των μετρήσεων είναι πολύ μικρή, δεχόμαστε σαν αντίσταση του γειωτή A το μέσο όρο των πραγματοποιηθέντων μετρήσεων. Σε αντίθετη περίπτωση μεγαλώνουμε την απόσταση AG και επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις όπως πριν, απομακρυνόμενοι τώρα από το B προς τα Γ και A σε απόσταση μεγαλύτερη των 7m. Σταματάμε όταν οι τιμές μέτρησης διαφέρουν μεταξύ τους μέσα σε όρια που αποδεχόμαστε. Στη γραφική παράσταση του σχήματος 1.10 απεικονίζεται η μεταβολή του δυναμικού εντός του εδάφους μεταξύ του γειωτή A και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ. Στην περιοχή όπου αυτό λαμβάνει μια σταθερή τιμή U_1 , τα ηλεκτρικά πεδία του γειωτή A και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ δεν αλληλοεπηρεάζονται. Η μετρούμενη λοιπόν τιμή αντίστασης γείωσης στο τμήμα ΚΛ είναι και η πραγματική [6].

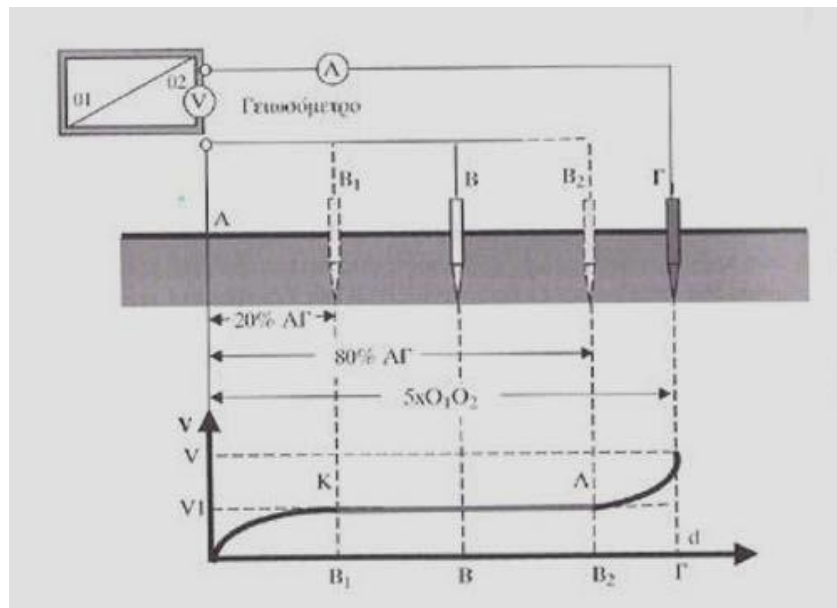
Συστήματα Γείωσης



Σχήμα 1.10 Μέτρηση αντίστασης σημειακού συστήματος γείωσης [5]

Στις εκτεταμένες γειώσεις, η αλληλεπίδραση των τμημάτων του γειωτή κάνει πιο δύσκολη την εύρεση της περιοχής ΚΛ (αναφορικά με το Σχήμα 1.11). Η απόσταση ΑΓ πρέπει να είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα και οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται από το 80% της ΑΓ προς το 20% της ΑΓ, με βήμα το 1/25 της ΑΓ περίπου. Στην πράξη έχει εκτιμηθεί ότι παίρνοντας σαν απόσταση ΑΓ περίπου το τριπλάσιο με πενταπλάσιο μήκος της διαγωνίου του σχηματιζόμενου νοητού πολυγώνου που δημιουργεί ο εκτεταμένος γειωτής, είναι επιτυχής η μέτρηση που πραγματοποιείται. Βέβαια, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ΑΓ, τόσο πιο εύκολα προσδιορίζεται η περιοχή ΚΛ και η απόκλιση της μετρούμενης τιμής της αντίστασης του γειωτή και της πραγματικής μηδενίζεται. Στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή μετρήσεων σε τόσο μεγάλο χώρο, ξεκινούμε από μια απόσταση ΑΓ π.χ. 60m και ενεργώντας όπως προαναφέρθηκε, σημειώνονται οι μετρούμενες τιμές. Επαναλαμβάνουμε για ΑΓ 50 και 40m, δημιουργώντας έναν πίνακα με τις τιμές που προκύπτουν [6].

Συστήματα Γείωσης



Σχήμα 1.11 Μέτρηση αντίστασης εκτεταμένου συστήματος γείωσης [6]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Φανή Η. Ασημακοπούλου, “Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους”, Ενδιάμεση κρίση, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
- [2] Π. Ντοκόπουλος “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384”, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2005.
- [3] Β. Κ. Παπαδιάς: “Εισαγωγή στην Τεχνική των Γειώσεων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”.
- [4] Σπύρος Ποντίκης, “Επίδραση του Σημείου Έγχυσης Κεραυνικού Ρεύματος στη Μεταβατική Σύνθετη Αντίσταση Διαφόρων Πλεγμάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002.
- [5] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας “Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων” Μεταπτυχιακή Εργασία Αθήνα 2011
- [6] Γεώργιος Ν.Αλεξόπουλος “Πειραματική μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης υπό κρουστική διέγερση” Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002.
- [7] Ιωάννης Φ. Γκόνοσ, “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης” Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2002.
- [8] Καρακίτσιος Ιωάννης, “Επίδραση βελτιωτικών υλικών εδάφους στη χρονική μεταβολή της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων” Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2011.
- [9] Αυγερινός-Βασίλειος Σακελλαρίου, «Επίδραση του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014.
- [10] Dwight H. B., “Calculation of Resistances to Ground”, Transactions of AIEE, vol. 55, pp. 1319–1328, 1936.
- [11] Hallén E., “Lösung zweier potentialprobleme der elektrostatik”, Arkiv f ör Matematik, Astronomi och Fysik, vol. 21A, no. 22, Stochholm, 1929.
- [12] Fagan E. G., Lee R.H., “The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes”, IEEE Transactions on Industry and general applications, vol. IGA-6, no. 4, pp. 337–348, July/Ago 1970.

Συστήματα Γείωσης

[13] Report of the substation committee working group 78.1, “Safe substation grounding—Part II”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 10, pp. 4006–4023, October 1982.

Κεφάλαιο 2

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

2.1 Γενικά

Οι έρευνες που αφορούν τη μελέτη των συστημάτων γείωσης κατά τη διάρκεια καταπόνησης με ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας θεωρούνται σε μεγάλο βαθμό πλήρεις. Από τις έρευνες αυτές έχουν προκύψει μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης και της τάσης στην επιφάνεια του εδάφους. Σε ό,τι αφορά τη μεταβατική συμπεριφορά οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι προσεγγιστικές καθώς αμελείται η επίδραση της χωρητικής και της επαγωγικής συνιστώσας.

Στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας τα πράγματα είναι πιο σύνθετα, καθώς η αντίσταση των συστημάτων γείωσης είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στη μόνιμη κατάσταση. Τα αίτια που προκαλούν αυτή την αύξηση της αντίστασης είναι [1]:

- η αντίδραση (το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης) των αγωγών και των συνδέσεων γίνεται μεγαλύτερη λόγω της μικρής διάρκειας του φαινομένου η οποία έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη υψηλών συχνοτήτων και επομένως την αύξηση της σύνθετης αντίστασης της γείωσης.
- η μείωση του χρόνου μετώπου της διέγερσης συντελεί στη μείωση του «ενεργού μήκους» (effective length) των μεγάλου μήκους αγωγών γείωσης.
- το επιδερμικό φαινόμενο αυξάνει τη σύνθετη αντίσταση των αγωγών γείωσης, λόγω της υψηλής συχνότητας κατά το μεταβατικό φαινόμενο.
- η υψηλή τιμή του εγχυόμενου ρεύματος μπορεί να ξηράνει το έδαφος, με αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής αντίστασής του.

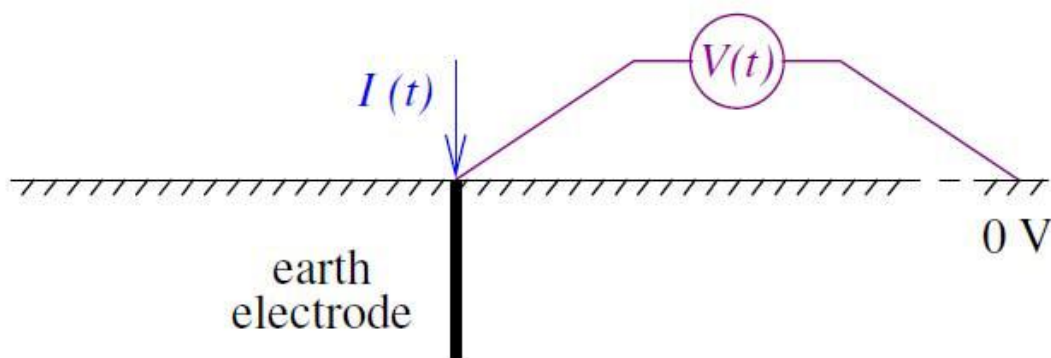
Οι παράγοντες που επιδρούν στη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης είναι η μορφή του συστήματος γείωσης, η ειδική αντίσταση του εδάφους, ο ιονισμός του εδάφους, το σημείο έγχυσης, καθώς και η κυματομορφή καταπόνησης.

2.2 Κρουστική σύνθετη αντίσταση

Η κρουστική (μεταβατική) σύνθετη αντίσταση ενός συστήματος γείωσης ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης του ρεύματος ως προς την άπειρη γη προς το εγχεόμενο ρεύμα [1]:

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (2.1)$$

Εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου, τις επικρατούσες συνθήκες εδάφους και την κυματομορφή του μεταβατικού ρεύματος. Είναι σημαντικό οι μετρήσεις των $u(t)$ και $i(t)$ να είναι συγχρονισμένες, αλλιώς οποιαδήποτε χρονική καθυστέρηση πρέπει να ληφθεί υπόψη [2]:



Σχήμα 2.1: Μέτρηση της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης [17]

Επειδή η κρουστική σύνθετη αντίσταση είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, ορίζουμε κάποιες χαρακτηριστικές παραμέτρους. Οι σχέσεις (2.2.2)-(2.2.5) εκφράζουν τους ορισμούς των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 [1]:

$$Z_1 = \max(z(t)) \quad (2.2)$$

$$Z_2 = \frac{U_{\max}}{i_{U_{\max}}} \quad (2.3)$$

$$Z_3 = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \quad (2.4)$$

$$Z_4 = \frac{U_{I_{\max}}}{I_{\max}} \quad (2.5)$$

όπου

Z_1 είναι η μέγιστη τιμή του λόγου της τάσης προς το ρεύμα.

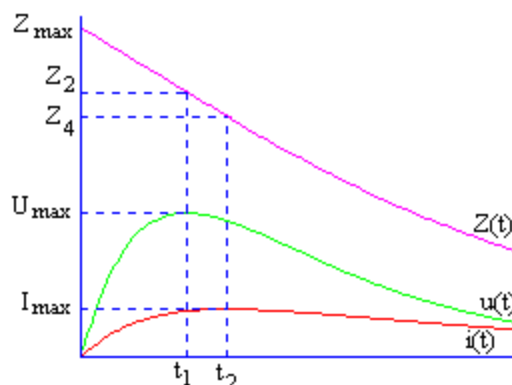
Z_2 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς το ρεύμα τη στιγμή κατά την οποία η τάση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

Z_3 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος.

Z_4 είναι ο λόγος της τιμής της τάσης όταν το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος.

Στο Σχήμα 2.2 γίνεται πιο ξεκάθαρος ο ορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης:



Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης [1]

Μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει ότι $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$. Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται η παράμετρος που θα μετρηθεί, π.χ. η παράμετρος Z_3 προτιμάται πολλές φορές λόγω της απλότητάς της, ενώ στις περιπτώσεις εκείνες που το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του πριν από το μέγιστο της τάσης η παράμετρος Z_4 θεωρείται η καταλληλότερη για να περιγράψει τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές αντικεραυνικής προστασίας η μέτρηση της Z_3 δεν είναι εφικτή και έτσι μετράται απλά η αντίσταση γείωσης. Επειδή η μέτρηση γίνεται με όργανα που συνήθως εφαρμόζουν ένα σήμα συχνότητας κάτω από 1kHz, η αντίσταση αυτή είναι γνωστή ως αντίσταση χαμηλής συχνότητας RLF. Ο λόγος Z_3/RLF για μία δοθείσα διάταξη ηλεκτροδίων, γνωστός ως συντελεστής μετάβασης, χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η παράμετρος Z_3 από τη μετρηθείσα αντίσταση RLF.

Λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες σχετικά με το έδαφος, ο συντελεστής αυτός συχνά θεωρείται ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδας, λόγω της συντηρητικής προσέγγισης που θέλει τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση μεγαλύτερη της αντίστασης χαμηλής συχνότητας.

Σύμφωνα, όμως, με την εργασία των S. Visacro και G. Rosado [3], φάνηκε ότι ο συντελεστής αυτός δεν είναι πάντα ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδας, όπως δείχνουν

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

τα αποτελέσματα πολλών προσομοιώσεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας κατέληξαν σε συντελεστές σημαντικά μικρότερους της μονάδος για ηλεκτρόδια μικρότερα από το ενεργό μήκος, ακόμα και σε χαμηλής αντίστασης εδάφη. Συγκεκριμένα, ο λόγος Z_3/RLF κυμάνθηκε στις περιοχές 0,3-0,6 και 0,68-0,9, για ηλεκτρόδια θαμμένα σε εδάφη υψηλής (3,8-4kΩm) και χαμηλής (90-300Ωm) ειδικής αντίστασης, αντίστοιχα. Τέλος, ηλεκτρόδια μακρύτερα του ενεργού μήκους LEF είχαν τιμές συντελεστή μετάβασης μεγαλύτερες της μονάδας, αν και εμφανώς μικρότερες από τις προβλεπόμενες μέσω προσομοιώσεων. Είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση.

2.3 Μέθοδοι και μοντέλα προσομοίωσης

Οι διάφορες μέθοδοι μοντελοποίησης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, που αναπτύχθηκαν από το 1980 μέχρι σήμερα, μπορούν να αναλυθούν στις εξής κατηγορίες:

- Κυκλωματική προσέγγιση
- Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου
 - Μέθοδος ροπών
 - Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
- Υβριδική προσέγγιση
- Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς

2.3.1 Κυκλωματική προσέγγιση

Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με πολύπλοκη γεωμετρία. Τα κύρια βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα ακόλουθα:

- Χωρισμός του συστήματος γείωσης σε πολλά πεπερασμένα τμήματα.
- Δημιουργία του ισοδύναμου συγκεντρωμένου κυκλώματος για κάθε τμήμα και υπολογισμός των παραμέτρων του: αυτεπαγωγή και αλληλεπαγωγή (ΔL),

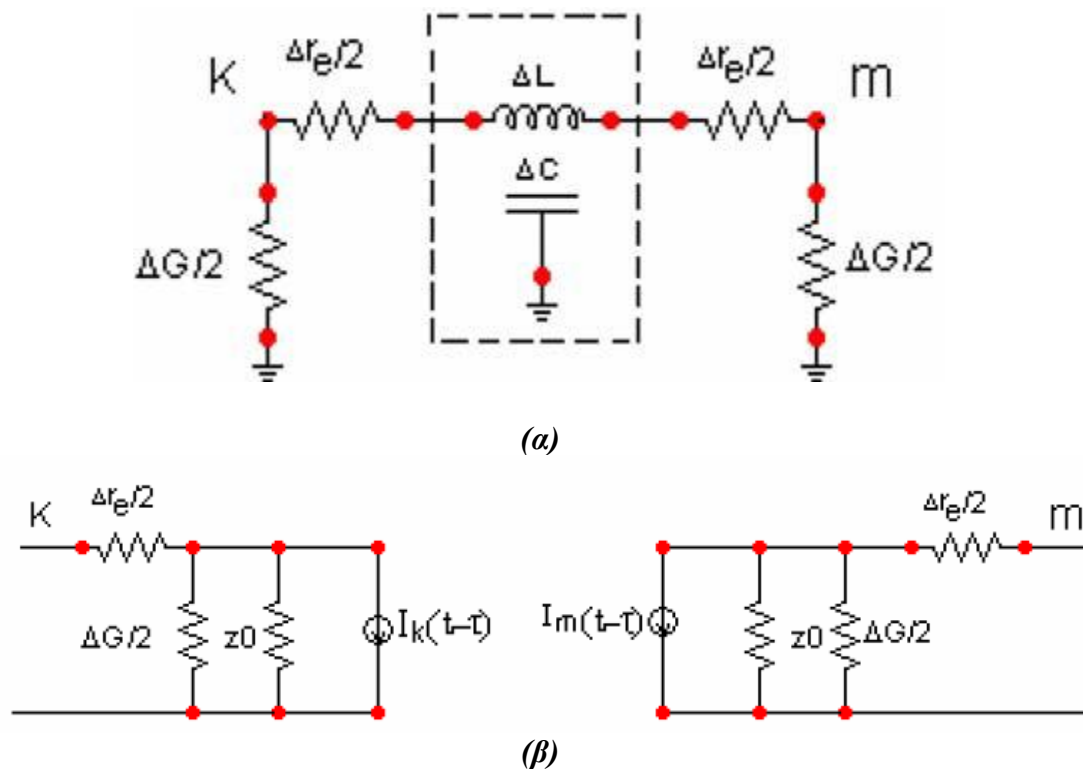
χωρητικότητα (ΔC), αγωγιμότητα (ΔG) και εσωτερική αντίσταση (Δr_e).

- Επίλυση των εξισώσεων κόμβων του ισοδύναμου κυκλώματος που

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

αντιπροσωπεύει ολόκληρο το σύστημα γείωσης βάσει των νόμων Kirchoff.

Η κυκλωματική προσέγγιση για τη μεταβατική ανάλυση ενός συστήματος γείωσης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους A. P. Melioroulos και M. G. Moharam [4] το 1983. Χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι ανεξάρτητες της συχνότητας για κάθε τμήμα (ΔL , ΔC , ΔG , Δr_e), οι οποίες υπολογίζονται με βάση την εξίσωση Laplace ($\nabla^2 V = 0$) στο ημιάπειρο αγωγίμο μέσο της γης. Το ενδιαφέρον σε αυτήν την εργασία είναι ότι κάθε τμήμα του αγωγού γείωσης αντικαταστάθηκε από μία γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες και από δύο επιπλέον αγωγιμότητες διαρροής προς γη σε διακλάδωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 (α), και το οποίο μπορεί να μετασχηματιστεί στο κύκλωμα του Σχήματος 2.3 (β):



Σχήματα 2.3 (α) και (β): Ισοδύναμο κύκλωμα για κάθε τμήμα στην κυκλωματική προσέγγιση του Melioroulos [4]

Η εξίσωση κόμβων για το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.3 είναι:

$$[Y] \cdot [V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t, \dots)] \quad (2.6)$$

όπου $[Y]$ είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων κόμβων του ισοδύναμου κυκλώματος, $[V(t)]$ είναι το διάνυσμα δυναμικών στο χρόνο t για τους κόμβους, $[I_s(t)]$ είναι το διάνυσμα

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

του εξωτερικού ρεύματος που εισάγεται στους κόμβους του κυκλώματος και $[b(t - \Delta t, \dots)]$ είναι το διάνυσμα προηγούμενων τιμών ρεύματος (current history).

Αργότερα σαν επέκταση αυτής της εργασίας, οι A. P. Melioroulos και A. D. Paralexoroulos [5] βελτίωσαν την κυκλωματική προσέγγιση συστήματος γείωσης για αντικεραυνικές μελέτες υπολογίζοντας την απόκριση κάθε τμήματος σε οποιαδήποτε υπερδιέγερση ρεύματος βασιζόμενοι στις μερικώς στατικές εξισώσεις Maxwell, έτσι ώστε οι παράμετροι κάθε τμήματος και οι προηγούμενες τιμές ρεύματος να είναι εξαρτώμενες από τη συχνότητα.

Η κυκλωματική προσέγγιση είναι εύκολη στην κατανόηση από την άποψη ότι η πολύπλοκη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης μετασχηματίζεται σε μία απλή μεταβατική ανάλυση ισοδύναμων κυκλωμάτων. Οι κυκλωματικές προσεγγίσεις μπορούν να συμπεριλάβουν όλες τις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στους αγωγούς γείωσης, ενώ μπορούν εύκολα να ενσωματώσουν και τα μη γραμμικά φαινόμενα ιονισμού του εδάφους.

2.3.2 Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι η πιο ακριβής μέθοδος επειδή επιλύει τις πλήρεις εξισώσεις Maxwell με ελάχιστες προσεγγίσεις. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τη Μέθοδο Ροπών (Method of Moment – MoM) είτε με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM).

Μέθοδος Ροπών: Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους L. Green και F. Dawalibi [6] το 1990. Βασίζεται στην ολοκληρωτική εξίσωση του Maxwell για το ηλεκτρικό πεδίο:

$$E^s = \frac{1}{4\pi j \omega \epsilon} (\nabla \nabla - \gamma^2) \int_l t' \cdot I_l(r') G_n(r, r') dl \quad (2.7)$$

όπου:

$$G_n(r, r') = G_1(r, r') + G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (2.8)$$

όπου E^s είναι το συνολικό κατανεμημένο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού, $t' \cdot I_l(r')$ είναι το ρεύμα που ρέει κατά μήκος του αγωγού,

$\epsilon = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ είναι η μιγαδική επιτρεπτότητα του μέσου, $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$ είναι η

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

σταθερά διάδοσης κύματος στο μέσο, όπου σ, ϵ και μ είναι η αγωγιμότητα, επιτρεπτότητα και διαπερατότητα αντίστοιχα, $G_n(r, r')$ είναι η πλήρης συνάρτηση Green, $G_1(r, r')$ και $G_i(r, r')$ είναι οι δυαδικές συναρτήσεις Green για το ηλεκτρικό πεδίο στο r λόγω του στοιχείου ρεύματος και της εικόνας του, και $G_s(r, r')$ είναι ένας όρος διόρθωσης που οφείλεται στη διεπιφάνεια αέρα-εδάφους, ο οποίος είναι απαραίτητος για την πλήρη επίλυση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η οριακή συνθήκη είναι ότι το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού γείωσης πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$t \cdot (E^i + E^s) = I \cdot Z_s \cdot \Delta l \quad (2.9)$$

όπου E^i είναι το αναμενόμενο ηλεκτρικό πεδίο και Z_s είναι η ανά μονάδα μήκους εσωτερική σύνθετη αντίσταση σε σειρά του αγωγού γείωσης συμπεριλαμβανομένου του επιδερμικού φαινομένου.

Η αριθμητική επεξεργασία της εξίσωσης (2.9) καλείται Μέθοδος Ροπών, που δεν είναι τίποτε άλλο από το μετασχηματισμό της σχετικής ολοκληρωτικής εξίσωσης σε ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους, όπου οι N άγνωστοι συνήθως αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές του ρεύματος βάσει μερικών κατάλληλων επεκτάσεων. Ανάλογα, λοιπόν, με την κατανομή του ρεύματος κατά μήκος του αγωγού που προσεγγίζεται, διαμορφώνεται και η αντίστοιχη ολοκληρωτική εξίσωση (2.7) για το ηλεκτρικό πεδίο.

Η βασισμένη στη Μέθοδο Ροπών προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που επιλύει τις πλήρεις εξισώσεις Maxwell στο πεδίο της συχνότητας, έχει ελάχιστες παραδοχές. Κατά συνέπεια, πιστεύεται ότι είναι πολύ ακριβής. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό είναι αρκετά πολύπλοκο για να υλοποιηθεί. Επίσης, όταν η δομή της γείωσης είναι μεγάλη, ο χρόνος υπολογισμού γίνεται και αυτός πολύ μεγάλος.

Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων: Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε από τους B. Nekhoul et al [7] το 1995. Το μοντέλο ξεκινά από εξισώσεις ηλεκτρικής ή μαγνητικής ενέργειας, οι οποίες εμπεριέχουν μερικές διαφορικές εξισώσεις Maxwell αναφορικά με το διανυσματικό δυναμικό (\vec{A}) και το βαθμωτό δυναμικό (V) σε διαφορετικές περιοχές του συστήματος. Υλοποιείται, έπειτα, με τη χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

Στοιχείων για τις λύσεις που βασίζονται στη φυσική αρχή ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο σύστημα. Οι τελικές συναρτήσεις $A-V$ δίνονται από τις εξισώσεις (2.10)-(2.12), οι οποίες εμπεριέχουν τις συναρτήσεις βάρους \vec{W} και w για το διανυσματικό και βαθμωτό δυναμικό αντίστοιχα:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_o} (\nabla \times \vec{W}) \cdot (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_o} (\nabla \cdot \vec{W}) (\nabla \cdot \vec{A}) + (\sigma_{soil} + j\omega \epsilon_{soil}) (j\omega \vec{W} \cdot \vec{A} + \vec{W} \cdot \nabla V) \right] d\Omega = 0 \quad (2.10)$$

$$\int_{\Omega} \left[(\sigma_{soil} + j\omega \epsilon_{soil}) \nabla w \cdot (j\omega \vec{A} + \nabla V) \right] d\Omega = 0 \quad (2.11)$$

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_o} (\nabla \times w) \cdot (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_o} (\nabla \cdot \vec{W}) (\nabla \cdot \vec{A}) \right] d\Omega = 0 \quad (2.12)$$

Οι (2.10) και (2.11) αφορούν το πεδίο στο έδαφος ενώ η (2.12) το πεδίο στον αέρα. Προκειμένου να λυθούν τα προβλήματα αριθμητικά οι εξισώσεις (2.10)- (2.12) μετασχηματίζονται σε γραμμικές εξισώσεις με διαίρεση ολόκληρου του συστήματος σε N μικρά στοιχεία. Η δυσκολία σε αυτήν την προσέγγιση έγκειται στο μετασχηματισμό των ανοιχτών ορίων του περιβάλλοντος τόσο του αέρα όσο και της γης σε ένα κλειστό οριακό πρόβλημα με χρήση χωρικού μετασχηματισμού, ο οποίος θα μειώσει το μέγεθος του προβλήματος. Το κύριο πλεονέκτημα της βασισμένης στη FEM προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ότι η περιγραφή της περιοχής (γεωμετρία του μέσου) του προβλήματος διευκολύνεται από ιδιαίτερα ευέλικτα μη ομοιόμορφα στοιχεία, που μπορούν εύκολα να περιγράψουν πολύπλοκα σχήματα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ο ιονισμός του εδάφους μπορεί εύκολα να συμπεριληφθεί στο συγκεκριμένο μοντέλο. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι ακόμα πιο περίπλοκη στην κατανόηση από αυτήν που βασίζεται στη MoM, επειδή δεν λύνει απευθείας τις εξισώσεις Maxwell.

2.3.3 Υβριδική προσέγγιση

Η υβριδική προσέγγιση ξεκίνησε αρχικά από τον F. Dawalibi [8] το 1986, και αργότερα τροποποιήθηκε το 2000 από τους R. Andolfato et al [9]. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί συνδυασμό της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της κυκλωματικής προσέγγισης. Η μεθοδολογία του μοντέλου αυτού βασίζεται στη διαίρεση ολόκληρου του συστήματος γείωσης σε n μικρά τμήματα, ενώ το ηλεκτρικό

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο δίνεται από την εξίσωση (2.13), η οποία προκύπτει από τις πλήρεις εξισώσεις Maxwell:

$$E = -\text{grad}V - j\omega\vec{A} \quad (2.13)$$

όπου \vec{A} είναι το διανυσματικό δυναμικό και V το βαθμωτό δυναμικό, ενώ η εξίσωση μετασχηματίζεται κατάλληλα σε κάθε τμήμα k .

Το πλεονέκτημα της υβριδικής προσέγγισης είναι ότι συμπεριλαμβάνεται στις εσωτερικές σύνθετες αντιστάσεις, και στις επαγωγικές και χωρητικές-αγωγίμες συνιστώσες σε σειρά η επίδραση της συχνότητας η οποία κάνει την προσέγγιση αυτή πιο ακριβή από τη συμβατική κυκλωματική προσέγγιση, ειδικά όταν η συχνότητα του ρεύματος σφάλματος είναι υψηλή.

2.3.4 Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς

Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3.1 η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς ήταν η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης. Ωστόσο, η ανάπτυξη της προσέγγισης αυτής δεν ήταν τόσο γρήγορη όσο αυτή της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της κυκλωματικής προσέγγισης.

Οι R. Verma, D. Mukhedkar [10] και C. Mazetti, G. M. Veca [11] εφήρμοσαν την έννοια της γραμμής μεταφοράς με απώλειες σε οριζόντιο αγωγό γείωσης, με την περιγραφή του οποίου να δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\frac{\partial V}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} + r_e I = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial V}{\partial t} + GV = 0 \quad (2.15)$$

Σκοπός της επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων (2.14) και (2.15) ήταν η εύρεση της αναλυτικής κατανομής ρεύματος και τάσης κατά μήκος του αγωγού γείωσης στο μιγαδικό επίπεδο και η μετατροπή αργότερα των μιγαδικών εξισώσεων σε εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου με χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Laplace. Αργότερα, η M. I. Lorentzou et al [12], ξεκίνησαν από τις ίδιες εξισώσεις (2.14) και (2.15), αλλά παρήγαγαν την εξίσωση κατανομής ρεύματος και τάσης του αγωγού απευθείας στο πεδίο του χρόνου. Το κοινό χαρακτηριστικό των

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

προσεγγίσεων γραμμής μεταφοράς που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ότι οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι είναι ομοιόμορφες κατά μήκος των αγωγών γείωσης.

Ο λόγος που η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς ήταν η πρώτη για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης είναι ότι χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς οριζόντιου αγωγού γείωσης (counterpoise wire). Ο οριζόντιος αγωγός γείωσης έχει μεταβατική συμπεριφορά παρόμοια με αυτή των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο αγωγός είναι θαμμένος στο έδαφος ενώ η εναέρια γραμμή μεταφοράς βρίσκεται στον αέρα. Η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης μπορεί να είναι είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας, αλλά είναι εύκολο να συμπεριληφθεί ο ιονισμός του εδάφους στο πεδίο του χρόνου. Παρόμοια με την κυκλωματική προσέγγιση, μπορεί επίσης να εμπεριέχει όλες τις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στα διάφορα τμήματα των αγωγών γείωσης. Επιπλέον, η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς μπορεί να προβλέψει την καθυστέρηση διάδοσης κύματος, η οποία είναι σημαντική όταν το σύστημα γείωσης έχει μεγάλο μέγεθος. Τέλος, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την προσέγγιση γραμμής μεταφοράς είναι πολύ μικρότερος συγκριτικά με την προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

2.4 Ιονισμός εδάφους

Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η διάσπαση του εδάφους δεν είναι ακόμη ξεκάθαρος παρά τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί. Δύο είναι οι βασικοί μηχανισμοί που ερμηνεύουν το φαινόμενο με βάση τη βιβλιογραφία, ο ένας είναι ο θερμικός μηχανισμός και ο άλλος είναι ο ιονισμός του εδάφους [13].

Με βάση το **θερμικό μηχανισμό**, που προτάθηκε από τους Snowden et al. [24] όταν το ρεύμα διέρχεται μέσω του συστήματος γείωσης στο έδαφος, λόγω του φαινομένου Joule, θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, που βρίσκεται παγιδευμένο στο έδαφος και μείωση της ειδικής του αντίστασης. Καθώς το ρεύμα διαλέγει το δρόμο μικρότερης αντίστασης θα διαρρεύσει τα μονοπάτια με τη μικρότερη αντίσταση (και συνεπώς με την υψηλότερη θερμοκρασία) προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Στις περιοχές που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή παρατηρείται διάσπαση του εδάφους. Ο χρόνος για την έναρξη της διάσπασης εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για τη θέρμανση και την εξάτμιση του νερού, που με τη σειρά του εξαρτάται από την

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του νερού, το μήκος των μονοπατιών, στα οποία έχει εκδηλωθεί διάσπαση και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους.

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ο **ιονισμός του εδάφους** και προτάθηκε από τους Leadon et al. [13]. Ο μηχανισμός αυτός είναι μια ηλεκτρική διαδικασία και λαμβάνει χώρα, όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα που βρίσκεται παγιδευμένος στις κοιλότητες και συνεπώς την εκδήλωση τόξου. Η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης που προκαλεί διάσπαση του εδάφους είναι μικρότερη από την τιμή που απαιτείται για τη διάσπαση ενός διακένου αέρα αντιστοίχων διαστάσεων.

Όταν συμβαίνει ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης παρατηρείται μείωση της σύνθετης αντίστασης του συστήματος. Ο πρώτος που παρατήρησε τη μείωση της σύνθετης αντίστασης ενός συστήματος γείωσης κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων ήταν ο Towne [25]. Η μείωση αυτή αποδίδεται από την επιστημονική κοινότητα στο φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, το οποίο θεωρείται ότι τελικά επικρατεί μεταξύ των δύο προτεινόμενων μηχανισμών περιγραφής της ηλεκτρικής διάσπασης του εδάφους. Σε μελέτη τους οι Nor και Ramli υποστήριξαν ότι οι δύο μηχανισμοί συνυπάρχουν και ότι η διάκριση μεταξύ τους εξαρτάται από το συνολικό ποσό της απορροφούμενης ενέργειας [14].

2.4.1 Μοντελοποίηση του φαινομένου

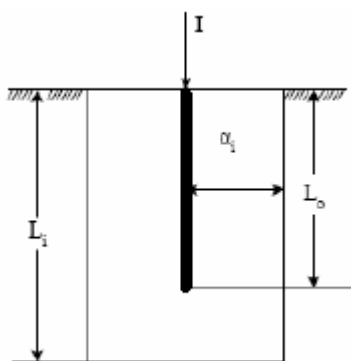
Από τα διάφορα μοντέλα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία τα κυριότερα είναι τα τρία που περιγράφονται παρακάτω.

2.4.1.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων

Το μοντέλο αυτό προτάθηκε από τους Belaschi et al. [15] και Πετρόπουλο [16] με βάση της σχετικές έρευνες που πραγματοποίησαν.

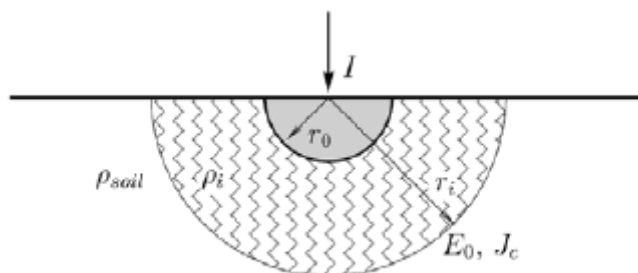
Ο Bellaschi και οι συνεργάτες του [15] έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκενώσεων και κατ' επέκταση τη μείωση της αντίστασης.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης



Σχήμα 2.4: Μοντέλο Bellaschi [15]

Ο Γ. Μ. Πετρόπουλος [16] αναφέρει ότι η αντίσταση των γειώσεων υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων παίρνει τιμές αρκετά μικρότερες από εκείνες που μετρώνται με μεθόδους διέλευσης ασθενών εναλλασσομένων ρευμάτων. Η μείωση αυτή της αντίστασης οφείλεται σε ηλεκτρικές εκκενώσεις, οι οποίες βραχυκυκλώνουν τη σχετικά υψηλή αντίσταση μεταξύ των αγωγίμων τμημάτων του εδάφους καταλαμβάνοντας έναν 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. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκενώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης έναν 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.



Σχήμα 2.5: Μοντέλο Πετρόπουλου [16]

Η αντίσταση μονίμου καταστάσεως του ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο:

$$R_0 = \frac{\rho_{soil}}{2\pi r_0} \quad (2.16)$$

όπου R_0 είναι η αντίσταση μονίμου καταστάσεως σε Ω

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

r_0 είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου σε m

ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

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

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.17)$$

όπου J είναι η πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2

I είναι το επιβαλλόμενο ρεύμα σε A

r είναι η απόσταση από το ηλεκτρόδιο σε m

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

$$J_e = \frac{E_e}{\rho_{soil}} \quad (2.18)$$

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

E_c είναι η κρίσιμη ένταση ιονισμού σε V/m

ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της περιοχής ιονισμού, η οποία δίδεται από τον τύπο:

$$r_i = \sqrt{\frac{\rho_{soil} I}{2\pi E_c}} \quad (2.19)$$

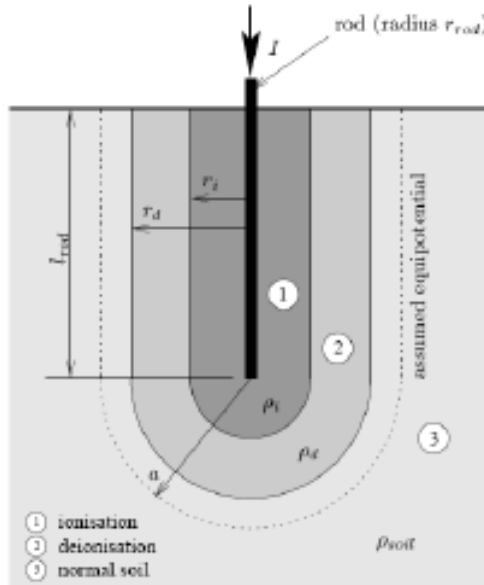
2.4.1.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η μείωση της αντίστασης του ηλεκτροδίου ερμηνεύεται ως μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ_{soil}) στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, εξαιτίας του φαινομένου του ιονισμού.

Το 1974 οι Liew και Darveniza [17] πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων ειδών εδάφους σε κρουστικά ρεύματα, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ισοτροπικό, δηλαδή, η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

Σύμφωνα με το μοντέλο τους το έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο χωρίζεται σε τρεις περιοχές ανάλογα με την τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος που εγχέεται: (1) η περιοχή ιονισμού, (2) η περιοχή απιονισμού και (3) η περιοχή όπου δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού.



Σχήμα 2.6: Μοντέλο Liew και Darveniza [17]

Αναλυτικότερα, καθώς το επιβαλλόμενο στο ηλεκτρόδιο ρεύμα αυξάνεται και εγχέεται στο έδαφος, η ειδική αντίσταση στις περιοχές, στις οποίες η πυκνότητα ρεύματος (J) είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή (J_c), θα παρουσιάζει μια τιμή μικρότερη από την τιμή της ειδικής αντίστασης μονίμου καταστάσεως (ρ_{soil}). Σε κάθε άλλη περίπτωση η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη. Δηλαδή:

$$\rho = \rho_{soil} \quad \text{για} \quad J < J_c \quad (2.20)$$

$$\rho = \rho_{soil} e^{-t/\tau_i} \quad \text{για} \quad J \geq J_c \quad (2.21)$$

όπου τ_i είναι η χρονική σταθερά ιονισμού κατά την αύξηση του ρεύματος και t είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του ιονισμού.

Ο ιονισμός θα επεκταθεί σε μια περιοχή με ακτίνα r_{cm} η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή που θα λάβει το ρεύμα.

Στη συνέχεια, καθώς το ρεύμα θα αρχίσει να μειώνεται, θα διαμορφωθούν στο έδαφος τρεις περιοχές.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

Η περιοχή 3 στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού και μπορεί να θεωρηθεί:

$$\rho = \rho_{soil} \text{ για } r > r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (2.22)$$

Η περιοχή 2 στην οποία η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή και η ειδική αντίσταση αρχίζει να ανακτά την αρχική τιμή της, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = \rho_i + (\rho_{soil} - \rho_i) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2}\right) \left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \text{ για } r < r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (2.23)$$

όπου

ρ_i είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης, όταν η πυκνότητα του ρεύματος

J είναι ίση με την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ρεύματος J_c

τ_2 είναι η χρονική σταθερά απιονισμού

t είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του απιονισμού

Η περιοχή 1 στην οποία ισχύουν $r < r_{cm}$ και $J > J_c$ και εξακολουθούν να εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού καθώς η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σύμφωνα με την τελευταία σχέση. Η διαδικασία αυτή θα σταματήσει όταν η πυκνότητα ρεύματος J θα πάρει τιμές μικρότερες από J_c , οπότε θα αρχίσει η διαδικασία του απιονισμού.

2.4.1.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του ιονισμού έχει προταθεί από τους Sekioka et al [18]. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας, εφόσον η ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με τις εκφορτίσεις στον αέρα.

Συνεπώς, ο ιονισμός του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος εκφόρτισης και μπορεί να παρομοιαστεί με το φαινόμενο τόξου που εμφανίζεται στο εσωτερικό των διακοπών. Έτσι, η αποκτηθείσα εμπειρία στη μοντελοποίηση των τόξων σε διακόπτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού στο έδαφος και τον προσδιορισμό της ζώνης ιονισμού.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

Οι Cooray et al. [19] εισήγαγαν ένα φυσικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων. Στο μοντέλο τους λαμβάνουν υπόψη τη δημιουργία ιονισμένων οχετών εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση αυτών των οχετών, ως συνάρτηση της ροής του ρεύματος μέσω αυτών, διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή θερμότητας και την απαγωγή της από τους οχετούς, καθώς και την εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία αγωγιμότητα του αέρα.

2.5 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σύμφωνα με τους Rafael Alipio και Silverio Visacro [20] η εξάρτηση των παραμέτρων του εδάφους, όπως η ειδική αντίσταση και η επιτρεπτότητα, από τη συχνότητα επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη μεταβατική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου γείωσης. Η εξάρτηση των παραμέτρων του εδάφους δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις,

$$\rho = \rho_o \{1 + [1.2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_o^{0.73}] \cdot [(f - 100)^{0.65}]\}^{-1} \quad 100\text{Hz} \leq f \leq 4\text{MHz} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_r = 7.6 \cdot 10^{-3} f^{-0.4} + 1.3 \quad 10\text{kHz} \leq f \leq 4\text{MHz} \quad (2.25)$$

όπου ρ_o η ειδική αντίσταση του εδάφους στα 100 Hz, ρ και ε_r η ειδική αντίσταση του εδάφους και η σχετική επιτρεπτότητα για συχνότητα f .

Η εξάρτηση από τη συχνότητα προκαλεί μείωση του πλάτους της αρμονικής αντίστασης γείωσης $Z(\omega)$ με ταυτόχρονη αύξηση της χωρητικής επίδρασης πάνω από ορισμένες συχνότητες. Είναι ξεκάθαρο ότι η επίδραση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

Στην εργασία των L. Grcev et al [21] αναφέρονται διάφοροι τύποι για τον υπολογισμό κρουστικών παραμέτρων όπως η κρουστική αντίσταση, ο κρουστικός συντελεστής και το ενεργό μήκος. Η κρουστική αντίσταση Z ορίζεται από τον τύπο

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.26)$$

όπου V_m η μέγιστη τιμή της τάσης και I_m η μέγιστη τιμή του ρεύματος.

Ο κρουστικός συντελεστής ορίζεται από τη σχέση

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

$$A = \frac{Z}{R} \quad (2.27)$$

όπου R η αντίσταση γείωσης με καταπόνηση ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας.

Το ενεργό μήκος ορίζεται ως το μέγιστο μήκος του ηλεκτροδίου για το οποίο το A ισούται με τη μονάδα.

Στην εργασία των I. F. Gonos et al [23] γίνεται κατά κύριο λόγο μια προσπάθεια συσχέτισης της αντίστασης μόνιμης κατάστασης με την μεταβατική αντίσταση γείωσης. Η συμπεριφορά του συστήματος γείωσης σε κρουστική καταπόνηση αποτελεί ένδειξη για το βαθμό προστασίας που παρέχει το συγκεκριμένο σύστημα. Το κάθετο ηλεκτρόδιο γείωσης αποτελεί την πιο απλή και την πιο οικονομική μορφή γείωσης. Η ωμική αντίσταση R του κάθετου ηλεκτροδίου γείωσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 \right) \quad (2.28)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους, l το μήκος του ηλεκτροδίου και d η ακτίνα του. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 2.7.

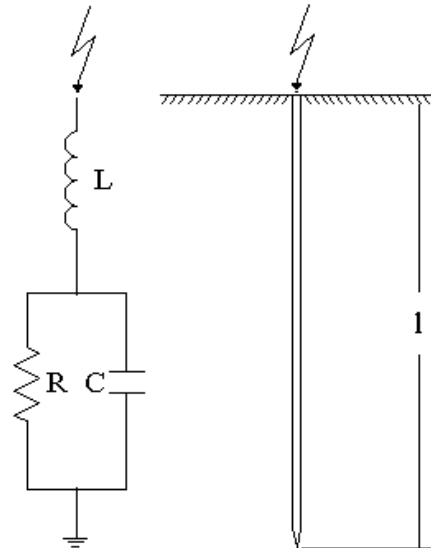
Η αυτεπαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος δίνεται από τη σχέση

$$L = 2 \cdot l \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l}{d} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2.29)$$

Ενώ η χωρητικότητά του δίνεται από τη σχέση

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot l}{18 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l}{d} \right)} \cdot 10^{-9} \quad (2.30)$$

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης



Σχήμα 2.7: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροδίου γείωσης [23]

Η μεταβατική αντίσταση ενός ηλεκτροδίου γείωσης είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και δίνεται από τη σχέση

$$Z(t) = \frac{U(t)}{i(t)} \quad (2.31)$$

Ορίζονται οι εξής παράμετροι που σχετίζονται με τη μεταβατική αντίσταση γείωσης

$$Z_1 = \max(Z(t)) \quad (2.32)$$

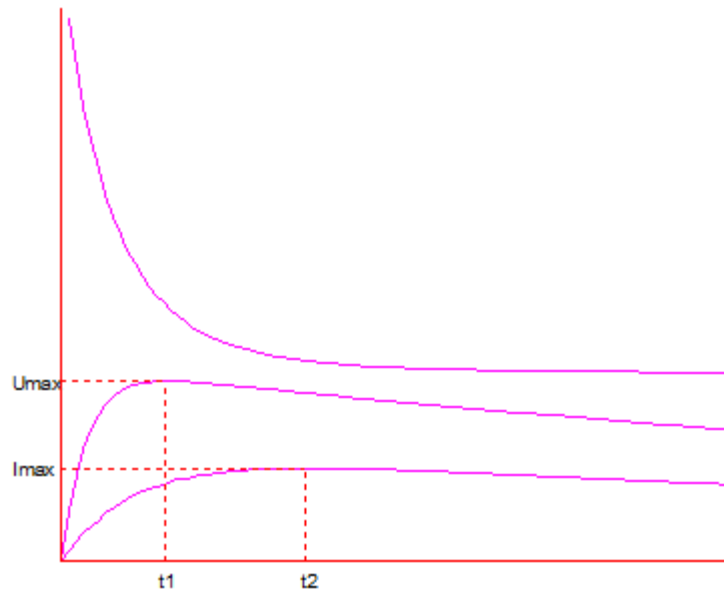
$$Z_2 = \frac{U(t_1)}{i(t_1)} \quad (2.33)$$

$$Z_3 = \frac{U(t_1)}{i(t_2)} \quad (2.34)$$

$$Z_4 = \frac{U(t_2)}{i(t_2)} \quad (2.35)$$

Το Σχήμα 2.8 που ακολουθεί βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση των μεγεθών που ορίστηκαν.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης



Σχήμα 2.8: Ορισμός των παραμέτρων μεταβατικής αντίστασης [23]

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν εξετάστηκαν διατάξεις με κατακόρυφα ηλεκτρόδια και με τρίγωνα ηλεκτροδίων, τα οποία καταπονήθηκαν με κυματομορφή τάσης 8/20μs. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Μια συσχέτιση της παραμέτρου Z_3 και της αντίστασης μόνιμης κατάστασης R για την περίπτωση κατακόρυφου ηλεκτροδίου δίνεται από την σχέση που ακολουθεί [23]

$$Z_3 = 2.053 \cdot R + 237.5 \quad (2.36)$$

Μια παρόμοια συσχέτιση για την περίπτωση του τριγώνου γείωσης φαίνεται παρακάτω [23]

$$Z_3 = 2.847 \cdot R + 218.7 \quad (2.37)$$

Ηλεκτρόδιο	l [cm]	R [Ω]	U_{peak} [kV]	I_{peak} [A]	Z_3 [Ω]
A ράβδος	50	68.2	5.14	13.7	375
A ράβδος	75	31.0	5.08	16.5	308

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

A ράβδος	100	22.3	5.03	17.7	284
A ράβδος	125	14.6	5.00	18.8	266
A ράβδος	150	12.1	4.99	19.3	259
Τρεις ράβδοι	50	27.0	4.91	16.7	294
Τρεις ράβδοι	75	15.6	4.87	18.3	266
Τρεις ράβδοι	100	10.7	4.83	19.3	250
Τρεις ράβδοι	125	7.6	4.80	20.0	240
Τρεις ράβδοι	150	6.9	4.79	20.3	236

Πίνακας 2.1: Πειραματικά αποτελέσματα [23]

Η μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης παρουσιάζει μια ιδιαίτερη δυσκολία τόσο στη θεωρητική προσέγγιση λόγω της περιπλοκότητας των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα όσο και στην πειραματική προσέγγιση λόγω του κόστους και της δυσκολίας υλοποίησης των πειραματικών διατάξεων. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συνεισφέρει κατά κύριο λόγο στην πειραματική προσέγγιση του φαινομένου και να ανοίξει νέους ορίζοντες για περαιτέρω έρευνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ιωάννης Φ. Γκόνος, “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης” Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2002.
- [2] K. J. Nixon, I. R. Jandrell, “Initial Design of a System to determine the Behaviour of an Earth Electrode subjected to real Lightning Discharges”, France, ICLP 2004.
- [3] S. Visacro and G. Rosado, “Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation”, Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions, February 2009.
- [4] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, “Transient analysis of grounding systems”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, pp.389-399, 1983.
- [5] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, “Frequency dependent characteristics of grounding systems”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.2, pp. 1073-1081, October 1987.
- [6] L. Grcev and F. Dawalibi, “An electromagnetic model for transients in grounding system”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, pp. 1773-1781, November 1990.
- [7] B. Nekhoul, C. Cuerin, P. Labie, G. Meunier, and R. Feuillet, “A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 3, pp. 2150- 2153, May 1995.
- [8] F. Dawalibi, “Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part I-single conductor and part II-ground networks”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, 1986.
- [9] R. Andolfato, L. Bernardi and L. Fellin, “Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp.1001-1009, July 2000.
- [10] R. Verma and D. Mukhedkar, “Impulse to impedance of buried ground wires”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003-2007, Sep./Oct. 1980.
- [11] C. Mazetti and G. M. Veca, “Impulse behaviour of grounding electrodes”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, pp. 3148-3156, 1983.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

- [12] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzargyriou, B. C. Papadias, “Time Domain Analysis of grounding electrodes impulse response”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 517-524, April 2003.
- [13] Φανή Η. Ασημακοπούλου, «Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
- [14] Fani E. Asimakopoulou, Ioannis F. Gonos, Ioannis A. Stathopoulos, «Methodologies for determination of soil ionization gradient», Journal of Electrostatics 70 (2012), pages 457-461.
- [15] P.L. Bellaschi, “Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds” transaction of American Institute of Electrical Engineer, Vol. 60, March 1941, pp. 123-128.
- [16] G.M. Petropoulos, “The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances,” Journal IEE, Vol. 95, Part II, 1948, pp.59-70.
- [17] A.C. Liew, M. Darveniza, “Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths”, Proc. IEE, Vol. 121, No 2, pp. 123-135, February 1974
- [18] S. Sekioka, M.I. Lorentzou, M.P. Philippakou, J.M. Prousalidis, “Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, no. 1, January 2006, pp. 194-201.
- [19] V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y. Liu, “Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization,” Journal of Electrostatics, 60, 2004, pp.193-202.
- [20] “How the Frequency Dependence of Soil Parameters Affects the Lightning Response of Grounding Electrodes” Rafael Alipio and Silverio Visacro, International Conference on Lightning Protection (ICLP) , Vienna 2012
- [21] “Transient Analysis of Grounding Systems Without Computer” Grcev, B. Markovski ,V. Arnautovski-Toseva ,K. E. K. Drissi, International Conference on Lightning Protection (ICLP) , Vienna 2012
- [22] Γεώργιος Ν. Αλεξόπουλος, “ Πειραματική μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης υπό κρουστική διέγερση ” Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2002.
- [23] “Transient Impedance of Grounding Rods ” I. F. Gonos , F. V. Topalis , I. A. Stathopoulos, ISH 1999, London

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

[24] J.W. Erler and D.P. Snowden, “High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4564- 4567.

[25] H. M. Towne, “Impulse characteristics of driven grounds,” Gen. Elect.Rev., Vol. 31, No. 11, November 1928, pp. 605–609.

Μεταβατική Αντίσταση Γείωσης

Κεφάλαιο 3

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

3.1 Γενικά

Τα βελτιωτικά υλικά εδάφους (στην ξένη βιβλιογραφία εμφανίζονται και ως Low Resistance Materials ή LRM) είναι υλικά ή μείγματα υλικών με μικρή ειδική αντίσταση. Η χρήση τους στα συστήματα γείωσης περιορίζεται κυρίως σε εδάφη με μεγάλη ειδική αντίσταση ή όταν ο χώρος της εγκατάστασης είναι περιορισμένος οπότε με τη χρήση τους επιδιώκεται η επιθυμητή αντίσταση γείωσης.

Όπως είναι αναμενόμενο τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα [1] έχουν καθιερώσει διάφορα κριτήρια για να θεωρηθεί ένα υλικό ως βελτιωτικό υλικό εδάφους καθώς η μικρή ειδική αντίσταση δεν επαρκεί. Τα κριτήρια αυτά είναι:

1. Αγωγιμότητα
2. Να είναι ασφαλές στη χρήση του και γενικότερα φιλικό προς το περιβάλλον
3. Να είναι μόνιμο και να διατηρεί τις ιδιότητές του
4. Να μην είναι διαβρωτικό για το ηλεκτρόδιο γείωσης
5. Εύκολο και απλό στην επεξεργασία

Χαρακτηριστικό παράδειγμα για την ανάγκη ύπαρξης αυτών των κριτηρίων αποτελεί η χρήση άλατος (NaCl), ως βελτιωτικό στα συστήματα γείωσης, που ήταν αρκετά συνηθισμένη τη δεκαετία του 1940. Το αλάτι ειδικά σε περιβάλλον με υγρασία παρουσιάζει ιδιαίτερα αγωγή συμπεριφορά. Ενδεικτικά το θαλασσινό νερό παρουσιάζει ειδική αντίσταση μόλις $1\Omega\text{m}$ ενώ το καθαρό βρόχινο νερό παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από $1000\Omega\text{m}$. Όμως, το αλάτι όπως και όλες οι χημικές ουσίες διαλύονται στο νερό οπότε με το πέρασμα του χρόνου απομακρύνονται και το έδαφος επιστρέφει στην αρχική του μορφή. Επιπλέον το αλάτι έχει διαβρωτικές ιδιότητες με αποτέλεσμα η χρήση του ως βελτιωτικό στα συστήματα γείωσης να καθίσταται απαγορευτική. Επίσης, ακόμα και σήμερα, επικρατεί η λανθασμένη εντύπωση ότι η σκόνη άνθρακα (καρβουνόσκονη) χρησιμοποιείται ως βελτιωτικό ειδικής αντίστασης

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

του εδάφους. Πράγματι η ειδική αντίσταση του εδάφους θα μειωθεί, όμως η καρβουνόσκονη μπορεί να περιέχει οξείδια του άνθρακα, τιτάνιο, νάτριο, μαγνήσιο, άνθρακα και άλλα στοιχεία τα οποία αναπόφευκτα αντιδρούν και με το χαλκό και με το χάλυβα, με αποτέλεσμα τη σίγουρη αλλά και επιταχυνόμενη διάβρωση των ηλεκτροδίων.

Με βάση τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα [1] ένα υλικό πρέπει να υπόκειται σε συγκεκριμένες δοκιμές. Η πρώτη είναι η δοκιμή διαρροής (ή απόπλυσης - leaching test) και κρίνεται επιτυχής όταν τα αποτελέσματα ικανοποιούν τους εθνικούς ή διεθνείς κανονισμούς. Η δεύτερη είναι η δοκιμή του θείου (sulphur determination) κατά ISO 4689-3 ή ISO 14869-1. Η δοκιμή κρίνεται επιτυχής όταν όλες οι μετρούμενες τιμές είναι κάτω από 2%. Ακολουθεί ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης του υλικού με τη μέθοδο Wenner, όπως αυτή περιγράφεται στο ASTM G57-06. Η μετρούμενη τιμή θα πρέπει να είναι χαμηλότερη, ή το πολύ ίση, με αυτήν που δίνει ο κατασκευαστής. Η τελευταία δοκιμή είναι η δοκιμή της διάβρωσης. Ο ρυθμός διάβρωσης προσδιορίζεται με τη χρήση ποτενσιοδυναμικών μεθόδων αντίστασης πόλωσης, όπως περιγράφεται στις προδιαγραφές ASTM G59-97 και ASTM G102-89. Για να περάσει επιτυχώς τον παραπάνω έλεγχο το υλικό θα πρέπει, για ηλεκτρόδια γείωσης από κράμα χαλκού, η αντίσταση πόλωσης να είναι μεγαλύτερη από $4\Omega\text{m}^2$ για μη επιθετικά περιβάλλοντα και από $8\Omega\text{m}^2$ για επιθετικά περιβάλλοντα, ενώ για γαλβανισμένα ηλεκτρόδια γείωσης, οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης πόλωσης πρέπει να είναι $3\Omega\text{m}^2$ και $7,6\Omega\text{m}^2$.

Πέρα από τους παραπάνω κανονισμούς οι οποίοι είναι κυρίως εμπειρικοί και έχουν προκύψει από διάφορες μελέτες, ένα βελτιωτικό υλικό πρέπει να έχει επίσης χαμηλό κόστος παραγωγής, μεταφοράς και εγκατάστασης.

3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

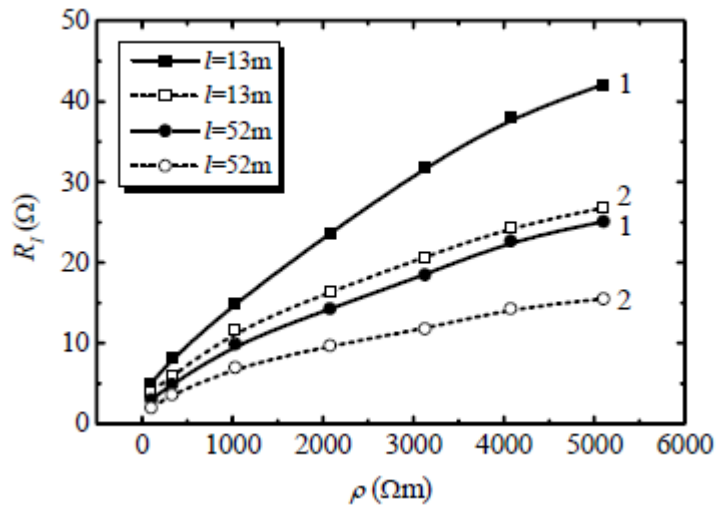
Για την πληρέστερη περιγραφή και μελέτη των βελτιωτικών υλικών εδάφους, κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο να γίνει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργασιών που έχουν δημοσιευθεί σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια και σχετίζονται κατά κύριο λόγο με την χρήση βελτιωτικών υλικών (LRM) σε συστήματα γείωσης, τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση.

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

Η Youping Tu et al [2] διερεύνησαν στην εργασία τους την περίπτωση του μπετονίτη που αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά βελτιωτικά υλικά και χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε εγκαταστάσεις γειώσεων. Αποδεικνύεται στην πράξη ότι τα βελτιωτικά υλικά μειώνουν την αντίσταση γείωσης σε καταπόνηση με ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας. Αντίθετα, σε ό,τι αφορά την κρουστική καταπόνηση, η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής θεωρείται ανεπαρκής. Ο μπετονίτης αποτελεί ένα φυσικό ορυκτό με περιεκτικότητα αργίλου που έχει προκύψει από ηφαιστειακές αντιδράσεις στο πέρασμα του χρόνου. Είναι μη διαβρωτικό και σταθερό και έχει χαμηλή αντίσταση η οποία οφείλεται κυρίως σε μια ηλεκτρολυτική διαδικασία μεταξύ του νερού, του Na_2O (soda), του K_2O (potash), του CaO (lime), του MgO (magnesia) και άλλων ορυκτών αλάτων τα οποία ιονίζονται δημιουργώντας έναν ισχυρό ηλεκτρολύτη με pH από 8 έως 10. Έχει την ιδιότητα να απορροφά όλη την υγρασία που βρίσκεται γύρω του οπότε μπορεί να διογκωθεί έως και 13 φορές με αποτέλεσμα να εφάπτεται πλήρως στον χώρο που τον περιορίζει, χωρίς οι ηλεκτρολυτικές του ιδιότητες να χάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Ο μπετονίτης χρειάζεται νερό για να αποκτήσει τις ιδιότητές του. Η αρχική ποσότητα νερού που απαιτείται προστίθεται κατά τη δημιουργία του μείγματος και μετά την εγκατάσταση οι ιδιότητές του διατηρούνται απορροφώντας την υγρασία του εδάφους. Η απόδοση του περιορίζεται όταν το έδαφος είναι πολύ ξηρό. Η προσθήκη βελτιωτικού υλικού σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης ισοδυναμεί με την αύξηση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου.

Η μεταβατική αντίσταση γείωσης δίνεται από τη σχέση $R(t) = \frac{u(t)}{i(t)}$ όπου $u(t)$ και $i(t)$ η τάση και το ρεύμα αντίστοιχα. Η κρουστική αντίσταση γείωσης δίνεται από τη σχέση $R_l = \frac{V_m}{I_m}$ όπου V_m και I_m η μέγιστη τιμή της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα. Ο ορισμός της κρουστικής αντίστασης δεν έχει κάποια φυσική σημασία όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του δυναμικού εφόσον είναι γνωστό το ρεύμα κάτι που βοηθάει ιδιαίτερα στον σχεδιασμό της εγκατάστασης.

Η θετική επίδραση της χρήσης βελτιωτικών υλικών στα συστήματα γείωσης είναι ιδιαίτερα προφανής με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Μάλιστα η επίδραση αυτή είναι πιο ορατή όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους μεγαλώνει. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Επίδραση της χρήσης LRM(1-χωρίς χρήση LRM, 2-με χρήση LRM) [2]

Η μείωση της κρουστικής αντίστασης που οφείλεται στη χρήση LRM κυμαίνεται από 25% έως 45%. Το ποσοστό αυτό δίνεται από τον εμπειρικό τύπο,

$$\eta_t = \alpha + 3.14 \times 10^{-5} \rho \quad (3.1)$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm και α είναι μια σταθερά που κυμαίνεται από 0,24 έως 0,29. Η κρουστική αντίσταση γείωσης με τη χρήση LRM μπορεί να βρεθεί από τη σχέση,

$$R_{II} = (1 - \eta_t) R_t \quad (3.2)$$

όπου R_t η κρουστική αντίσταση γείωσης χωρίς LRM. Το ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης με καταπόνηση βιομηχανικής συχνότητας στην περίπτωση χρήσης LRM δίνεται από τη σχέση,

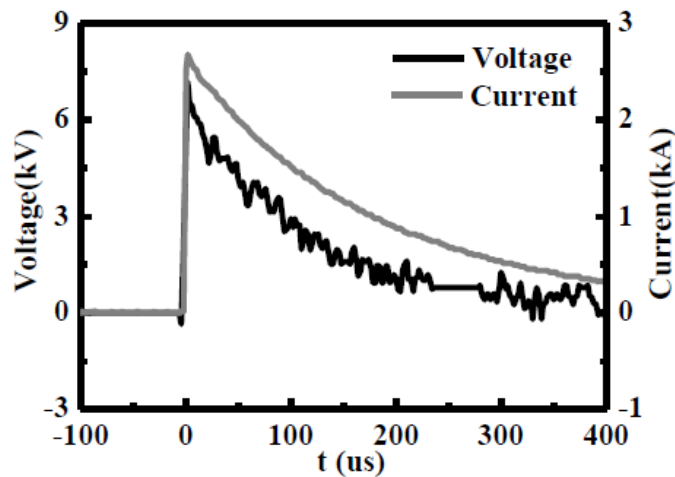
$$\eta = 0.236 + 1.9 \times 10^{-5} \rho \quad (3.3)$$

Ο Wentang Hu et al [3] ερευνούν στην εργασία τους την περίπτωση ενός βελτιωτικού υλικού (για το οποίο δεν αναφέρουν λεπτομέρειες σε ό,τι αφορά την σύσταση και την προέλευσή του) και το συγκρίνουν με το φυσικό έδαφος. Ενώ έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες για την καταπόνηση με ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας η περίπτωση της κρουστικής καταπόνησης παραμένει θολή. Αξίζει να

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

σημειωθεί ότι τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την περίπτωση καταπόνησης με χαμηλή συχνότητα δεν μπορούν να γενικευτούν στην περίπτωση της κρουστικής καταπόνησης καθώς τα δύο φαινόμενα διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Η δυσκολία οφείλεται κατά κύριο λόγο στο φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους αλλά και στην έμφυτη περιπλοκότητα που χαρακτηρίζει τα μεταβατικά φαινόμενα.

Στο πρώτο πείραμα εξετάστηκε η περίπτωση του φυσικού εδάφους. Στην περίπτωση καταπόνησης του ηλεκτροδίου με ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας η σύνθετη αντίσταση μετρήθηκε ίση με $20,1\Omega$. Στην περίπτωση κρουστικής καταπόνησης η κρουστική αντίσταση μετρήθηκε ίση με $2,67\Omega$ και το παλμογράφημα της τάσεως και του ρεύματος φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

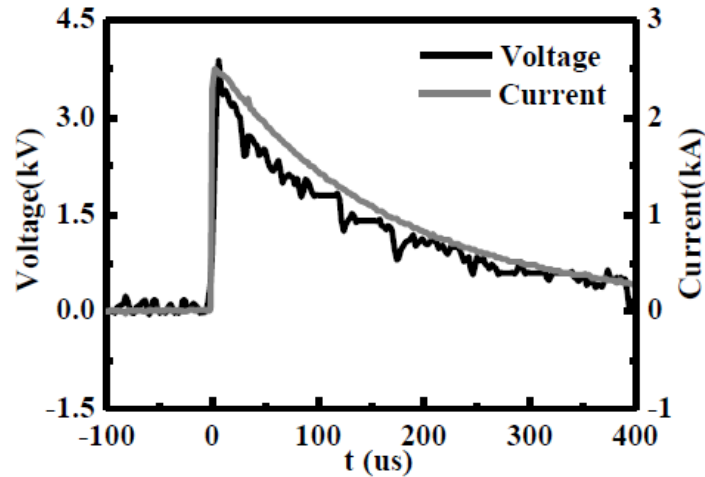


Σχήμα 3.2: Κρουστική καταπόνηση σε κατακόρυφο ηλεκτρόδιο εντός του φυσικού εδάφους [3]

Στο δεύτερο πείραμα εξετάστηκε η περίπτωση του βελτιωτικού υλικού. Στην περίπτωση καταπόνησης του ηλεκτροδίου με ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας η σύνθετη αντίσταση βρέθηκε ίση με $12,1\Omega$. Στην περίπτωση κρουστικής καταπόνησης η κρουστική αντίσταση βρέθηκε ίση με $1,49\Omega$ και το παλμογράφημα της τάσεως και του ρεύματος φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

Το όφελος του βελτιωτικού υλικού φαίνεται ξεκάθαρα στα μεγέθη που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Επίσης φαίνεται ξεκάθαρα το γεγονός ότι τα συμπεράσματα για την καταπόνηση βιομηχανικής συχνότητας δεν μπορούν να αναχθούν στην περίπτωση κρουστικής καταπόνησης παρά μόνο ποιοτικά. Η βελτίωση στην περίπτωση καταπόνησης με βιομηχανική συχνότητα ανέρχεται στο 60% ενώ στην περίπτωση κρουστικής καταπόνησης στο 52%.

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους



Σχήμα 3.3: Κρουστική καταπόνηση σε κατακόρυφο ηλεκτρόδιο εντός του βελτιωτικού υλικού [3]

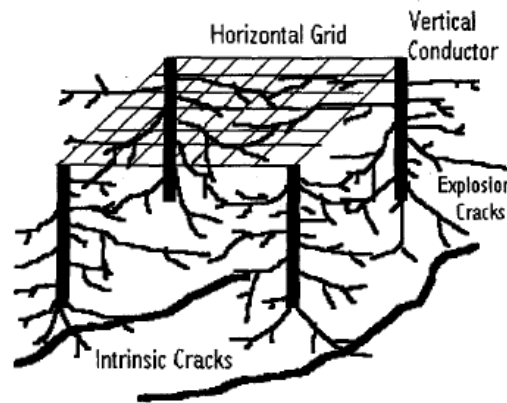
Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εργασία πάνω στα βελτιωτικά υλικά είναι εκείνη του Qingbo Meng et al [4]. Η μέθοδος η οποία προτείνουν περιγράφεται αναλυτικά στην εργασία τους και περιλαμβάνει τρία κυρίως βήματα 1) το άνοιγμα μιας βαθιάς οπής στην οποία θα τοποθετηθεί το ηλεκτρόδιο, 2) τη δημιουργία ρωγμών στο εσωτερικό της οπής με τη χρήση εκρηκτικού μηχανισμού και 3) την πλήρωση της οπής με υλικό χαμηλής αντίστασης υπό πίεση.

Η αντίσταση ενός τετραγωνικού πλέγματος γείωσης δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο $R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$ όπου A η επιφάνεια του πλέγματος και ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους. Αν η απαιτούμενη αντίσταση γείωσης είναι $0,5\Omega$ τότε ισχύει $A \cong \rho^2$. Είναι ξεκάθαρο ότι για μεγάλες τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους η επιφάνεια του πλέγματος γείωσης γίνεται απαγορευτικά μεγάλη οπότε η χρήση βελτιωτικών υλικών αποτελεί μονόδρομο.

Τα βελτιωτικά υλικά εδάφους είναι συνήθως μη οργανικά υλικά με ειδική αντίσταση μικρότερη από $5\Omega\text{m}$. Η βασική ιδέα της μεθόδου που προτείνεται φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η προτεινόμενη μέθοδος είναι οι εξής:

- 1) Επαφή με τα βαθιά στρώματα του εδάφους που έχουν χαμηλή αντίσταση.
- 2) Μείωση της αντίστασης επαφής.
- 3) Μείωση της αντίστασης διαρροής.
- 4) Σύνδεση με τις υπόγειες ρωγμές χαμηλής αντίστασης του εδάφους.



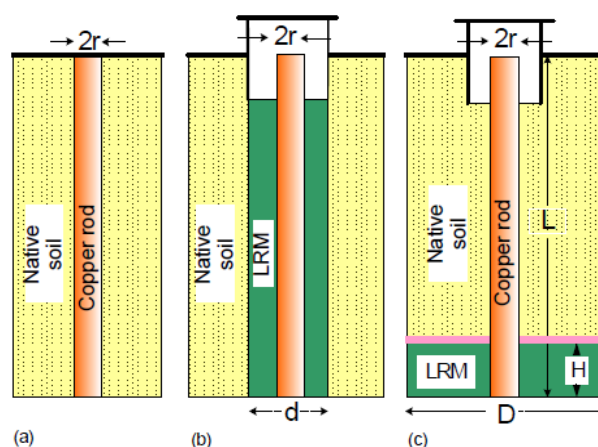
Σχήμα 3.4 Η προτεινόμενη μέθοδος από τον Qingbo Meng και την ομάδα του [4]

Στην εργασία του Y. Khan et al [5] αναφέρεται μια ιδιαίτερα χρήσιμη εφαρμογή πάνω στα βελτιωτικά υλικά και μάλιστα σε μια περιοχή με ιδιαίτερα ξηρό και άνυδρο έδαφος όπως η Σαουδική Αραβία.

Η σωστή λειτουργία ενός συστήματος γείωσης και η χαμηλή του αντίσταση απαιτείται κυρίως για τρεις λόγους:

- 1) Παροχή ενός σημείου αναφοράς δυναμικού για τη σωστή λειτουργία του εξοπλισμού και την ασφάλεια του προσωπικού.
- 2) Παροχή ενός σημείου εκτόνωσης για τα οδεύοντα κύματα, που οφείλονται σε κεραυνοπληξίες, καθώς και για την επιστροφή των ρευμάτων σφάλματος.
- 3) Πρόληψη υπερτάσεων στα συστήματα ισχύος.

Οι συγγραφείς μελέτησαν τρεις διαφορετικές διατάξεις όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Διατάξεις γείωσης: (a) Φυσικό έδαφος (b) Ηλεκτρόδιο με επικάλυψη LRM σε όλο το μήκος του (c) Ηλεκτρόδιο εμπλουτισμένο με LRM στην βάση του [5]

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

Η ωμική αντίσταση της διάταξης γείωσης της περίπτωσης (α) δίνεται από τη σχέση

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right\} + \left(\frac{r}{2L}\right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right) \quad (3.4)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους, r η ακτίνα του ηλεκτροδίου και L το μήκος του ηλεκτροδίου. Όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι αρκετά μεγάλη μπορούμε να τοποθετήσουμε πολλά ηλεκτρόδια παράλληλα, με την απόσταση μεταξύ τους να είναι τουλάχιστον διπλάσια από το μήκος του ηλεκτροδίου.

Η ωμική αντίσταση της διάταξης γείωσης της περίπτωσης (β) δίνεται από τη σχέση

$$R_2 = \frac{\rho_c}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right\} + \left(\frac{r}{2L}\right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right) + \frac{\rho - \rho_c}{2\pi L} \times \left(\ln \frac{2L}{d} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L}\right)^2} \right\} + \left(\frac{d}{2L}\right) - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L}\right)^2} \right) \quad (3.5)$$

όπου ρ_c η ειδική αντίσταση του βελτιωτικού υλικού.

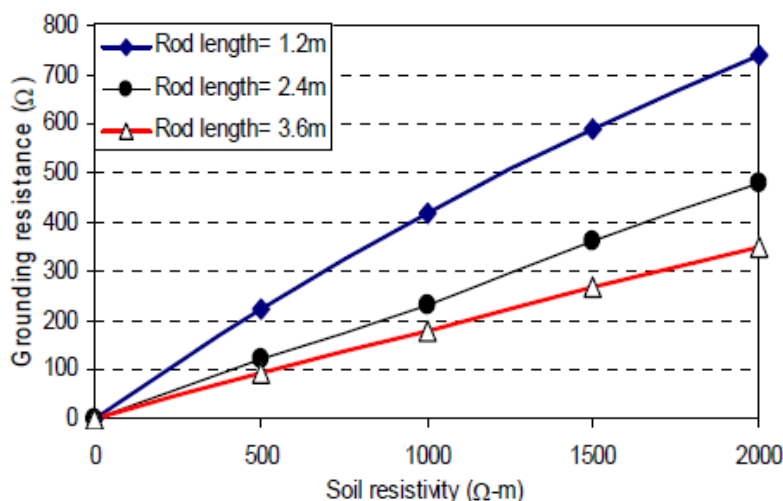
Η ωμική αντίσταση της διάταξης γείωσης της περίπτωσης (γ) δίνεται από τη σχέση

$$R_3 = \frac{\rho \cdot \rho_c}{2\pi [H\rho + (L-H)]\rho_c} \left(\ln \frac{2L}{r} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right\} + \left(\frac{r}{2L}\right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right) + \frac{H\rho(\rho - \rho_c)}{2\pi L [H\rho + (L-H)]\rho_c} \times \left(\ln \frac{2L}{D} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2L}\right)^2} \right\} + \left(\frac{D}{2L}\right) - \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2L}\right)^2} \right) \quad (3.6)$$

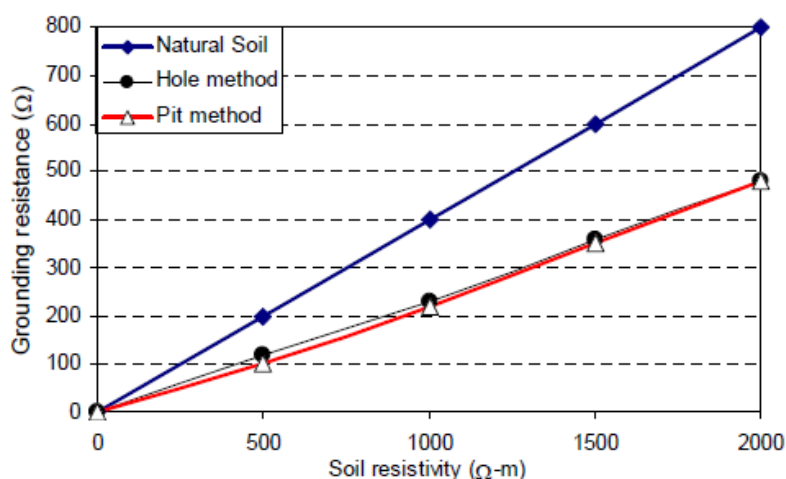
Στην περίπτωση (α) του φυσικού εδάφους η αντίσταση R_1 έχει μια σχεδόν γραμμική σχέση με την ειδική αντίσταση του εδάφους. Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται πως επηρεάζει το μήκος του ηλεκτροδίου την αντίσταση γείωσης στην περίπτωση (β). Το μήκος των 2,4m φαίνεται να είναι η πιο οικονομική επιλογή σε σχέση με τις άλλες δύο.

Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται μια σύγκριση μεταξύ των τριών μεθόδων για μήκος ηλεκτροδίου 2.4m και $\rho_c = 2\Omega m$. Η αποτελεσματικότητα των περιπτώσεων (β) και (γ) είναι σχεδόν ίδια.

Μια υλοποιήσιμη επίσης μέθοδος που εξυπηρετεί τη μείωση της αντίστασης γείωσης είναι η χρήση πολυμερών. Η πρώτη σχετική αναφορά καταγράφεται το 1993



Σχήμα 3.6 Επιλογή βέλτιστου μήκους ηλεκτροδίου για την μέθοδο (b) [5]



Σχήμα 3.7 Επιλογή βέλτιστης μεθόδου για σταθερό μήκος ηλεκτροδίου 2,4m [5]

σε δημοσίευση του Hiroshi Yamane et al [6]. Αναφέρουν ότι ο Sanik [6] είχε παρουσιάσει ένα ηλεκτρολυτικό τζελ με περιεκτικότητα φερροκυανιδίου χαλκού ενώ οι Clark και Watkins [6] πρότειναν μια μέθοδο έγχυσης υπό πίεση ενός μείγματος από πυριτικό άλας, γραφίτη και νερό. Αργότερα, οι Sato et al [6] παρουσίασαν μια μέθοδο χημικής διαμόρφωσης του περιβάλλοντος χώρου με ένα μείγμα μπετονίτη, νερού και χλωριούχου νατρίου (NaCl). Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να μειώσουν την αντίσταση γείωσης μέχρι και 60%. Μακροπρόθεσμα όμως η αντίσταση γείωσης μπορεί να αυξηθεί αρκετά καθώς τα υλικά αυτά ενδέχεται να απομακρυνθούν από το έδαφος. Επίσης σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας ο μπετονίτης χάνει τις ιδιότητές του με αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση της αντίστασης γείωσης.

Το 1999 και το 2000 ο C. Romualdo-Torres et al [7] μελέτησαν πειραματικά τη συμπεριφορά εννέα ηλεκτροδίων γείωσης. Σε μια τοποθεσία του Μεξικού

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

τοποθέτησαν εννέα ηλεκτρόδια, εκ των οποίων τα πέντε ήταν χημικά ηλεκτρόδια, δηλαδή είχαν στο εσωτερικό τους συγκεκριμένα χημικά βελτιωτικά, τα τρία ήταν απλά ηλεκτρόδια με περιμετρική προσθήκη βελτιωτικών υλικών και τέλος ένα ηλεκτρόδιο ήταν τοποθετημένο απευθείας στο φυσικό έδαφος λειτουργώντας ως ηλεκτρόδιο αναφοράς. Μηνιαίες μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους λαμβάνονταν με σκοπό τον προσδιορισμό της εποχικής μεταβολής των δύο αυτών παραμέτρων για κάθε τύπο ηλεκτροδίου. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έδειξαν καταρχάς ότι όλα τα ηλεκτρόδια με βελτιωτικά υλικά είχαν καλή επίδοση στην τιμή της αντίστασης γείωσης για όσο χρονικό διάστημα υπήρχε αρκετή υγρασία στο έδαφος λόγω των βροχοπτώσεων. Επίσης, ενώ ο μπετονίτης δεν προτιμάται για χρήση ως βελτιωτικό από τους συγγραφείς, παρουσίασε στο συγκεκριμένο πείραμα τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με όλα τα εμπορικά χημικά βελτιωτικά. Τονίζεται όμως, ότι σε εξαιρετικά παρατεταμένη περίοδο ξηρασίας είναι πιθανό ο μπετονίτης να εμφανίσει ρωγμές και συνεπώς να αυξηθεί σημαντικά η αντίσταση γείωσης που παρουσιάζει, αφού θα χειροτερεύσει η επαφή του με το ηλεκτρόδιο γείωσης. Πάντως, προτείνεται η χρήση απλών κατακόρυφων ηλεκτροδίων με τοποθέτηση περιμετρικά τους βελτιωτικών υλικών παρά η αγορά χημικών ηλεκτροδίων, τα οποία έχουν αρκετά μεγαλύτερο κόστος.

Το 2006 ο Shin-Der Chen et al [8] παρουσίασαν τη μελέτη τους πάνω στην πιθανή χρήση, ως βελτιωτικού υλικού γείωσης, ενός υποπροϊόντος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, της ιπτάμενης τέφρας. Η διαχείριση των αποβλήτων μπορεί να συντελέσει στη μείωση του κόστους διαχείρισής τους και της πιθανής μόλυνσης του περιβάλλοντος. Η ιπτάμενη τέφρα ήδη χρησιμοποιείται για την παρασκευή τσιμέντου και εφόσον βρέθηκε ότι επιπλέον εμφανίζει χαμηλή τιμή ειδικής αντίστασης αποφασίστηκε από τους συγγραφείς να αναλυθεί περαιτέρω το συγκεκριμένο υλικό. Πρώτα επιλέχθηκε, ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία, η καλύτερη δυνατή αναλογία ιπτάμενης τέφρας, τσιμέντου, νερού και αλατιού. Η τελική σύσταση προέκυψε λαμβάνοντας υπόψιν ότι η ειδική αντίσταση είναι ανάλογη της ποσότητας του τσιμέντου στο μείγμα και αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας αλατιού. Τον Ιανουάριο του 2002 στην Ταϊβάν τοποθετήθηκαν πέντε κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης στο έδαφος, εκ των οποίων τα τρία ήταν καλυμμένα μερικώς ή ολικώς με το βελτιωτικό μείγμα, ενώ τα υπόλοιπα δύο ήταν σε άμεση επαφή με τη γη.

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

Τα αποτελέσματα της μέτρησης της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων μετά από διάστημα ενός έτους έδειξαν ότι αυτά που περιβάλλονταν από βελτιωτικό υλικό εμφάνισαν μείωση στη μετρούμενη αντίσταση γείωσης μεγαλύτερη από 35% σε σύγκριση με τα ηλεκτρόδια αναφοράς. Συμπερασματικά, προτείνεται η χρήση αυτού του μείγματος για την αποτελεσματική μείωση της αντίστασης γείωσης.

Το 2008 ο Kumarasinghe [9] από το τμήμα Μετεωρολογίας της Σρι Λάνκα πρότεινε ένα χαμηλού κόστους σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χωριό στη Σρι Λάνκα. Διεξήγαγε ένα πείραμα στο οποίο χρησιμοποίησε ως βελτιωτικά υλικά εδάφους φυσικά υλικά, όπως τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας και σκόνη ρυζιού. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα από τη χρήση μπετονίτη. Τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν έδειξαν ότι αυτά τα φυσικά βελτιωτικά εδάφους ήταν εξίσου καλά με τον μπετονίτη για τη βελτίωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Το 2010 ο J. Jasni et al. [9] μελέτησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες φυσικών βελτιωτικών εδάφους, ως εναλλακτικές λύσεις έναντι του μπετονίτη. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν μπετονίτης, τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, κηπευτικό αργιλώδες χώμα και σκόνη ρυζιού. Εγκαταστάθηκαν για το σκοπό αυτό πέντε ηλεκτρόδια και εφαρμόστηκε ο κανόνας του 61,8% της μεθόδου πτώσεως δυναμικού. Τα αποτελέσματα μετά από 138 ημέρες μετρήσεων έδειξαν ότι η απόδοση των ηλεκτροδίων με βελτιωτικά εδάφους ήταν σημαντικά διαφορετική από την αντίστοιχη των ηλεκτροδίων που είχαν εγκατασταθεί απευθείας στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, αυτά τα υλικά καταφέρνουν να διατηρούν με μεγάλη επιτυχία την υγρασία του εδάφους και να μειώνουν αποτελεσματικά την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη διάχυση του ρεύματος μέσα στο έδαφος. Ειδικότερα, το αργιλώδες κηπευτικό χώμα παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές από τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά σε βάθος χρόνου και εμφάνισε την καλύτερη ικανότητα διατήρησης της υγρασίας εδάφους, αναδεικνύοντάς το ως το πιο αποτελεσματικό βελτιωτικό σε σύγκριση με τα άλλα που μελετήθηκαν.

Το 2012 ο Siow Chun Lim et al. [10] παρουσίασαν στο Διεθνές Συνέδριο Αντικεραυνικής Προστασίας (ICLP) που διεξήχθη στη Βιέννη, τα αποτελέσματα της έρευνάς τους σχετικά με τη συμπεριφορά μείγματος μπετονίτη και σκυροδέματος ως βελτιωτικό υλικό γείωσης. Η διάταξη του συστήματος γείωσης αποτελείται από

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

μεταλλικούς κλωβούς χάλυβα θαμμένους σε τοποθεσία με σχετικά ομοιογενή επιφανειακή ειδική αντίσταση εδάφους 100Ωm. Σε αυτούς έγινε προσθήκη του νέου μείγματος από μπετονίτη και σκυρόδεμα σε αναλογίες μπετονίτη στο μείγμα 0%, 10%, 20% , 30%, 40%, 50%, 60% και 70%, ενώ το υπόλοιπο ήταν τσιμέντο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης γείωσης, αρχικά έδειξαν ότι στην περίπτωση μείγματος με ποσοστό μπετονίτη 20% υπήρξε μείωση της αντίστασης γείωσης σε σύγκριση με την τιμή που παρουσίασε ο κλωβός με σκυρόδεμα μόνο γύρω του, ο οποίος είναι και ο κλωβός αναφοράς. Σε βάθος χρόνου πέντε μηνών κατέστη προφανές, ότι όλα τα μείγματα με μπετονίτη στη σύστασή τους είχαν χειρότερη επίδοση από το απλό σκυρόδεμα, όμως πρέπει να σημειωθεί ότι παρουσίαζαν μεγαλύτερη σταθερότητα. Συνεπώς, αποδείχτηκε στην έρευνα αυτή ότι η χρήση μείγματος μπετονίτη με σκυρόδεμα δε βελτιώνει τη μετρούμενη αντίσταση γείωσης του συστήματος και ότι η συμπεριφορά του σκυροδέματος ως βελτιωτικό υλικό γείωσης είναι εξαιρετική.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της μεταβατικής συμπεριφοράς ορισμένων βελτιωτικών υλικών εδάφους. Λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις αναφέρονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] BS EN 62561-7:2012, «Lightning Protection System Components (LPSC)», Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds.
- [2] “Influences of Low-Resistivity-Materials on Lightning Impulse Properties of Grounding Devices” Youping Tu, Jinliang He, Rong Zeng
- [3] “A Testing Research on the Effect of Conductive Backfill on Reducing grounding Resistance under Lightning” Wentang Hu, Shaofeng Yu, Rui Cheng και Jinliang He, ICLP, Vienna 2012
- [4] “A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions” Qingbo Meng, Jinliang He, F. P. Dawalibi και J. IEEE Transactions 1999
- [5] “Efficient Use of Low Resistivity Material For Grounding Resistance Reduction in High Soil Resistivity Areas” Y. Khan, N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, M. I. Qureshi, and F. R. Pazheri, TENCON, Fukuoka 2010
- [6] Hiroshi Yamane, Tsuyoshi Ideguchi, and Masamitsu Tokuda, «New Ground Resistance-Reducing Material Based on Water-Absorbent Polymer», Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol. 77, No. 5, 1994.
- [7] C. Romualdo-Torres, R. Velázquez-Sánchez, J. Loza-Rodríguez, «The Application of Backfills for Improving the Grounding Resistance of Power Systems», IEEE 2006.
- [8] Shin-Der Chen, Li-Hsiung Chen, Chih-Kun Cheng, Jiann-Fuh Chen, «An Experimental Study on the Electrical Properties of Fly Ash in the Grounding System», International Journal of Emerging Electric Power Systems Volume 7, Issue 2, 2006.
- [9] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [10] Siow Chun Lim, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Chandima Gomes και Sani Dahiru Buba, «Preliminary Results of the Performance of Grounding Electrodes Encased in Bentonite-Mixed Concrete», International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, 2012.
- [11] Αυγερινός-Βασίλειος Σακελλαρίου, «Επίδραση του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014.

Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους

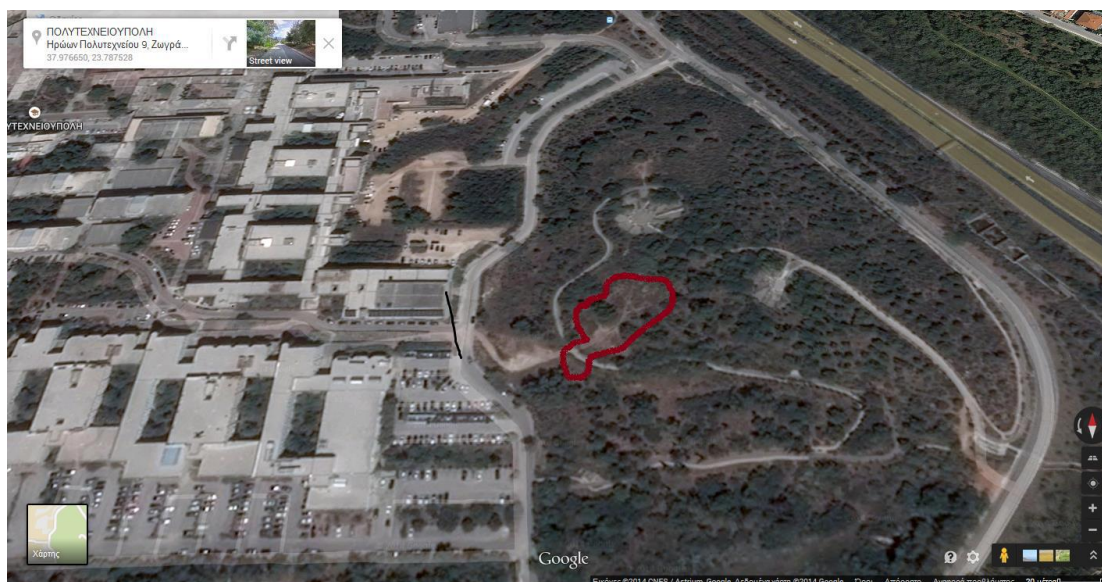
Κεφάλαιο 4

Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη μπορεί να διαχωριστεί στο σταθερό και στο κινητό μέρος. Το σταθερό μέρος αποτελείται από τα ηλεκτρόδια γείωσης τα οποία είναι τοποθετημένα μόνιμα στο έδαφος και εξυπηρετούν τις ανάγκες διαφόρων πειραματικών μετρήσεων ενώ το κινητό μέρος αποτελείται από τον πειραματικό εξοπλισμό δηλαδή συσκευές μέτρησης, γεννήτριες, καλώδια κλπ.

4.1 Τοποθεσία πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη των ηλεκτροδίων γείωσης βρίσκεται στην κορυφή του λοφίσκου που βρίσκεται δίπλα από τα κτίρια των Χημικών Μηχανικών, τα παλιά κτίρια των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και το υπαίθριο πάρκινγκ ακριβώς όπως φαίνεται στην δορυφορική απεικόνιση της Εικόνας 4.1.



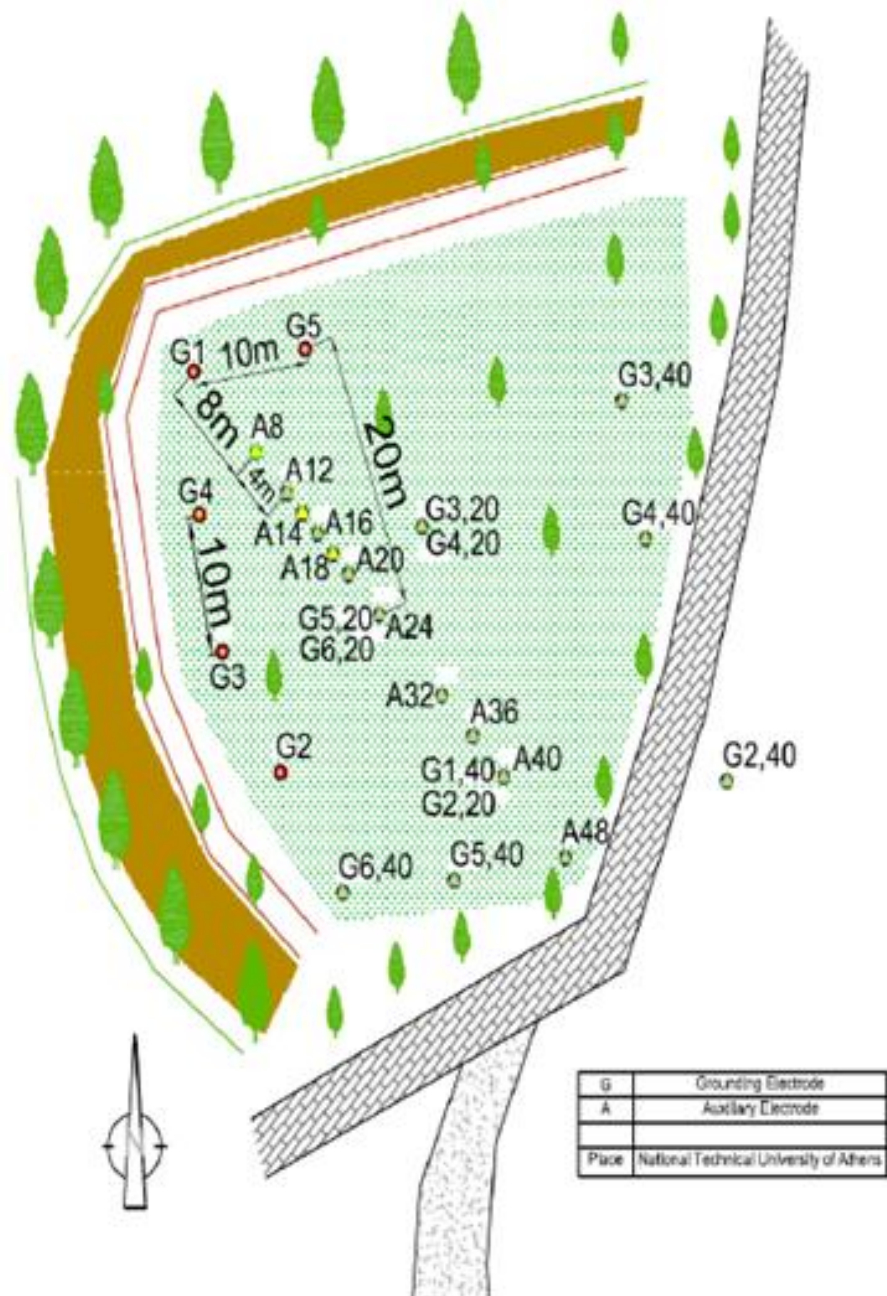
Εικόνα 4.1: Δορυφορική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης [1]

Στον περικυκλωμένο χώρο με κόκκινη γραμμή όπως φαίνεται στον παραπάνω χάρτη τοποθετήθηκαν το 2011 πέντε κύρια ηλεκτρόδια ράβδου St/e-Cu τύπου Α διαστάσεων 17x1500mm, με πάχος επιχάλκωσης 254μm, σε απόσταση 10m το ένα από το άλλο, εκ των οποίων τα τέσσερα μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης και το ένα

Πειραματική Διάταξη

απευθείας στο φυσικό έδαφος, σε διάταξη όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2 ως εξής:

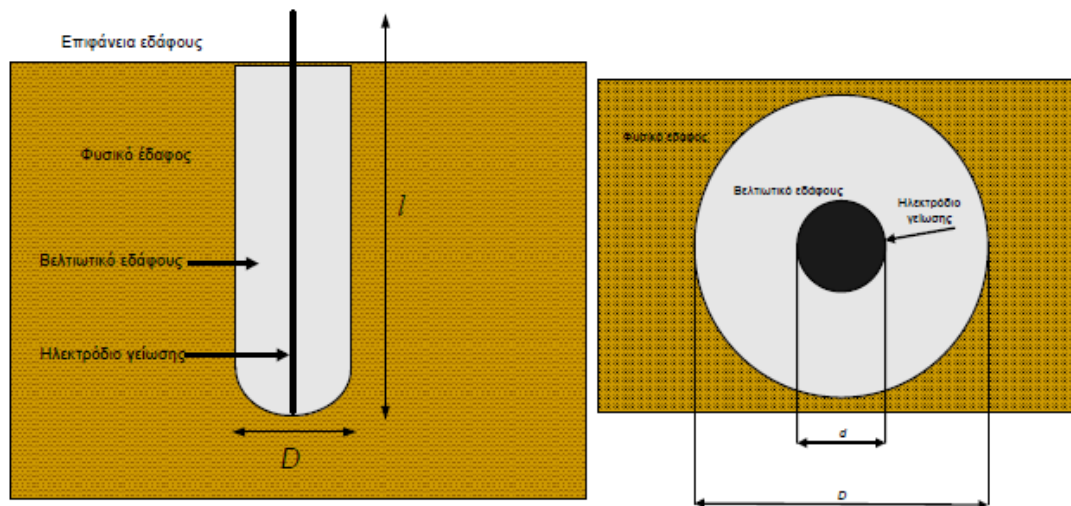
- Ηλεκτρόδιο G1: Φυσικό έδαφος
- Ηλεκτρόδιο G2: Σκυρόδεμα
- Ηλεκτρόδιο G3: Μπεντονίτης
- Ηλεκτρόδιο G4: Χημικό υλικό A
- Ηλεκτρόδιο G5: Χημικό υλικό B



Εικόνα 4.2: Κάτοψη της πειραματικής διάταξης [2]

Πειραματική Διάταξη

Επίσης, τοποθετήθηκαν μόνιμα στο έδαφος σε διάφορες θέσεις δεκαπέντε βοηθητικά ηλεκτρόδια, του ίδιου τύπου με τα κύρια, αλλά μήκους 0,5m, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης ρ του εδάφους με τη μέθοδο Wenner και της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων R .



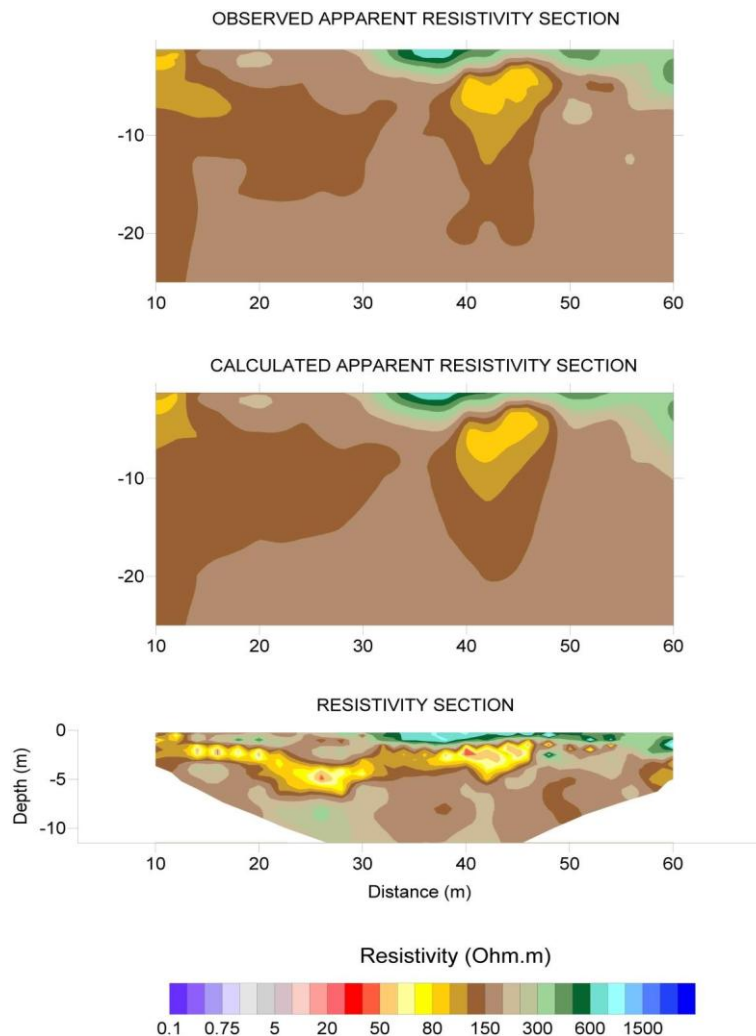
Εικόνα 4.3: Ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετημένο μέσα στο βελτιωτικό έδαφος [2]

Το έδαφος της παραπάνω περιοχής χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκη άμμος με χαλίκια και κροκάλες. Όπως αναφέρεται στη μελέτη των Φραγκογιάννη, Παπαθεοδώρου και Σταματάκη [4] έγινε δειγματοληψία χώματος από την εν λόγω περιοχή και τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης έδειξαν ότι, το συγκεκριμένο έδαφος αποτελείται από χαλίκι και κροκάλες σε ποσοστό 54,78%, άμμο σε ποσοστό 39,47% και άργιλο σε ποσοστό 5,74%. Το σύστημα κατηγοριοποίησης του εδάφους που εφαρμόστηκε ήταν κατά *AASTHO* [4]. Τέλος, ο συγκεκριμένος τύπος χώματος εξετάστηκε και βρέθηκε ότι είναι υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το νερό αποστραγγίζεται πολύ γρήγορα από το έδαφος και συνεπώς η ικανότητα του να συγκρατεί το νερό είναι μικρή σε σχέση με άλλους τύπους εδαφών.

Στα πλαίσια της περαιτέρω διερεύνησης της δομής του εδάφους στο χώρο εγκατάστασης της διάταξης των ηλεκτροδίων, ο Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας [2], σε συνεργασία με το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, εφάρμοσε τη μέθοδο της ηλεκτροτομογραφίας. Μέσω αυτής πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής σάρωση του υπεδάφους, από τα αποτελέσματα της οποίας προέκυψε μια αναλυτική

Πειραματική Διάταξη

εικόνα για την κατανομή των τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους ανά στρώμα και βάθος, όπως παρατίθεται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Γράφημα ηλεκτροτομογραφίας στο χώρο του πειράματος [2]

Από τα αποτελέσματα του γραφήματος φαίνεται ότι υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα το οποίο, από το μέσο του προφίλ και προς τη νότια κατεύθυνση, εμφανίζει πολύ υψηλή ειδική αντίσταση, πιθανόν διότι συνίσταται από πυκνή κροκαλοπαγή δομή. Αντίθετα, προς την άλλη πλευρά (προς βόρεια) το εν λόγω στρώμα εμφανίζει μια πιο χαλαρή συμπεριφορά. Στο διάστημα μεταξύ 10m και 47m και σε βάθος 1 έως 6m από την επιφάνεια, ανιχνεύεται αργιλικό στρώμα με κάπως στρογγυλεμένες πέτρες, μέσου πάχους 2m και ειδικής αντίστασης περίπου $80\Omega\text{m}$. Το τελευταίο σε βάθος στρώμα είναι ένα συνεκτικά κροκαλολατιποπαγές στρώμα υπεδάφους, που περιλαμβάνει καστανόχρωμες χερσαίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις, δηλαδή

Πειραματική Διάταξη

συνεκτικούς αργιλοπηλούς με διάσπαρτες κροκάλες και λατίπες. Η ειδική αντίσταση που παρουσιάζει το εν λόγω στρώμα είναι της τάξης των $150\Omega\text{m}$ [2].

4.2 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων αποτελείται από τις εξής συσκευές-εξαρτήματα:

- Κρουστική γεννήτρια ρεύματος
- Παλμογράφος
- Ομοαξονικά καλώδια
- Βενζινογεννήτρια
- Σταθεροποιητής τάσης
- Διαφορικό probe

4.2.1 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. Η γεννήτρια παράγει κρουστικά ρεύματα με κυματομορφή 8/20 μs και μέγιστη τιμή ρεύματος που κυμαίνεται από 0,5 έως 25kA. Η γεννήτρια διαθέτει δύο εξόδους, οι οποίες μέσω ενός καταμεριστή με λόγο καταμερισμού 1000:1 και μιας αντίστασης μέτρησης 1m Ω δίνουν αντιστοίχως την τάση και το ρεύμα εξόδου υποβαθμισμένα σε επίπεδα κατάλληλα ώστε να μετρηθούν από τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης (παλμογράφος). Έτσι, εάν για παράδειγμα το πραγματικό ρεύμα εξόδου είναι 5kA, στην έξοδο της γεννήτριας και συνεπώς στον παλμογράφο θα λάβουμε 5V \rightarrow 5kA.

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” οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμά μας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αναλυτικά στοιχεία της κρουστικής γεννήτριας ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004.

Πειραματική Διάταξη

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 kΩ
Εξωτερική έξοδος ενεργοποίησης	10 V at 1 kΩ
Μέγιστη τιμή τάσης φόρτισης, προσαρμόσιμη	0,2 – 10 kV, ±2%
Πολικότητα παλμού εξόδου	POS/NEG/ALT
Μέγιστη αποθηκευόμενη ενέργεια	1500 J
Πυκνωτής αποθήκευσης ενέργειας, standard έκδοση	30 μF/ 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 μs, 25 kA
Κρουστικό ρεύμα εξόδου, ρυθμιζόμενο μέσω της τάσης φόρτισης	2-25 kA ± 5%
Κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος εξόδου, σύμφωνα με IEC 60	8 / 20 μs ± 20%
Κυμάτωση ("ringing")	< 30 %
Αντίσταση μέτρησης ρεύματος, ενσωματωμένη	1 mΩ, 20 MHz

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά κρουστικής γεννήτριας ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004 [3]

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η κρουστική γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 4.5: Κρουστική γεννήτρια ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004 [3]

Γυρνώντας το κλειδί που βρίσκεται στο κάτω αριστερό άκρο της πρόσοψης της γεννήτριας, η συσκευή ενεργοποιείται. Στην κεντρική οθόνη της γεννήτριας εμφανίζονται τέσσερις επιλογές, σχετικές με τον επιθυμητό τρόπο διεξαγωγής των δοκιμών (χειροκίνητα ή αυτόματα). Το σύστημα δε βρίσκεται υπό τάση και γι' αυτό το λόγο είναι αναμμένη η πράσινη ένδειξη, τόσο στο ταμπλό της γεννήτριας, όσο και στο επάνω μέρος της (Εικόνα 4.6).

Όπως έχει προαναφερθεί, στην παρούσα διπλωματική εργασία όλες οι δοκιμές έγιναν χειροκίνητα "Manual Test". Με την επιλογή της αντίστοιχης λειτουργίας, ανάβει η κόκκινη ένδειξη, κάτι που σημαίνει πως οποιαδήποτε στιγμή το σύστημα

Πειραματική Διάταξη

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



Εικόνα 4.6: Εμπρόσθια όψη γεννήτριας [3]

βραχυκύκλωσης, την πολικότητα, το χρόνο μεταξύ των επαναλήψεων και τον αριθμό παλμών, καθώς και το είδος της κυματομορφής (8/20 μ s) (Εικόνα 4.7).

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



Εικόνα 4.7: Ρύθμιση τάσης φόρτισης της γεννήτριας υπό τάση [3]

Πειραματική Διάταξη

4.2.2 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος Tektronix TDS 2014C, που είναι ένα από τα πιο σύγχρονα μοντέλα της εταιρίας, διαθέτει 4 κανάλια, ενώ διαθέτει και θύρα USB για τη διασύνδεση με εκτυπωτή ή αποθηκευτικό μέσο (USB Flash Drive). Να σημειωθεί εδώ ότι για τις μετρήσεις μας χρησιμοποιήθηκαν τα κανάλια CH2 και CH3. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο παλμογράφος (Εικόνα 4.8), καθώς και ένας πίνακας με τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 4.2).



Εικόνα 4.8: Εμπρόσθια όψη παλμογράφου Tektronix TDS 2014C [3]

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 [3]

Πειραματική Διάταξη

4.2.3 Ομοαξονικά καλώδια

Για τη σύνδεση της πειραματικής διάταξης με τα κανάλια CH2 και CH3 του παλμογράφου, χρησιμοποιήθηκαν ομοαξονικά καλώδια τύπου RG 223U MIL-C-17 50 Ω.

4.2.4 Βενζινογεννήτρια

Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης παροχής τάσης στον υπαίθριο χώρο που διεξάγονται οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η βενζινογεννήτρια SINCR8 που φαίνεται στην Εικόνα 4.9. Τα τεχνικά της χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 4.3.

Κινητήρας	Τετράχρονος, Μονοκύλινδρος, Αερόψυκτος
Καύσιμο	Αμόλυβδη βενζίνη
Ισχύς	3kW
Τάση	230V
Ρεύμα	13A
Συχνότητα	50Hz
Στροφές	3000rpm
Cosφ	1
Βάρος	35kg

Πίνακας 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά της ντιζελογεννήτριας SINCR8



Εικόνα 4.9: Βενζινογεννήτρια SINCR8

4.2.5 Σταθεροποιητής τάσης

Μεταξύ της βενζινογεννήτριας που αποτελεί την πηγή τροφοδότησης και του πειραματικού κυκλώματος παρεμβάλλεται ένας σταθεροποιητής τάσης, καθώς η απευθείας τροφοδότηση ηλεκτρονικών συσκευών όπως ο παλμογράφος και ο φορητός Η/Υ θεωρείται επικίνδυνη. Ο σταθεροποιητής τάσης που φαίνεται στην

Πειραματική Διάταξη

Εικόνα 4.10 αποτελεί ιδιοκατασκευή του εργαστηρίου φωτοτεχνίας ΕΜΠ και παρέχει στην έξοδό του σταθερή τάση 230V.



Εικόνα 4.10: Σταθεροποιητής τάσης

4.2.6 Διαφορικό probe

Για την ακριβέστερη μέτρηση της τάσης θεωρείται προτιμότερη η χρήση ενός διαφορικού probe. Το probe αυτό συνδέεται μεταξύ του παλμογράφου και ενός τρίτου ηλεκτροδίου, το οποίο είναι τοποθετημένο σε άξονα κάθετο προς την ευθεία που ενώνει το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο με το ηλεκτρόδιο της απόμακρης γης. Το διαφορικό probe που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο PINTECH PT80W που φαίνεται στην Εικόνα 4.11.

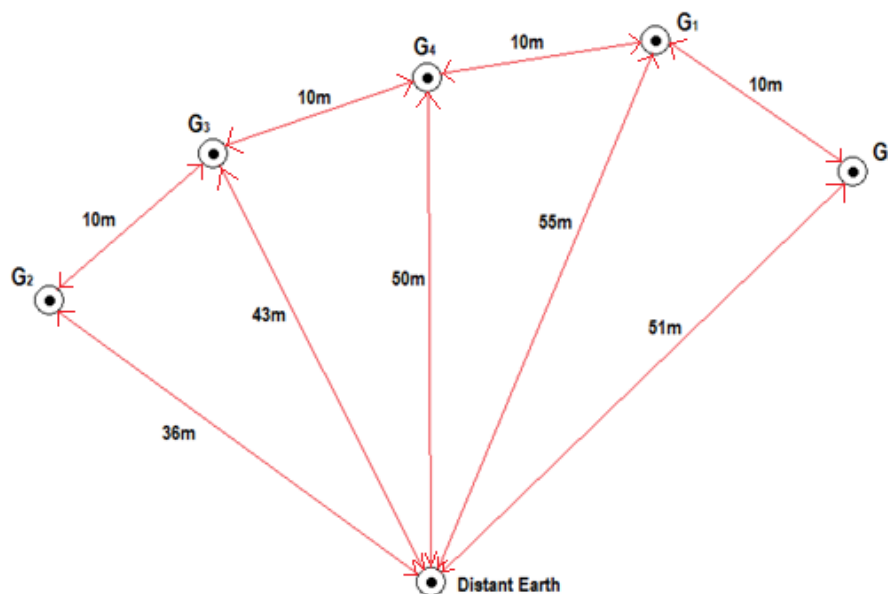


Εικόνα 4.11: Διαφορικό probe

Πειραματική Διάταξη

4.3 Διεξαγωγή των μετρήσεων

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ηλεκτροδίων γείωσης, που είναι εγκιβωτισμένα σε βελτιωτικά υλικά εδάφους, στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Για τους σκοπούς του πειράματος εγκαταστάθηκαν πέντε ηλεκτρόδια γείωσης σύμφωνα με τη διάταξη της Εικόνας 4.12.



Εικόνα 4.12: Διάταξη ηλεκτροδίων

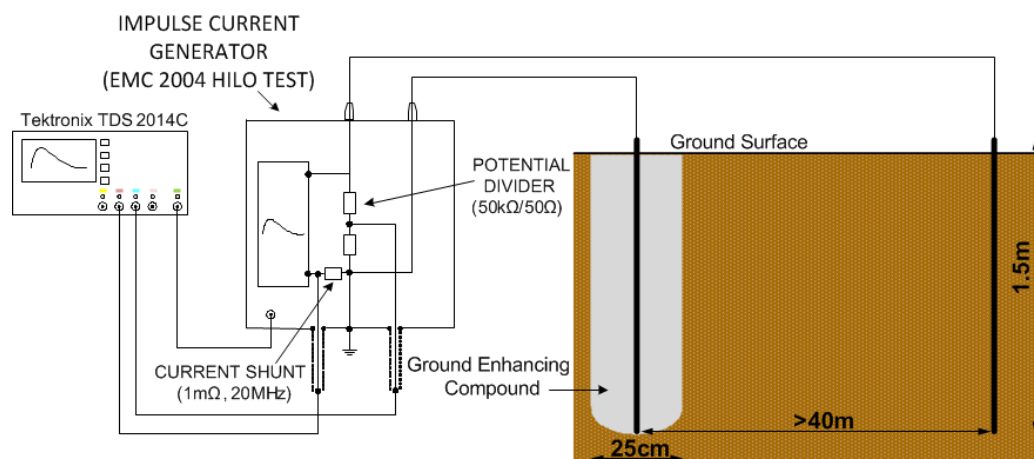
- Ηλεκτρόδιο G1: Φυσικό έδαφος
- Ηλεκτρόδιο G2: Σκυρόδεμα
- Ηλεκτρόδιο G3: Μπεντονίτης
- Ηλεκτρόδιο G4: Χημικό υλικό A
- Ηλεκτρόδιο G5: Χημικό υλικό B

Σε κάποια από τα πέντε ηλεκτρόδια λαμβάνονται μετρήσεις με δύο διαφορετικούς τρόπους που αφορούν τον τρόπο μέτρησης της τάσης. Στην πρώτη περίπτωση η μέτρηση της τάσης γίνεται απευθείας από τον καταμεριστή τάσης που είναι ενσωματωμένος στην κρουστική γεννήτρια ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ένα διαφορικό probe και ένα ηλεκτρόδιο στον κάθετο άξονα της ευθείας που ενώνει το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο με το ηλεκτρόδιο της απόμακρης γης σε απόσταση μεγαλύτερη των 20 μέτρων. Το ρεύμα μετριέται και στις δυο περιπτώσεις μέσω του current shunt που είναι ενσωματωμένο στην κρουστική

Πειραματική Διάταξη

γεννήτρια. Σε κάθε ηλεκτρόδιο λαμβάνονται από πέντε μετρήσεις, κατά μέσο όρο, σε οκτώ διαφορετικές στάθμες φόρτισης. Οι στάθμες αυτές είναι -4kV, -6kV, -8kV, -10kV, +4kV, +6kV, +8kV, +10kV. Η κρουστική τάση δοκιμής είναι της μορφής 8/20μs.

Το κύκλωμα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στην Εικόνα 4.13 ενώ στην Εικόνα 4.14 φαίνεται η διάταξη για ένα από τα πέντε ηλεκτρόδια γείωσης.



Εικόνα 4.13: Κύκλωμα πειραματικής διάταξης



Εικόνα 4.14: Πειραματική διάταξη

Πειραματική Διάταξη

Λόγω του βάρους και του όγκου του εξοπλισμού της πειραματικής διάταξης υπήρχε μια ιδιαίτερη δυσκολία στη μεταφορά του και στη διεξαγωγή των μετρήσεων. Οι εικόνες 4.15 και 4.16 είναι ενδεικτικές των δύσκολων συνθηκών διεξαγωγής του πειράματος.



Εικόνα 4.15: Μεταφορά του εξοπλισμού στην τοποθεσία του πειράματος



Εικόνα 4.16: Λήψη μετρήσεων σε συνθήκες καύσωνα το μήνα Ιούλιο

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται η αναλυτική επεξεργασία των μετρήσεων καθώς και των συμπερασμάτων που προκύπτουν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αυγερινός-Βασίλειος Σακελλαρίου, «Επίδραση του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014.
- [2] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [3] Δημήτριος Κ. Αναγνωστόπουλος, «Πειραματική μελέτη μεταβατικής αντίστασης γείωσης με χρήση υπό κλίμακα μοντέλων», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2013.
- [4] Fragogiannis Georgios, Papatheodorou Nikolaos and Prof. Stamataki Sofia, “Evaluation of Thermal Performance of Ground - Source Energy Systems. A Geophysics Supported Approach”, World Renewable Energy Congress (WRECX), 2008.

Κεφάλαιο 5

Παρουσίαση Μετρήσεων

Με βάση την περιγραφή της πειραματικής διάταξης που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν όλες οι μετρήσεις που ελήφθησαν για τις ανάγκες του πειράματος καθώς και η επεξεργασία τους.

Στο χώρο του πειράματος πραγματοποιήθηκαν συνολικά τέσσερις επισκέψεις στις παρακάτω ημερομηνίες,

- 10 Ιουλίου 2014
- 29 Οκτωβρίου 2014
- 4 Νοεμβρίου 2014
- 13 Νοεμβρίου 2014

Σε κάθε ένα από τα πέντε ηλεκτρόδια γείωσης λαμβάνονται μετρήσεις σε οκτώ διαφορετικές στάθμες φόρτισης που αφορούν τη μέγιστη τιμή της τάσης. Οι στάθμες φόρτισης είναι +4kV, +6kV, +8kV, +10kV, -4kV, -6kV, -8kV και -10kV. Σε κάθε στάθμη λαμβάνονται πέντε μεμονωμένες μετρήσεις. Σε κάθε μεμονωμένη μέτρηση καταγράφεται μια κυματομορφή τάσης και μια κυματομορφή ρεύματος. Με βάση την μορφή των κυματομορφών κρίθηκε κατάλληλος ο υπολογισμός της παραμέτρου Z_4 που ορίζεται ως ο λόγος της τιμής της τάσης όταν το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος. Πριν τον υπολογισμό της παραμέτρου Z_4 τόσο η κυματομορφή τάσης όσο και η κυματομορφή ρεύματος υφίστανται κατάλληλη εξομάλυνση προκειμένου να εξαλειφθεί ο θόρυβος που εμπεριέχουν. Η κρουστική τάση που εφαρμόζεται από την κρουστική γεννήτρια είναι της μορφής 8/20μs.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις που καταγράφηκαν ανά ηλεκτρόδιο γείωσης.

5.1 Φυσικό έδαφος

Στο φυσικό έδαφος ελήφθησαν μετρήσεις στις 10 Ιουλίου 2014 και στις 13 Νοεμβρίου 2014. Στους πίνακες που ακολουθούν εμπεριέχονται οι τιμές της παραμέτρου Z_4 και για τις δυο ημερομηνίες καθώς και ο μέσος όρος τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά παλμογραφήματα. Η παράμετρος R_{SS} αντιστοιχεί στην αντίσταση μόνιμης κατάστασης λειτουργίας.

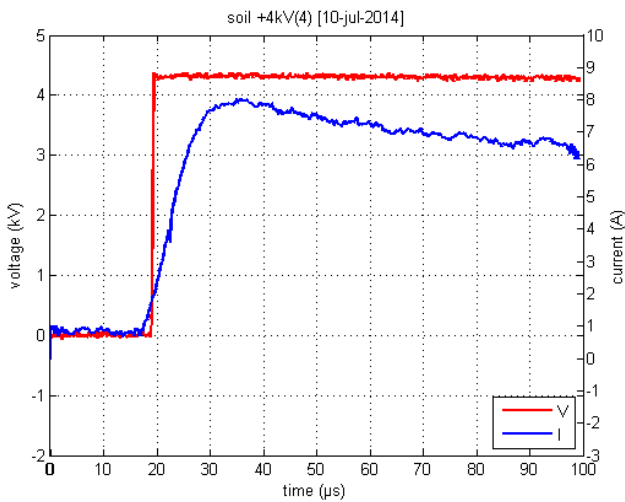
Παρουσίαση Μετρήσεων

Φυσικό έδαφος ($R_{SS}=486\Omega$)

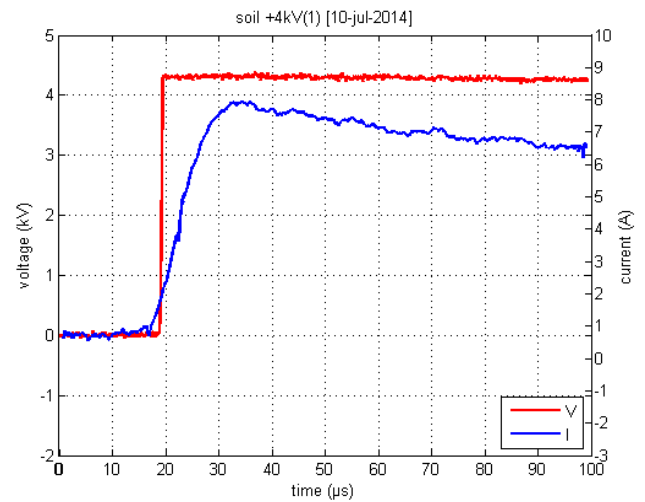
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	510,90	441,49	418,75	397,59	544,70	553,66	496,87	454,66
2 ^η	441,67	423,34	426,82	388,80	592,30	551,16	497,95	457,38
3 ^η	443,72	437,65	435,52	396,81	613,96	545,02	494,51	456,18
4 ^η	488,75	430,72	427,07	394,13	570,42	523,89	500,38	427,41
5 ^η	496,80	438,73	432,69	391,31	603,07	553,67	489,25	449,48
MO	476,36	434,38	428,17	393,72	584,89	545,48	495,79	449,02

Πίνακας 5.1: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 10 Ιουλίου 2014 για το φυσικό έδαφος.

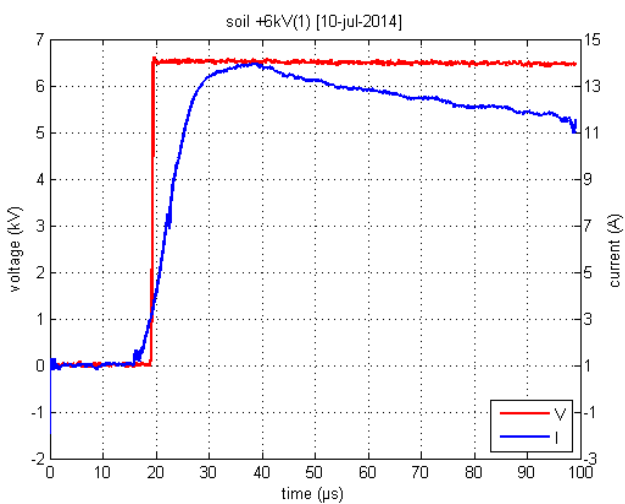
Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.



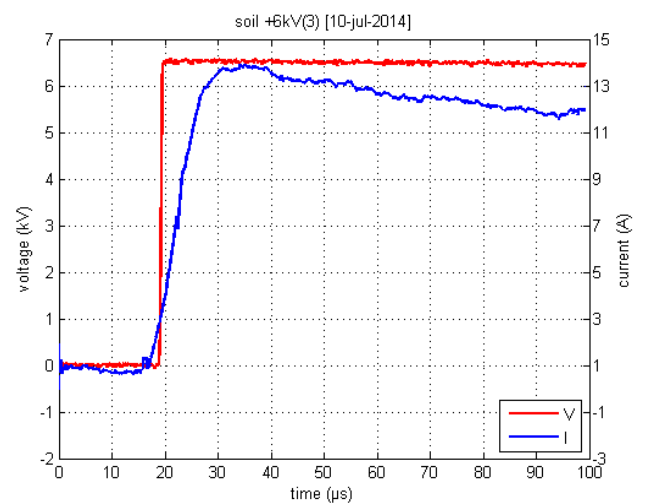
Εικόνα 5.1: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +4kV



Εικόνα 5.2: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +4kV

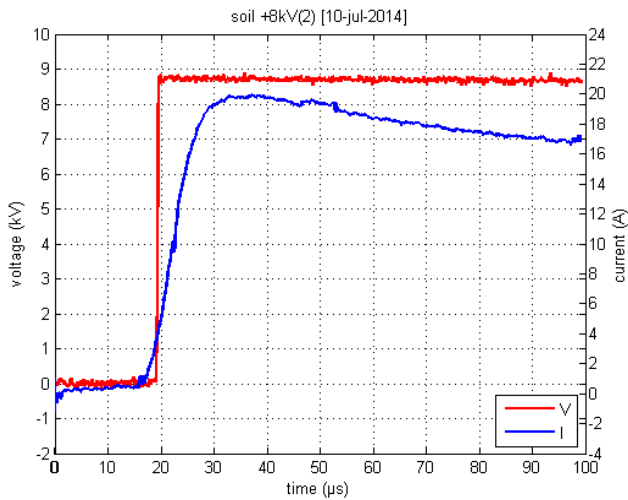


Εικόνα 5.3: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +6kV

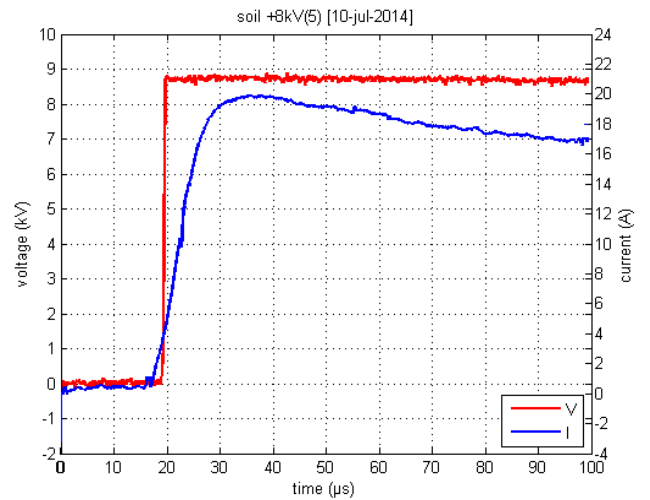


Εικόνα 5.4: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +6kV

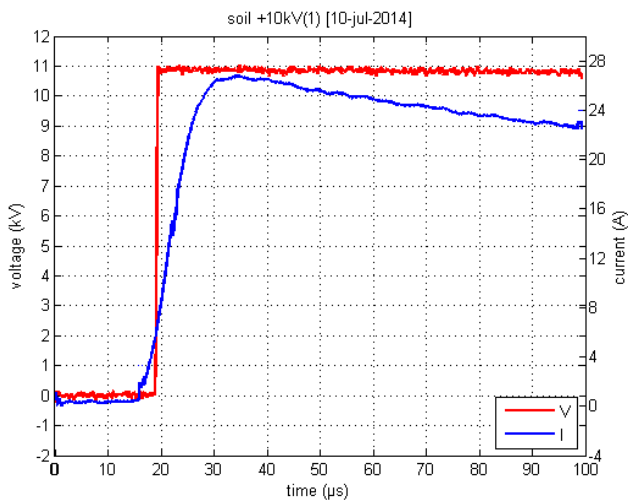
Παρουσίαση Μετρήσεων



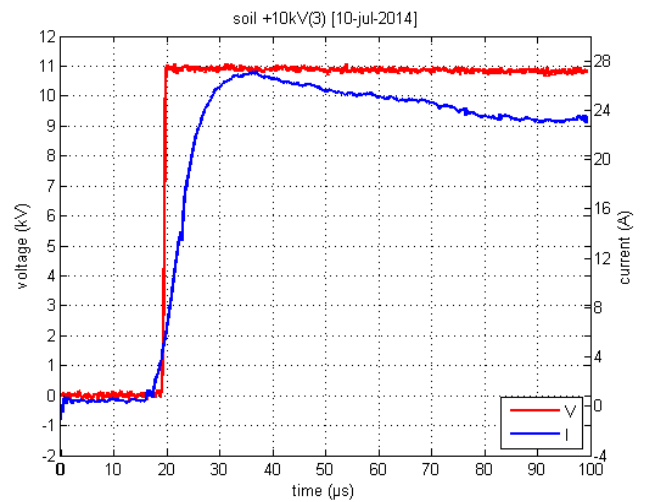
Εικόνα 5.5: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +8kV



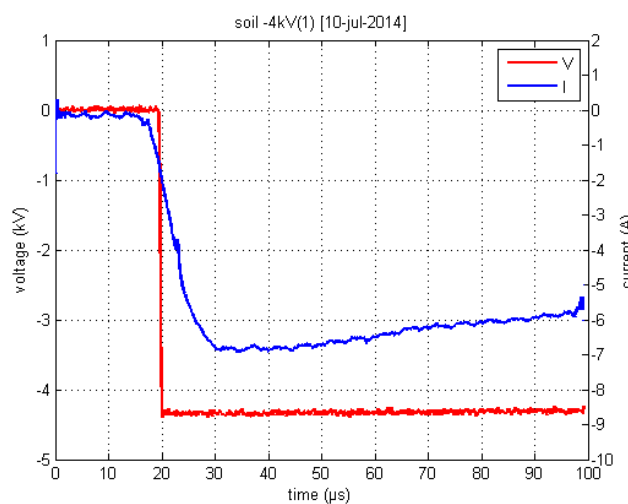
Εικόνα 5.6: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +8kV



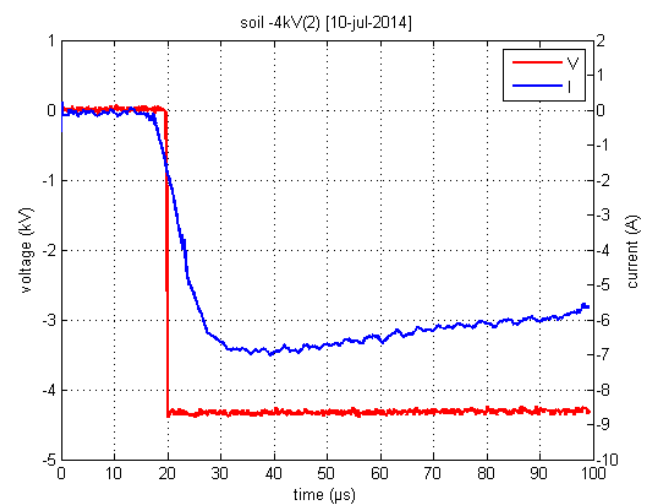
Εικόνα 5.7: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +10kV



Εικόνα 5.8: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα +10kV

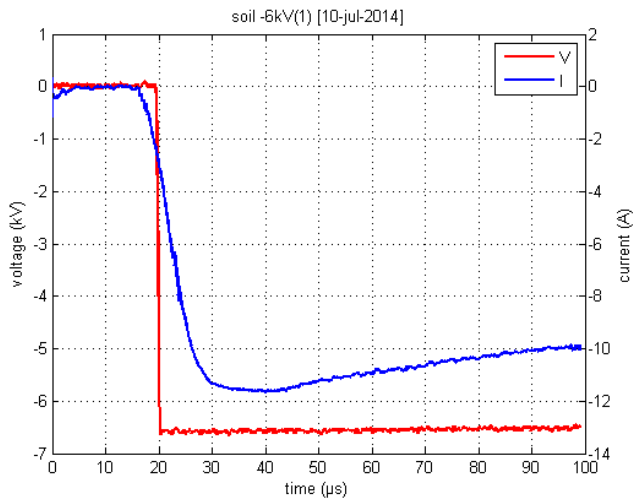


Εικόνα 5.9: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -4kV

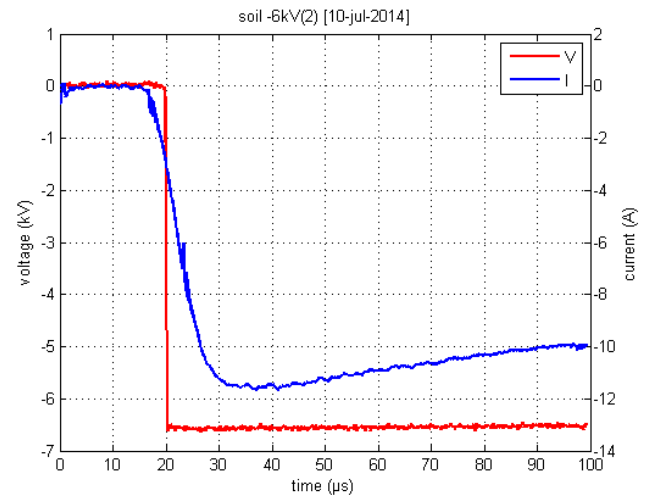


Εικόνα 5.10: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -4kV

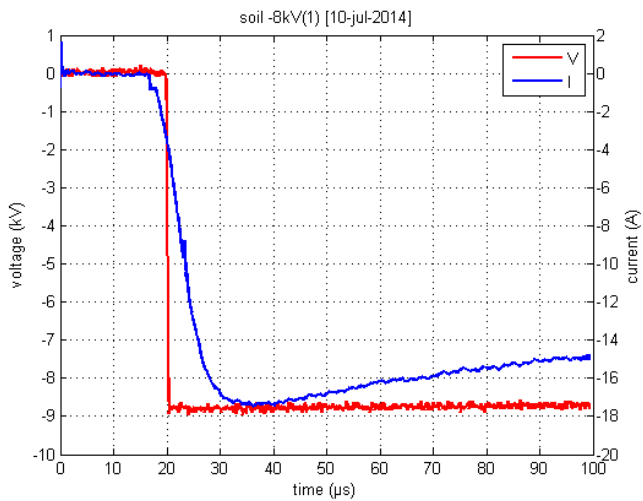
Παρουσίαση Μετρήσεων



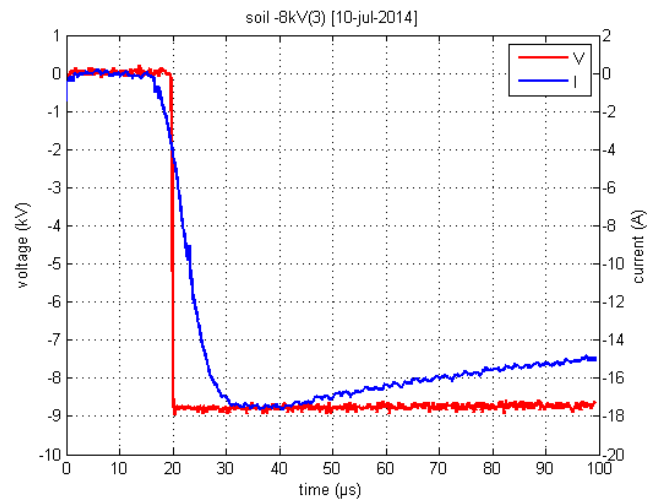
Εικόνα 5.11: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -6kV



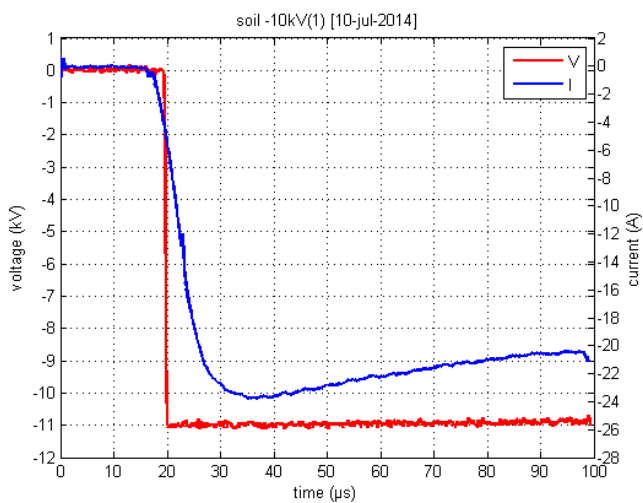
Εικόνα 5.12: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -6kV



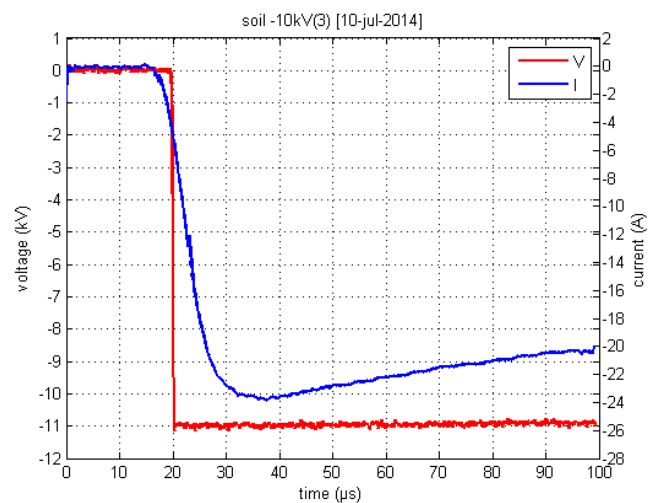
Εικόνα 5.13: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.14: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.15: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.16: Φυσικό έδαφος στις 10-7-2014 στα -10kV

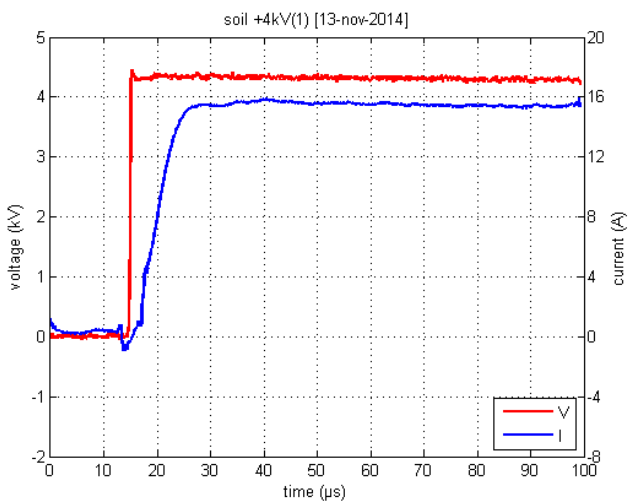
Παρουσίαση Μετρήσεων

Φυσικό έδαφος ($R_{SS}=228,6\Omega$)

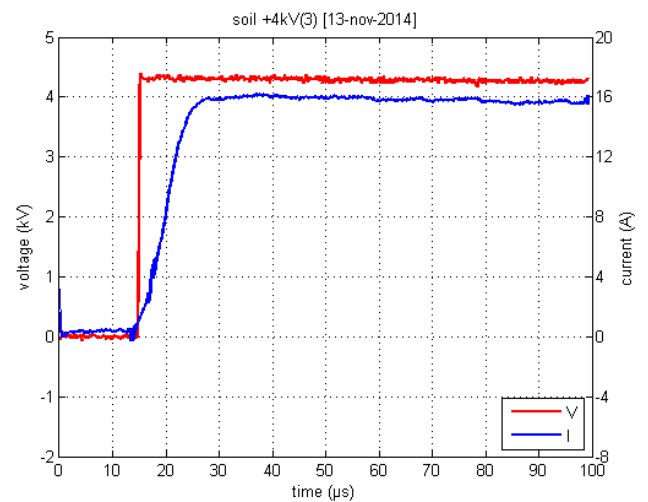
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	266,67	242,42	218,75	221,31	253,95	236,88	232,43	228,96
2 ^η	245,45	239,14	225,21	212,97	234,78	240,63	236,21	223,57
3 ^η	256,46	242,69	226,05	213,15	252,34	234,70	236,32	228,66
4 ^η	249,39	237,99	219,39	210,32	240,91	242,63	226,29	228,57
5 ^η	230,43	241,83	227,21	217,61	245,46	240,13	227,27	225,00
MO	249,68	240,81	223,32	215,07	245,88	238,99	231,70	226,95

Πίνακας 5.2: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 13 Νοεμβρίου 2014 για το φυσικό έδαφος.

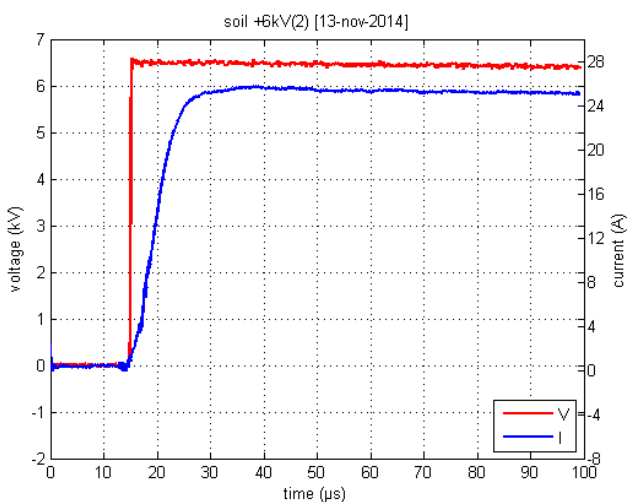
Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.



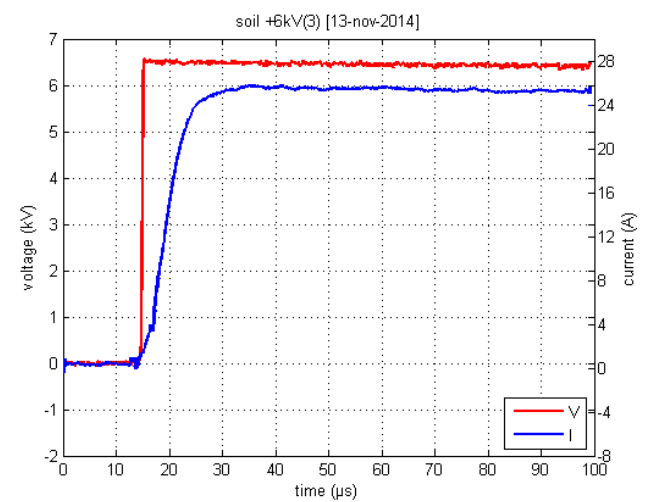
Εικόνα 5.17: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +4kV



Εικόνα 5.18: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +4kV

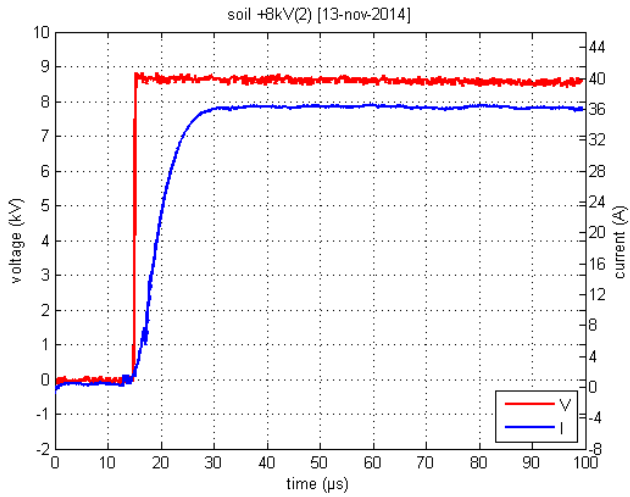


Εικόνα 5.19: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +6kV

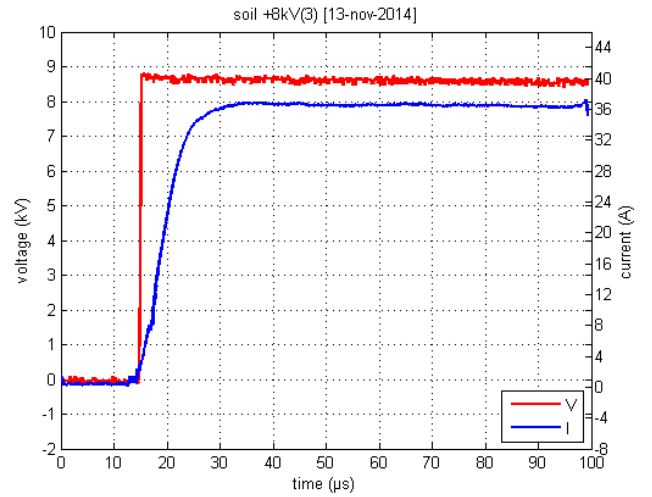


Εικόνα 5.20: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +6kV

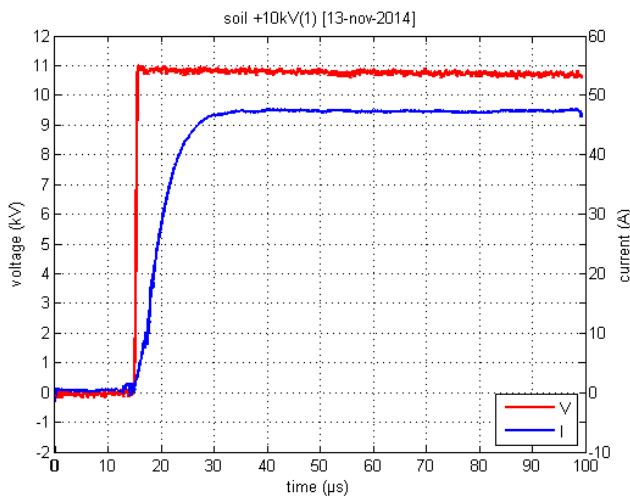
Παρουσίαση Μετρήσεων



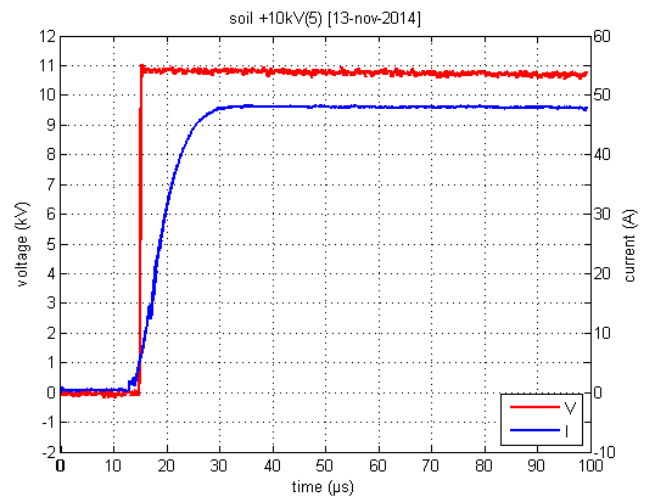
Εικόνα 5.21: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +8kV



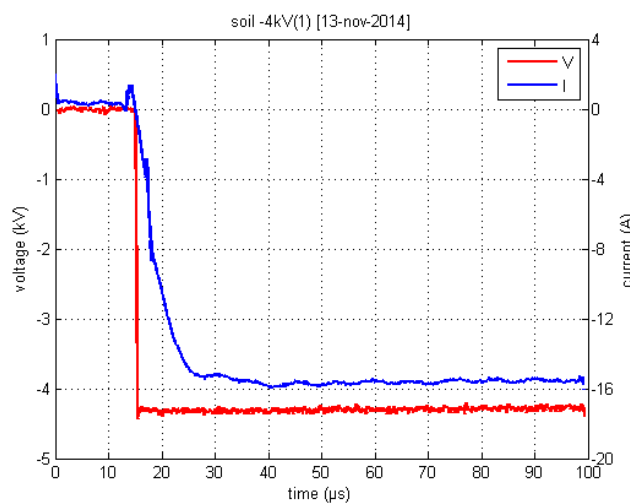
Εικόνα 5.22: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +8kV



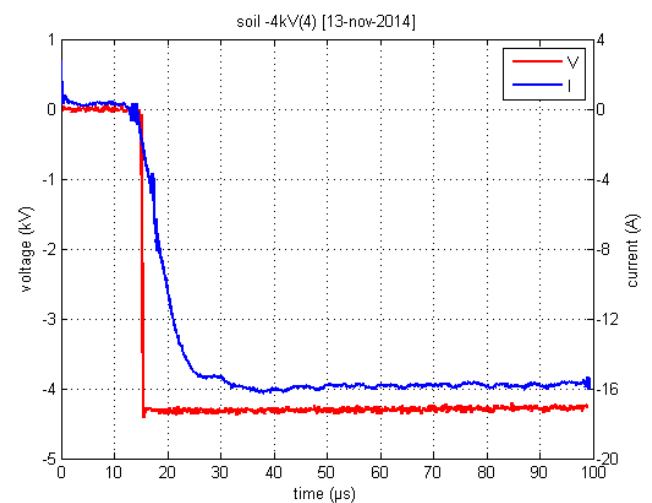
Εικόνα 5.23: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +10kV



Εικόνα 5.24: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα +10kV

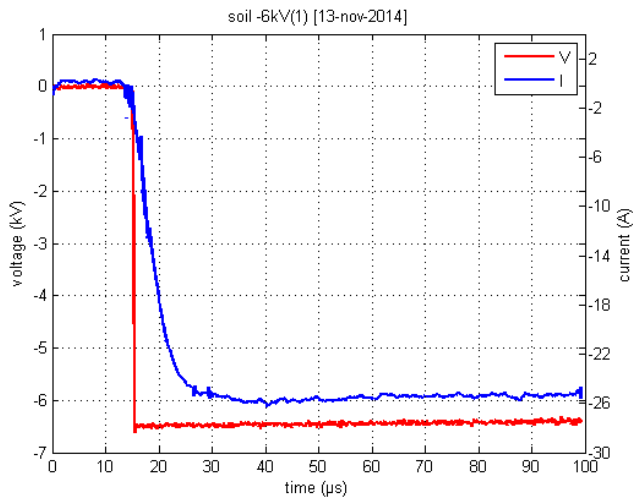


Εικόνα 5.25: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -4kV

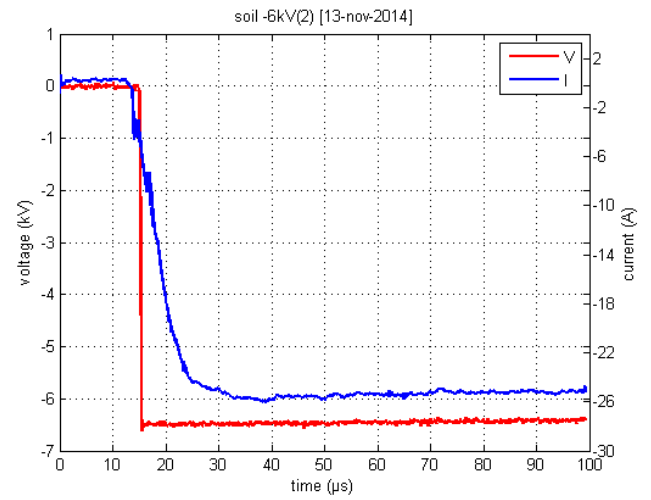


Εικόνα 5.26: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -4kV

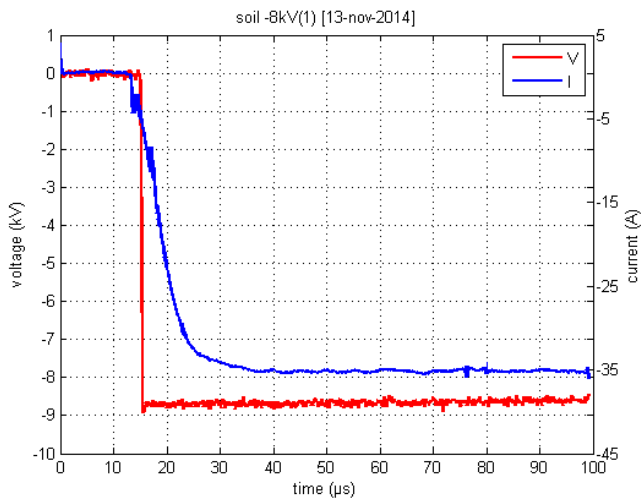
Παρουσίαση Μετρήσεων



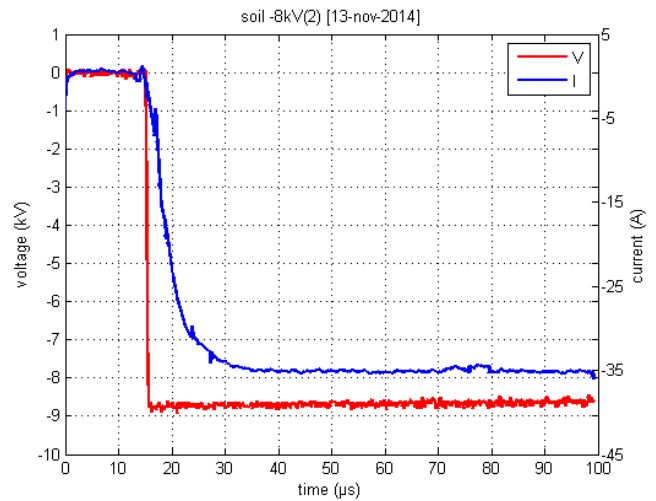
Εικόνα 5.27: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -6kV



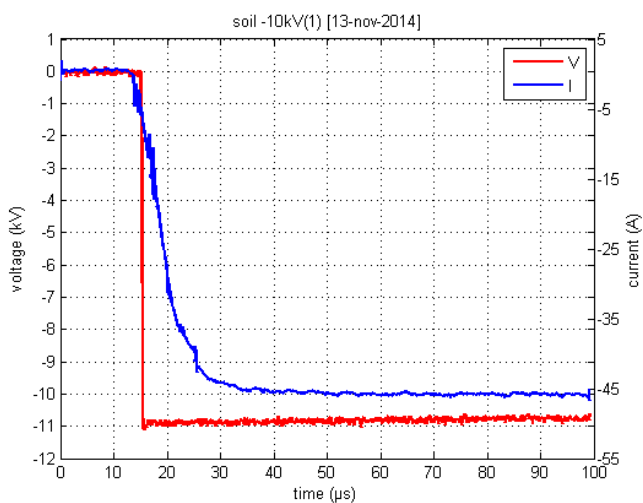
Εικόνα 5.28: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -6kV



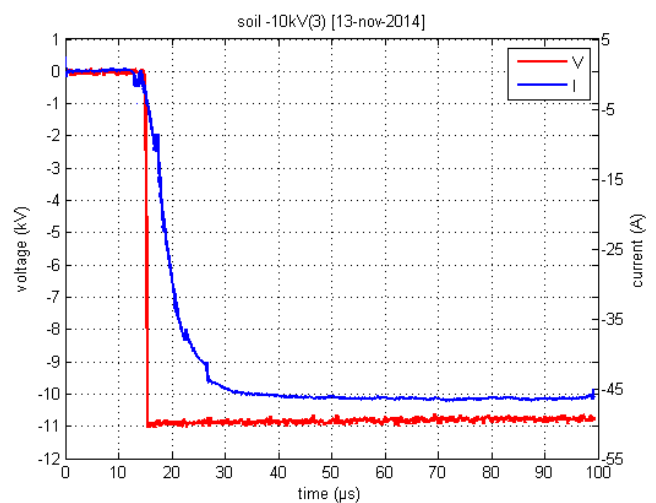
Εικόνα 5.29: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.30: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.31: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.32: Φυσικό έδαφος στις 13-11-2014 στα -10kV

Παρουσίαση Μετρήσεων

5.2 Σκυρόδεμα

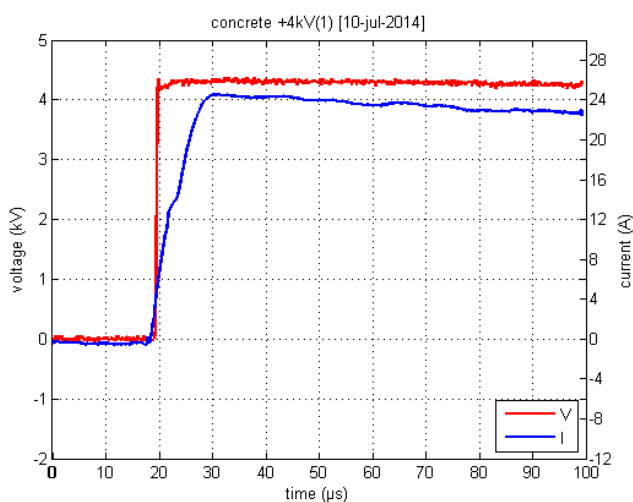
Στο ηλεκτρόδιο που είναι εγκιβωτισμένο σε σκυρόδεμα ελήφθησαν μετρήσεις στις 10 Ιουλίου 2014, στις 29 Οκτωβρίου 2014 με διαφορικό probe και χωρίς διαφορικό probe και στις 13 Νοεμβρίου 2014. Στους πίνακες που ακολουθούν εμπεριέχονται οι τιμές της παραμέτρου Z_4 και για τις τρεις ημερομηνίες καθώς και ο μέσος όρος τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά παλμογραφήματα.

Σκυρόδεμα ($R_{SS}=135,2\Omega$)

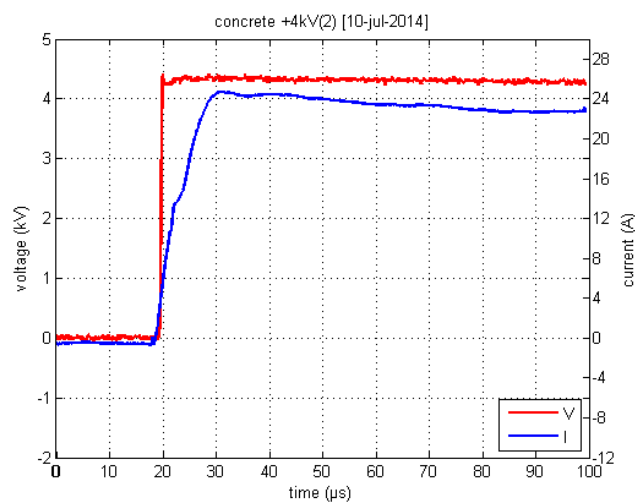
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	169,52	160,15	148,52	137,85	157,18	155,32	147,83	145,32
2 ^η	173,38	156,25	151,13	141,06	150,72	145,44	143,74	140,95
3 ^η	168,27	153,38	151,35	138,22	177,08	149,08	139,82	138,88
4 ^η	171,23	155,96	142,69	143,20	166,88	157,03	151,44	136,02
5 ^η	172,53	156,02	143,77	137,38	171,56	161,22	150,81	137,08
MO	170,98	156,35	147,49	139,54	164,68	153,61	146,73	139,65

Πίνακας 5.3: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 10 Ιουλίου 2014 για το σκυρόδεμα.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

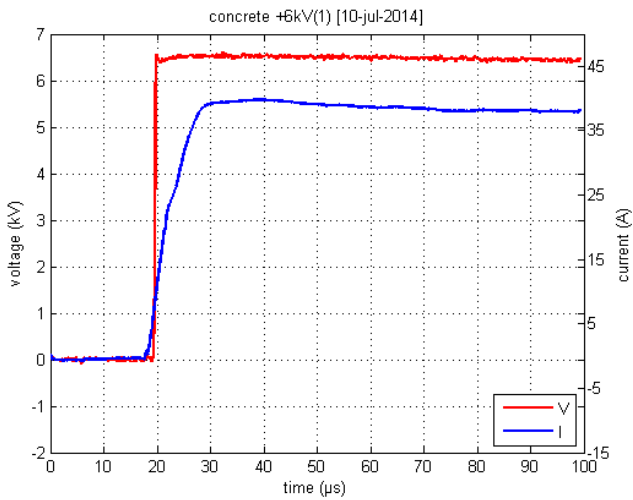


Εικόνα 5.33: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +4kV

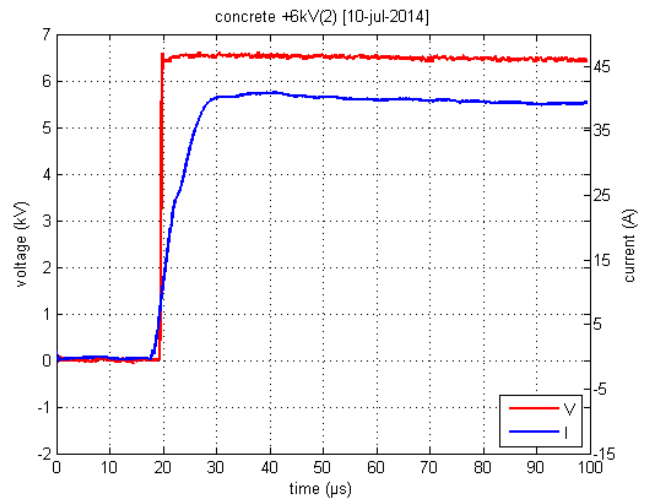


Εικόνα 5.34: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +4kV

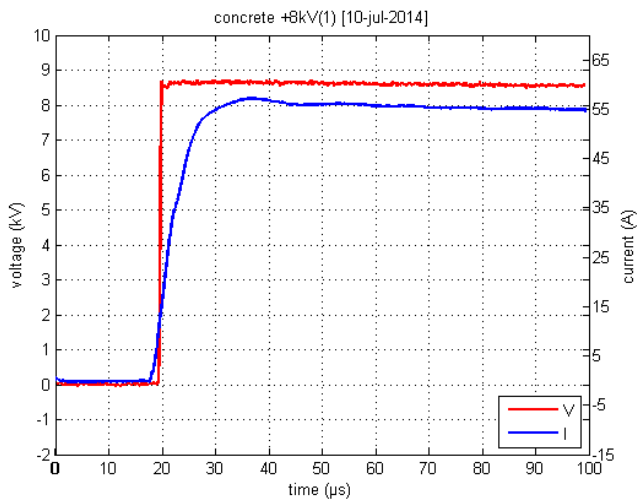
Παρουσίαση Μετρήσεων



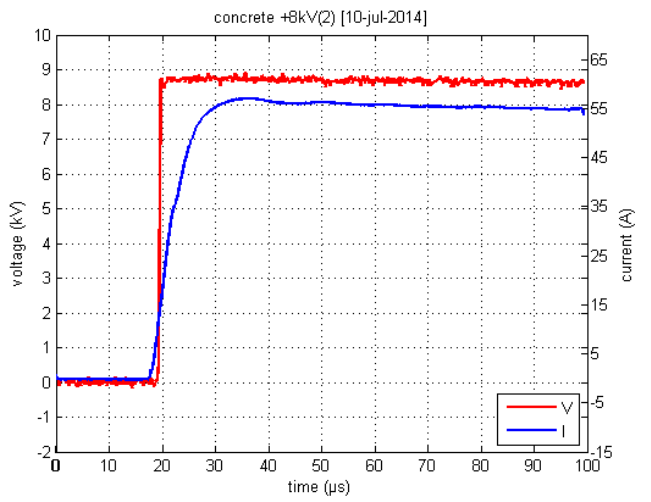
Εικόνα 5.35: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +6kV



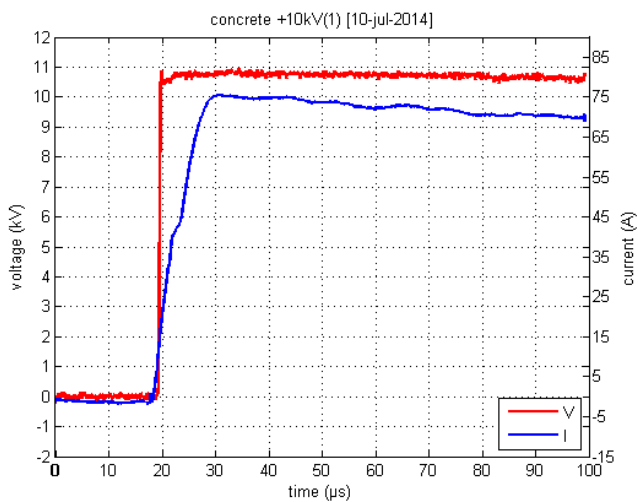
Εικόνα 5.36: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +6kV



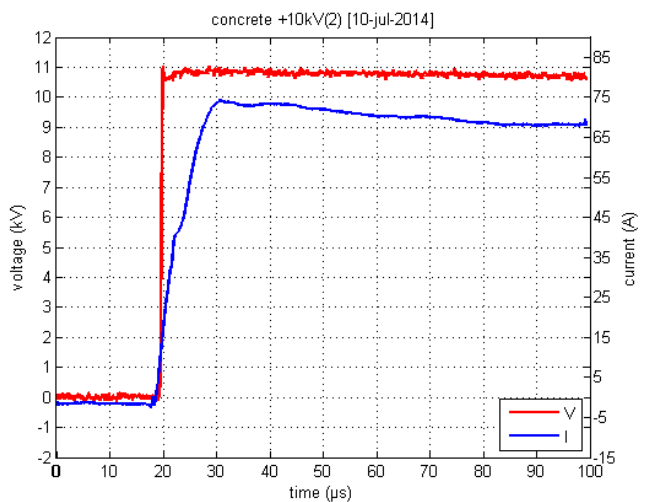
Εικόνα 5.37: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +8kV



Εικόνα 5.38: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +8kV

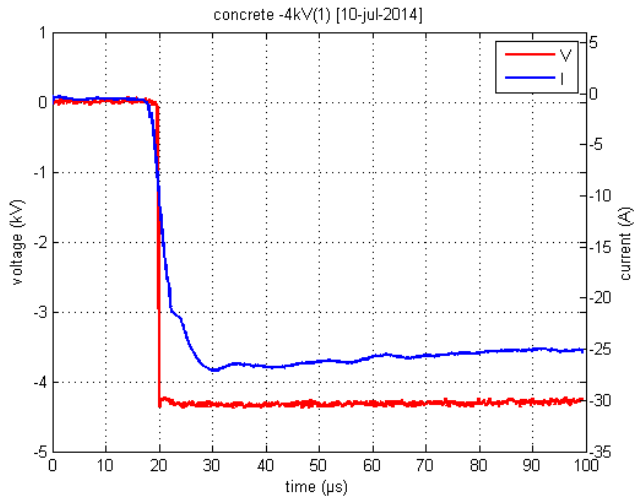


Εικόνα 5.39: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +10kV

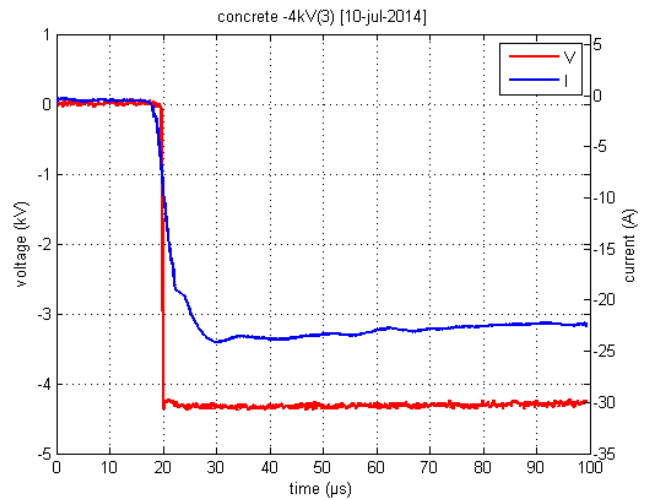


Εικόνα 5.40: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα +10kV

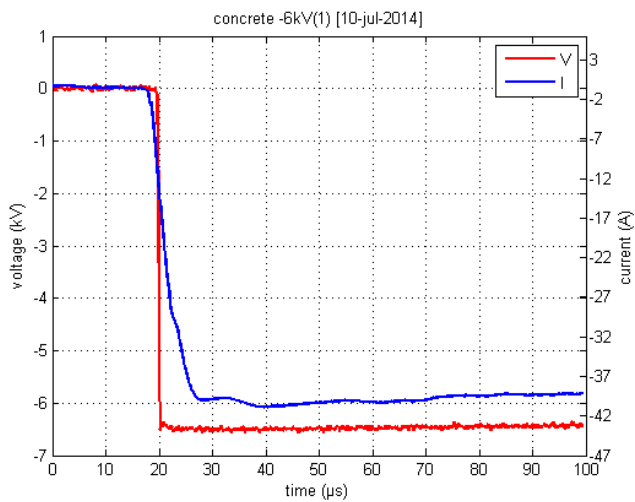
Παρουσίαση Μετρήσεων



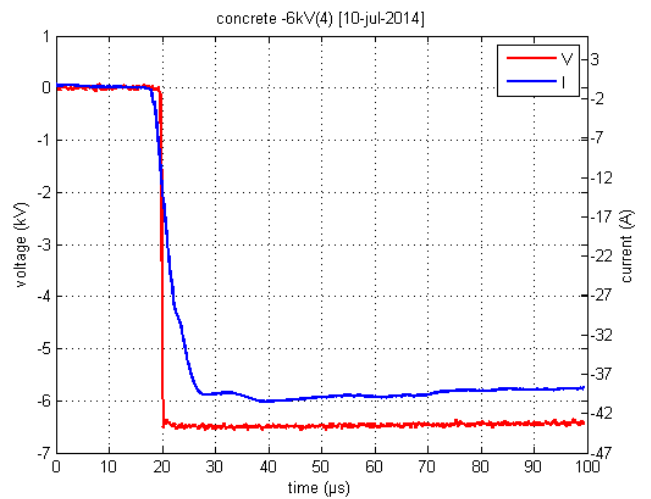
Εικόνα 5.41: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -4kV



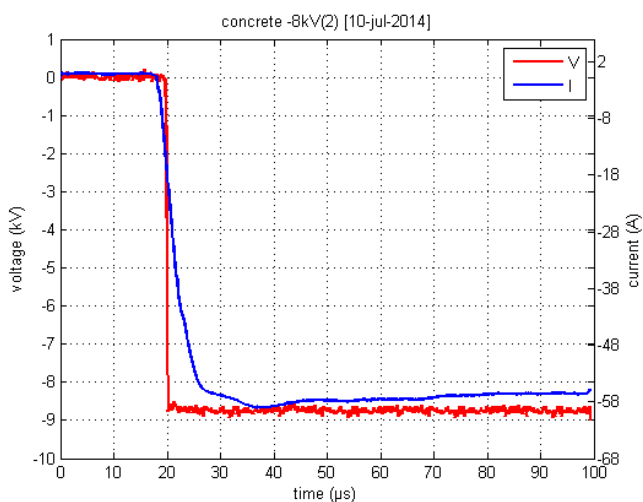
Εικόνα 5.42: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -4kV



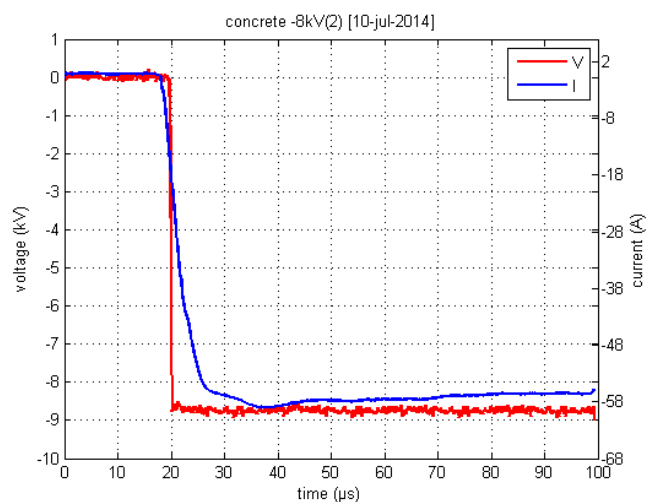
Εικόνα 5.43: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -6kV



Εικόνα 5.44: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -6kV

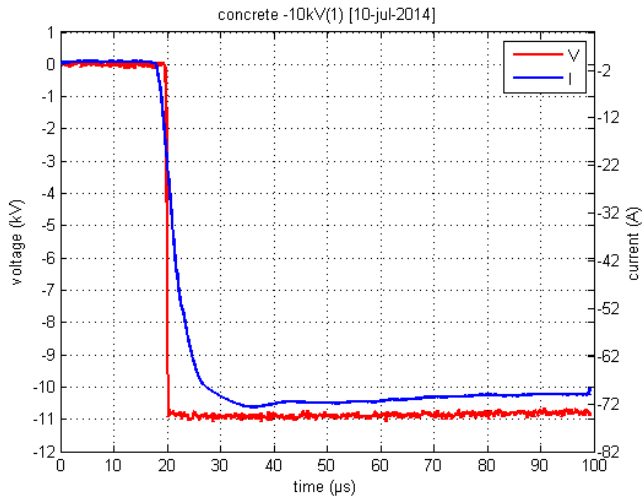


Εικόνα 5.45: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -8kV

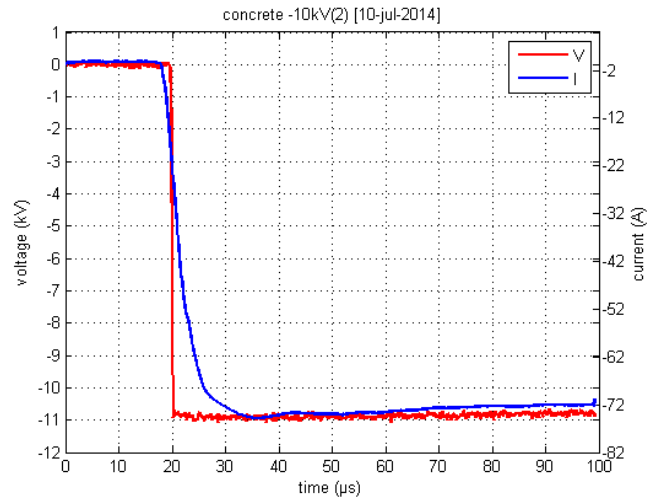


Εικόνα 5.46: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -8kV

Παρουσίαση Μετρήσεων



Εικόνα 5.47: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -10kV



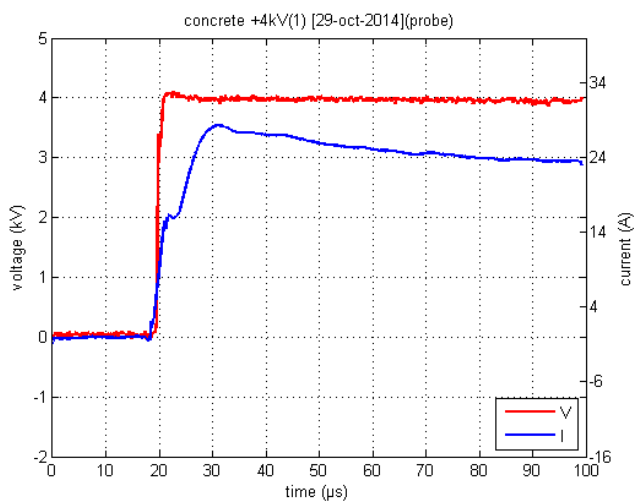
Εικόνα 5.48: Σκυρόδεμα στις 10-7-2014 στα -10kV

Σκυρόδεμα ($R_{SS}=108,5\Omega$)

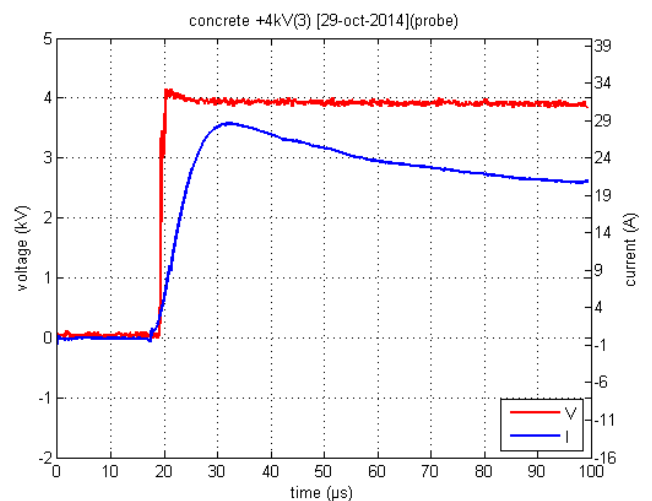
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	138,64	141,39	134,02	123,43	157,90	151,43	130,14	127,06
2 ^η	133,63	139,38	134,04	123,95	157,13	150,37	128,21	124,17
3 ^η	135,32	127,23	125,56	125,64	154,98	152,16	128,71	123,67
4 ^η	138,85	130,65	134,47	117,31	155,40	151,84	131,46	125,47
5 ^η	135,71	123,41	129,28	118,82	158,33	153,15	128,77	125,09
MO	136,43	132,41	131,47	121,83	156,75	151,79	129,46	125,09

Πίνακας 5.4: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 29 Οκτωβρίου 2014 για το σκυρόδεμα με τη χρήση διαφορικού probe.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

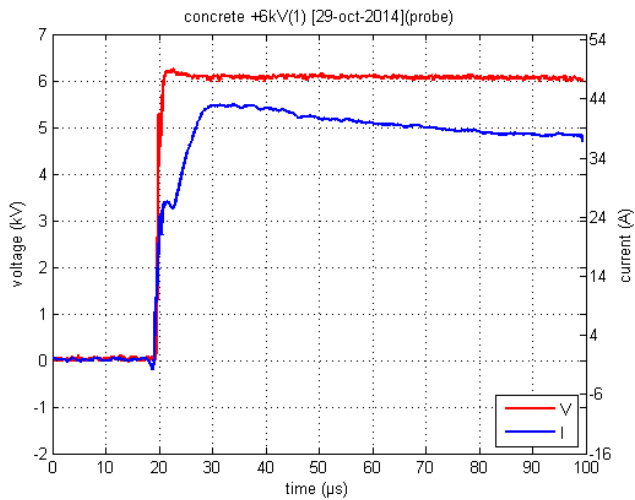


Εικόνα 5.49: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +4kV

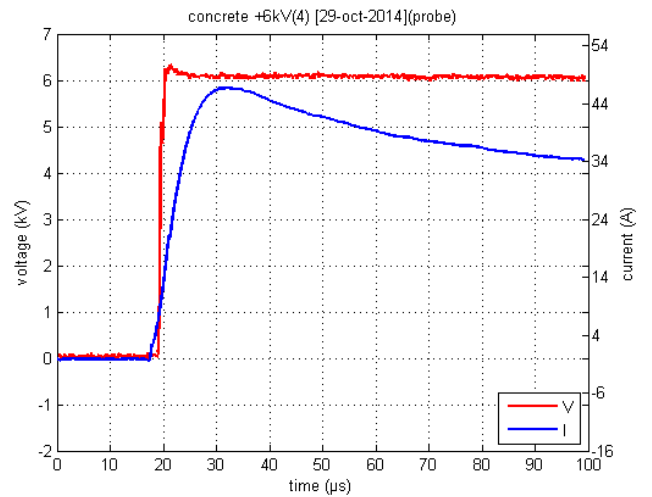


Εικόνα 5.50: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +4kV

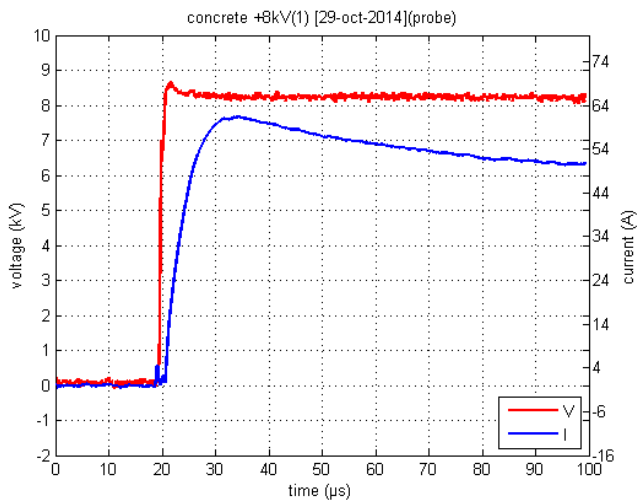
Παρουσίαση Μετρήσεων



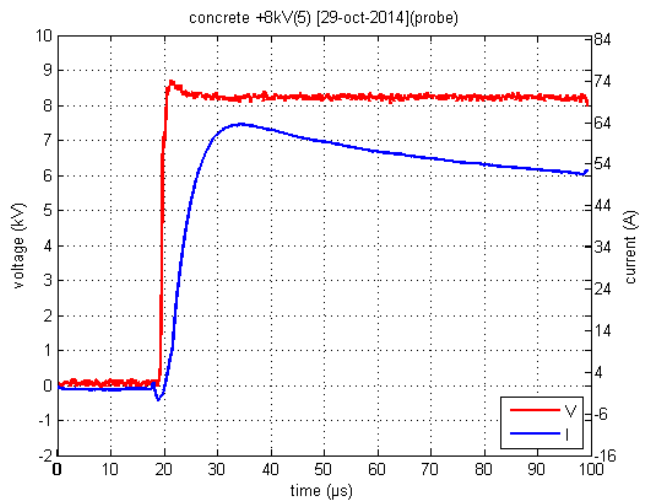
Εικόνα 5.51: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +6kV



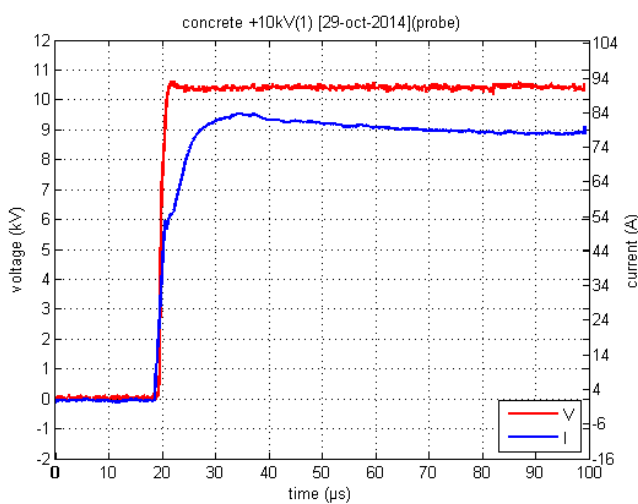
Εικόνα 5.52: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +6kV



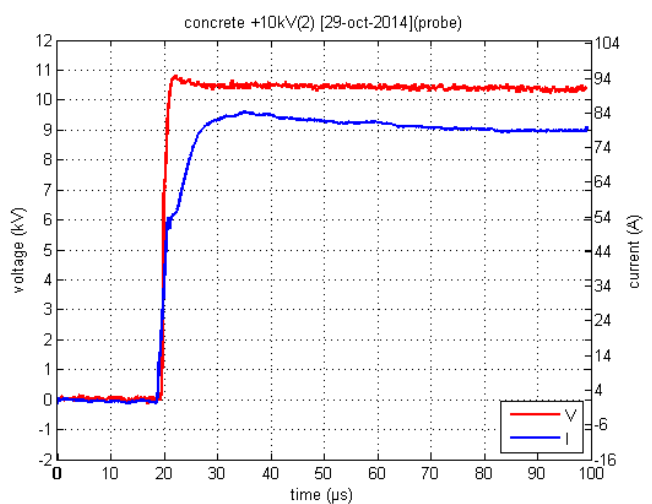
Εικόνα 5.53: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +8kV



Εικόνα 5.54: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +8kV

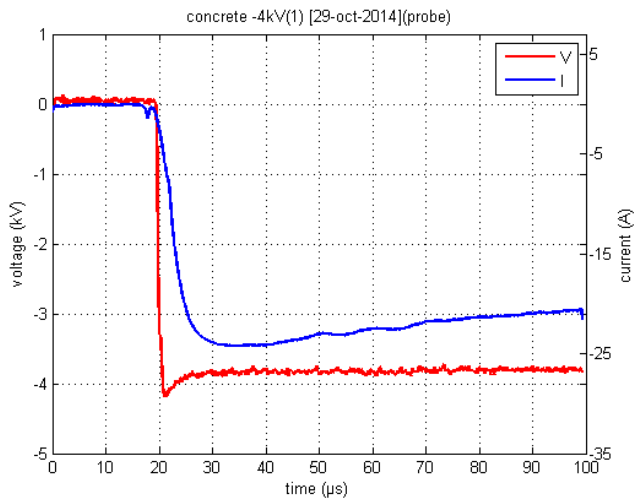


Εικόνα 5.55: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +10kV

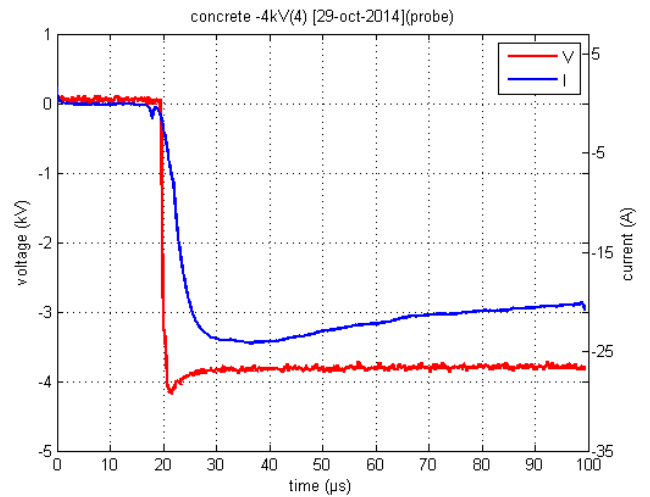


Εικόνα 5.56: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +10kV

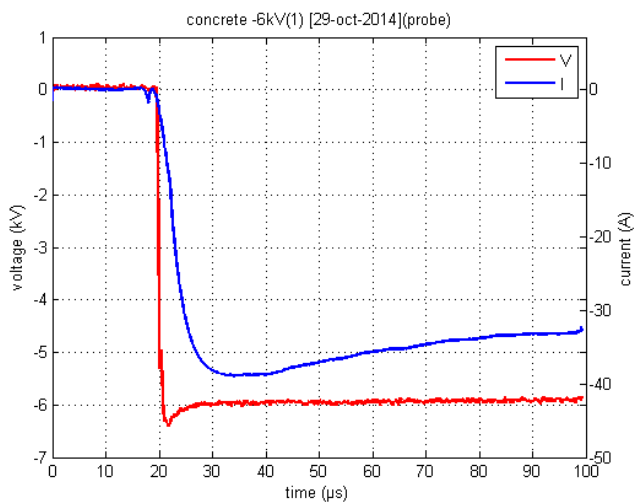
Παρουσίαση Μετρήσεων



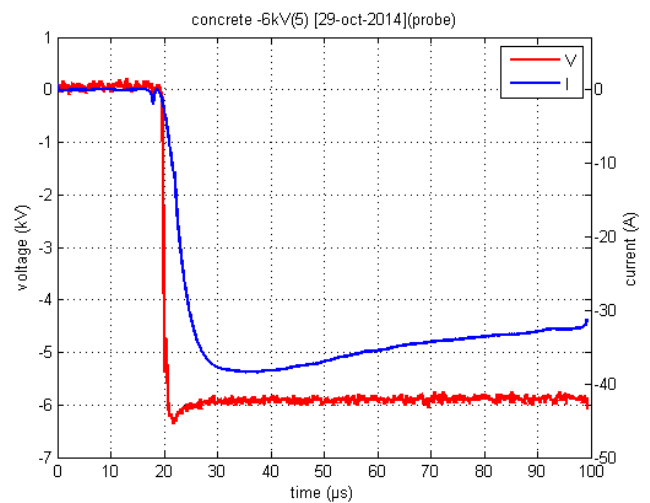
Εικόνα 5.57: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -4kV



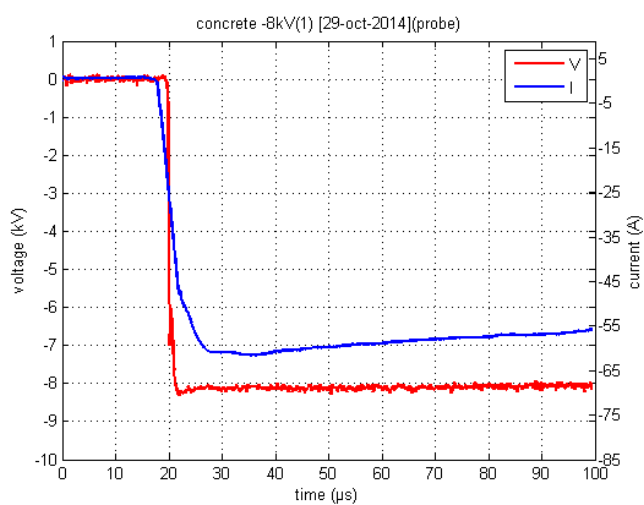
Εικόνα 5.58: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -4kV



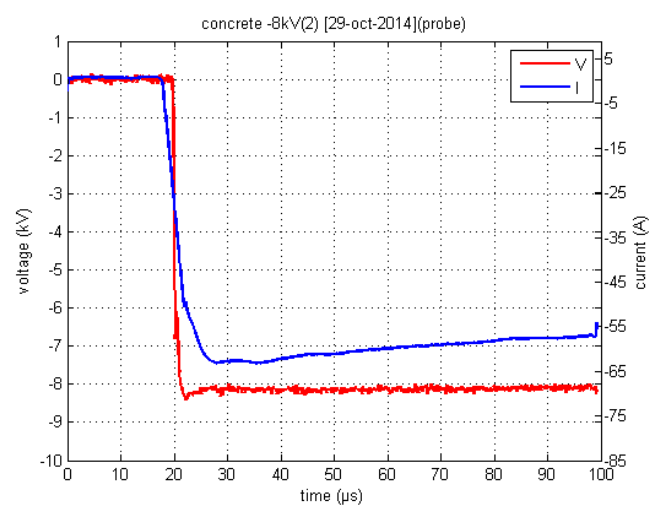
Εικόνα 5.59: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -6kV



Εικόνα 5.60: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -6kV

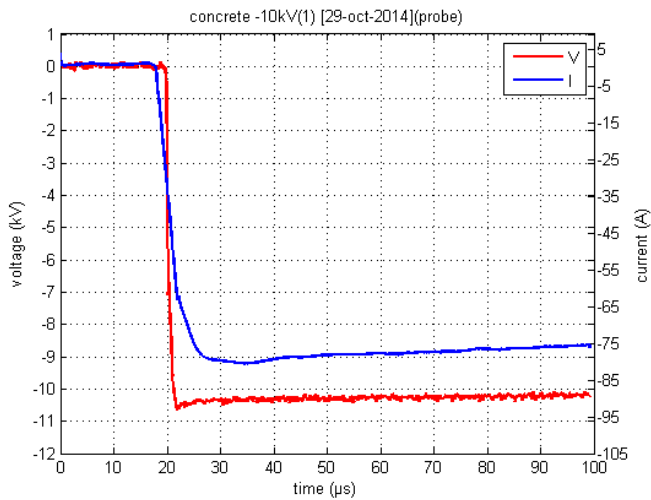


Εικόνα 5.61: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -8kV

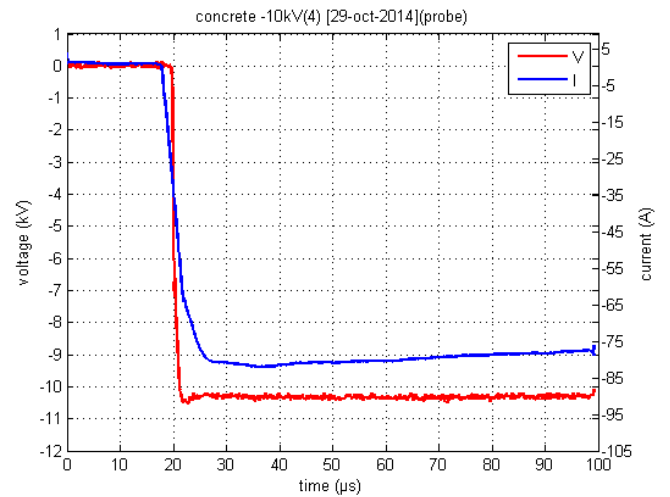


Εικόνα 5.62: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -8kV

Παρουσίαση Μετρήσεων



Εικόνα 5.63: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -10kV



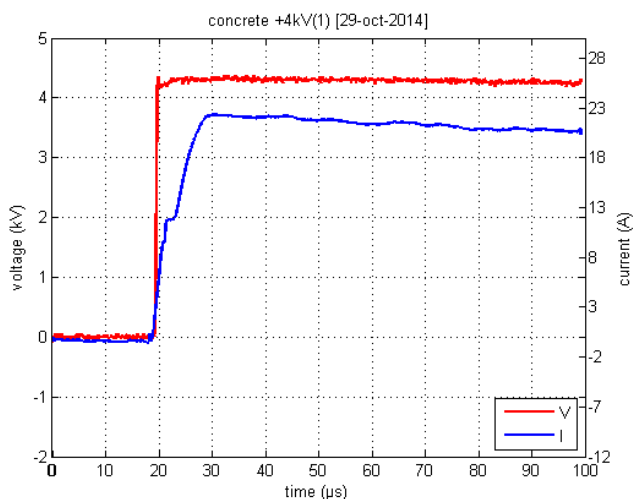
Εικόνα 5.64: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -10kV

Σκυρόδεμα ($R_{SS}=108,5\Omega$)

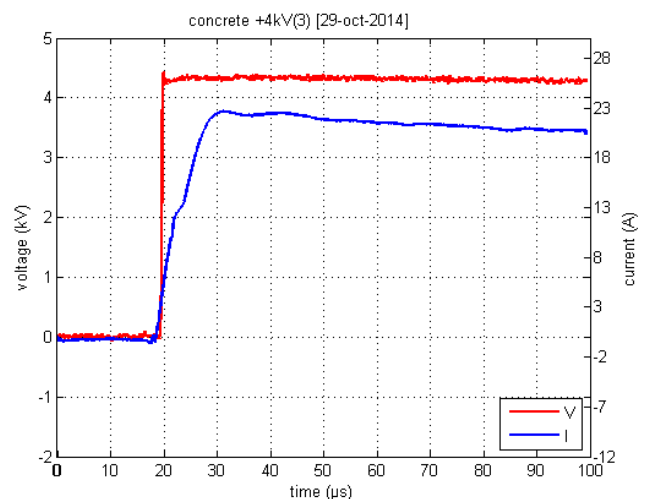
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	189,82	179,42	165,00	153,84	172,83	174,13	164,82	163,15
2 ^η	193,71	174,59	167,69	158,47	165,74	163,05	161,42	158,35
3 ^η	188,78	172,57	168,14	155,42	194,72	167,29	157,11	153,87
4 ^η	193,54	173,31	159,38	160,95	184,58	177,14	169,89	149,63
5 ^η	189,82	174,95	160,57	154,40	192,48	179,96	169,20	152,99
MO	191,13	174,97	164,15	156,61	182,07	172,31	164,49	155,59

Πίνακας 5.5: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις Οκτωβρίου 2014 για το σκυρόδεμα χωρίς τη χρήση διαφορικού probe.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

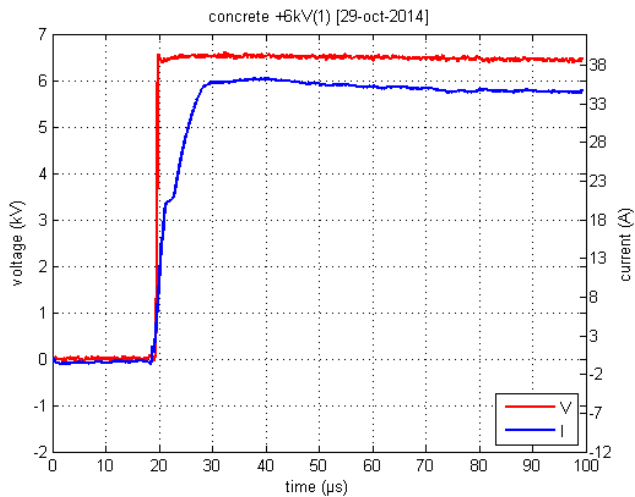


Εικόνα 5.65: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +4kV

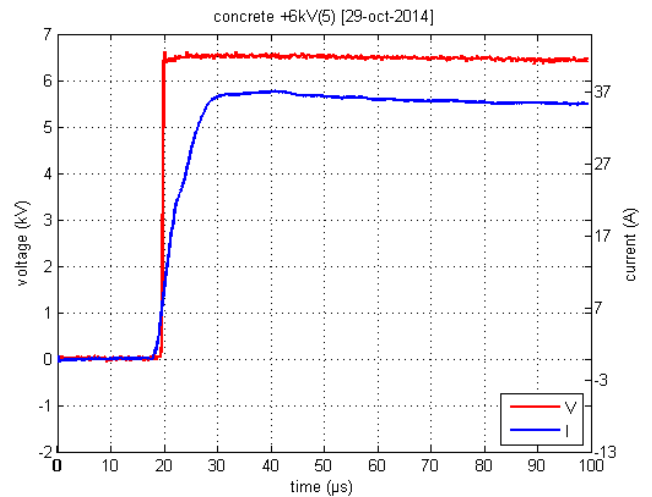


Εικόνα 5.66: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +4kV

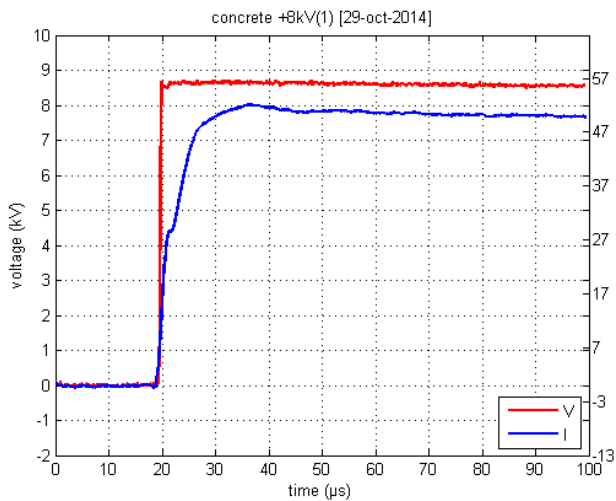
Παρουσίαση Μετρήσεων



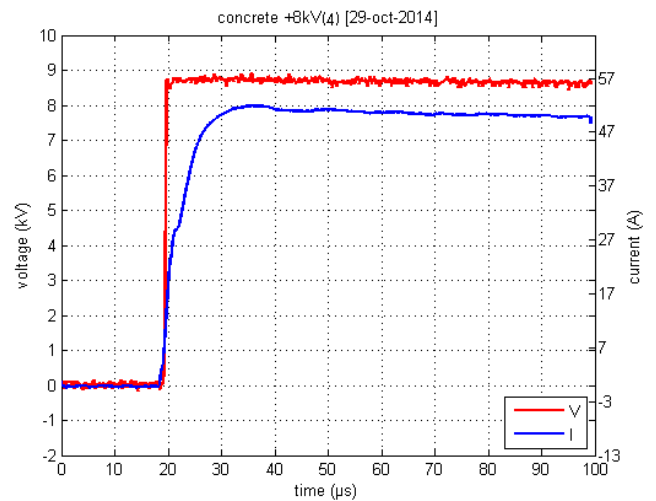
Εικόνα 5.67: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +6kV



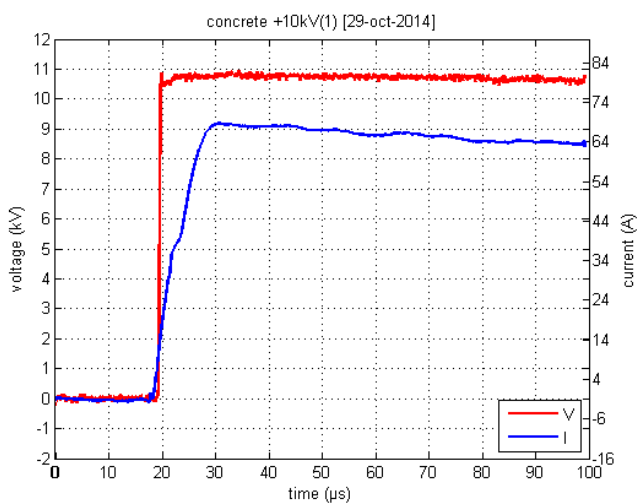
Εικόνα 5.68: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +6kV



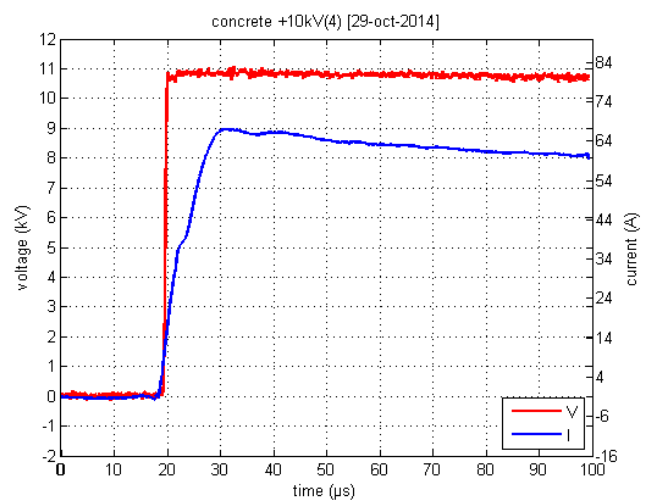
Εικόνα 5.69: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +8kV



Εικόνα 5.70: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +8kV

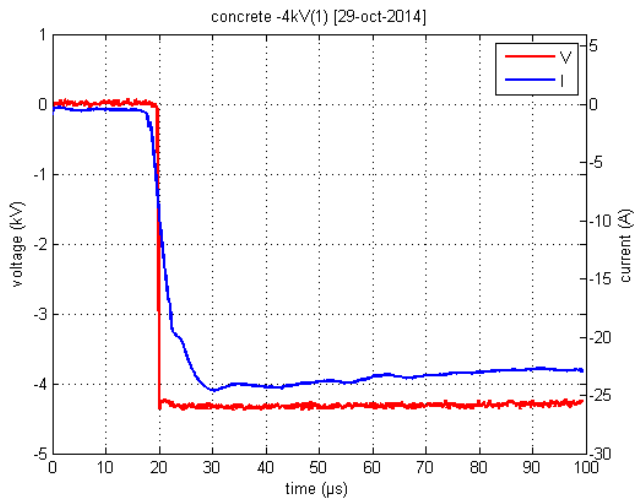


Εικόνα 5.71: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +10kV

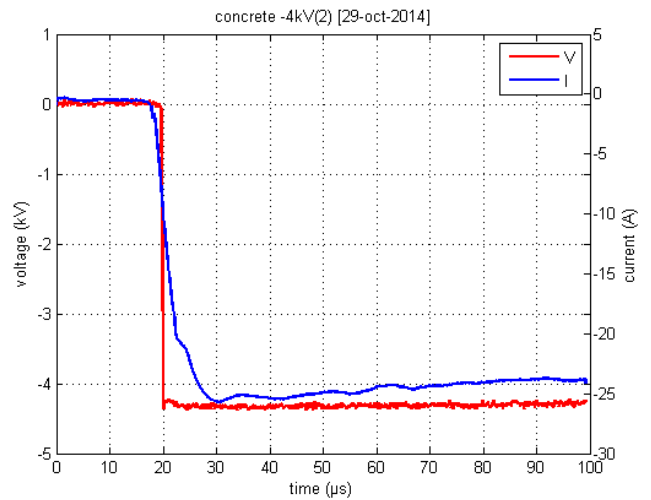


Εικόνα 5.72: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα +10kV

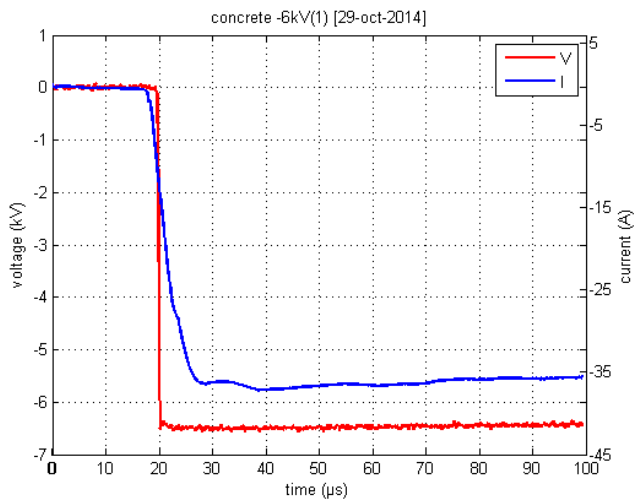
Παρουσίαση Μετρήσεων



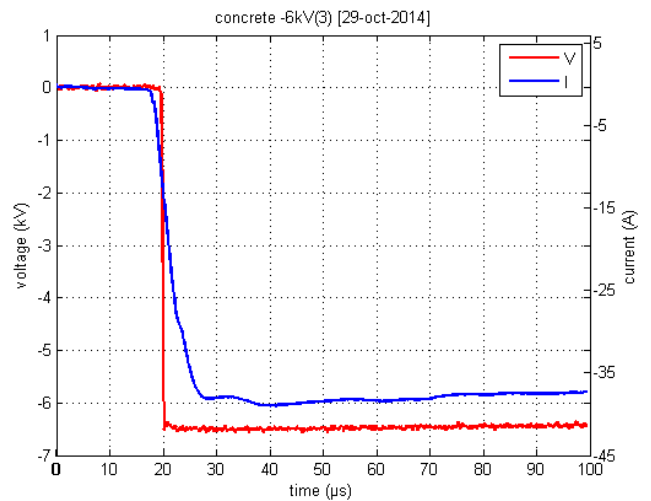
Εικόνα 5.73: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -4kV



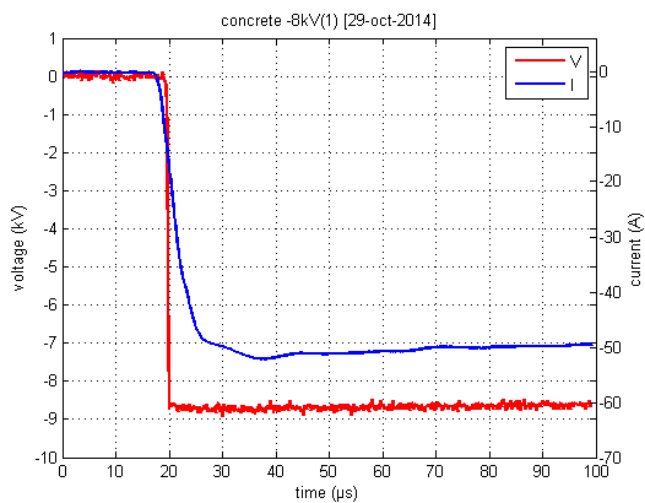
Εικόνα 5.74: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -4kV



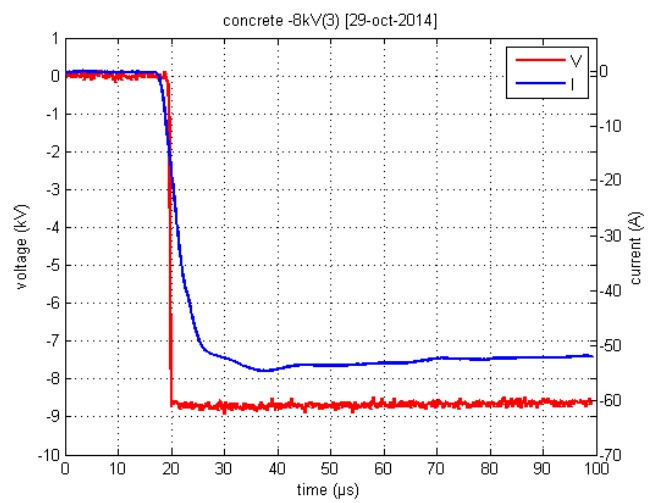
Εικόνα 5.75: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -6 kV



Εικόνα 5.76: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -6 kV

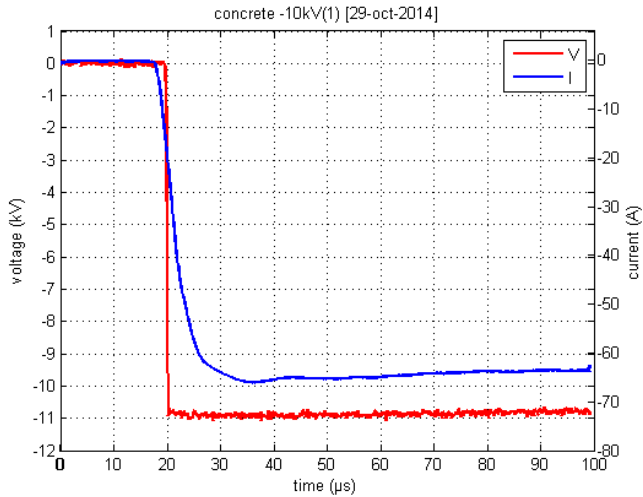


Εικόνα 5.77: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -8 kV

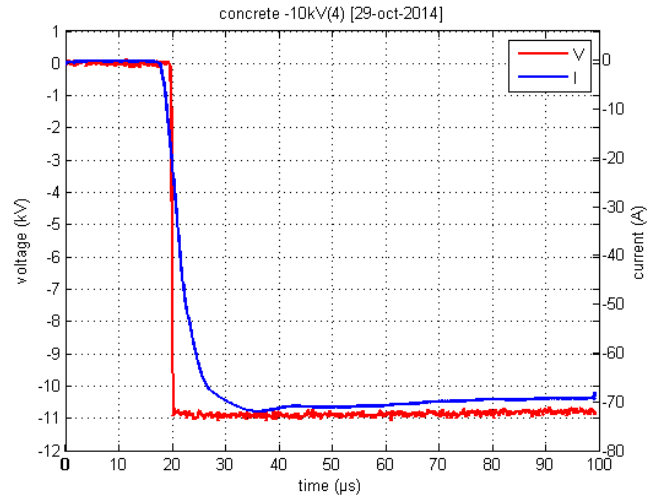


Εικόνα 5.78: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -8 kV

Παρουσίαση Μετρήσεων



Εικόνα 5.79: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -10 kV



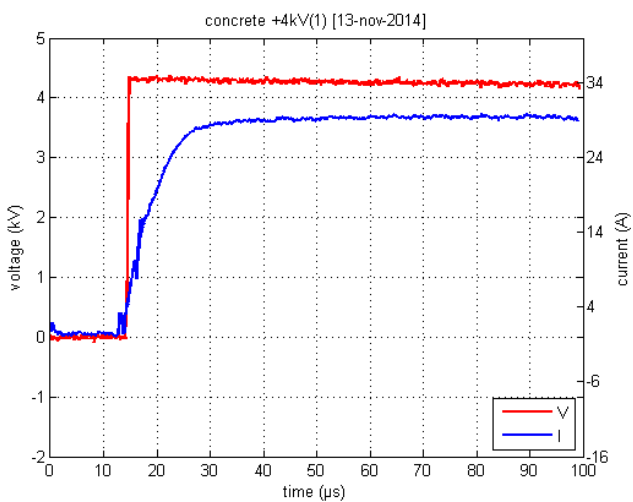
Εικόνα 5.80: Σκυρόδεμα στις 29-10-2014 στα -10 kV

Σκυρόδεμα ($R_{SS}=101,2\Omega$)

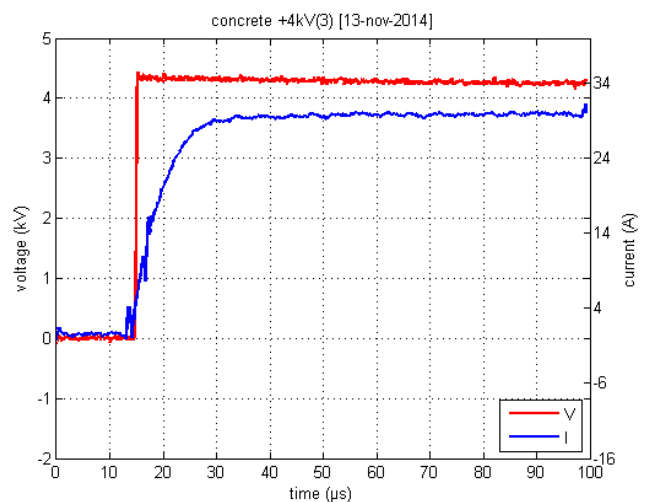
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	136,34	123,60	124,02	117,54	131,73	123,08	121,89	118,38
2 ^η	126,19	129,00	121,90	116,66	128,00	121,97	122,86	117,84
3 ^η	138,46	128,80	123,06	116,52	129,27	122,16	125,51	118,31
4 ^η	135,68	129,21	109,53	114,89	133,32	124,91	125,32	119,00
5 ^η	134,51	126,46	119,88	107,35	133,30	124,10	119,44	117,87
MO	134,24	127,41	119,68	114,59	131,12	123,24	123,00	118,28

Πίνακας 5.6: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 13 Νοεμβρίου 2014 για το σκυρόδεμα.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

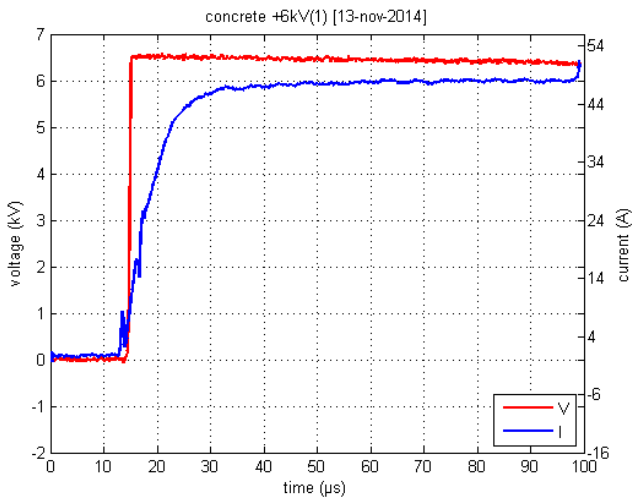


Εικόνα 5.81: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +4 kV

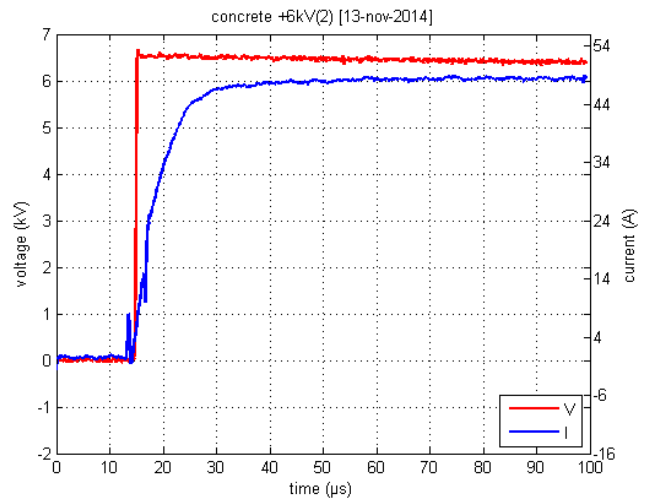


Εικόνα 5.82: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +4 kV

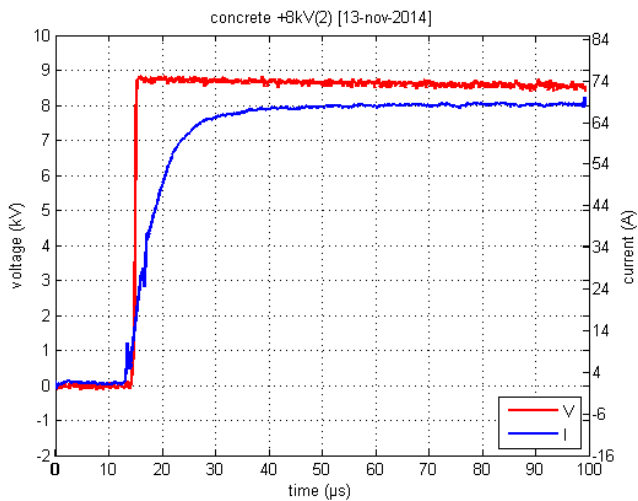
Παρουσίαση Μετρήσεων



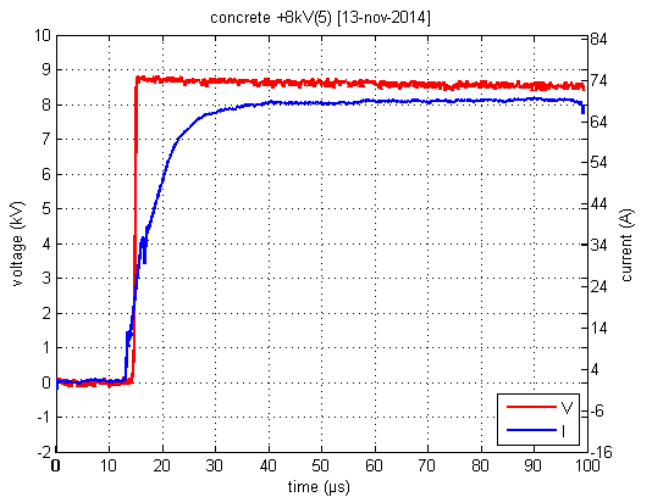
Εικόνα 5.83: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +6 kV



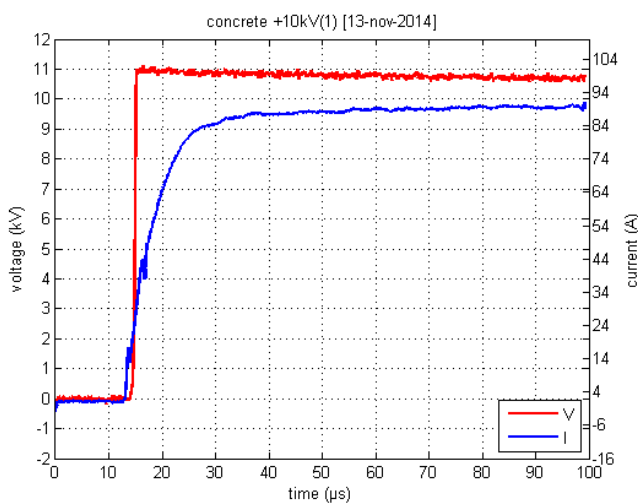
Εικόνα 5.84: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +6 kV



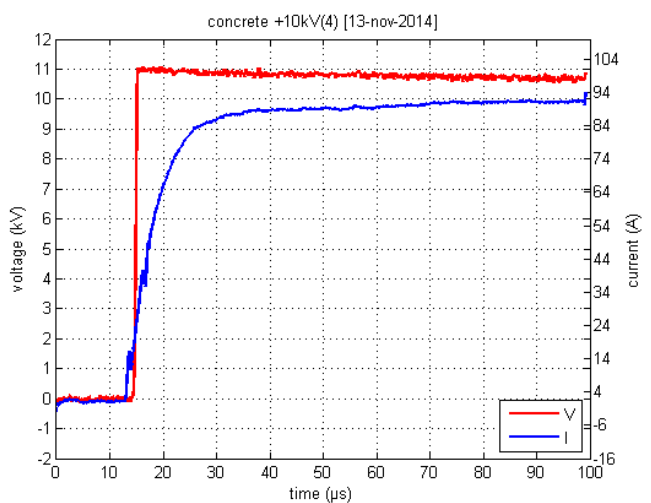
Εικόνα 5.85: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +8 kV



Εικόνα 5.86: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +8 kV

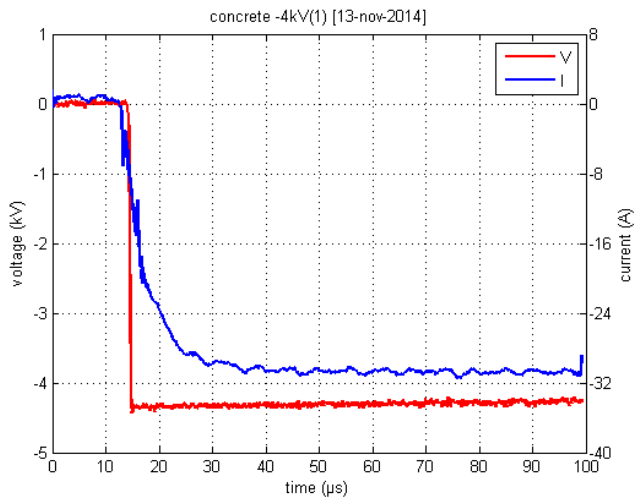


Εικόνα 5.87: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +10 kV

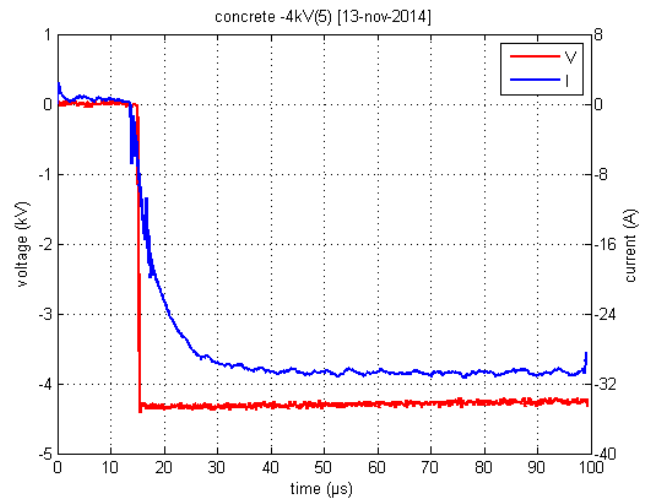


Εικόνα 5.88: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα +10 kV

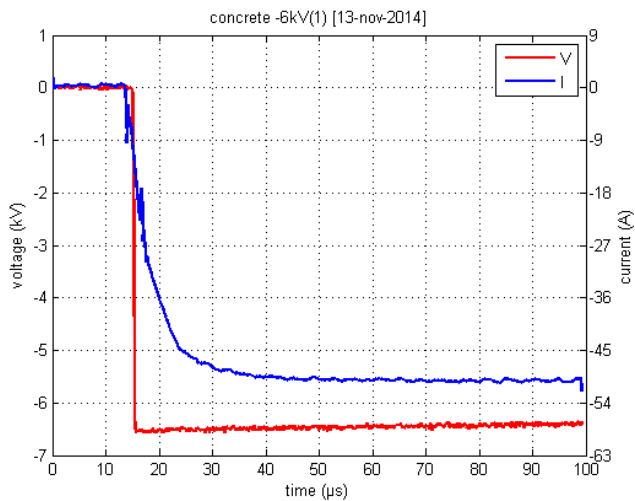
Παρουσίαση Μετρήσεων



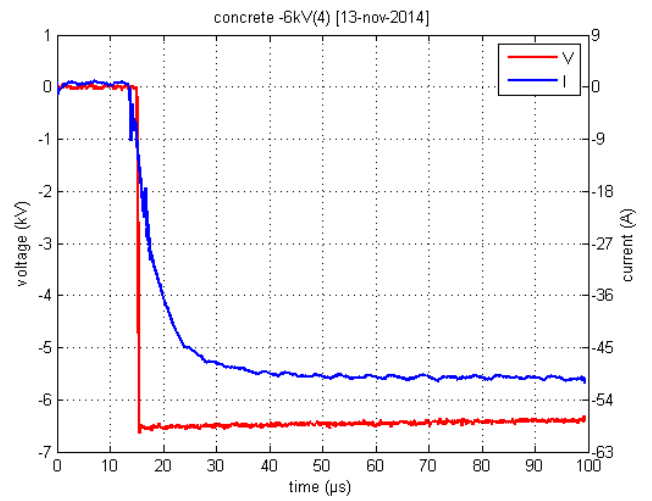
Εικόνα 5.89: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -4 kV



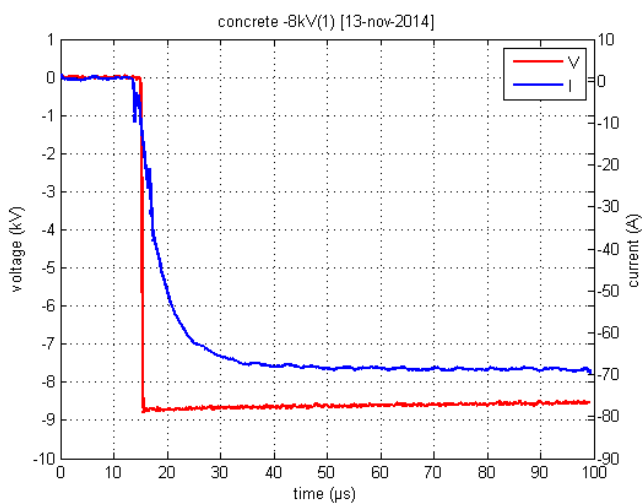
Εικόνα 5.90: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -4 kV



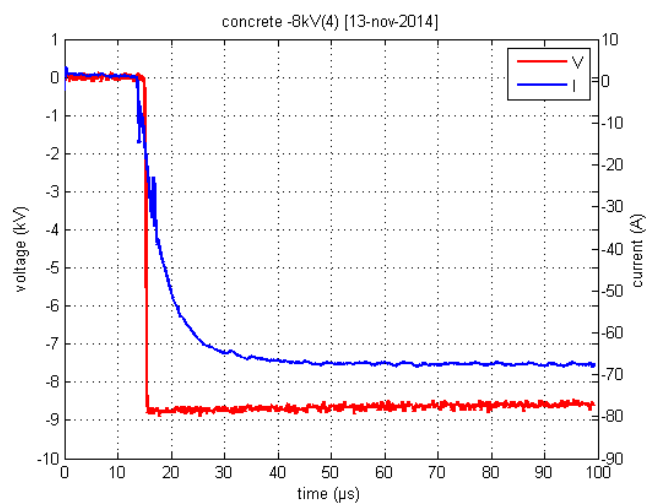
Εικόνα 5.91: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -6 kV



Εικόνα 5.92: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -6 kV

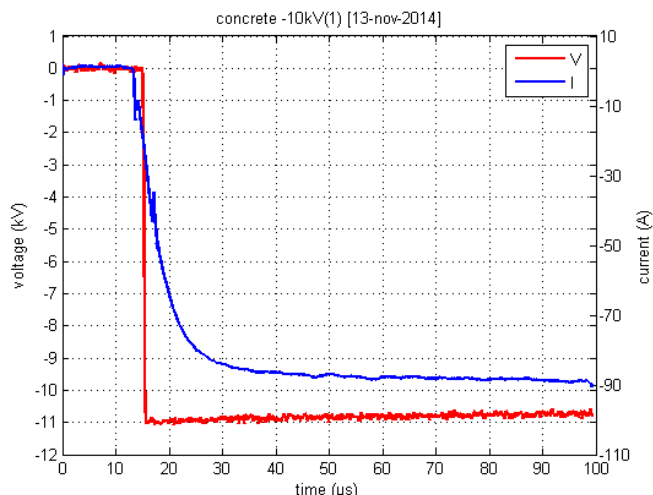


Εικόνα 5.93: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -8 kV

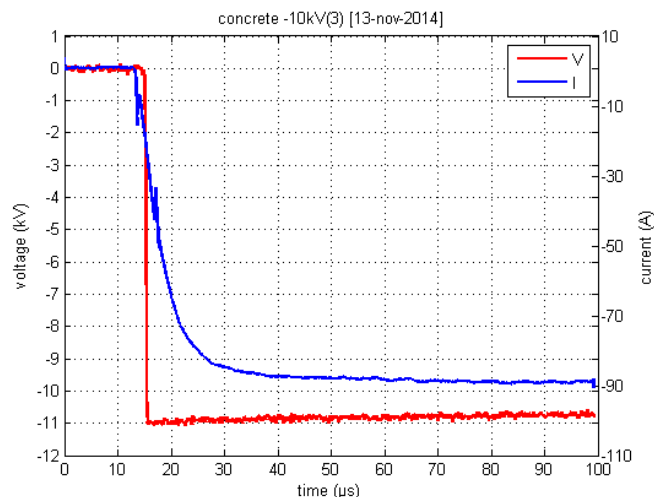


Εικόνα 5.94: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -8 kV

Παρουσίαση Μετρήσεων



Εικόνα 5.95: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -10 kV



Εικόνα 5.96: Σκυρόδεμα στις 13-11-2014 στα -10 kV

5.3 Μπετονίτης

Στο ηλεκτρόδιο που είναι εγκιβωτισμένο σε μπετονίτη ελήφθησαν μετρήσεις στις 10 Ιουλίου 2014, στις 29 Οκτωβρίου 2014 με διαφορικό probe και χωρίς διαφορικό probe και στις 13 Νοεμβρίου 2014. Στους πίνακες που ακολουθούν εμπεριέχονται οι τιμές της παραμέτρου Z_4 και για τις τρεις ημερομηνίες καθώς και ο μέσος όρος τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά παλμογραφήματα.

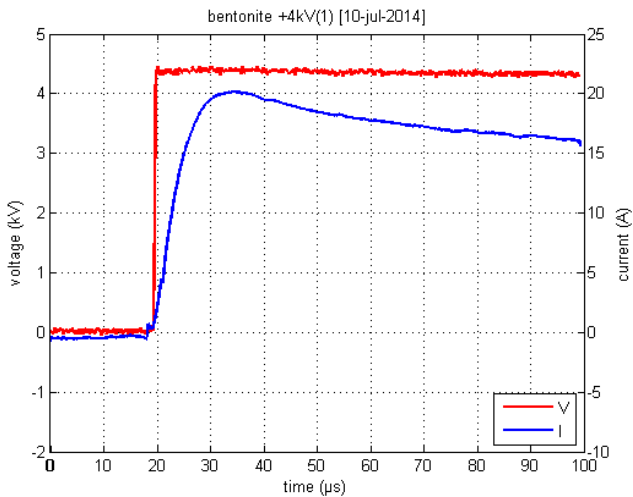
Μπετονίτης ($R_{SS}=170,8\Omega$)

	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	216,48	205,14	189,91	182,59	217,06	200,51	192,22	186,30
2 ^η	214,67	200,19	191,96	183,75	212,66	195,62	191,89	184,78
3 ^η	218,50	198,55	192,00	183,04	211,12	194,53	188,81	185,29
4 ^η	217,24	199,24	192,49	185,75	208,04	199,72	190,17	185,03
5 ^η	215,51	197,39	193,23	185,41	211,49	197,59	190,49	184,20
MO	216,48	200,10	191,91	184,11	212,07	197,59	190,72	185,12

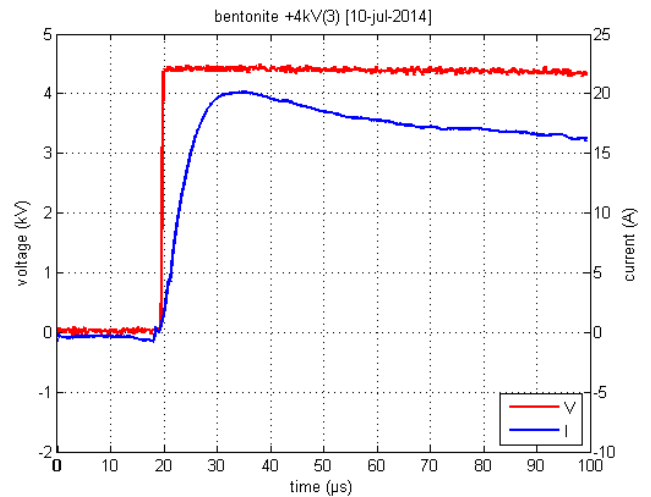
Πίνακας 5.7: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 10 Ιουλίου 2014 για το μπετονίτη.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

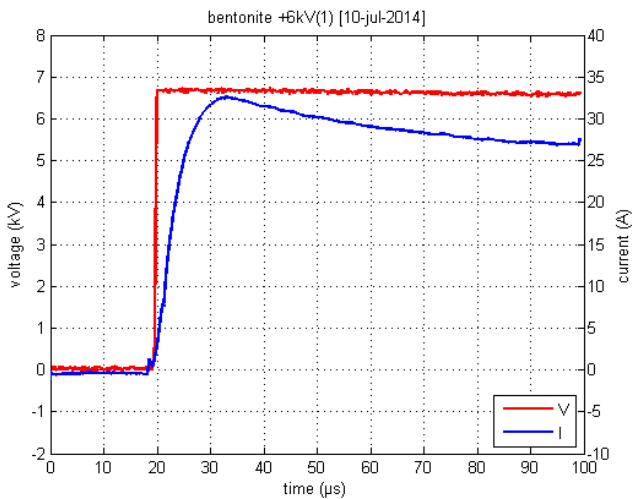
Παρουσίαση Μετρήσεων



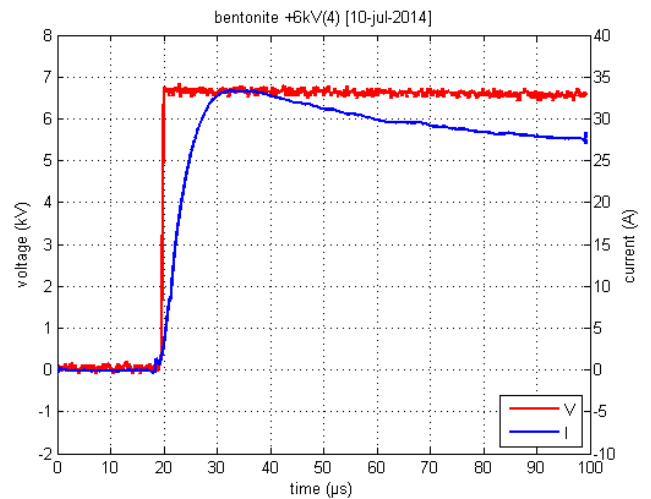
Εικόνα 5.97: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +4kV



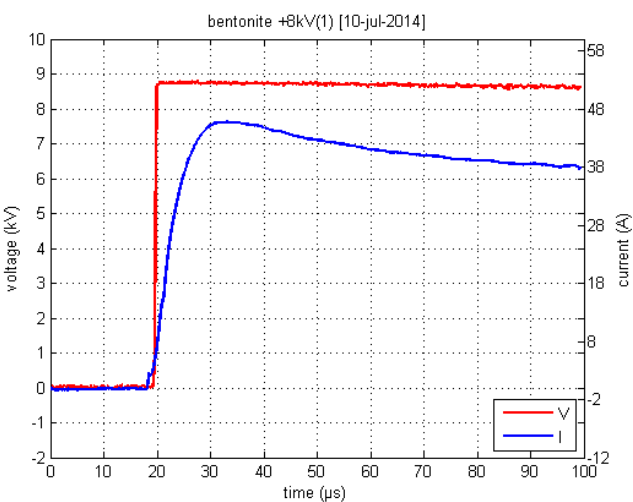
Εικόνα 5.98: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +4kV



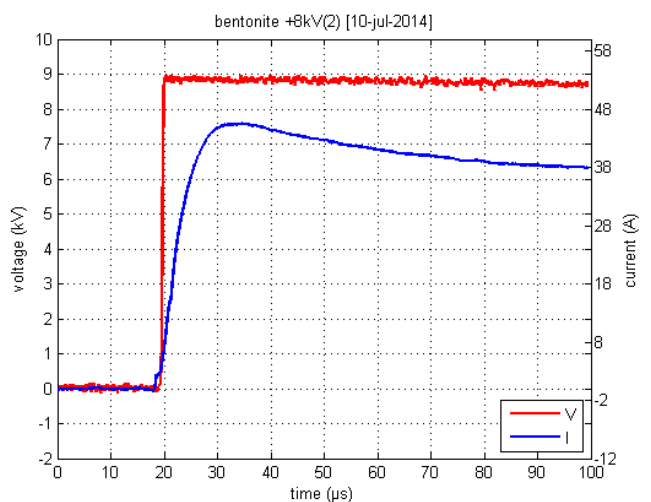
Εικόνα 5.99: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +6kV



Εικόνα 5.100: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +6kV

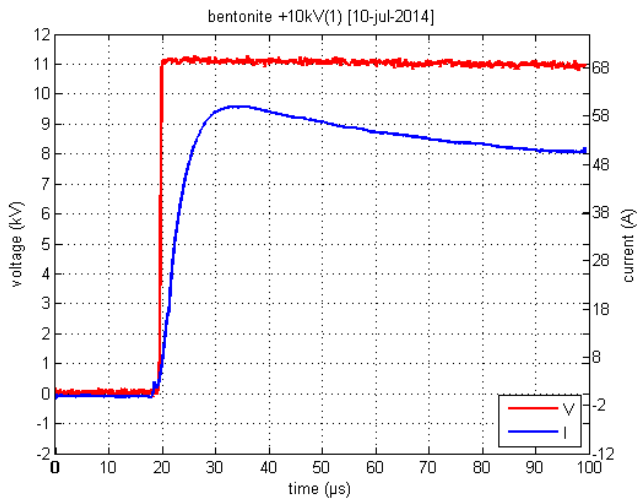


Εικόνα 5.101: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +8kV

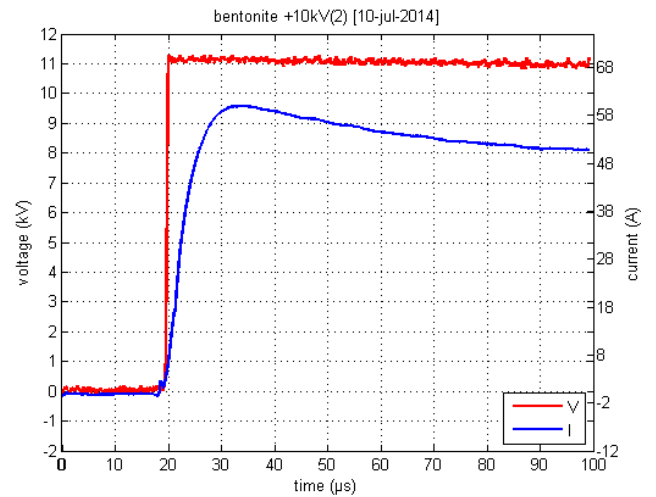


Εικόνα 5.102: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +8kV

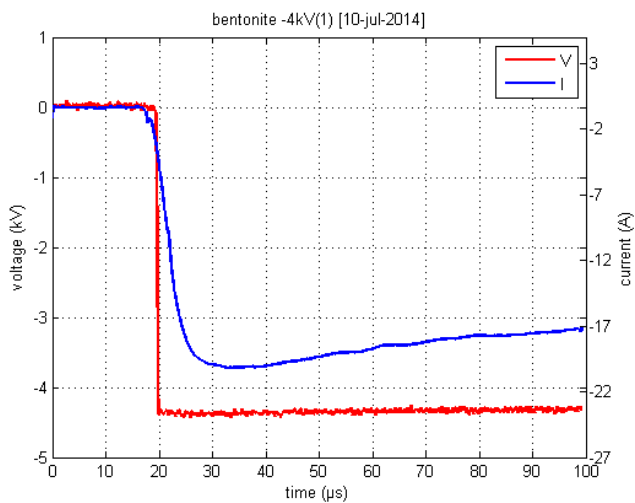
Παρουσίαση Μετρήσεων



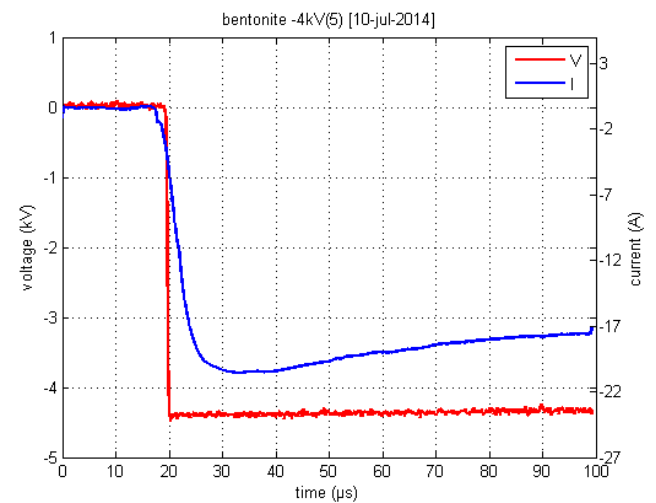
Εικόνα 5.103: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +10kV



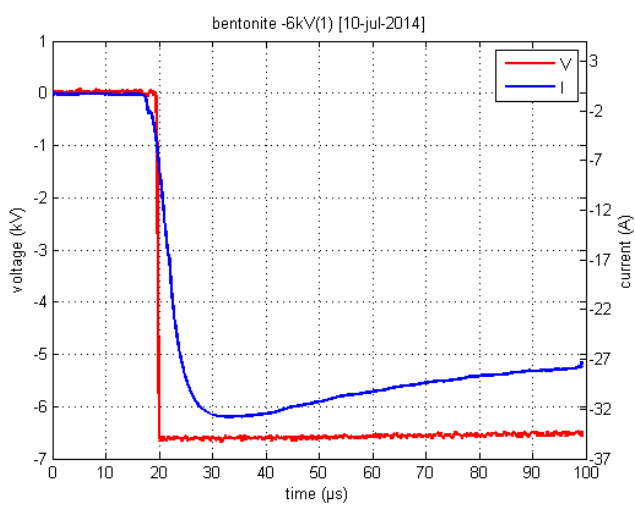
Εικόνα 5.104: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα +10kV



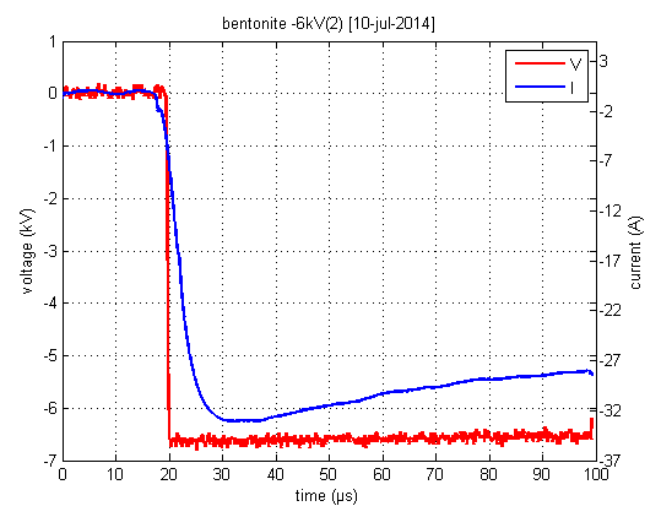
Εικόνα 5.105: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -4kV



Εικόνα 5.106: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -4kV

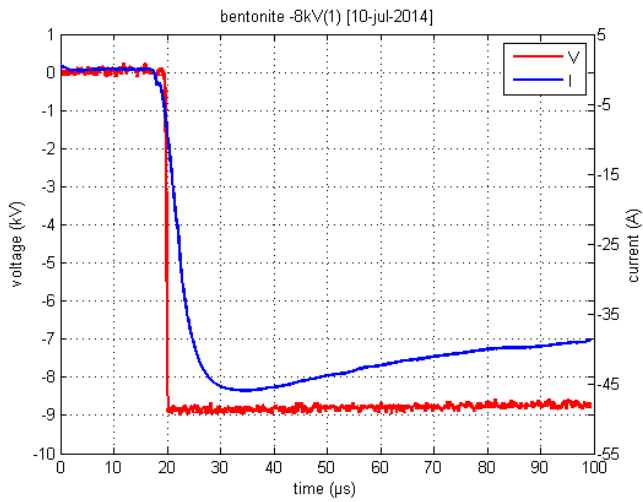


Εικόνα 5.107: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -6kV

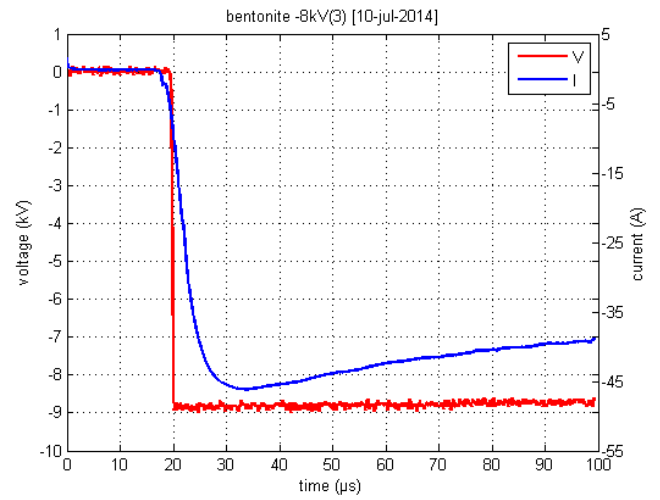


Εικόνα 5.108: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -6kV

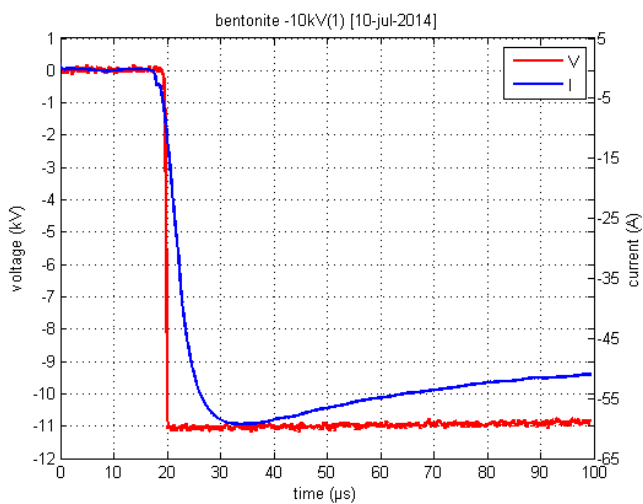
Παρουσίαση Μετρήσεων



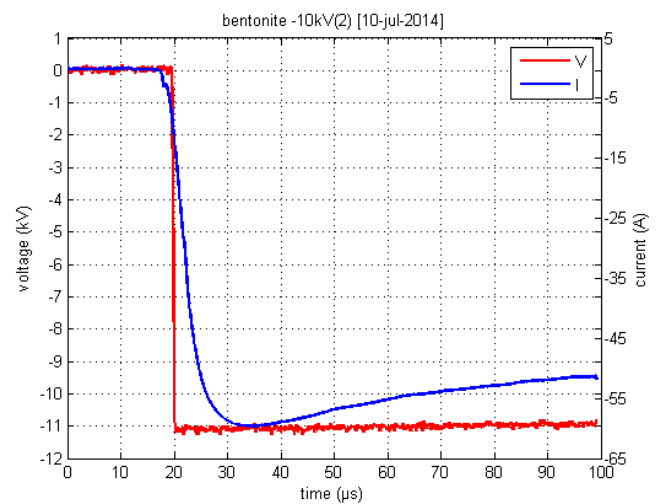
Εικόνα 5.109: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.110: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.111: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -10kV



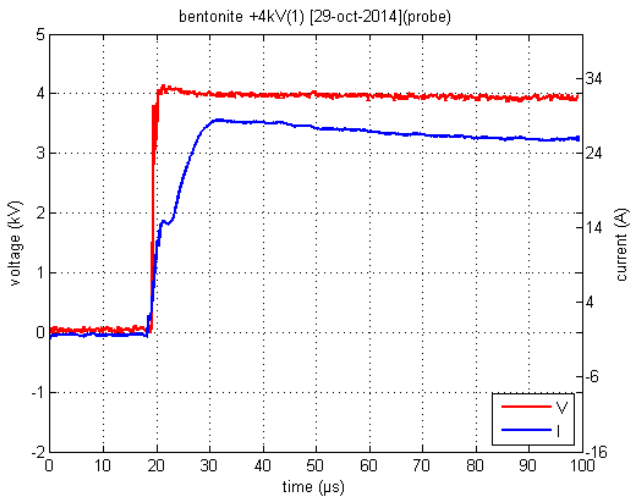
Εικόνα 5.112: Μπετονίτης στις 10-7-2014 στα -10kV

Μπετονίτης ($R_{SS}=110,7\Omega$)

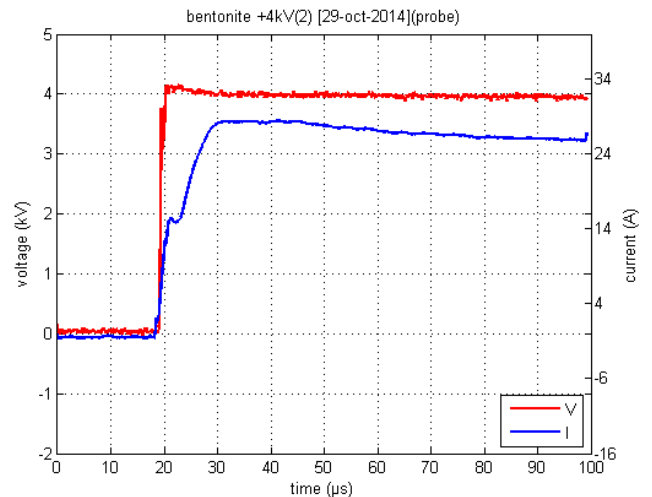
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	138,89	134,51	124,87	123,46	135,37	130,76	122,99	118,74
2 ^η	138,79	131,31	124,15	120,78	135,99	130,87	125,27	120,25
3 ^η	137,58	131,87	124,39	117,23	135,05	130,85	125,27	119,35
4 ^η	138,18	129,86	123,98	117,29	137,98	132,30	123,31	119,79
5 ^η	137,93	129,73	123,10	117,68	136,34	132,68	125,43	119,94
MO	138,27	131,46	124,10	119,29	136,15	131,49	124,45	119,61

Πίνακας 5.8: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 29-10 Οκτωβρίου 2014 για το μπετονίτη με τη χρήση διαφορικού probe.

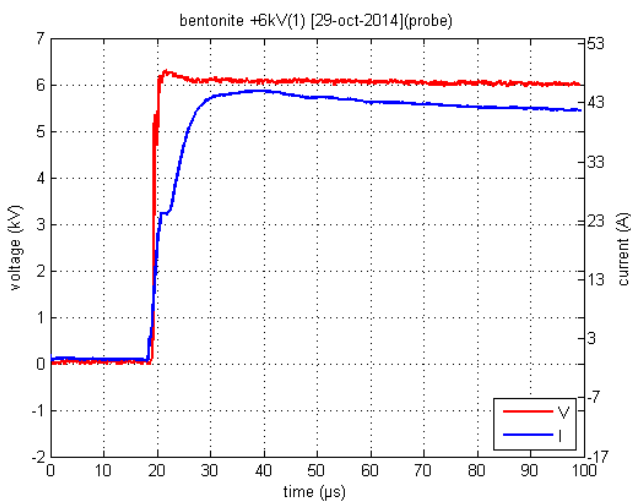
Παρουσίαση Μετρήσεων



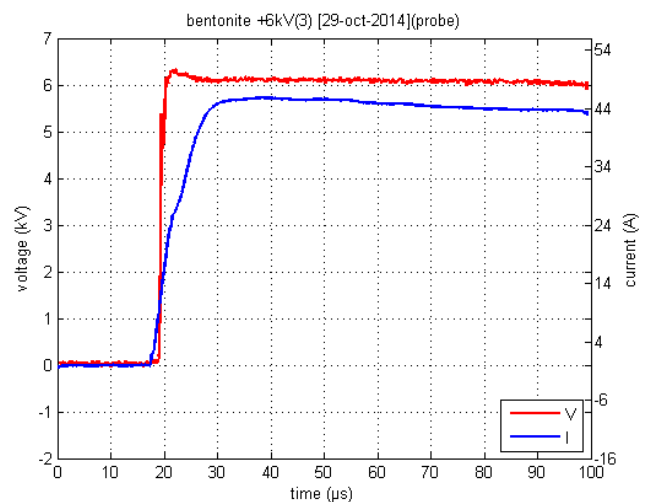
Εικόνα 5.113: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +4kV



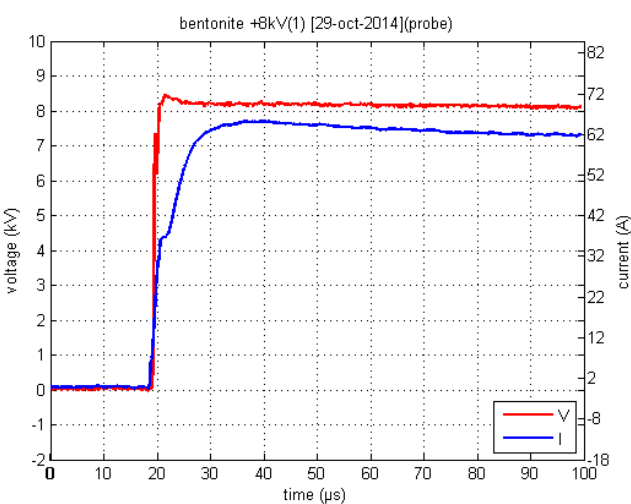
Εικόνα 5.114: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +4kV



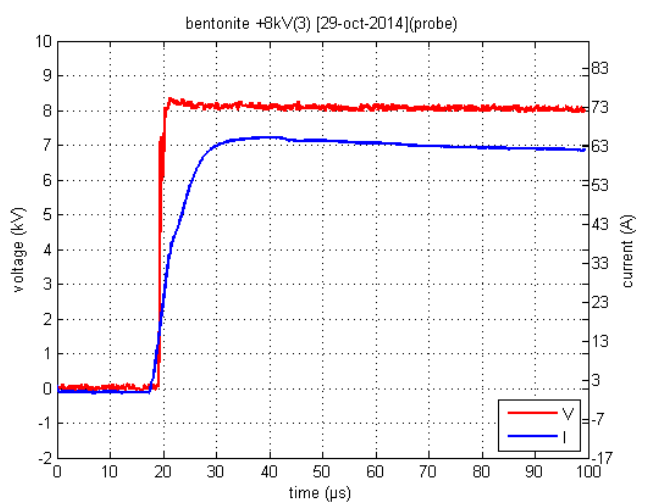
Εικόνα 5.115: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +6kV



Εικόνα 5.116: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +6kV

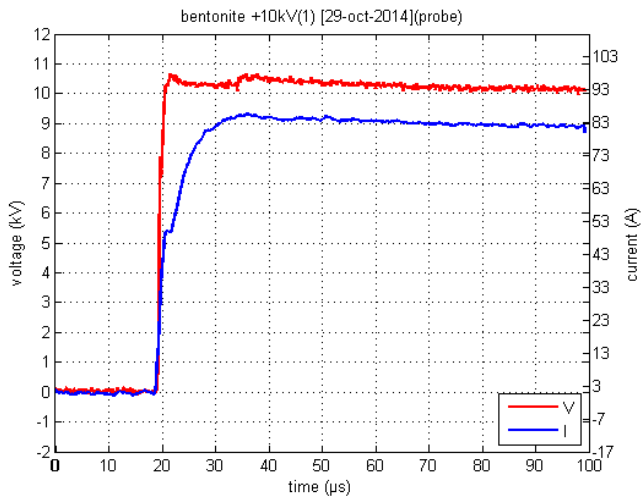


Εικόνα 5.117: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +8kV

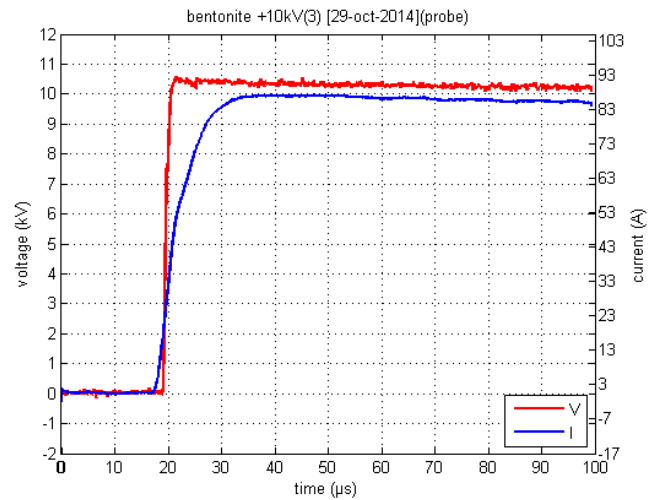


Εικόνα 5.118: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +8kV

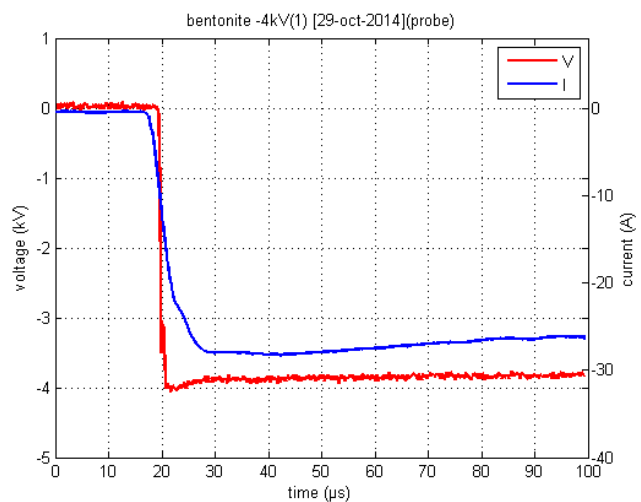
Παρουσίαση Μετρήσεων



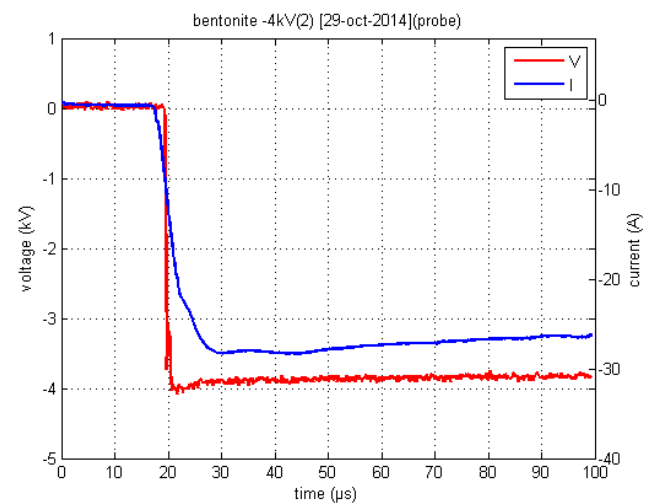
Εικόνα 5.119: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +10kV



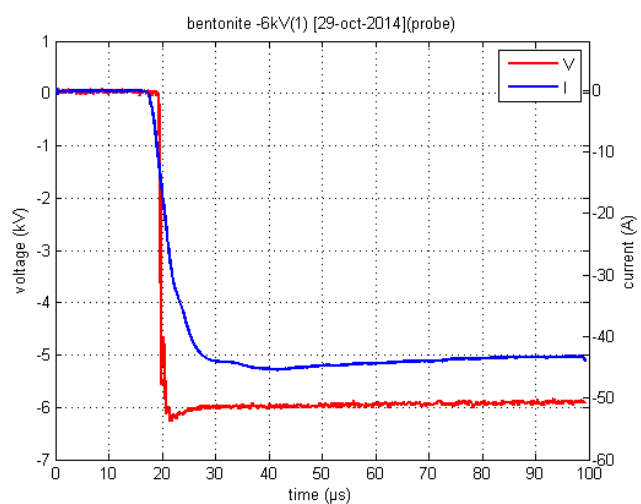
Εικόνα 5.120: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +10kV



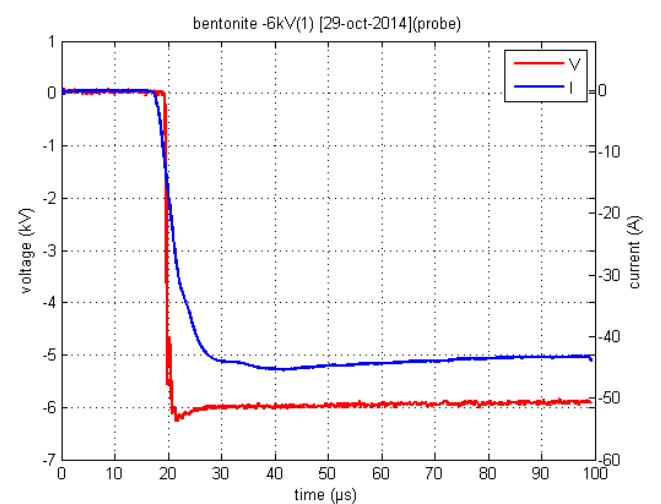
Εικόνα 5.121: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -4kV



Εικόνα 5.122: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -4kV

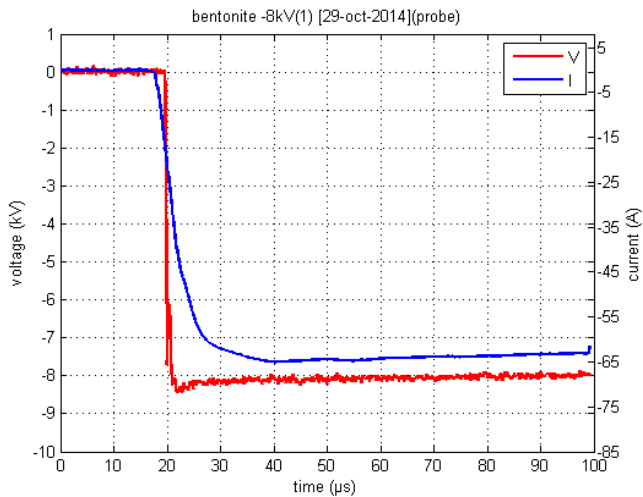


Εικόνα 5.123: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -6kV

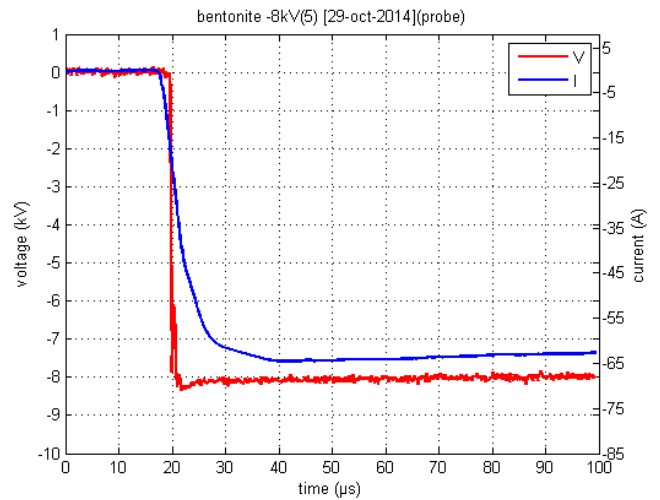


Εικόνα 5.124: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -6kV

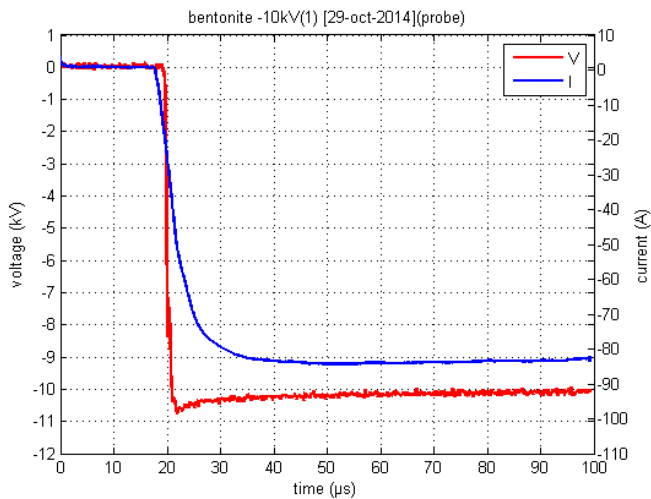
Παρουσίαση Μετρήσεων



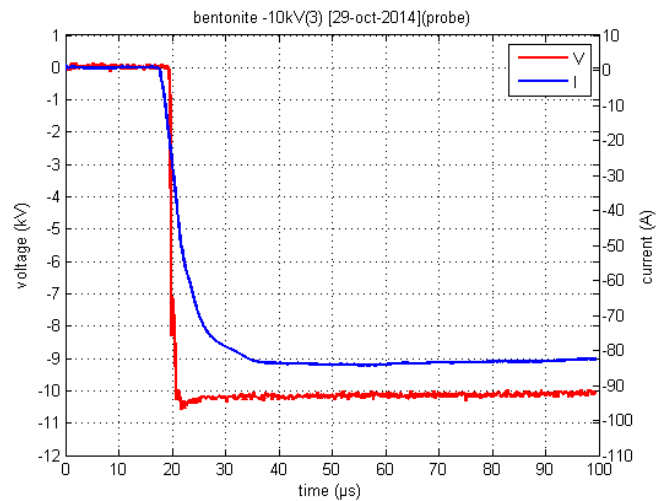
Εικόνα 5.125: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.126: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.127: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -10kV



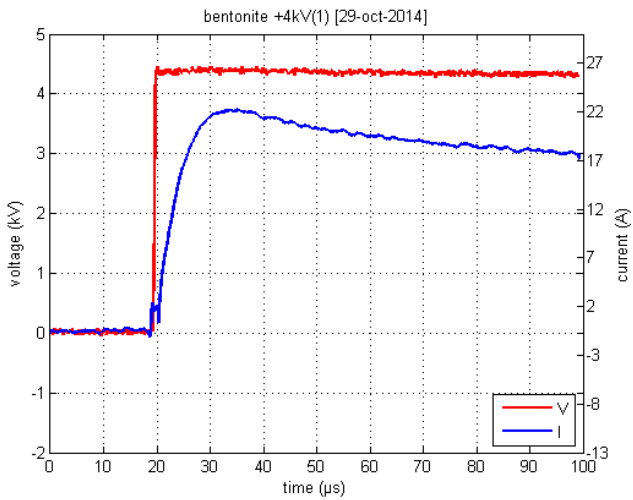
Εικόνα 5.128: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -10kV

Μπετονίτης ($R_{SS}=110,7\Omega$)

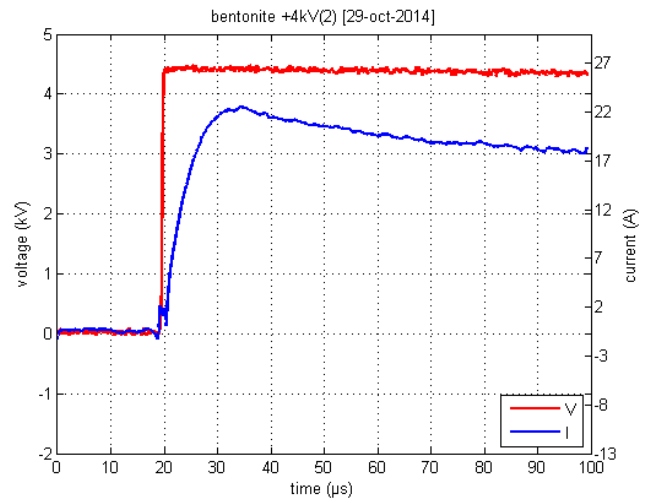
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	196,8	191,72	180,87	175,57	197,33	187,39	183,07	179,14
2 ^η	194,24	187,10	182,82	176,68	193,35	182,82	182,76	177,68
3 ^η	198,64	185,56	182,85	176,00	191,93	181,80	179,82	178,17
4 ^η	198,64	186,21	183,33	178,61	189,13	186,65	181,11	177,92
5 ^η	195,92	184,48	184,03	178,28	192,27	184,66	181,42	177,12
ΜΟ	196,85	187,01	182,78	177,03	192,80	184,66	181,64	178,01

Πίνακας 5.9: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 29 Οκτωβρίου 2014 για το μπετονίτη χωρίς τη χρήση διαφορικού probe.

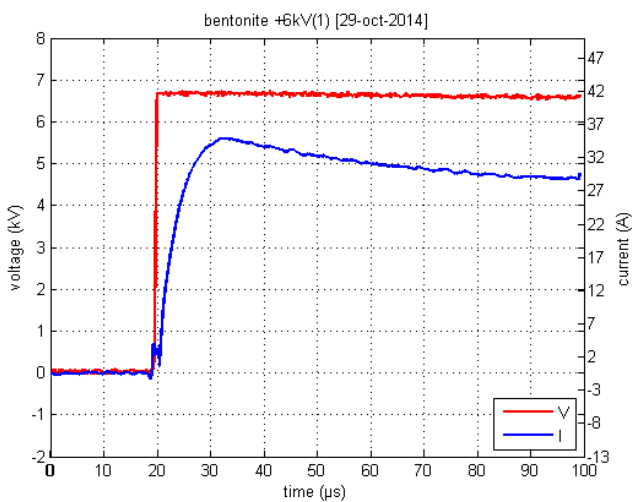
Παρουσίαση Μετρήσεων



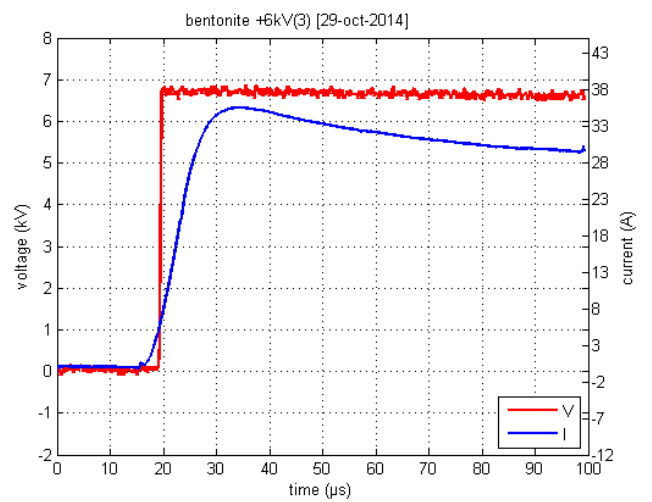
Εικόνα 5.129: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +4kV



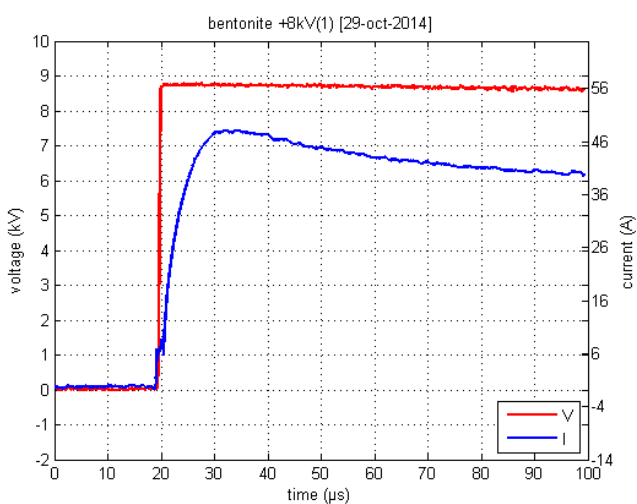
Εικόνα 5.130: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +4kV



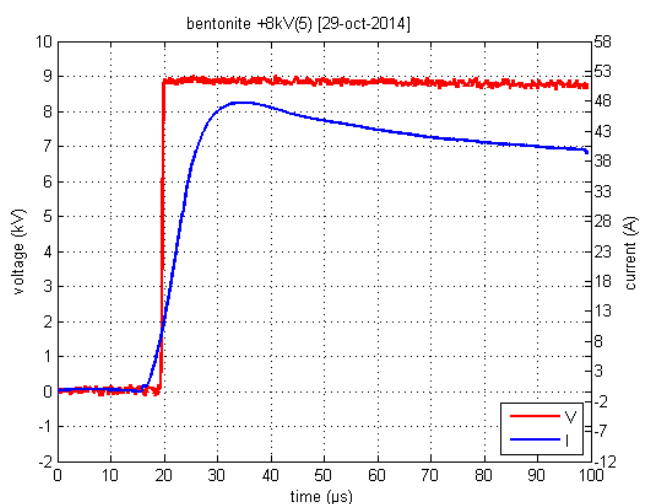
Εικόνα 5.131: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +6kV



Εικόνα 5.132: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +6kV

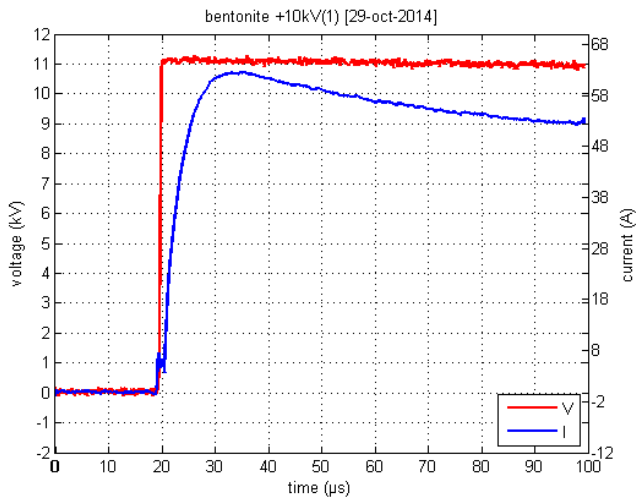


Εικόνα 5.133: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +8kV

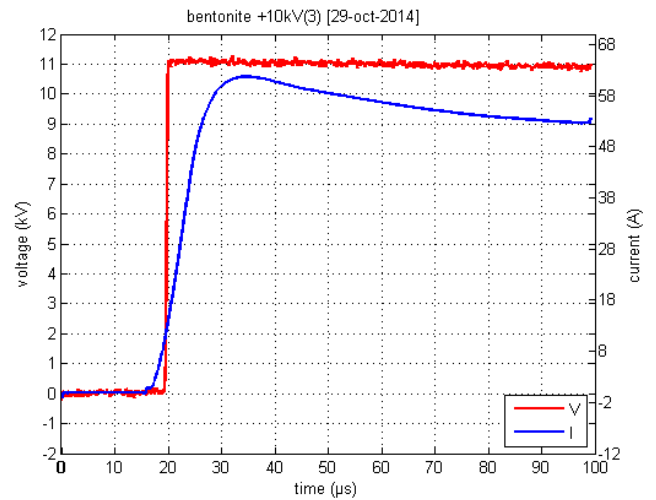


Εικόνα 5.134: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +8kV

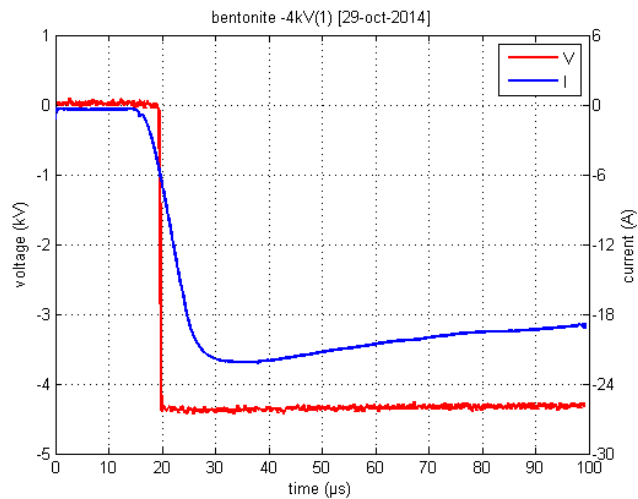
Παρουσίαση Μετρήσεων



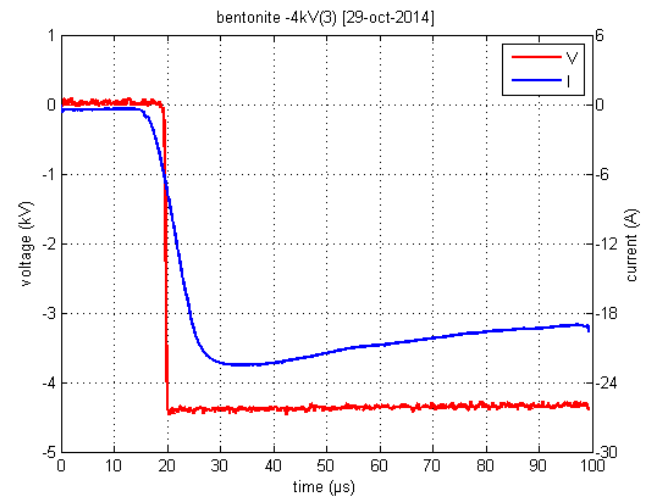
Εικόνα 5.135: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +10kV



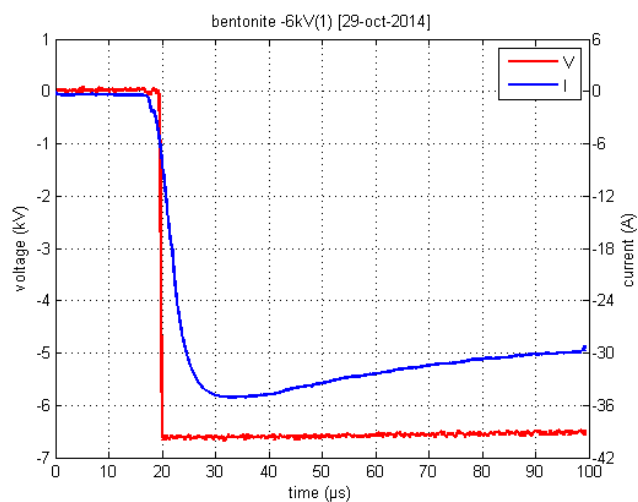
Εικόνα 5.136: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα +10kV



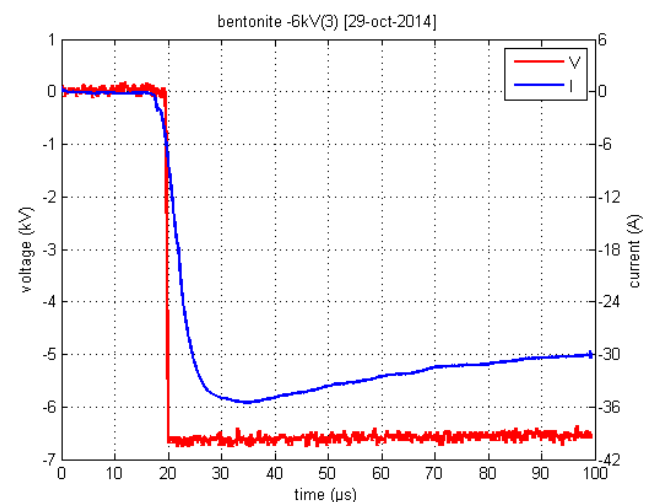
Εικόνα 5.137: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -4kV



Εικόνα 5.138: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -4kV

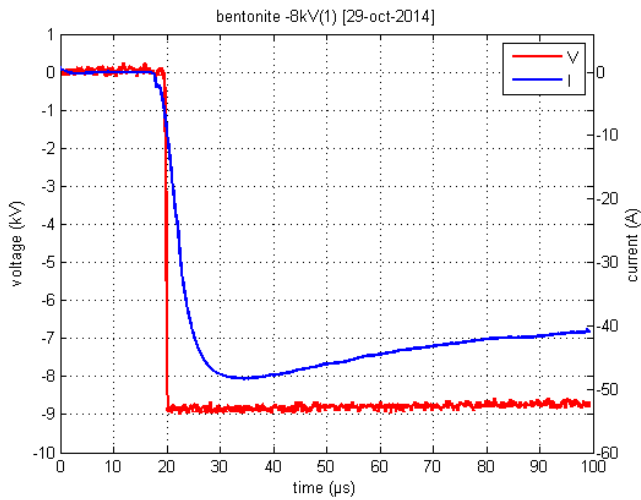


Εικόνα 5.139: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -6kV

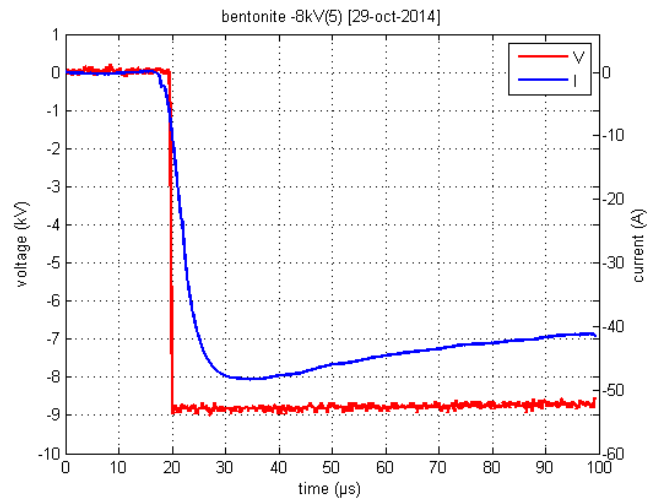


Εικόνα 5.140: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -6kV

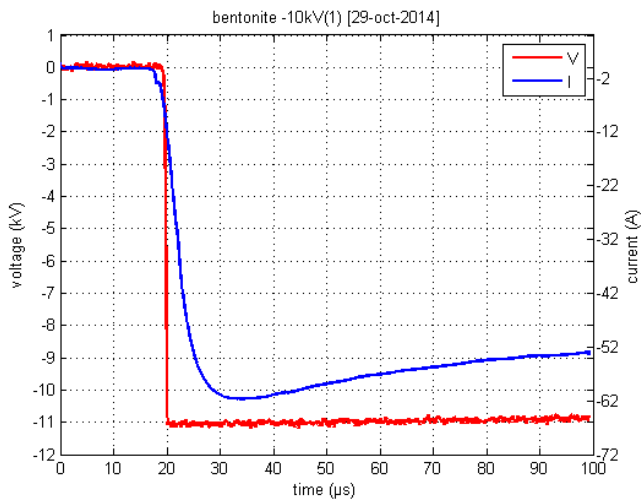
Παρουσίαση Μετρήσεων



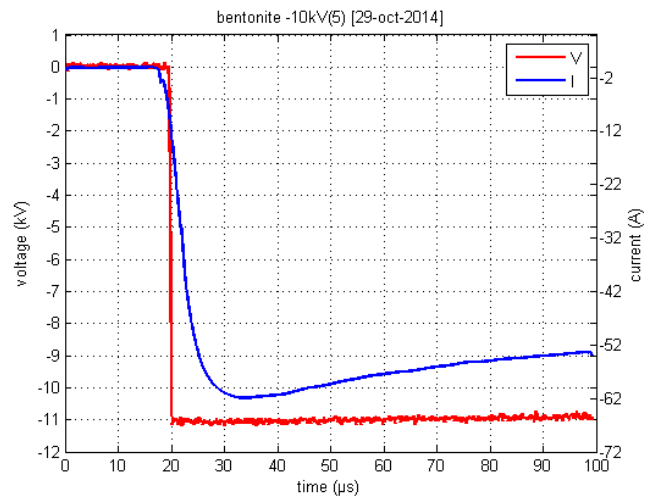
Εικόνα 5.141: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.142: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.143: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.144: Μπετονίτης στις 29-10-2014 στα -10kV

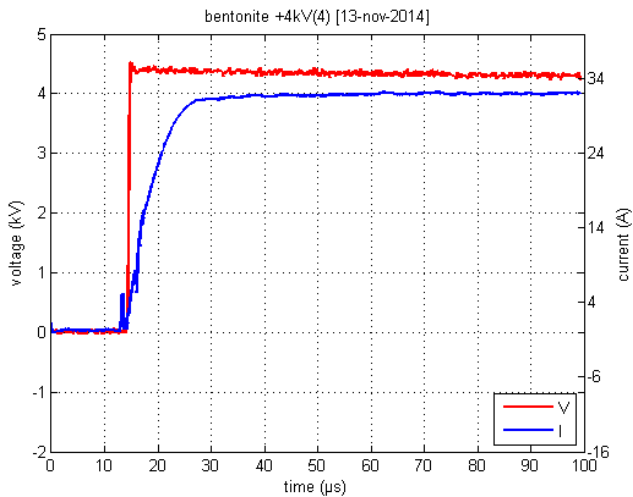
Μπετονίτης ($R_{SS}=103,9\Omega$)

	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	130,86	121,27	110,84	103,57	115,21	114,57	107,62	105,51
2 ^η	133,33	121,49	109,74	103,21	120,38	112,68	112,80	101,92
3 ^η	134,92	118,18	102,38	100,00	120,97	114,69	110,11	103,85
4 ^η	133,43	118,29	111,37	101,51	121,11	111,74	112,44	103,43
5 ^η	130,00	117,83	109,32	96,34	121,53	115,06	110,26	103,90
MO	132,51	119,41	108,73	100,93	119,84	113,75	110,65	103,72

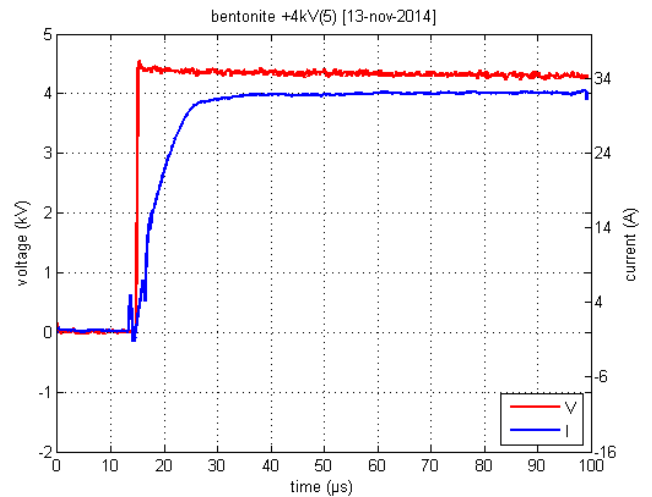
Πίνακας 5.10: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 13 Νοεμβρίου 2014 για το μπετονίτη.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

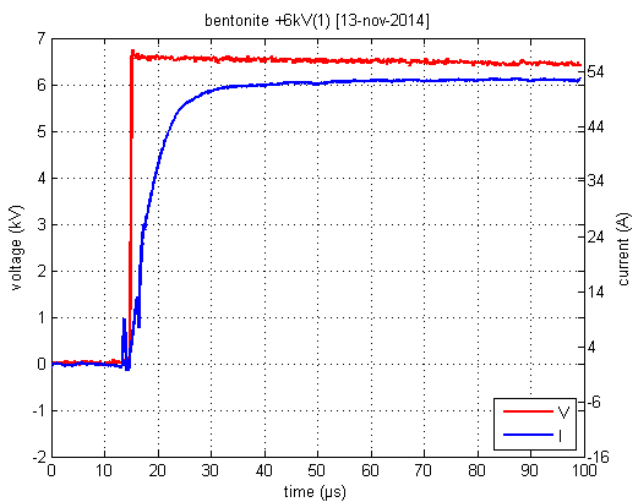
Παρουσίαση Μετρήσεων



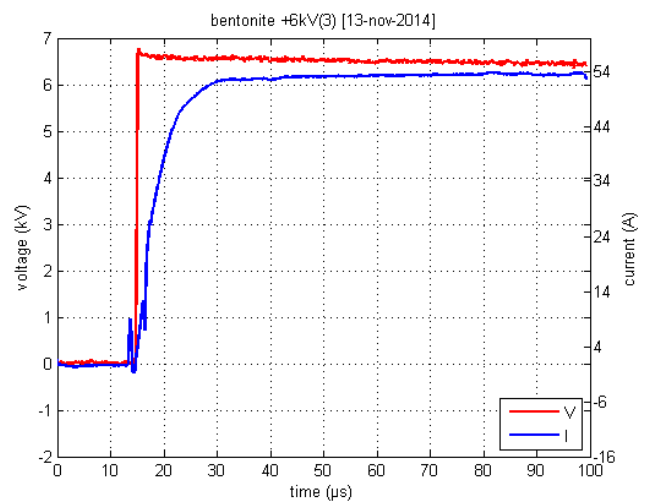
Εικόνα 5.145: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +4kV



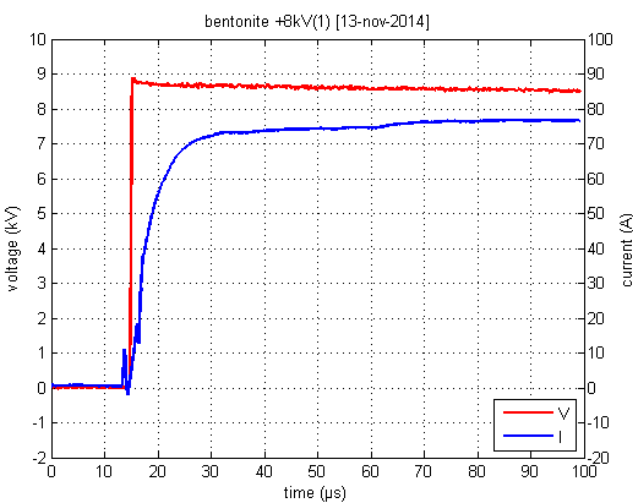
Εικόνα 5.146: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +4kV



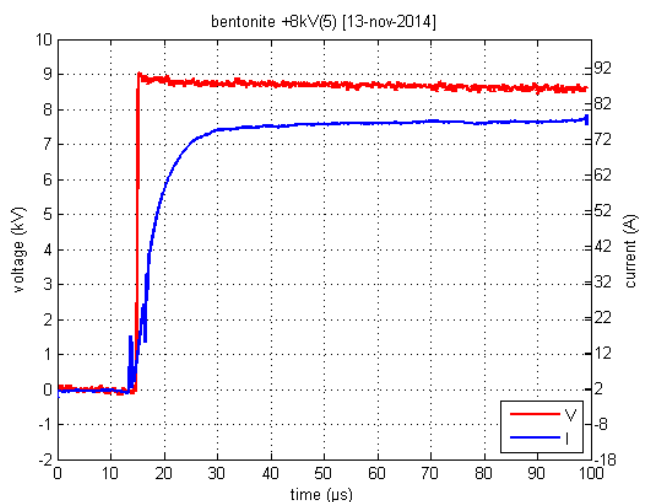
Εικόνα 5.147: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +6kV



Εικόνα 5.148: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +6kV

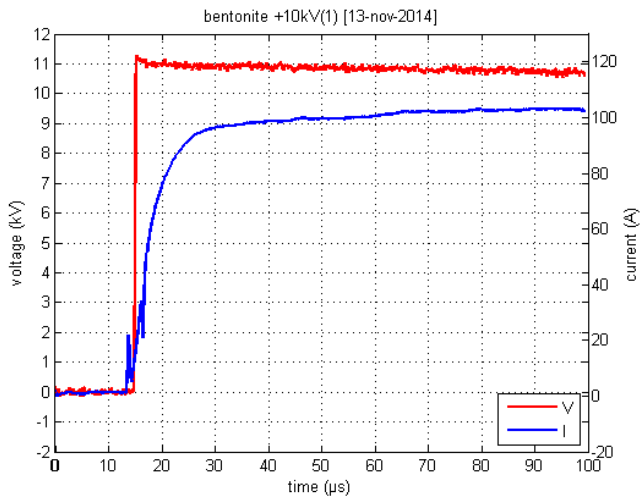


Εικόνα 5.149: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +8kV

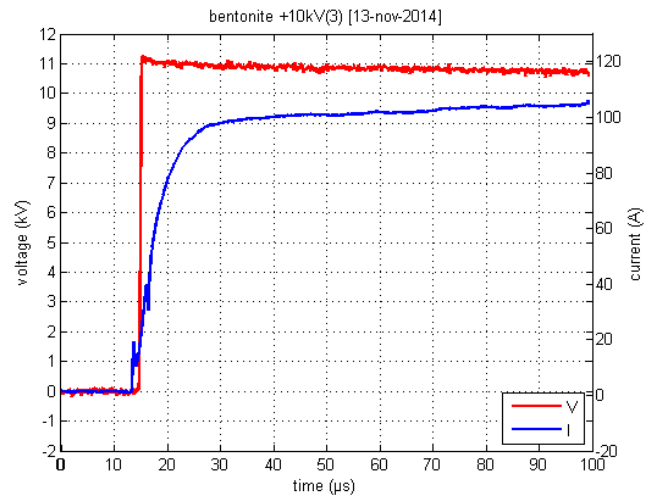


Εικόνα 5.150: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +8kV

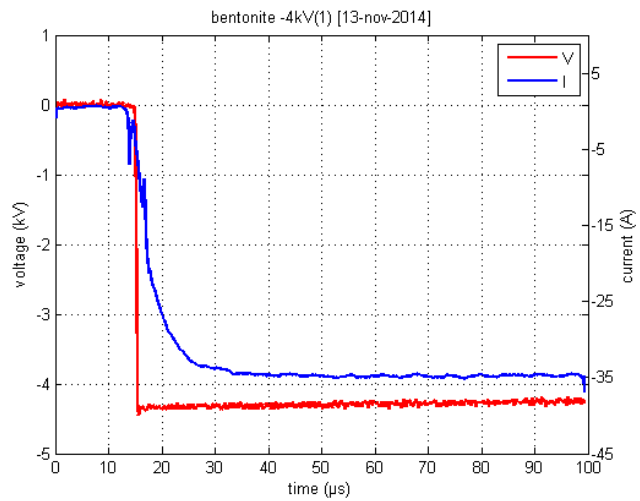
Παρουσίαση Μετρήσεων



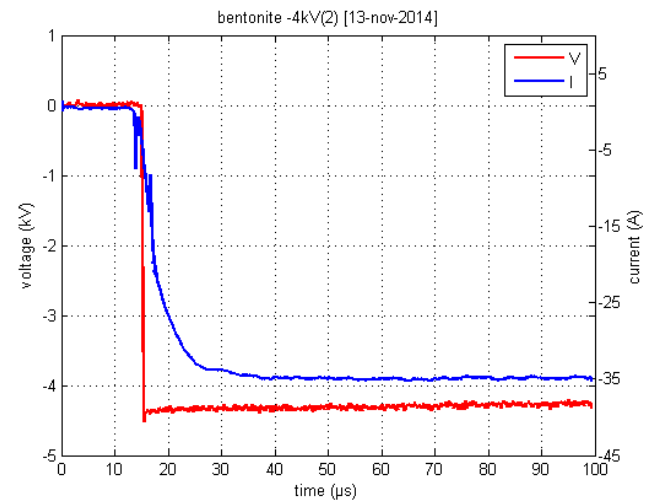
Εικόνα 5.151: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +10kV



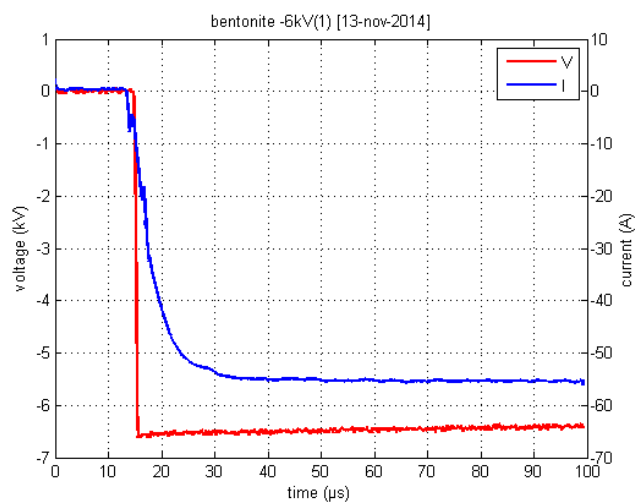
Εικόνα 5.152: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα +10kV



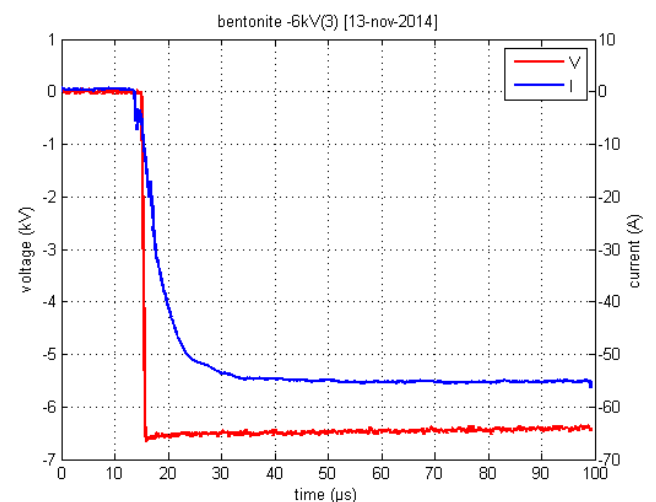
Εικόνα 5.153: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -4kV



Εικόνα 5.154: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -4kV

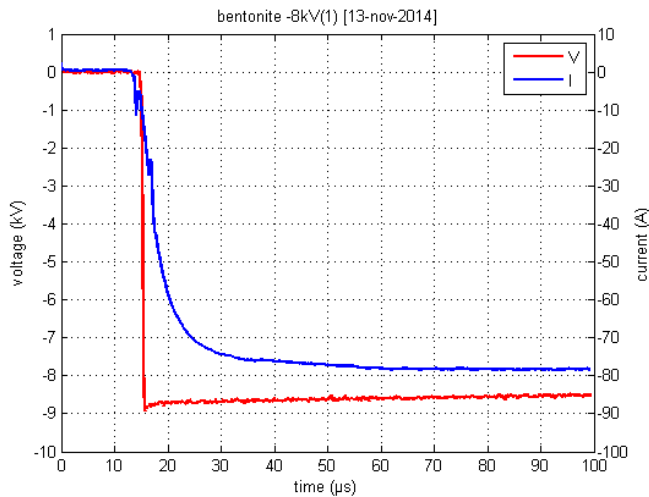


Εικόνα 5.155: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -6kV

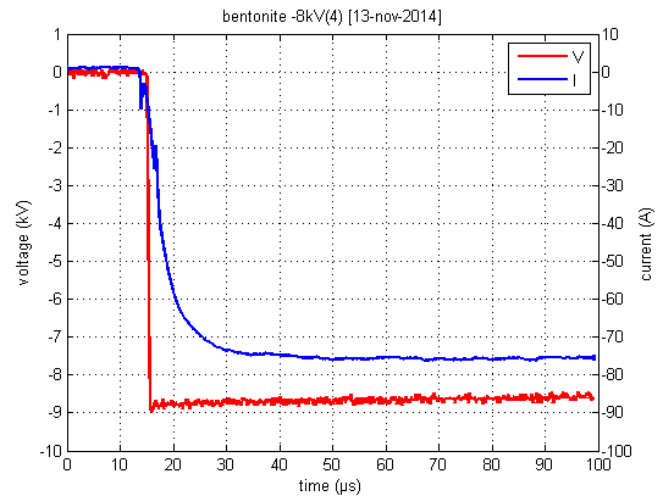


Εικόνα 5.156: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -6kV

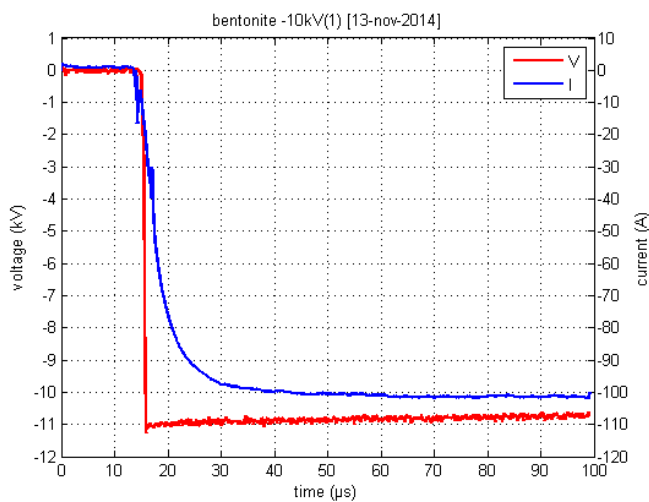
Παρουσίαση Μετρήσεων



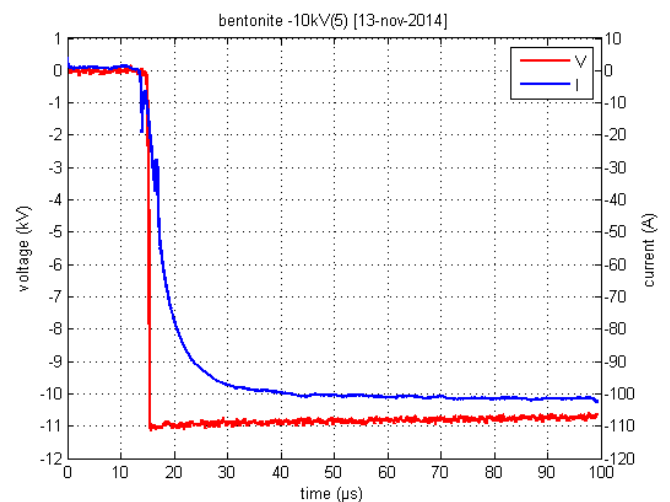
Εικόνα 5.157: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.158: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.159: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.160: Μπετονίτης στις 13-11-2014 στα -10kV

5.4 Χημικό υλικό A

Στο ηλεκτρόδιο που είναι εγκιβωτισμένο στο χημικό υλικό A ελήφθησαν μετρήσεις στις 10 Ιουλίου 2014, στις 4 Νοεμβρίου 2014 με διαφορικό probe και χωρίς διαφορικό probe και στις 13 Νοεμβρίου 2014. Στους πίνακες που ακολουθούν εμπεριέχονται οι τιμές της παραμέτρου Z_4 και για τις τρεις ημερομηνίες καθώς και ο μέσος όρος τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά παλμογραφήματα.

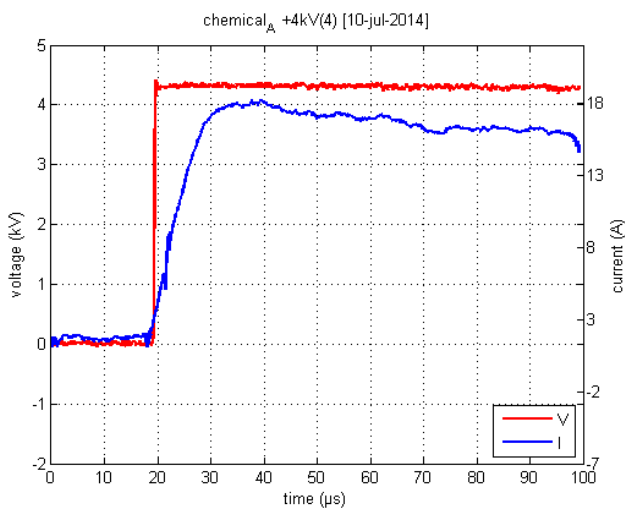
Παρουσίαση Μετρήσεων

Χημικό υλικό A ($R_{SS}=196\Omega$)

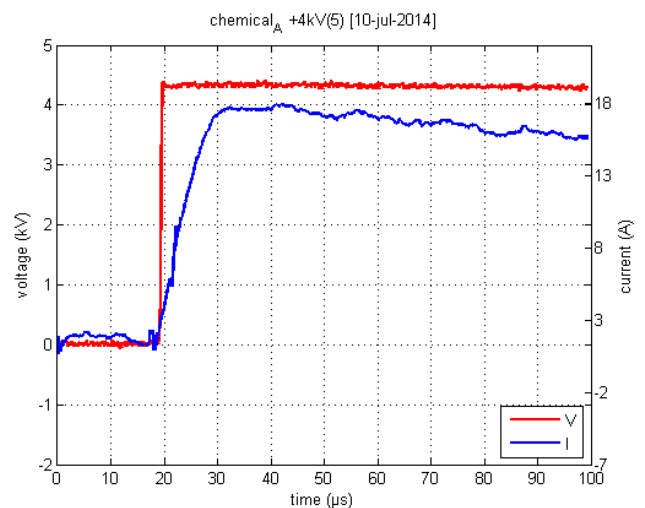
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	233,53	218,11	211,97	194,48	247,34	243,41	236,58	230,63
2 ^η	226,62	220,06	213,05	199,53	248,14	239,75	225,75	195,10
3 ^η	228,29	219,53	213,60	201,68	250,24	231,51	220,56	227,39
4 ^η	224,99	217,86	218,20	206,24	253,59	239,75	239,63	228,11
5 ^η	230,85	221,09	216,17	204,73	241,28	239,32	235,38	217,16
MO	228,85	219,33	214,60	201,31	248,12	238,75	231,57	219,68

Πίνακας 5.11: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 10 Ιουλίου 2014 για το χημικό υλικό A.

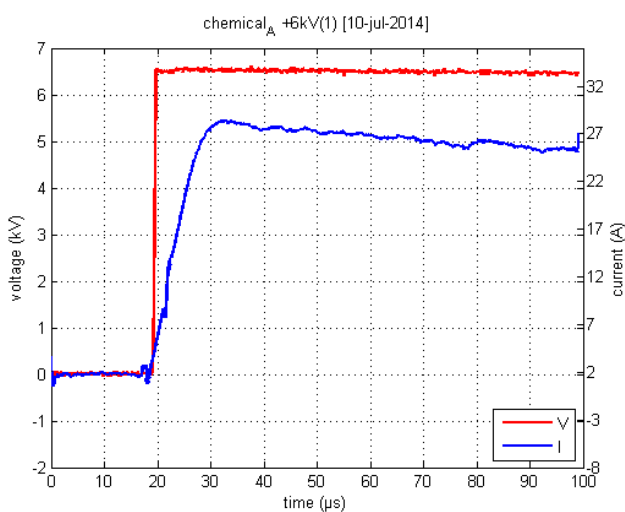
Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.



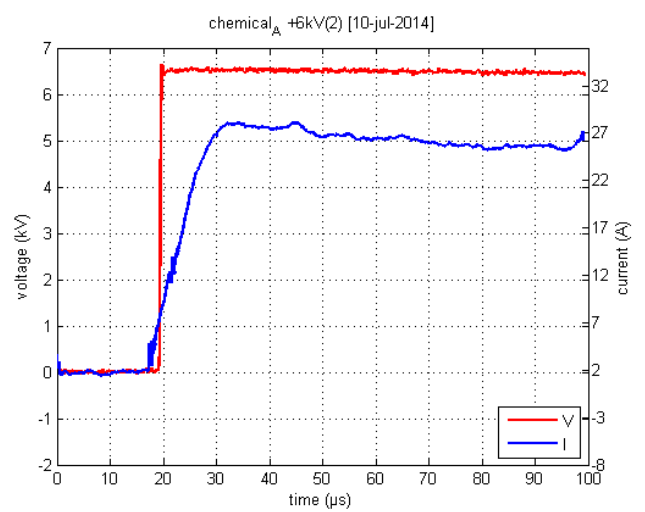
Εικόνα 5.161: Χημικό A στις 10-7-2014 στα +4kV



Εικόνα 5.162: Χημικό A στις 10-7-2014 στα +4kV

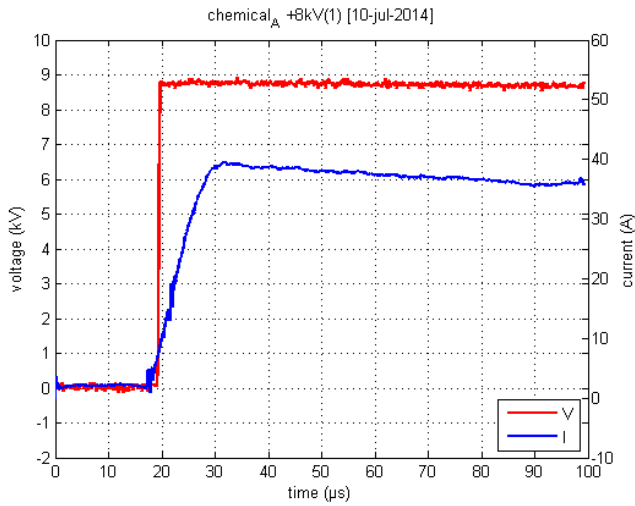


Εικόνα 5.163: Χημικό A στις 10-7-2014 στα +6kV

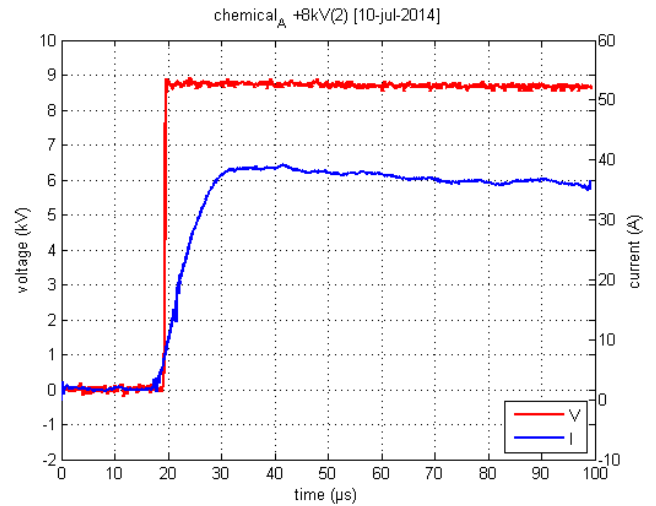


Εικόνα 5.164: Χημικό A στις 10-7-2014 στα +6kV

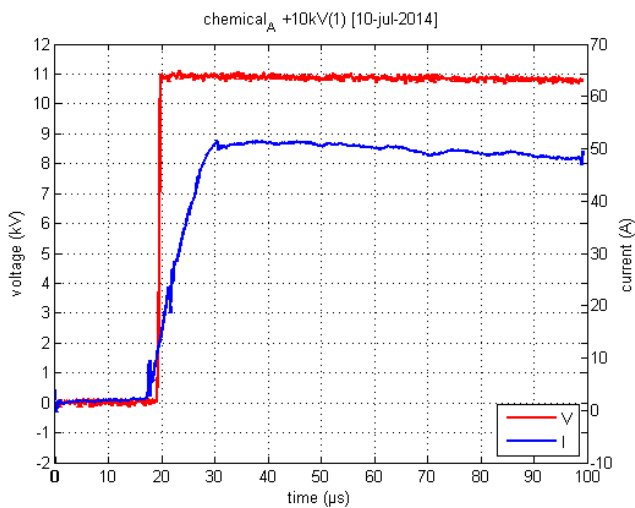
Παρουσίαση Μετρήσεων



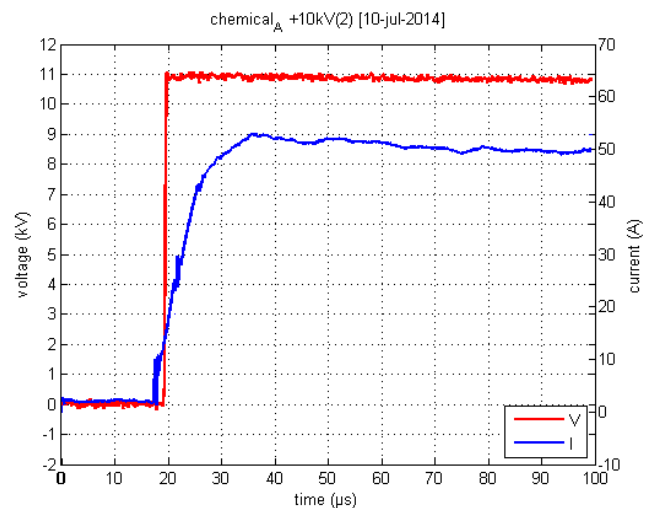
Εικόνα 5.165: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα +8kV



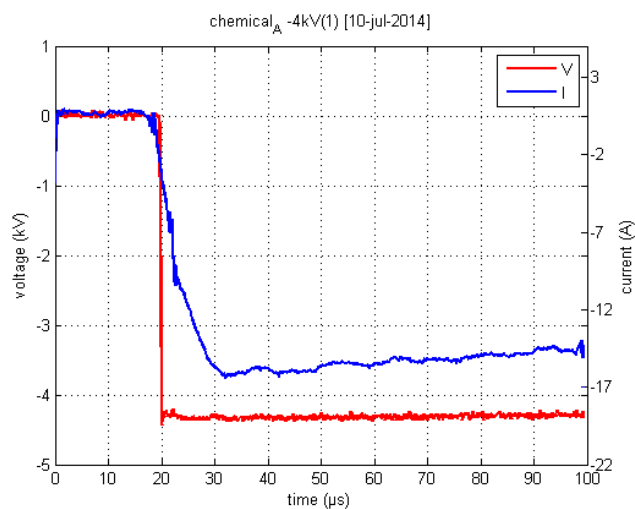
Εικόνα 5.166: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα +8kV



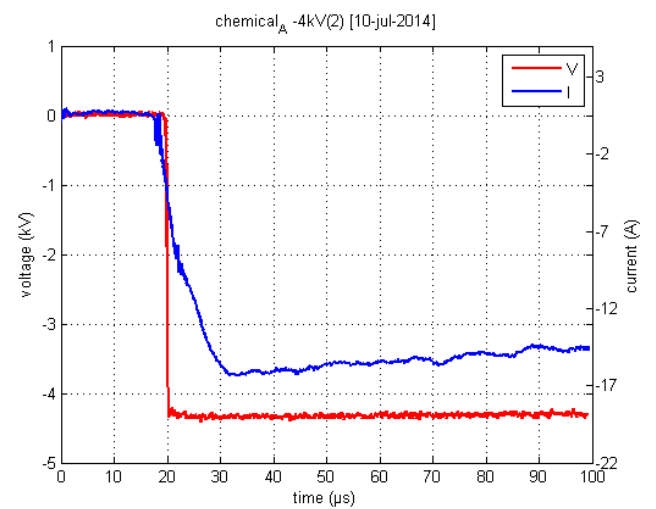
Εικόνα 5.167: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα +10kV



Εικόνα 5.168: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα +10kV

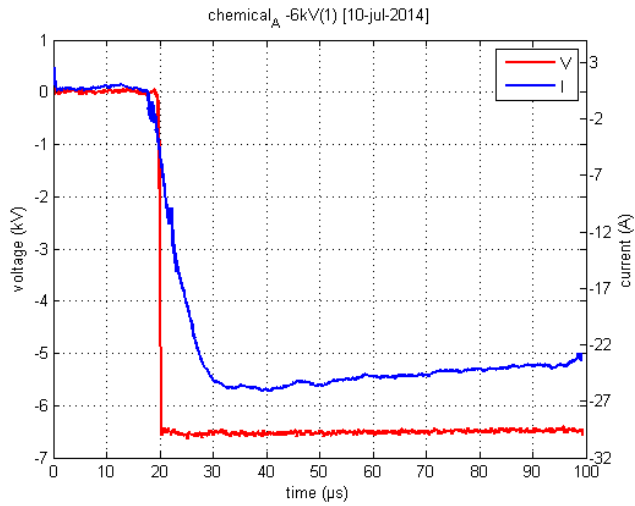


Εικόνα 5.169: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -4kV

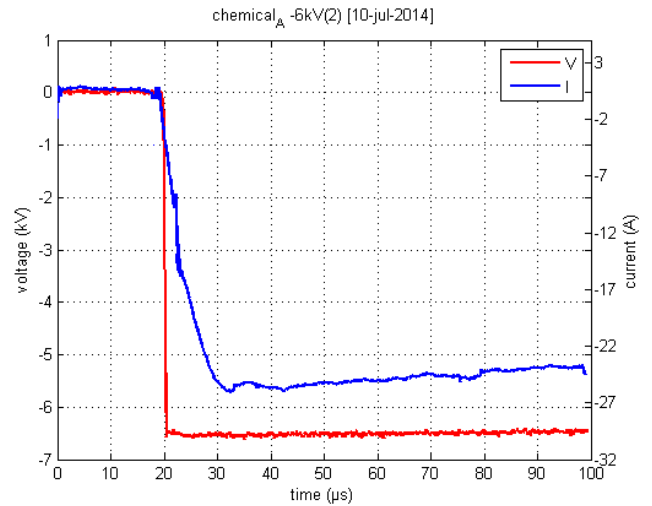


Εικόνα 5.170: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -4kV

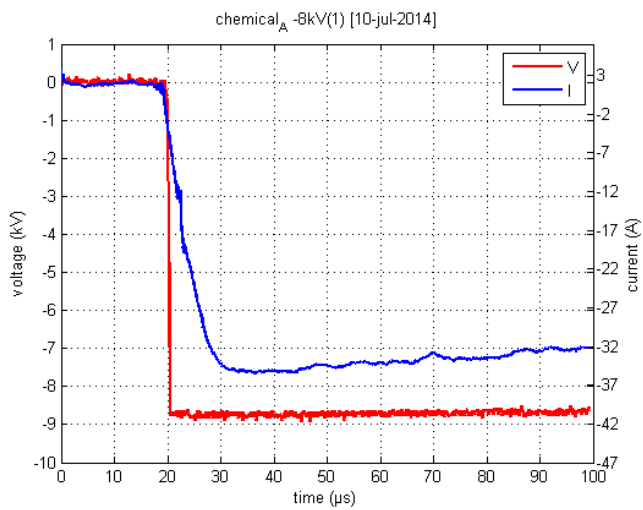
Παρουσίαση Μετρήσεων



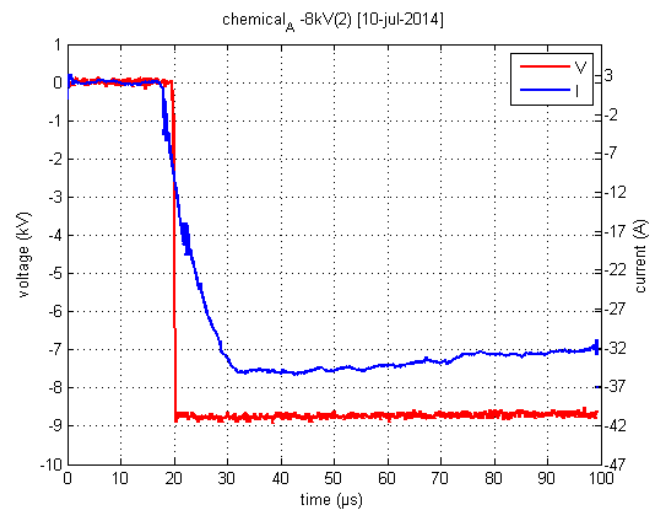
Εικόνα 5.171: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -6kV



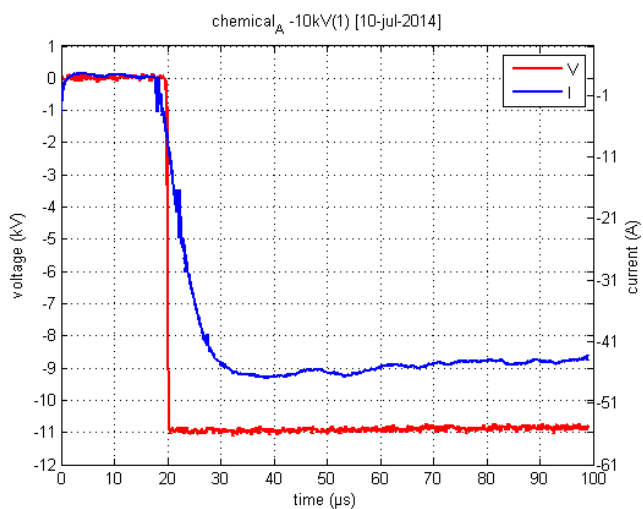
Εικόνα 5.172: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -6kV



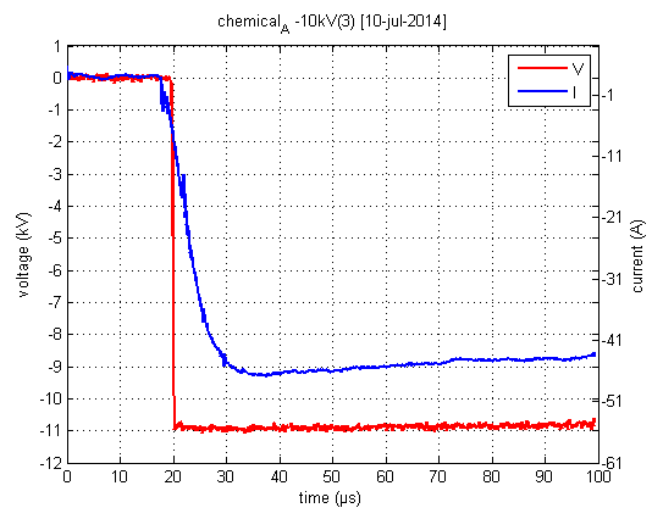
Εικόνα 5.173: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.174: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.175: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.176: Χημικό Α στις 10-7-2014 στα -10kV

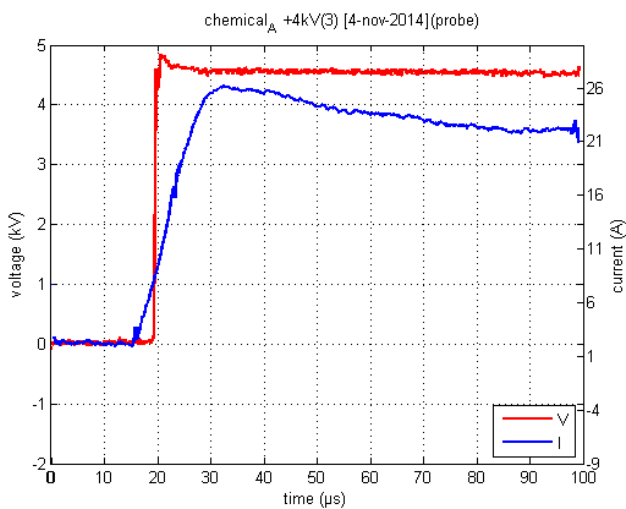
Παρουσίαση Μετρήσεων

Χημικό υλικό A ($R_{SS}=194,8\Omega$)

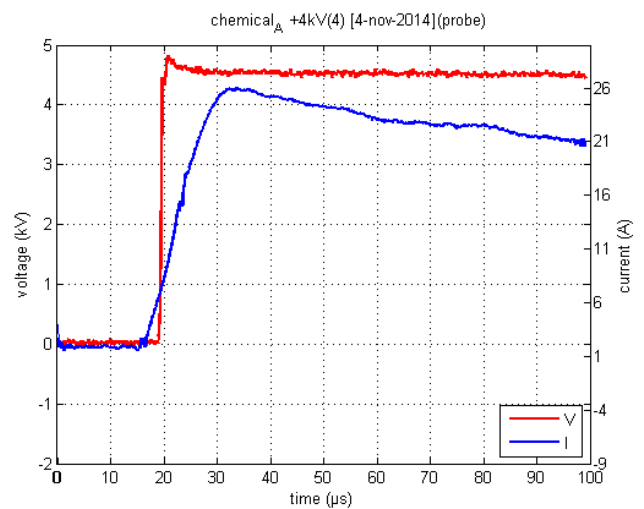
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	162,85	163,94	166,78	158,01	227,2	201,90	173,30	154,07
2 ^η	162,86	152,73	167,87	157,83	219,78	200,27	167,40	167,05
3 ^η	165,80	164,45	168,33	159,36	200,00	204,32	171,65	161,86
4 ^η	162,86	168,83	169,54	165,37	222,26	206,32	175,78	163,88
5 ^η	165,70	168,87	170,42	154,83	216,15	206,81	173,30	166,10
MO	164,02	163,76	168,58	159,08	217,08	203,92	172,29	162,59

Πίνακας 5.12: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 4 Νοεμβρίου 2014 για το χημικό υλικό A με τη χρήση διαφορικού probe .

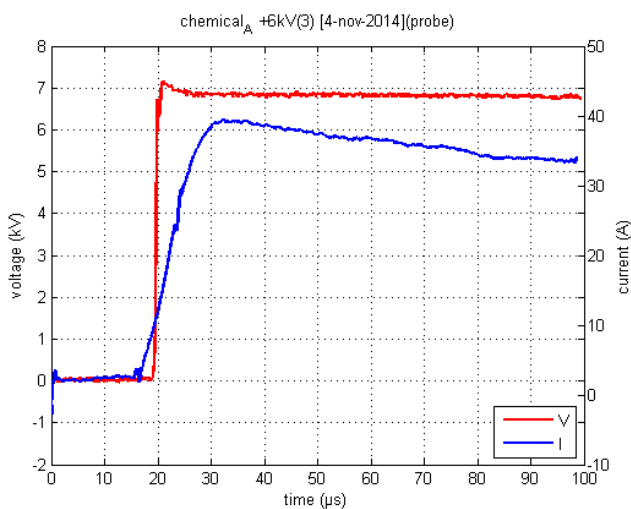
Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.



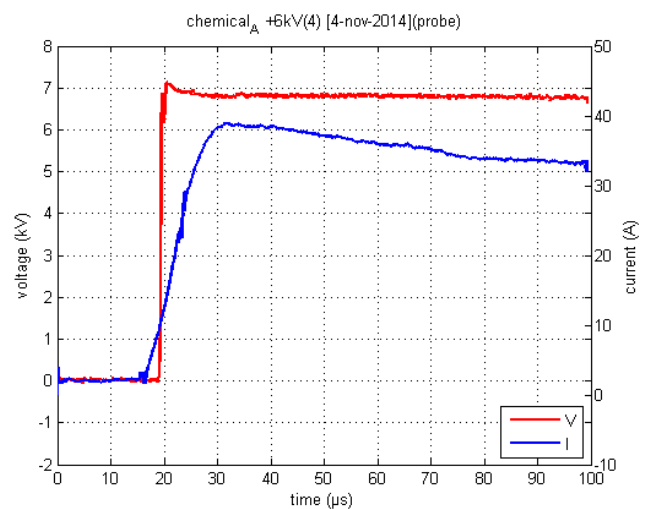
Εικόνα 5.177: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +4kV



Εικόνα 5.178: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +4kV

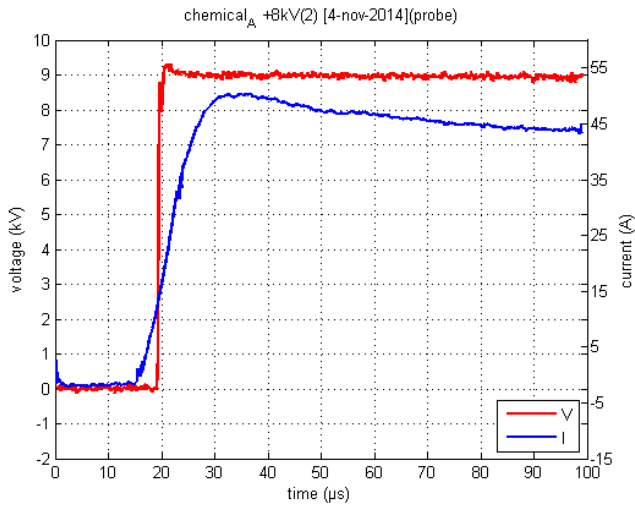


Εικόνα 5.179: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +6kV

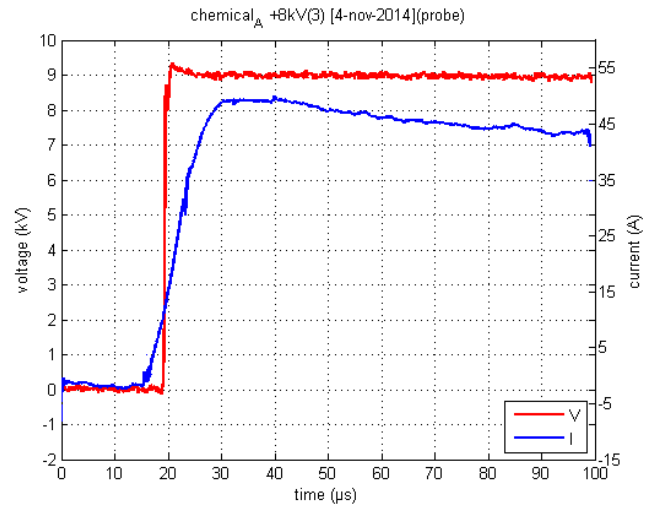


Εικόνα 5.180: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +6kV

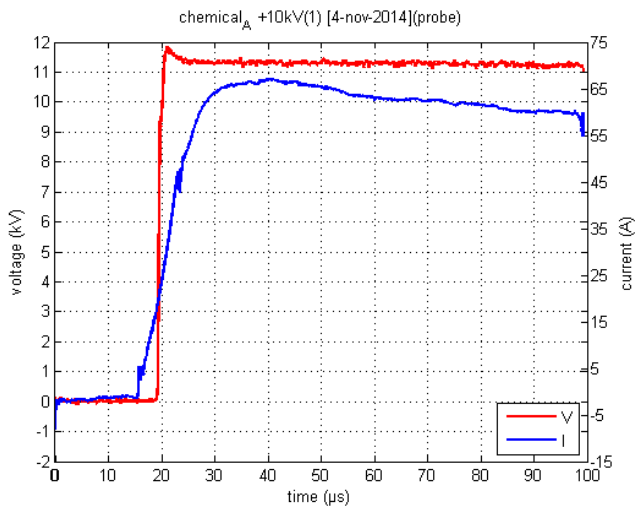
Παρουσίαση Μετρήσεων



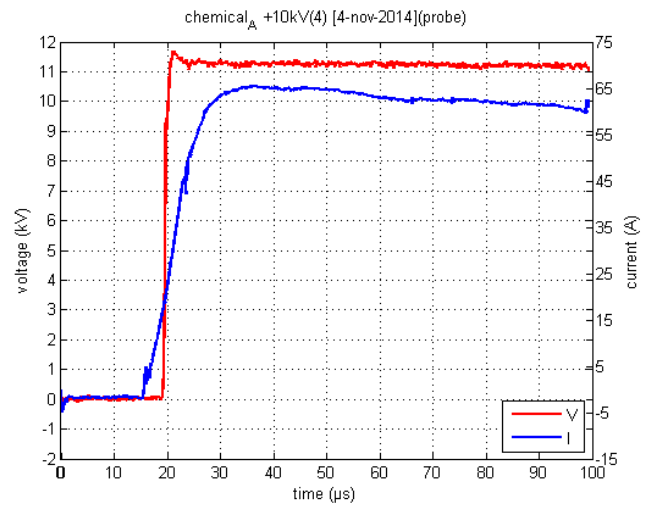
Εικόνα 5.181: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +8kV



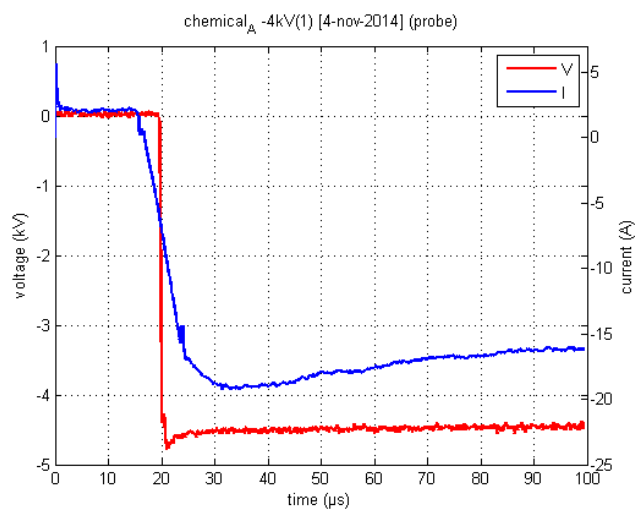
Εικόνα 5.182: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +8kV



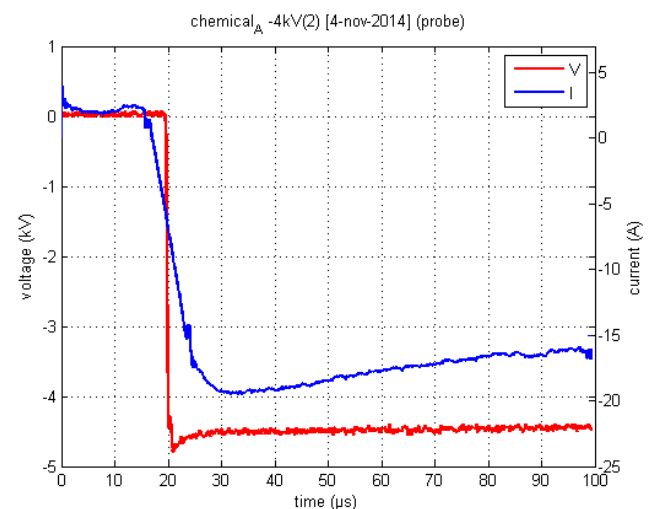
Εικόνα 5.183: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +10kV



Εικόνα 5.184: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +10kV

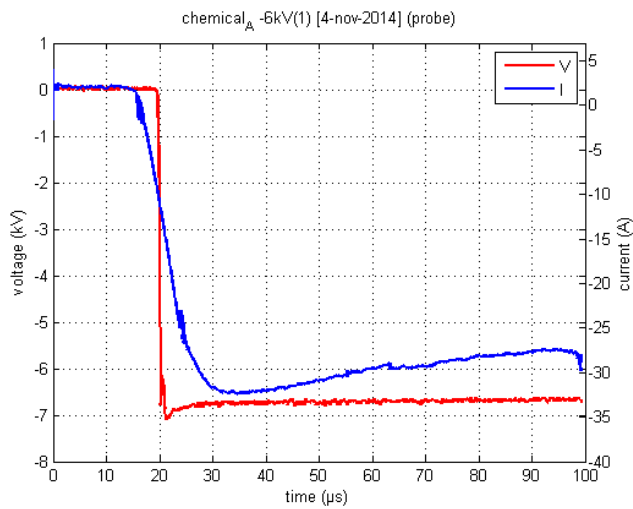


Εικόνα 5.185: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -4kV

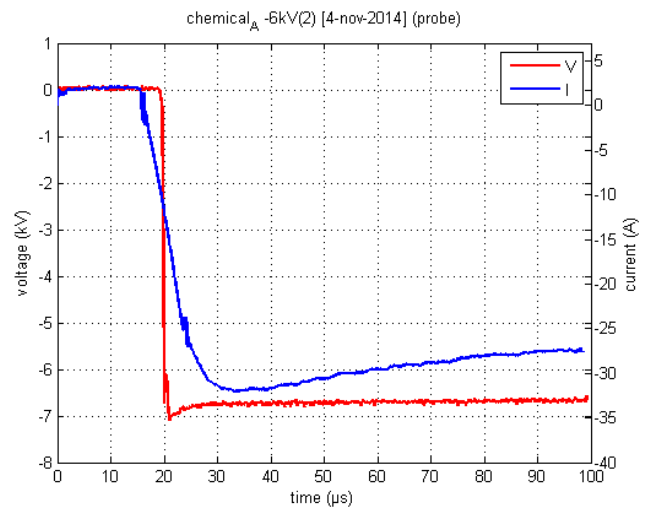


Εικόνα 5.186: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -4kV

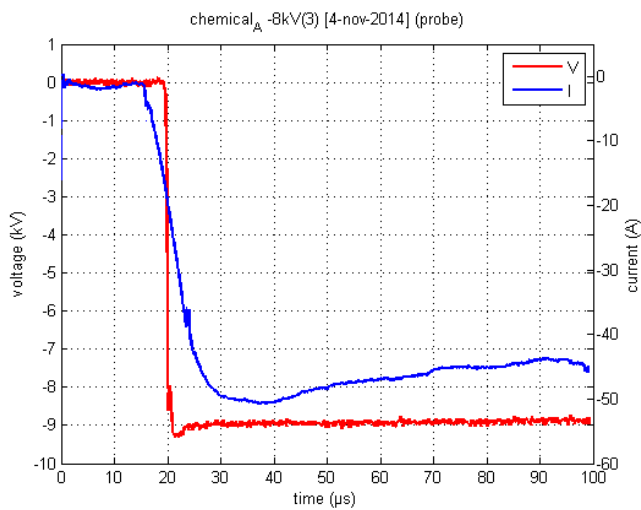
Παρουσίαση Μετρήσεων



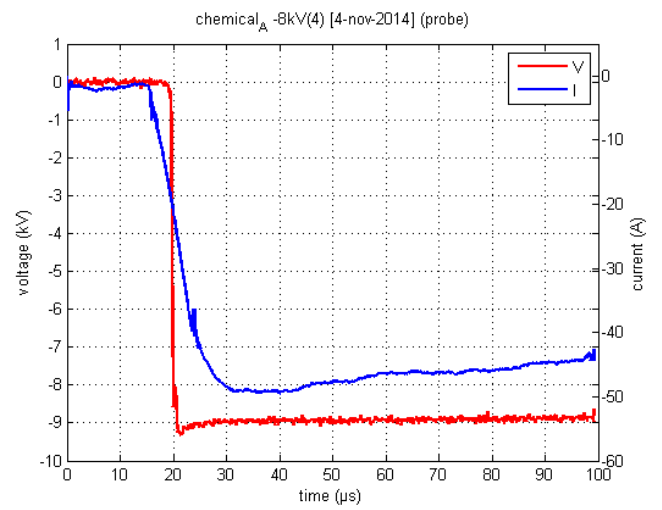
Εικόνα 5.187: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -6kV



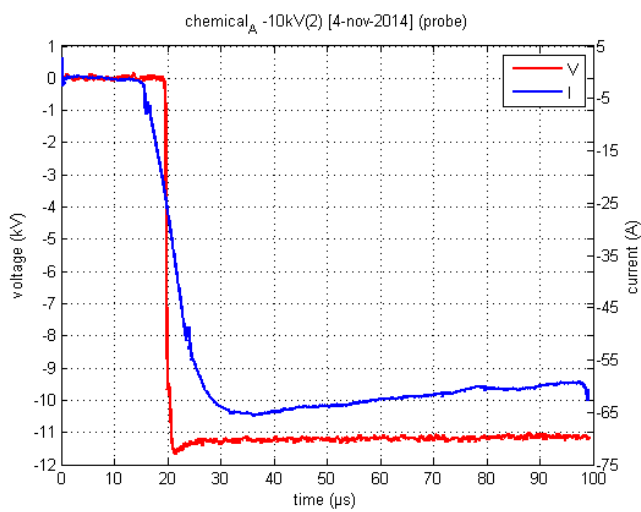
Εικόνα 5.188: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -6kV



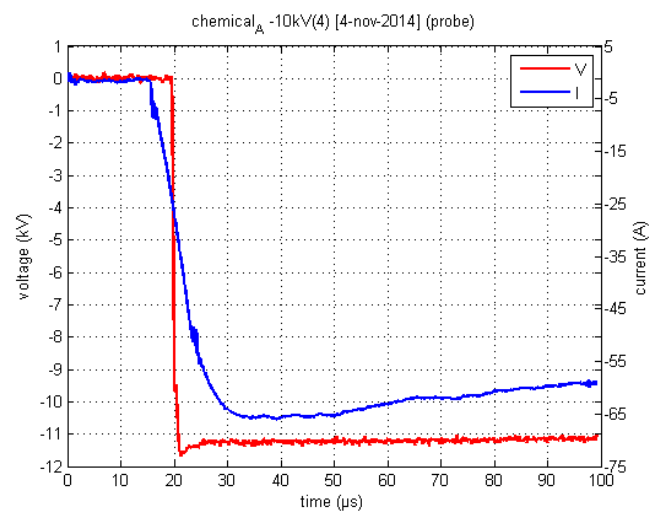
Εικόνα 5.189: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.190: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.191: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.192: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -10kV

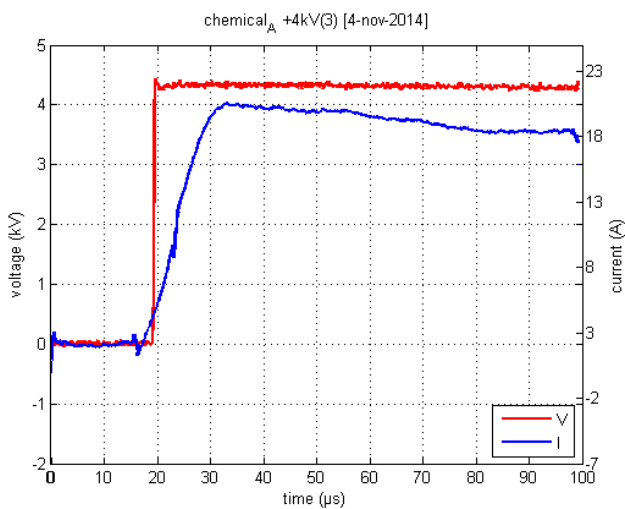
Παρουσίαση Μετρήσεων

Χημικό υλικό A ($R_{SS}=194,8\Omega$)

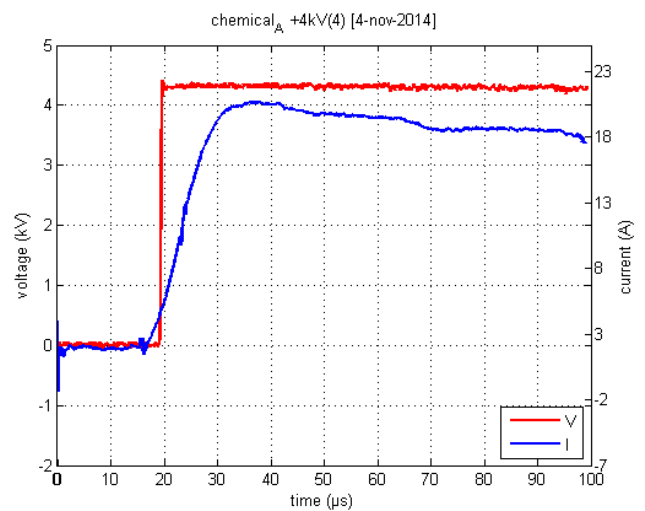
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	203,07	198,28	196,27	185,22	235,56	231,82	225,31	219,65
2 ^η	197,06	200,05	197,27	190,00	236,32	228,33	215,00	185,81
3 ^η	198,52	199,57	197,78	190,00	238,32	220,49	210,00	216,56
4 ^η	195,65	198,05	202,04	196,42	241,50	228,33	228,22	217,25
5 ^η	200,74	200,99	200,16	194,98	229,79	227,93	224,17	206,82
MO	199,01	199,38	198,70	191,32	236,29	227,38	220,54	209,22

Πίνακας 5.13: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 4 Νοεμβρίου 2014 για το χημικό υλικό A χωρίς τη χρήση διαφορικού probe.

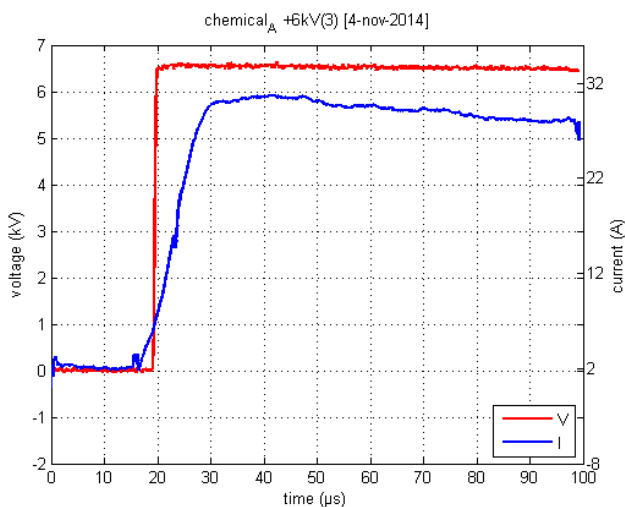
Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.



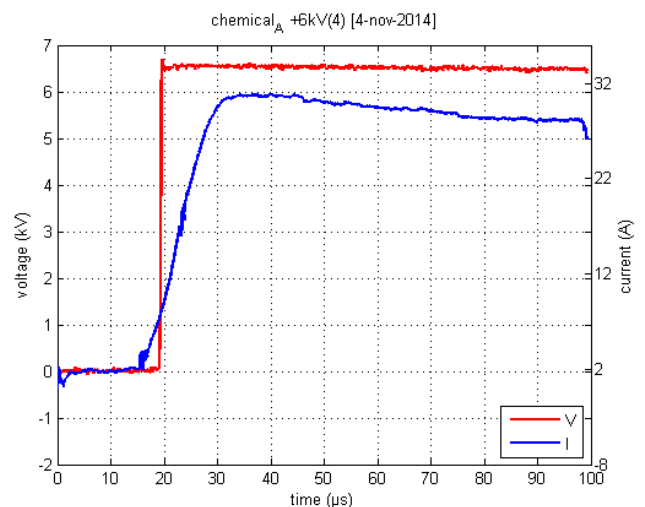
Εικόνα 5.193: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +4kV



Εικόνα 5.194: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +4kV

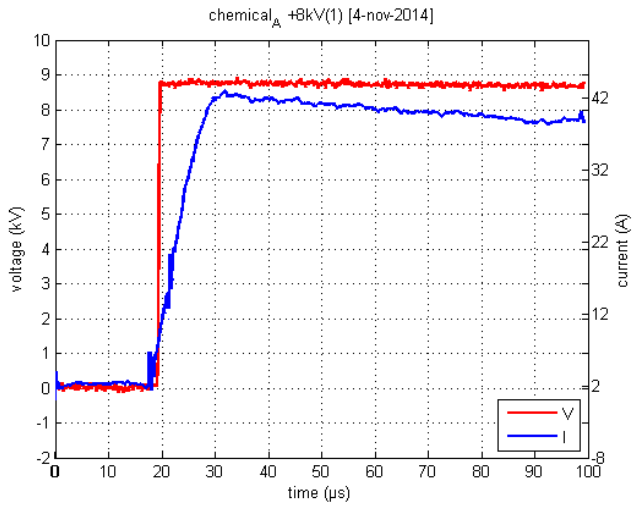


Εικόνα 5.195: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +6kV

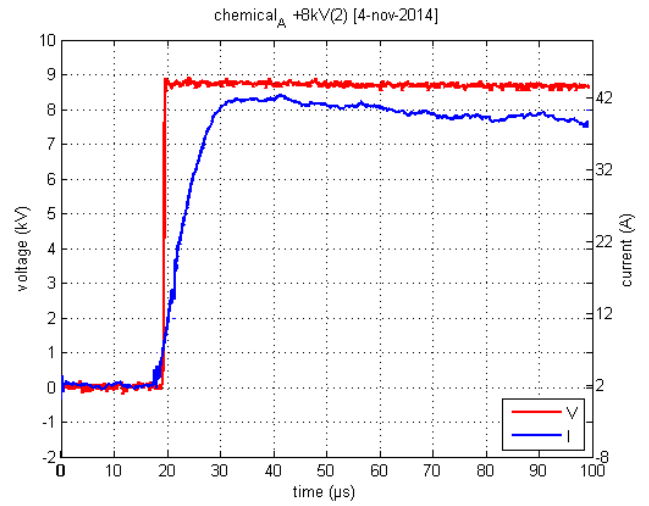


Εικόνα 5.196: Χημικό A στις 4-11-2014 στα +6kV

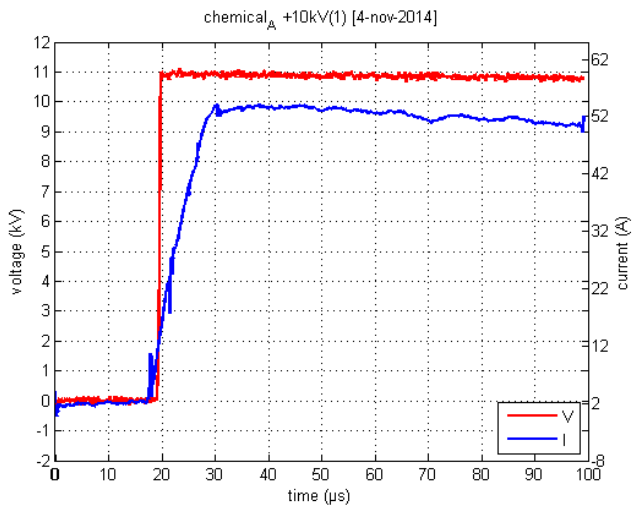
Παρουσίαση Μετρήσεων



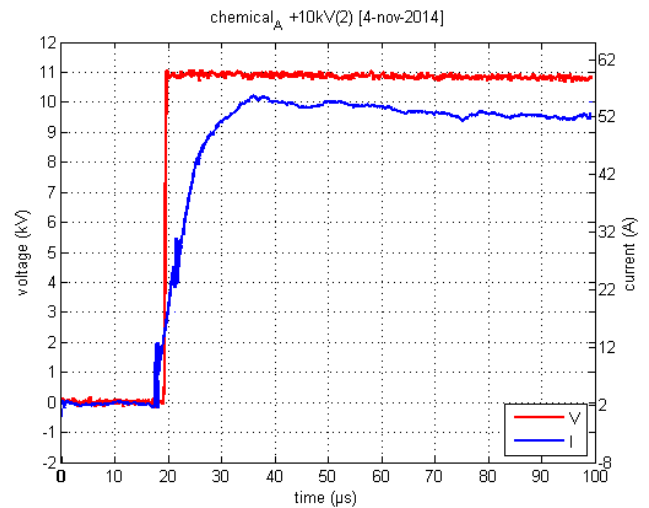
Εικόνα 5.197: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +8kV



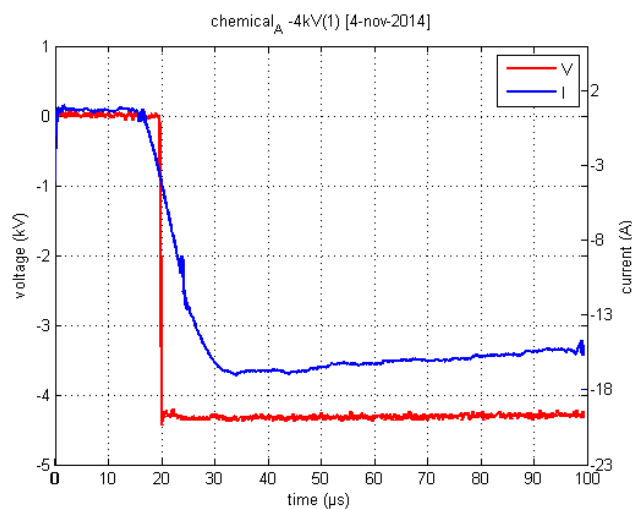
Εικόνα 5.198: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +8kV



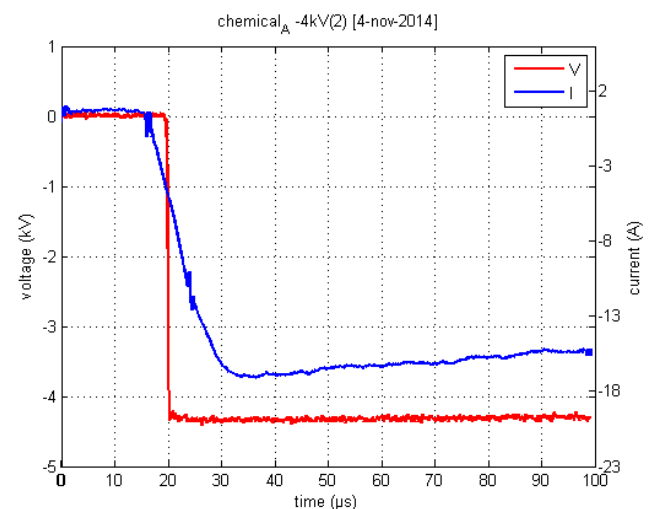
Εικόνα 5.199: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +10kV



Εικόνα 5.200: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα +10kV

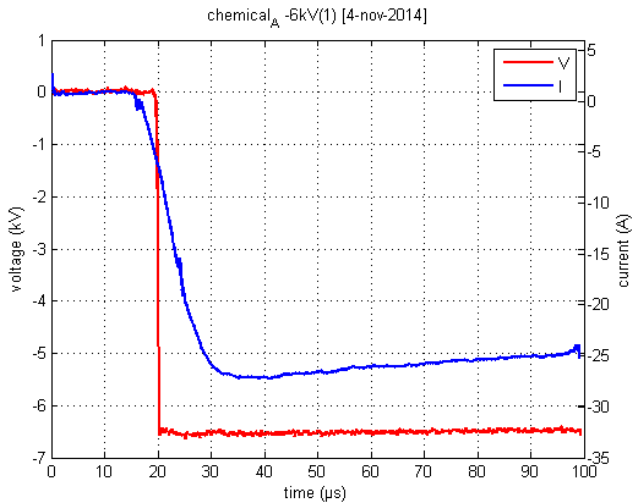


Εικόνα 5.201: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -4kV

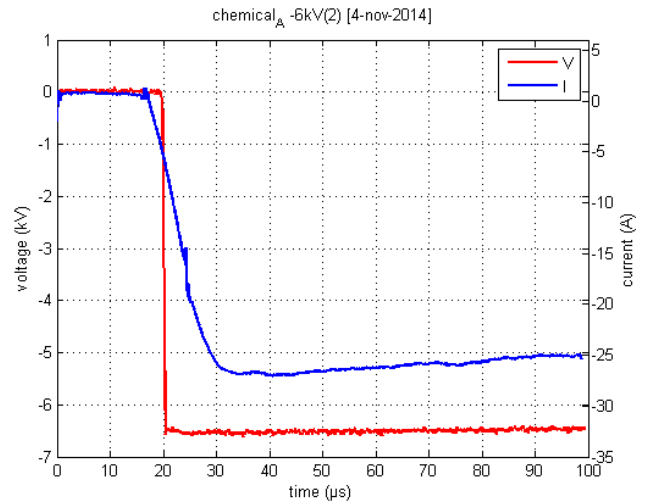


Εικόνα 5.202: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -4kV

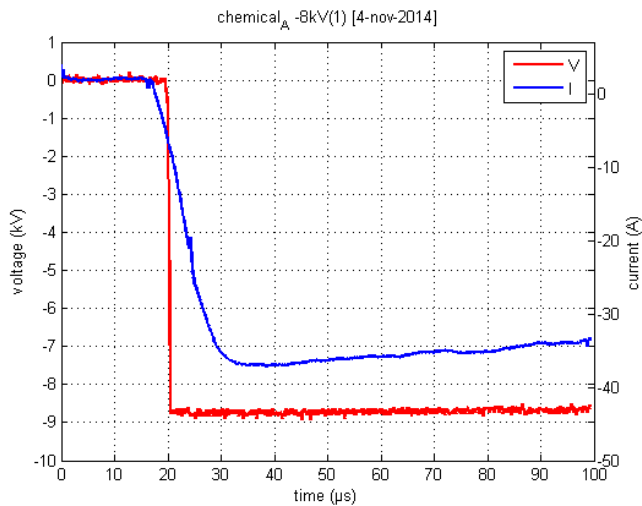
Παρουσίαση Μετρήσεων



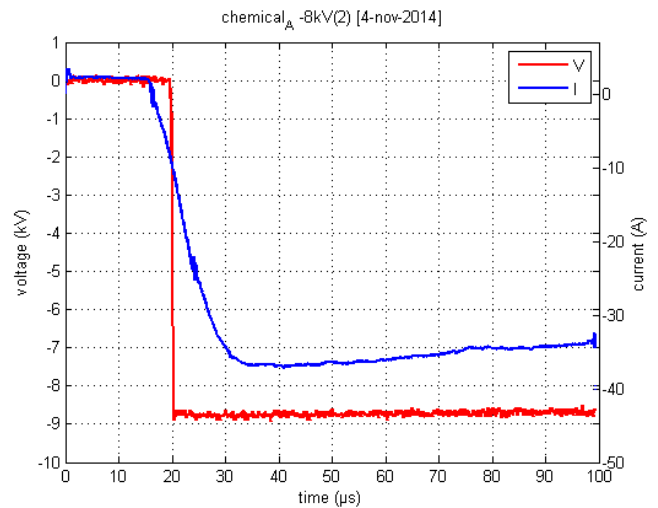
Εικόνα 5.203: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -6kV



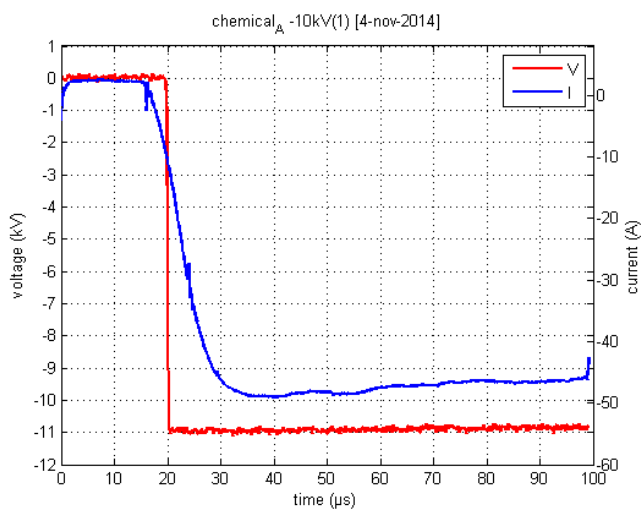
Εικόνα 5.204: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -6kV



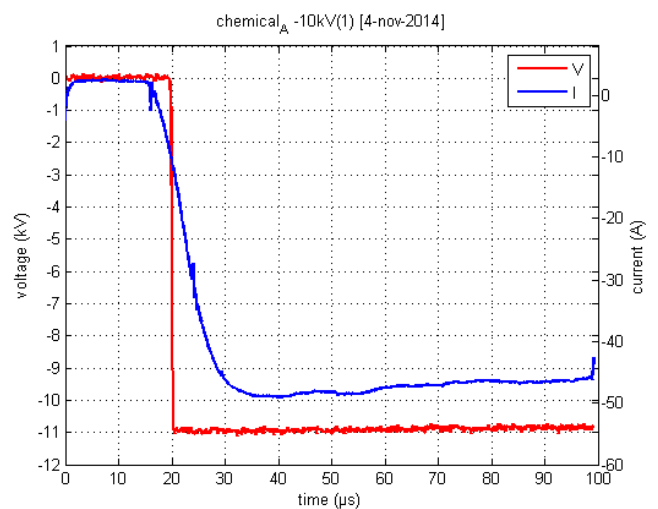
Εικόνα 5.205: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.206: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.207: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.208: Χημικό Α στις 4-11-2014 στα -10kV

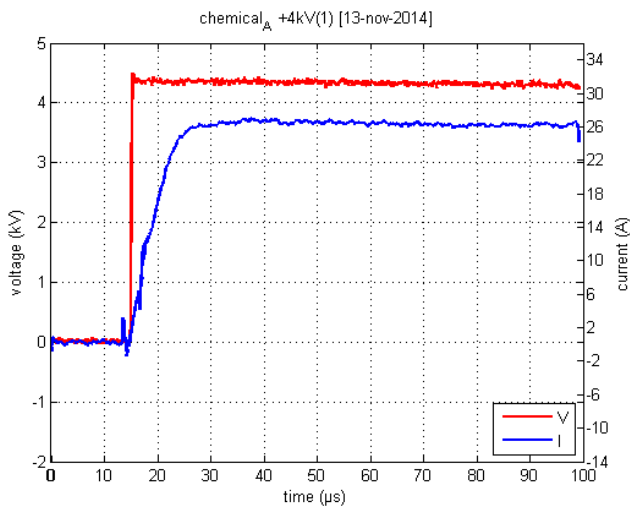
Παρουσίαση Μετρήσεων

Χημικό υλικό A ($R_{SS}=116,7\Omega$)

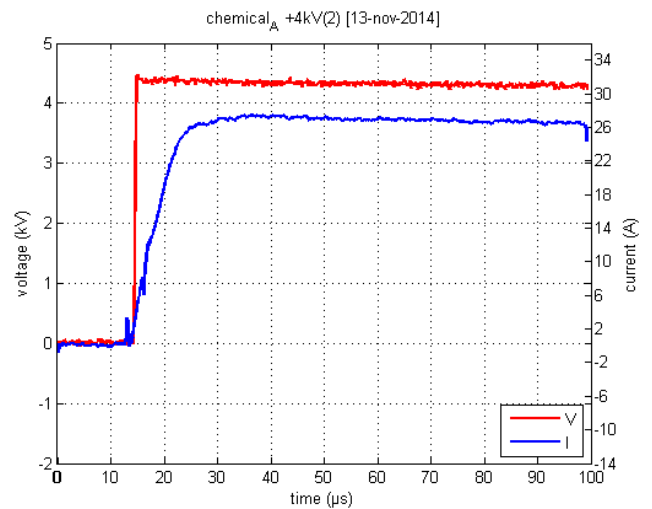
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	156,02	145,37	123,56	101,56	142,05	129,65	121,74	107,09
2 ^η	154,71	136,44	122,16	110,23	138,09	129,66	124,19	110,92
3 ^η	149,87	132,17	121,04	103,92	138,89	130,53	119,44	117,66
4 ^η	149,79	132,88	118,92	104,13	135,90	126,18	116,22	117,89
5 ^η	152,11	132,65	116,22	102,9	134,09	127,93	122,86	116,62
MO	152,50	135,90	120,38	104,55	137,80	128,79	120,89	114,04

Πίνακας 5.14: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 13 Νοεμβρίου 2014 για το χημικό υλικό A.

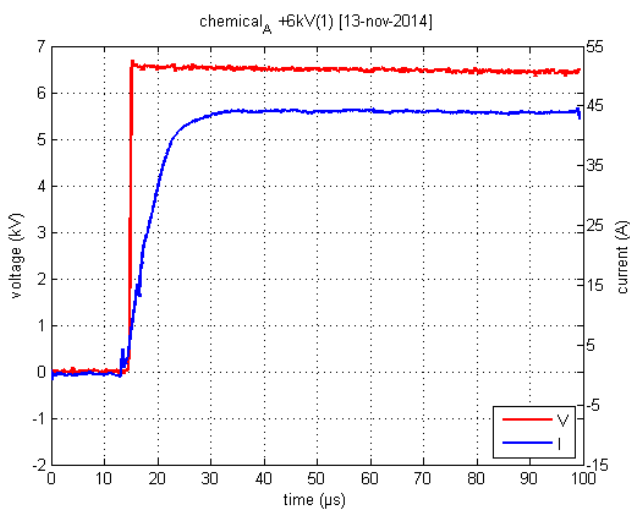
Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.



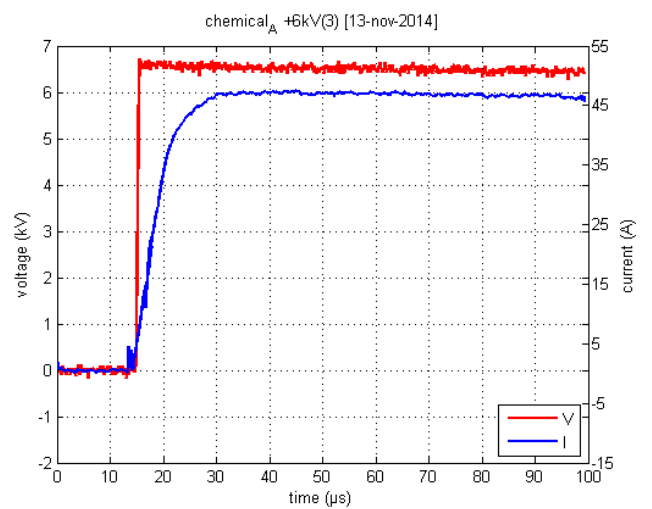
Εικόνα 5.209: Χημικό A στις 13-11-2014 στα +4kV



Εικόνα 5.210: Χημικό A στις 13-11-2014 στα +4kV

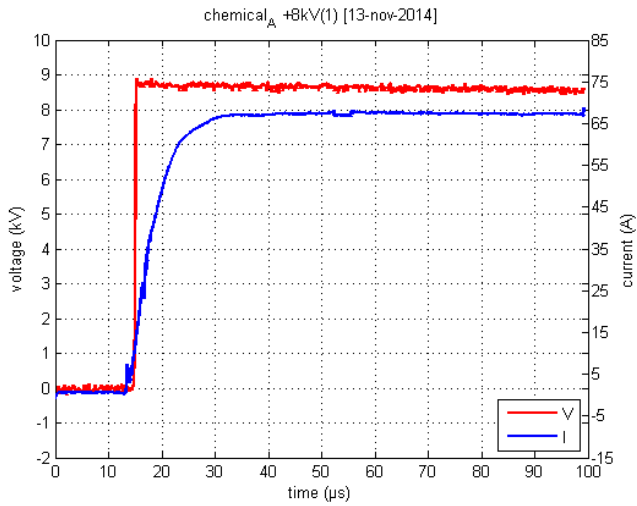


Εικόνα 5.211: Χημικό A στις 13-11-2014 στα +6kV

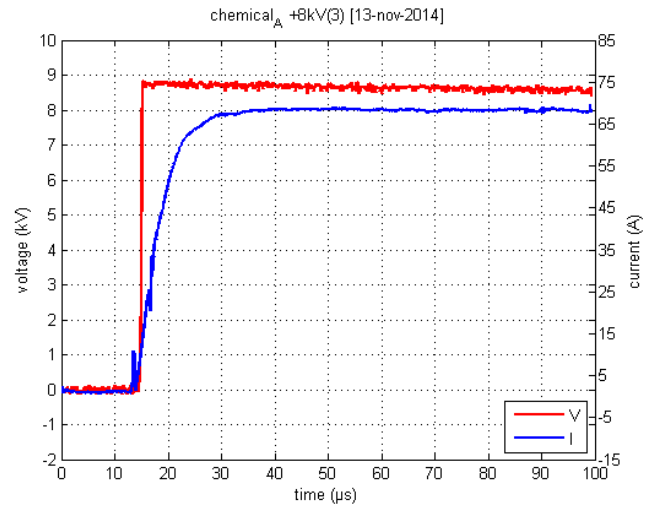


Εικόνα 5.212: Χημικό A στις 13-11-2014 στα +6kV

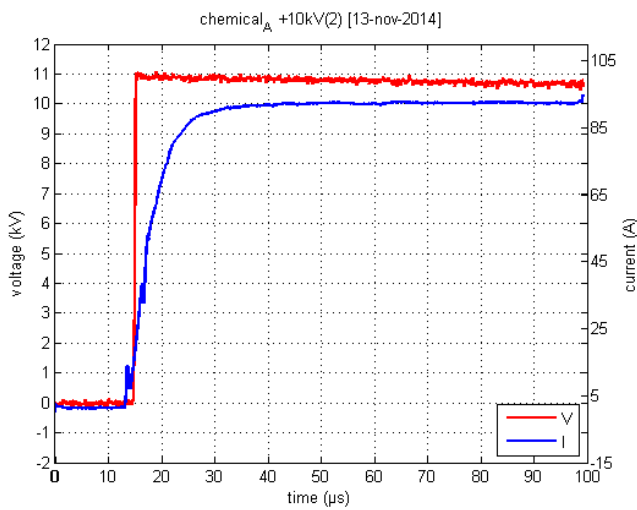
Παρουσίαση Μετρήσεων



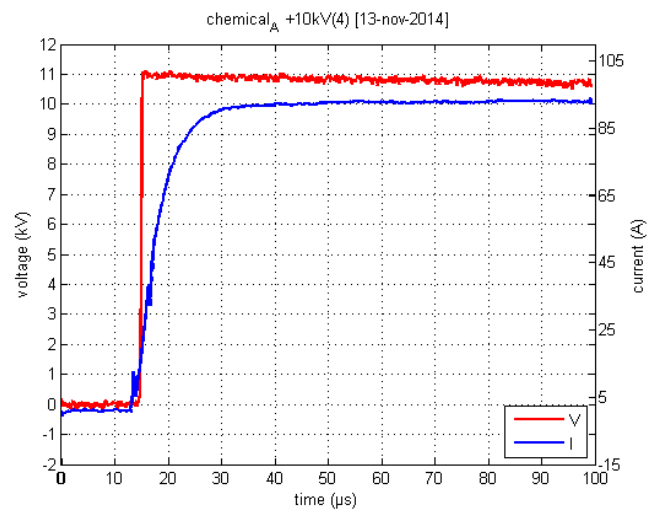
Εικόνα 5.213: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα +8kV



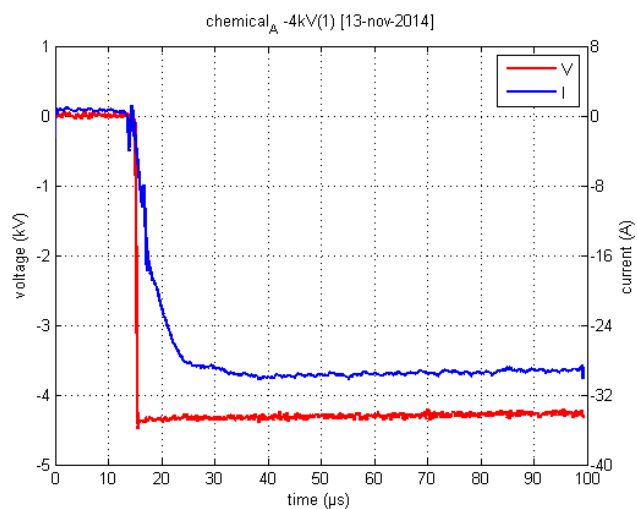
Εικόνα 5.214: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα +8kV



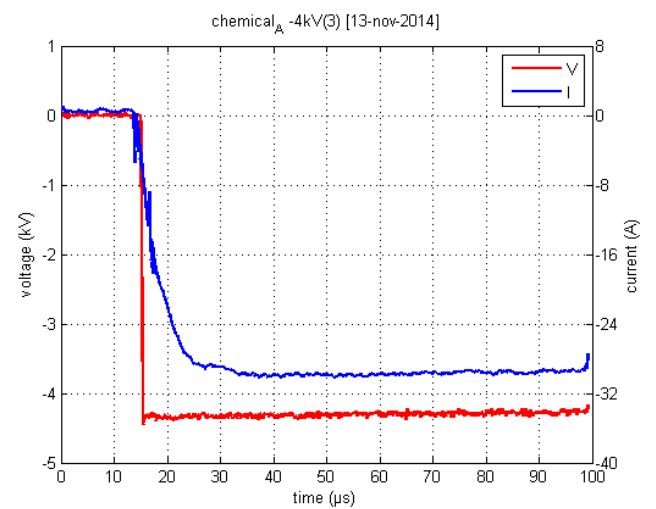
Εικόνα 5.215: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα +10kV



Εικόνα 5.216: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα +10kV

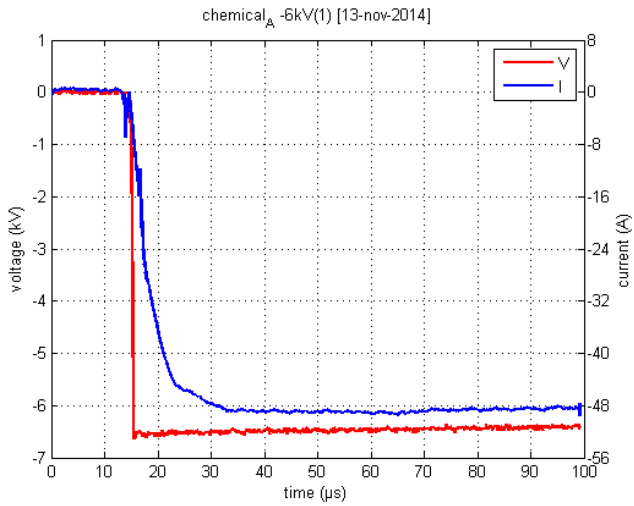


Εικόνα 5.217: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -4kV

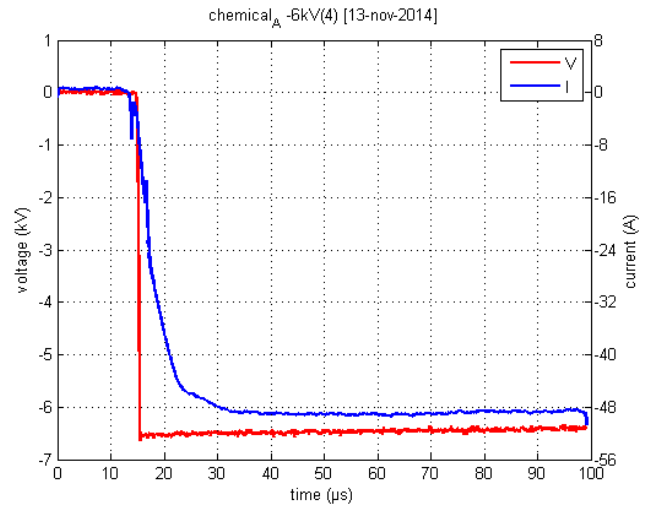


Εικόνα 5.218: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -4kV

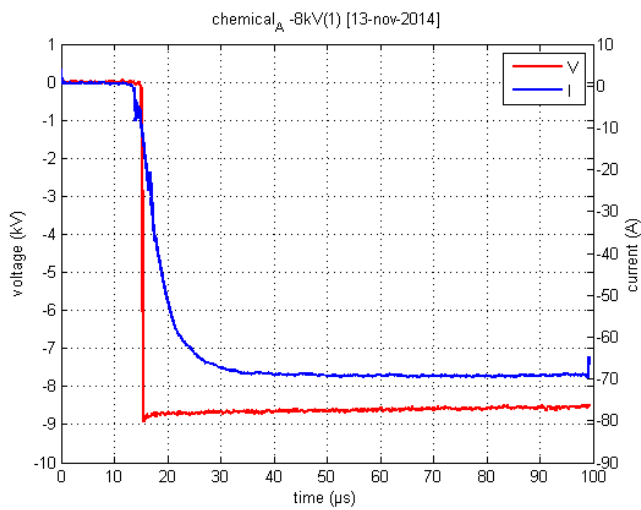
Παρουσίαση Μετρήσεων



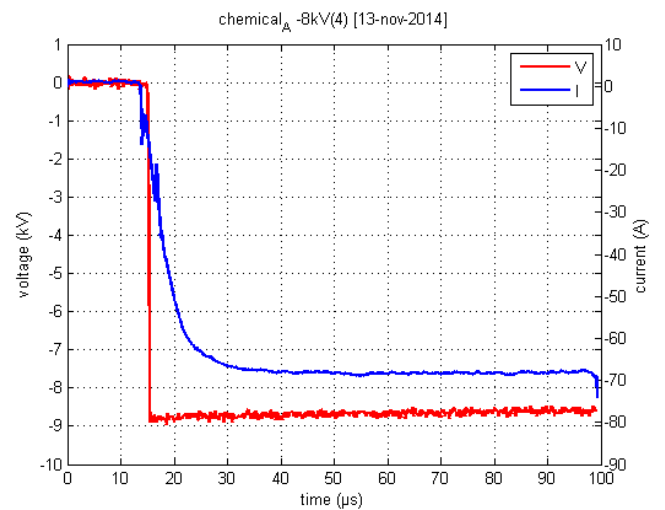
Εικόνα 5.219: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -6kV



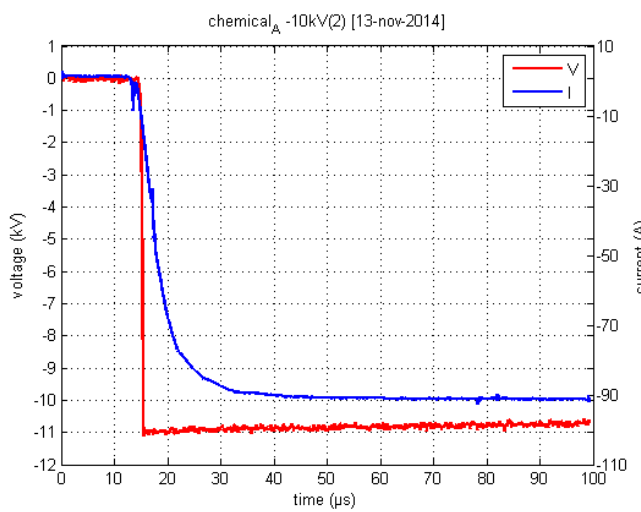
Εικόνα 5.220: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -6kV



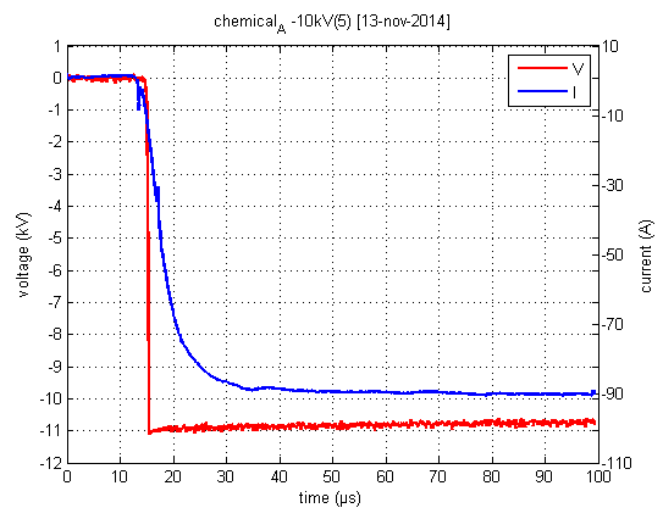
Εικόνα 5.221: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.222: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -8kV



Εικόνα 5.223: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.224: Χημικό Α στις 13-11-2014 στα -10kV

Παρουσίαση Μετρήσεων

5.5 Χημικό υλικό B

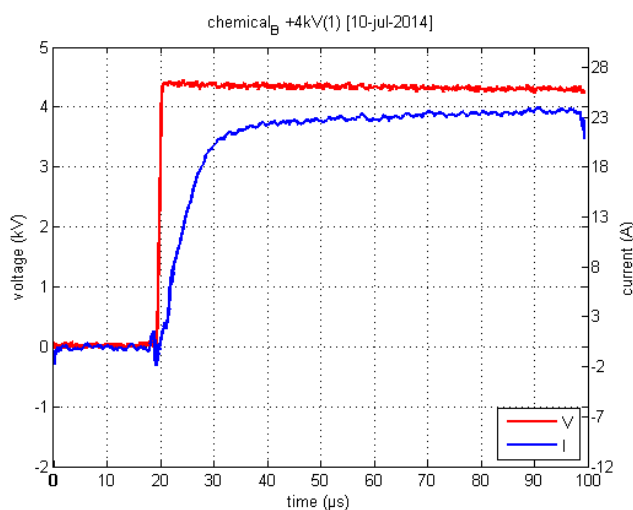
Στο ηλεκτρόδιο που είναι εγκιβωτισμένο στο χημικό υλικό B ελήφθησαν μετρήσεις στις 10 Ιουλίου 2014 και στις 13 Νοεμβρίου 2014. Στους πίνακες που ακολουθούν εμπεριέχονται οι τιμές της παραμέτρου Z_4 και για τις δυο ημερομηνίες καθώς και ο μέσος όρος τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά παλμογραφήματα.

Χημικό υλικό B ($R_{SS}=102,7\Omega$)

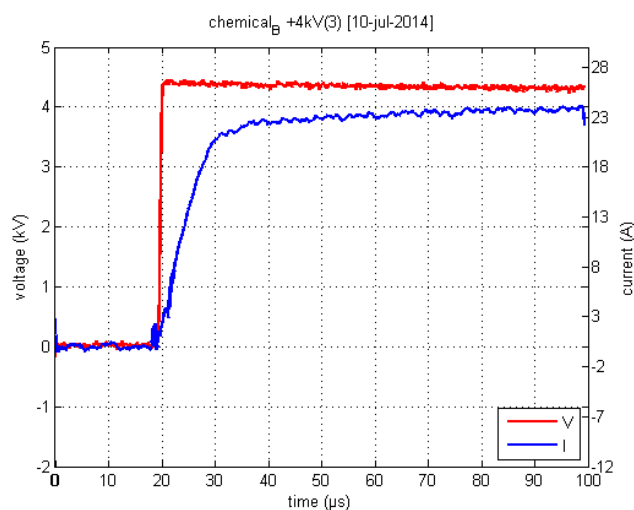
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	172,42	160,28	153,04	148,89	167,64	162,48	160,33	154,12
2 ^η	167,26	152,09	157,41	152,04	167,83	161,10	159,93	157,79
3 ^η	171,37	154,58	156,83	151,71	163,43	162,77	158,32	153,55
4 ^η	162,17	159,31	149,85	152,09	164,73	162,94	162,85	154,38
5 ^η	175,27	162,31	156,55	147,89	169,30	163,16	155,80	157,31
MO	169,69	157,71	154,73	150,52	166,58	162,48	159,45	155,43

Πίνακας 5.15: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 10 Ιουλίου 2014 για το χημικό υλικό B.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

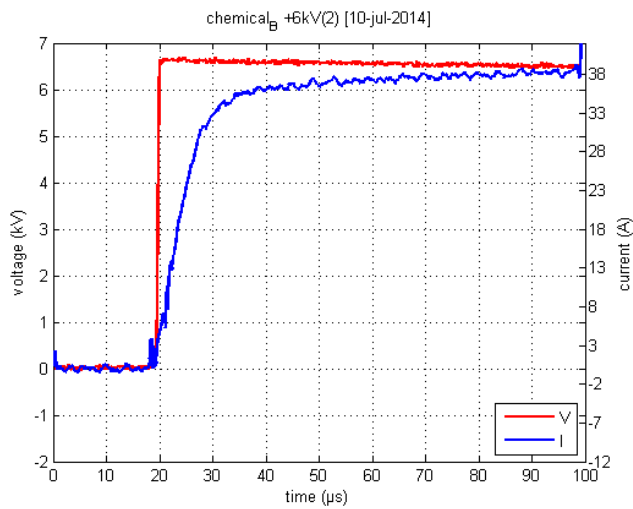


Εικόνα 5.225: Χημικό B στις 10-7-2014 στα +4kV

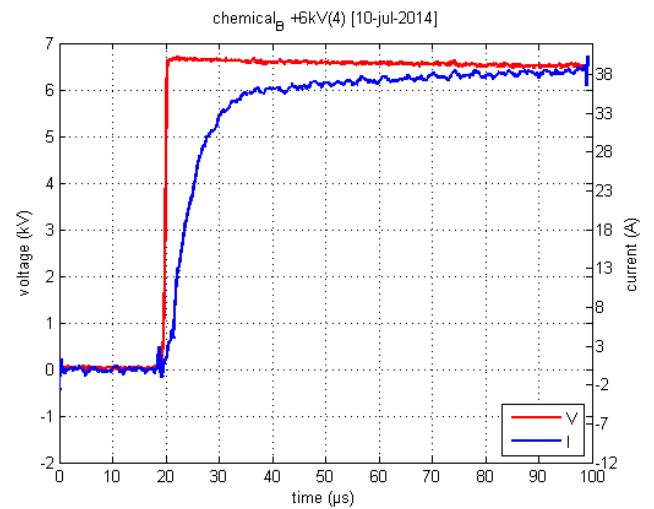


Εικόνα 5.226: Χημικό B στις 10-7-2014 στα +4kV

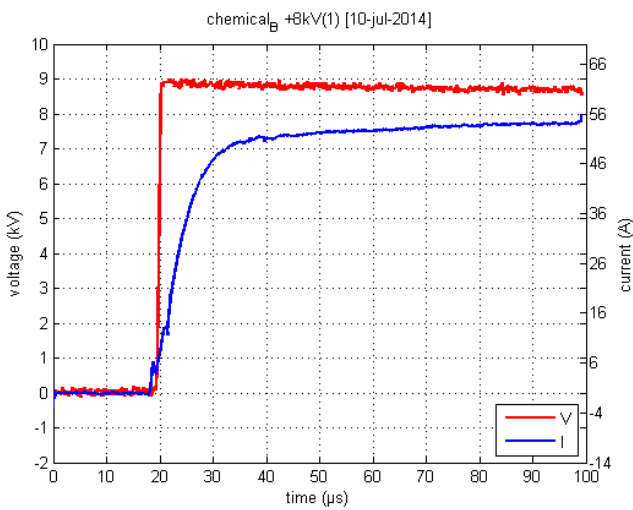
Παρουσίαση Μετρήσεων



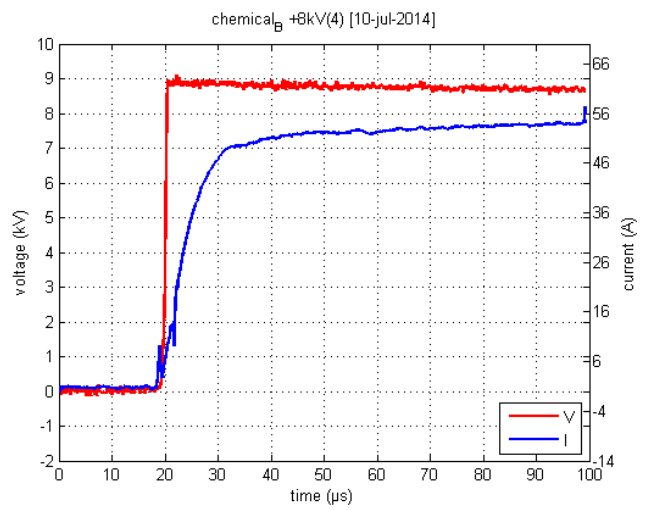
Εικόνα 5.227: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα +6kV



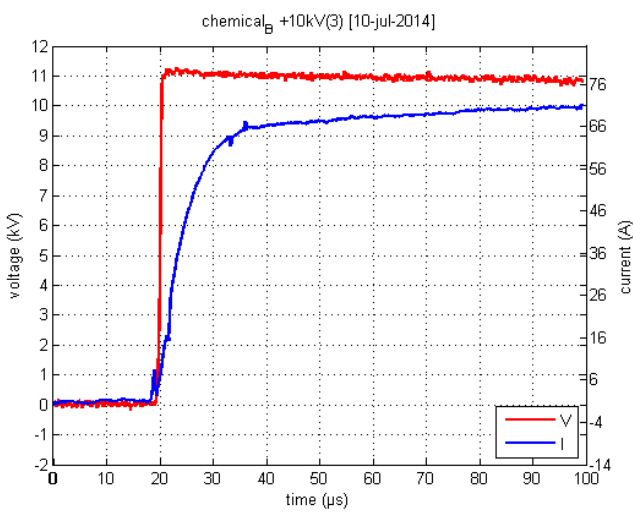
Εικόνα 5.228: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα +6kV



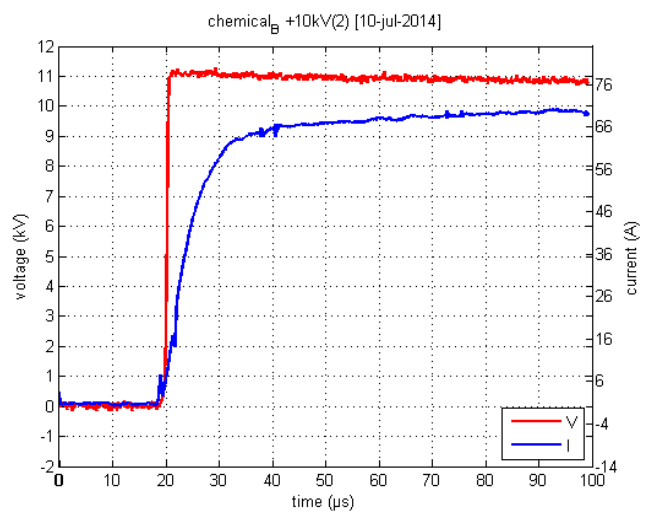
Εικόνα 5.229: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα +8kV



Εικόνα 5.230: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα +8kV

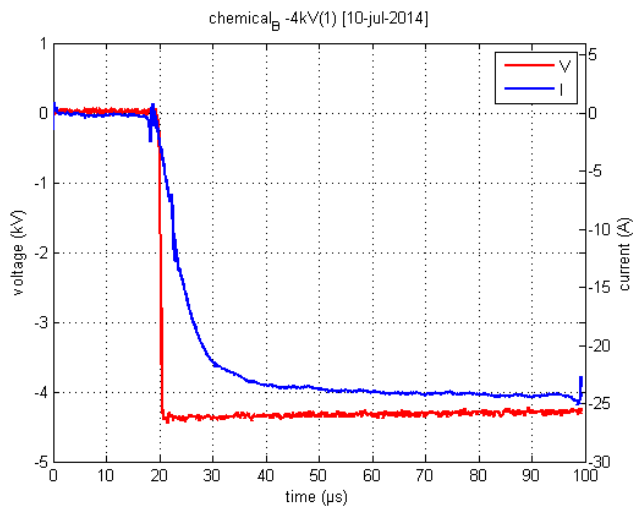


Εικόνα 5.231: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα +10kV

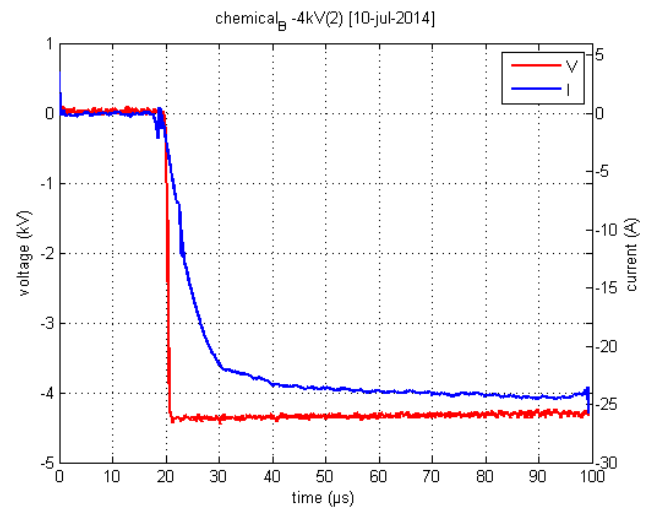


Εικόνα 5.232: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα +10kV

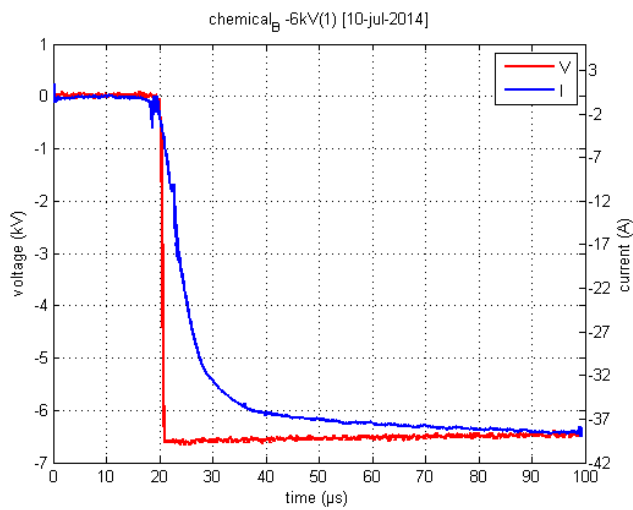
Παρουσίαση Μετρήσεων



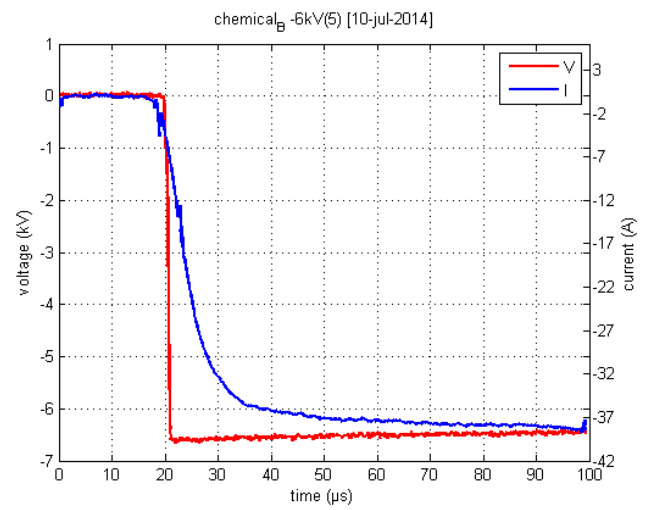
Εικόνα 5.233: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -4kV



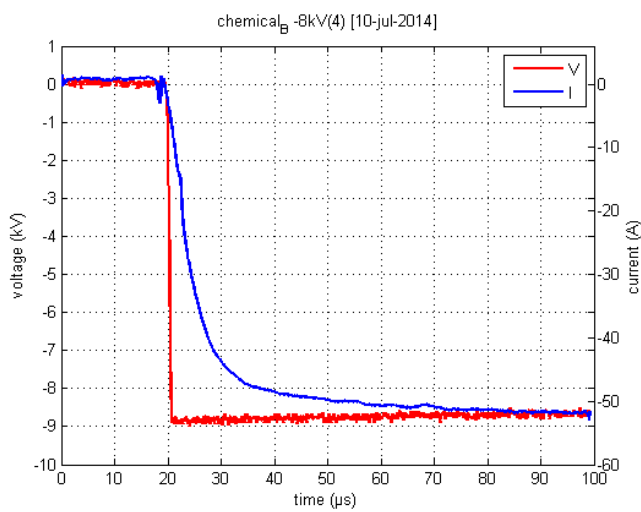
Εικόνα 5.234: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -4kV



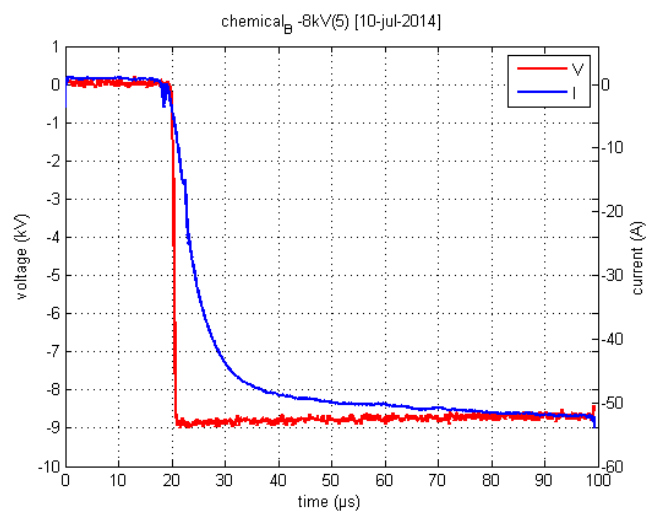
Εικόνα 5.235: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -6kV



Εικόνα 5.236: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -6kV

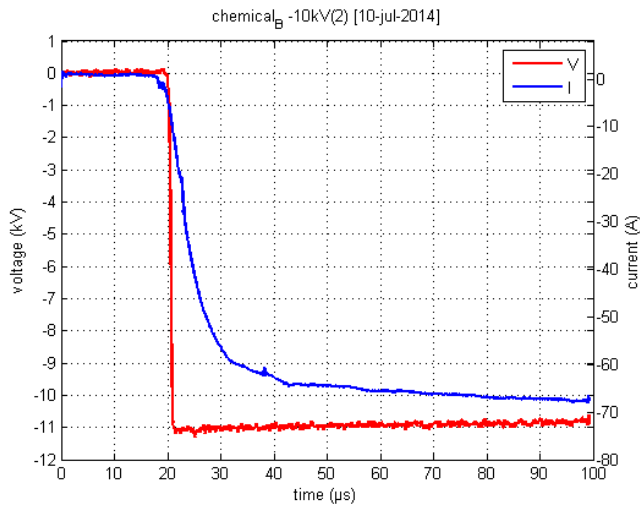


Εικόνα 5.237: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -8kV

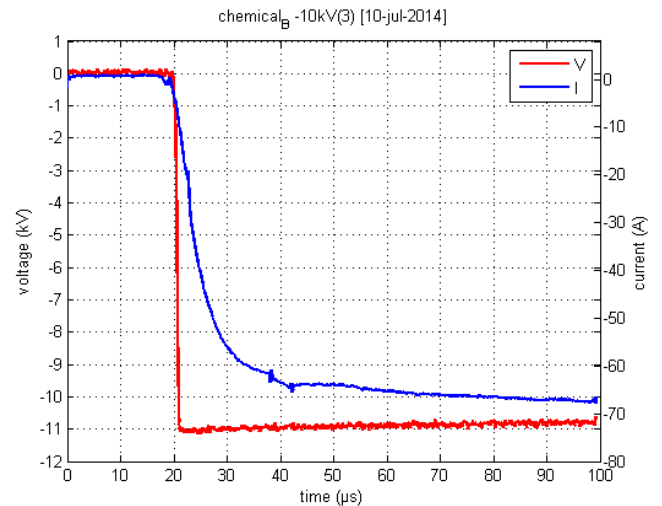


Εικόνα 5.238: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -8kV

Παρουσίαση Μετρήσεων



Εικόνα 5.239: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -10kV



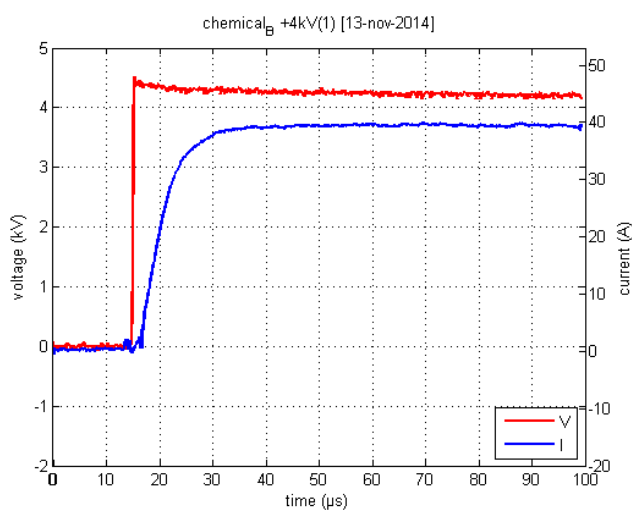
Εικόνα 5.240: Χημικό Β στις 10-7-2014 στα -10kV

Χημικό υλικό Β ($R_{SS}=55,1\Omega$)

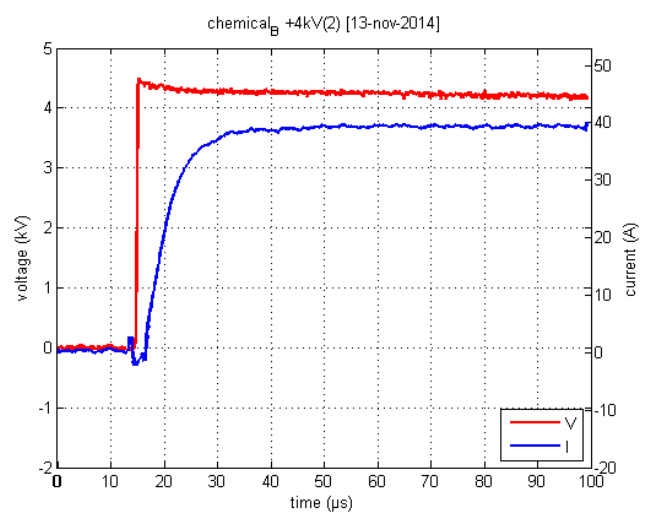
	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV
1 ^η	103,78	97,53	91,11	89,57	106,84	101,18	97,74	87,82
2 ^η	101,96	98,43	96,70	86,89	106,76	100,00	93,33	88,82
3 ^η	105,27	100,00	95,57	88,99	105,93	100,66	96,82	89,43
4 ^η	104,35	98,91	91,85	85,48	108,39	101,49	96,94	90,23
5 ^η	104,83	102,10	95,38	90,84	108,63	98,73	97,19	88,89
MO	104,03	99,39	94,12	88,35	107,31	100,41	96,40	89,04

Πίνακας 5.16: Τιμές της παραμέτρου Z_4 στις 13 Νοεμβρίου 2014 για το χημικό υλικό Β.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.

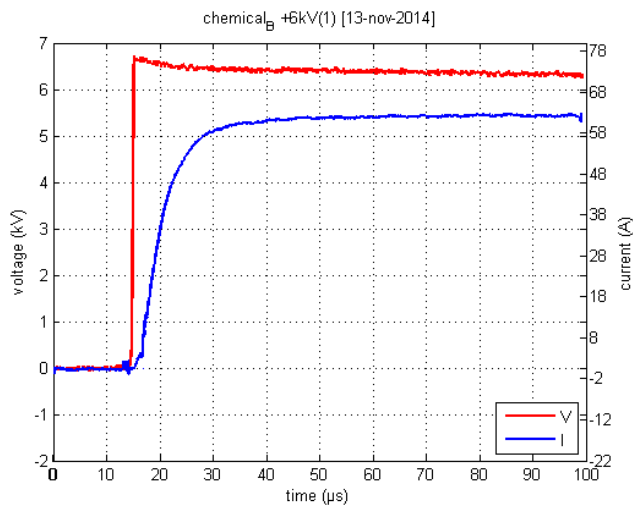


Εικόνα 5.241: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +4kV

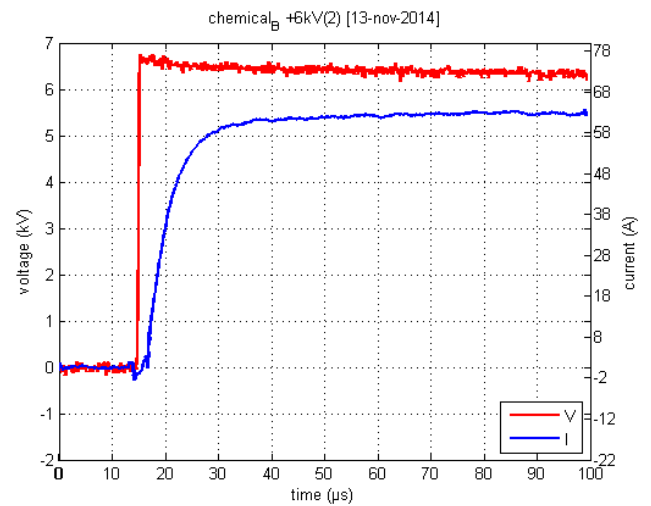


Εικόνα 5.242: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +4kV

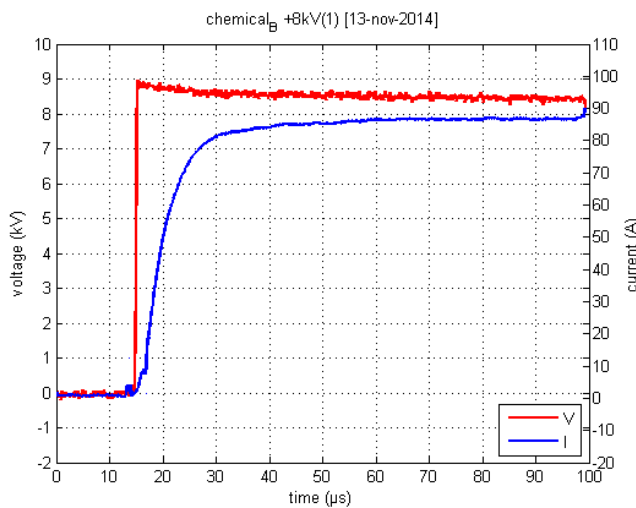
Παρουσίαση Μετρήσεων



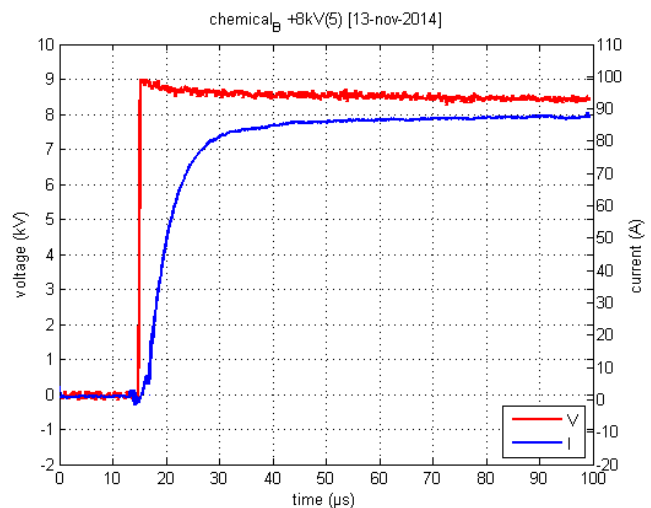
Εικόνα 5.243: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +6kV



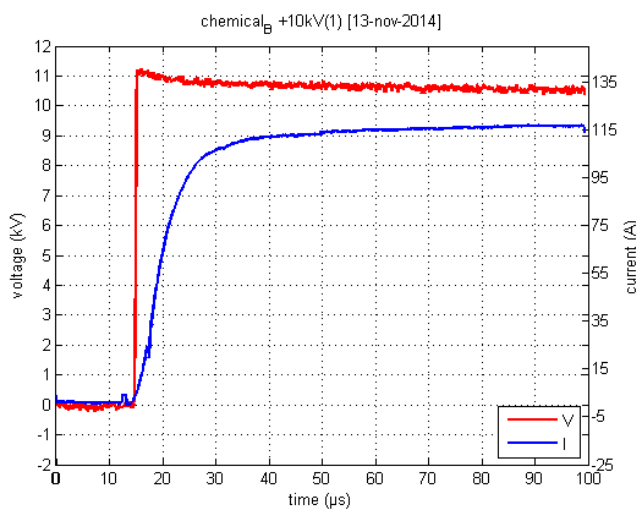
Εικόνα 5.244: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +6kV



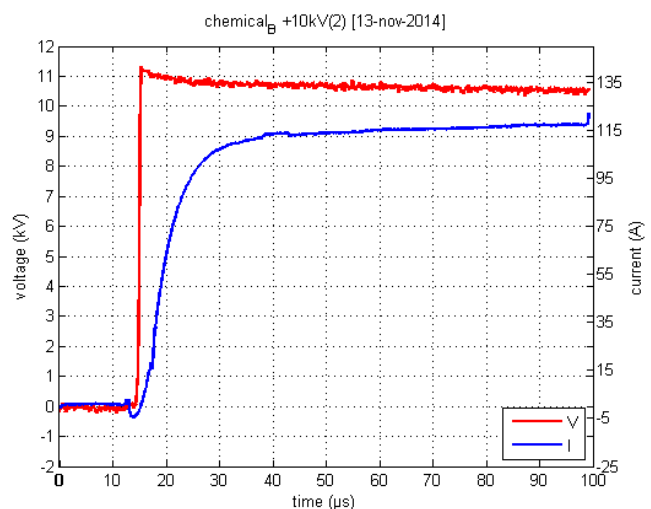
Εικόνα 5.245: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +8kV



Εικόνα 5.246: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +8kV

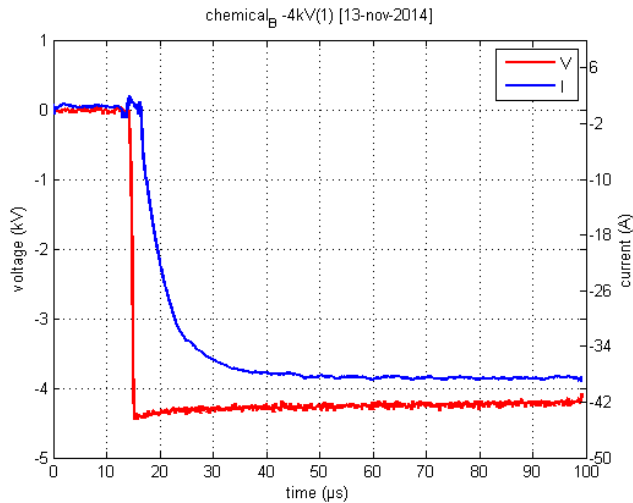


Εικόνα 5.247: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +10kV

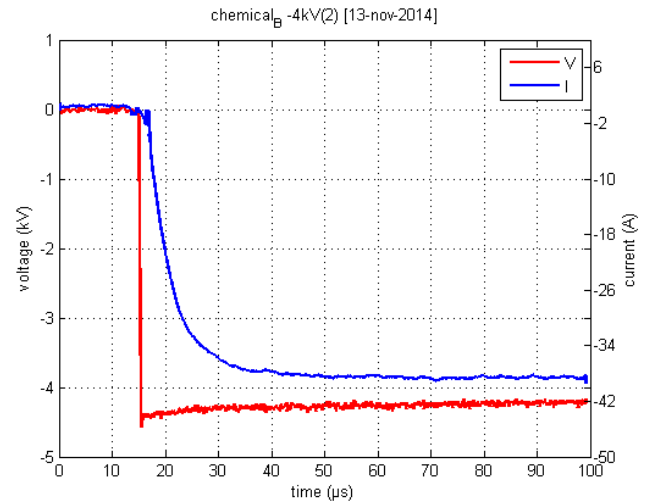


Εικόνα 5.248: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα +10kV

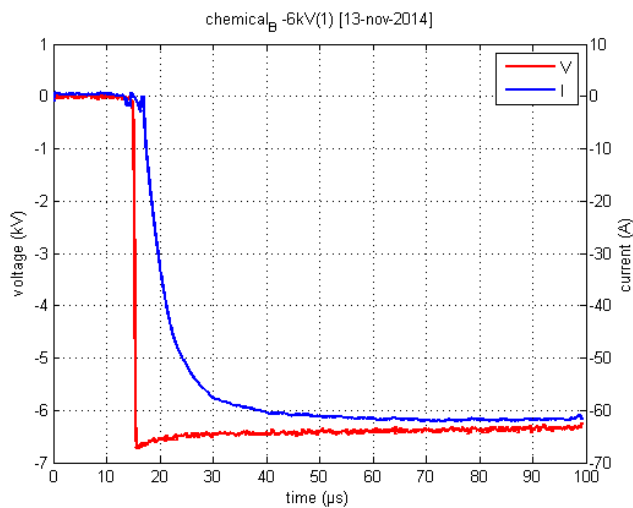
Παρουσίαση Μετρήσεων



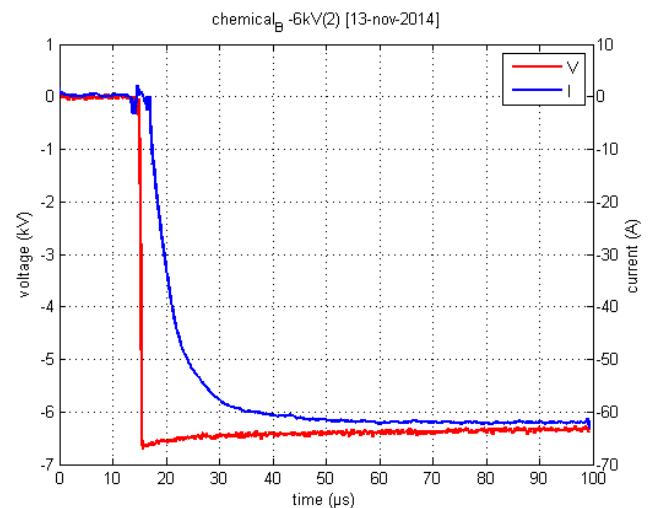
Εικόνα 5.249: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -4kV



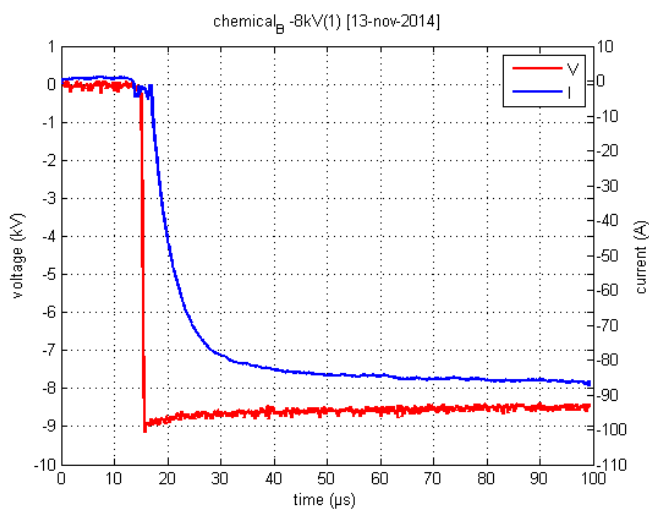
Εικόνα 5.250: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -4kV



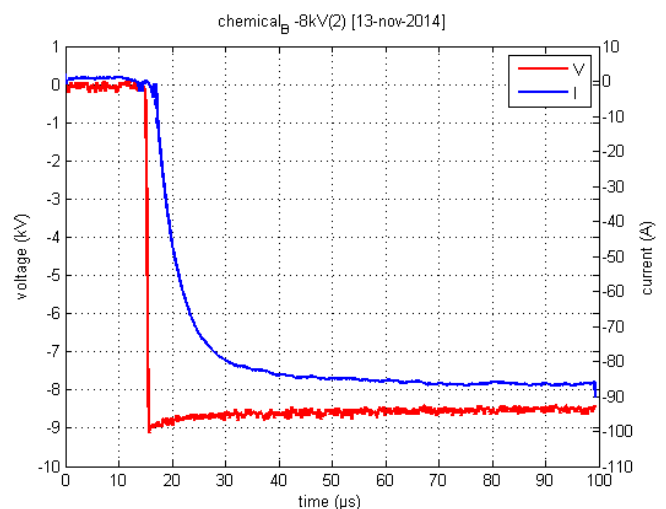
Εικόνα 5.251: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -6kV



Εικόνα 5.252: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -6kV

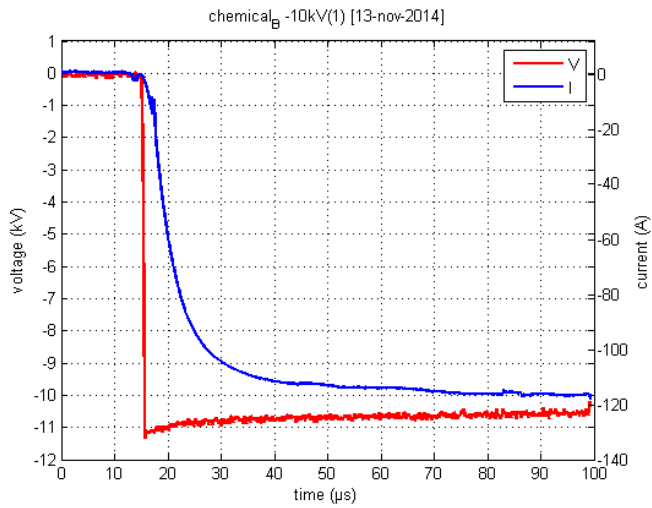


Εικόνα 5.253: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -8kV

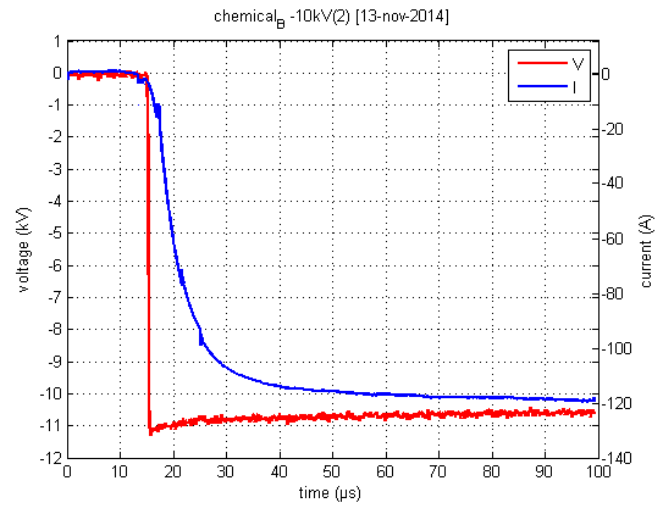


Εικόνα 5.254: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -8kV

Παρουσίαση Μετρήσεων



Εικόνα 5.255: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -10kV



Εικόνα 5.256: Χημικό Β στις 13-11-2014 στα -10kV

Παρουσίαση Μετρήσεων

Κεφάλαιο 6

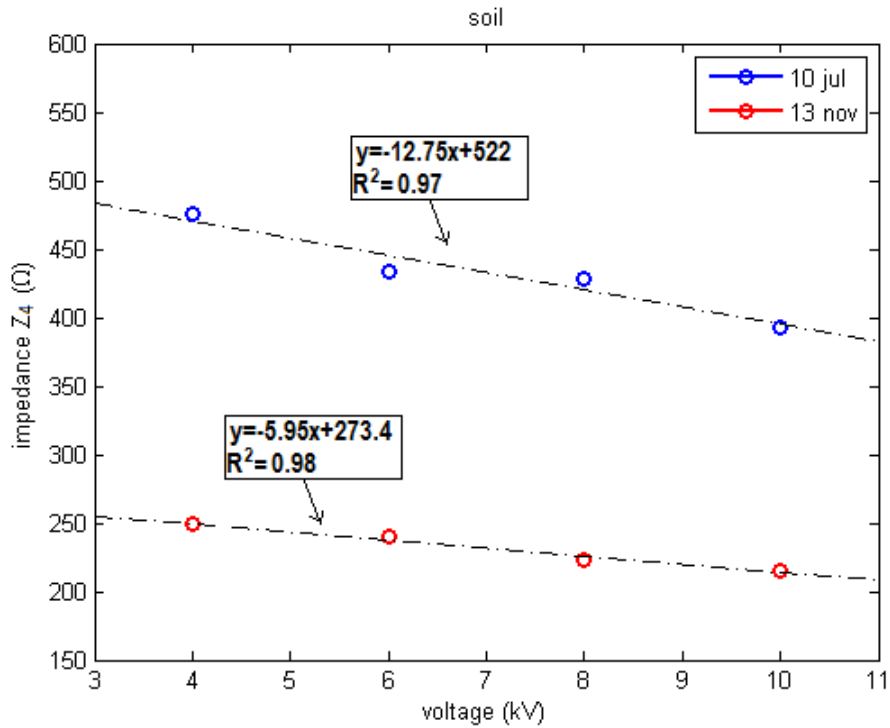
Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

Το κεφάλαιο των συμπερασμάτων συνιστά προφανώς το σημαντικότερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Η παρουσίαση των συμπερασμάτων θα πραγματοποιηθεί πρώτα ανά υλικό και στη συνέχεια συνολικά. Τέλος, θα διατυπωθούν συγκεκριμένες προτάσεις που αφορούν την επόμενη μέρα, δηλαδή τα βήματα που προτείνονται για τη συνέχιση της έρευνας.

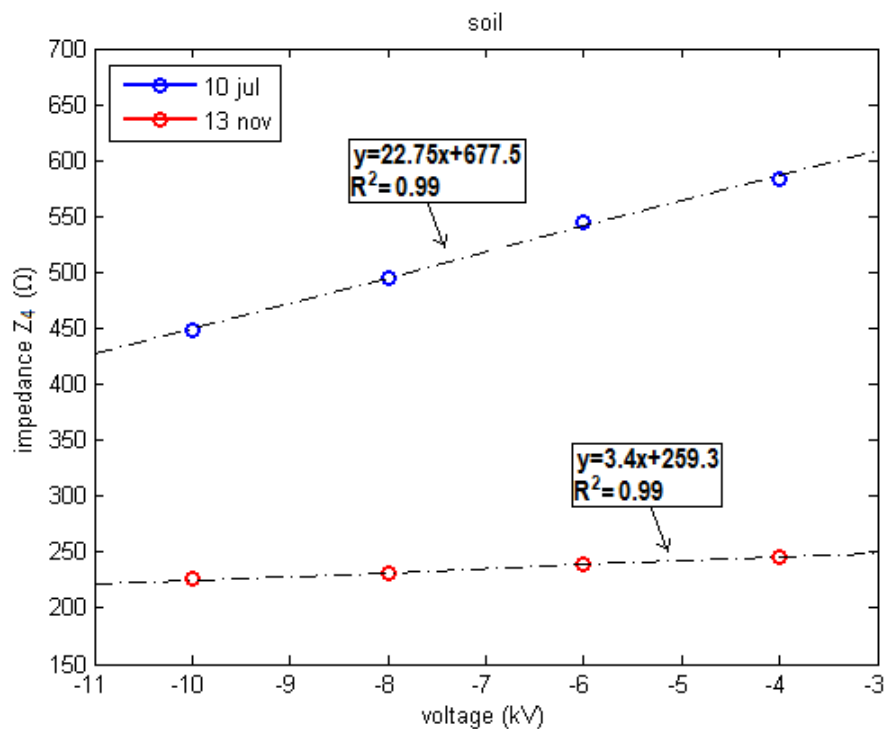
6.1 Φυσικό έδαφος

Το ηλεκτρόδιο που έχει τοποθετηθεί απευθείας στο φυσικό έδαφος αποτελεί το σημείο αναφοράς και προφανώς ένα βελτιωτικό υλικό θα έχει νόημα να προταθεί για χρήση ή να ερευνηθεί περαιτέρω μόνο αν παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά. Στις εικόνες 6.1 και 6.2 που ακολουθούν φαίνεται η συμπεριφορά του συγκεκριμένου ηλεκτροδίου στις 10 Ιουλίου και στις 13 Νοεμβρίου. Στις 10 Ιουλίου η μεταβατική αντίσταση που μετρήθηκε είναι περίπου διπλάσια από εκείνη που μετρήθηκε στις 13 Νοεμβρίου. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται απόλυτα δεδομένου ότι πρόκειται για μια καλοκαιρινή μέρα σε περίοδο ξηρασίας και για μια χειμωνιάτικη μέρα μετά από έντονη βροχόπτωση αντίστοιχα. Τόσο στη θετική όσο και στην αρνητική φόρτιση η μεταβατική αντίσταση Z_4 μειώνεται αυξανόμενου του επιπέδου της τάσης. Στην περίπτωση της αρνητικής φόρτισης η σχέση της μεταβατικής αντίστασης Z_4 με την τάση φαίνεται να είναι πιο γραμμική σε σύγκριση με τη θετική φόρτιση. Στις 10 Ιουλίου, η γραμμή τάσης που αφορά την αρνητική φόρτιση παρουσιάζει μια κλίση σχεδόν διπλάσια από εκείνη της θετικής φόρτισης. Η αντίστοιχη κλίση στις 13 Νοεμβρίου δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά. Οι ακριβείς αριθμητικές τιμές των γραφημάτων μπορούν να βρεθούν στο κεφάλαιο 5 στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων του αντίστοιχου υλικού.

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα



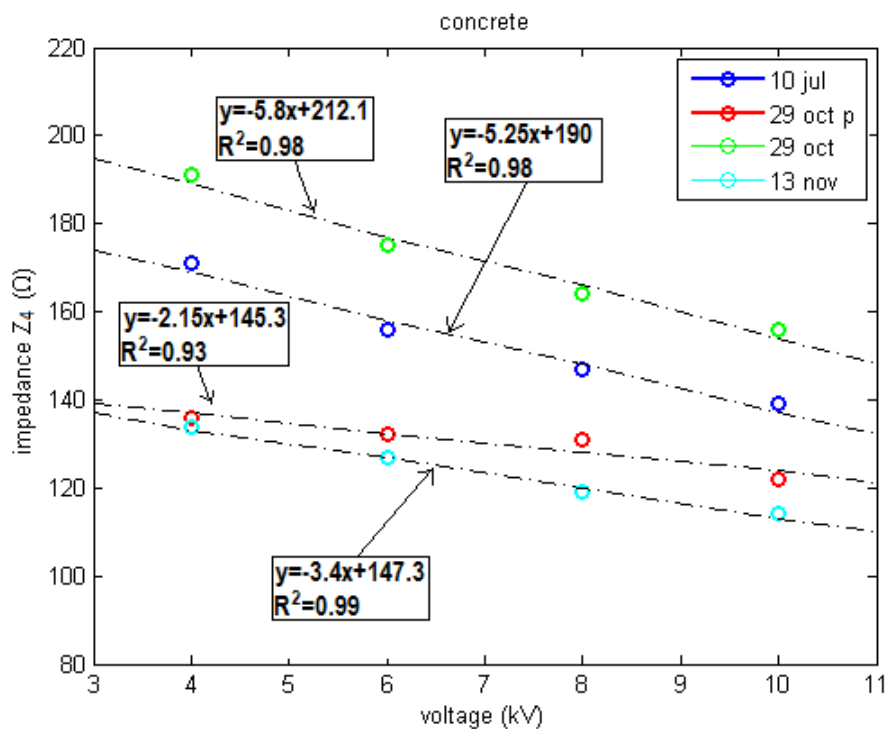
Εικόνα 6.1: Συμπεριφορά του φυσικού εδάφους για θετική τάση φόρτισης.



Εικόνα 6.2: Συμπεριφορά του φυσικού εδάφους για αρνητική τάση φόρτισης.

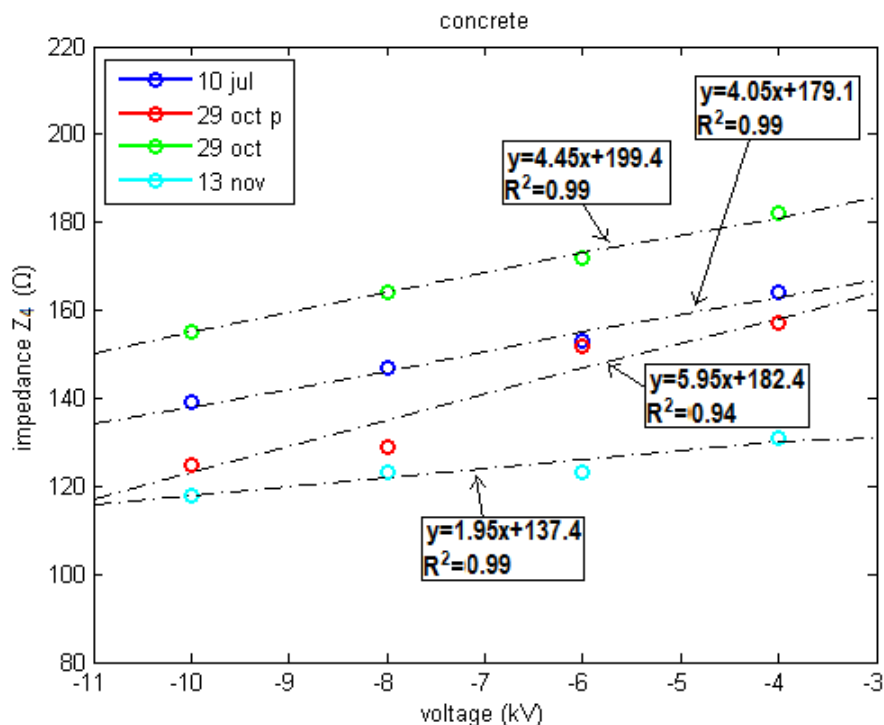
6.2 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα κατασκευαστικό υλικό που χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες ως βελτιωτικό υλικό σε ηλεκτρόδια γείωσης και αποτελεί μια κλασική και οικονομική λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα για εγκαταστάσεις χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις. Η συμπεριφορά του φαίνεται στις εικόνες 6.3 και 6.4 τόσο για τη θετική όσο και για την αρνητική τάση φόρτισης. Η πτωτική τάση της μεταβατικής αντίστασης Z_4 αυξανόμενου του επιπέδου φόρτισης παρατηρείται όπως και στο φυσικό έδαφος. Οι κλίσεις των γραμμών τάσης δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές και είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Αυτό που χαρακτηρίζει το σκυρόδεμα και φαίνεται έντονα από τις γραφικές παραστάσεις είναι η σταθερότητα του, η τιμή του Z_4 παρουσιάζει σχετικά μικρή διαφορά ανάμεσα στις 10 Ιουλίου και στις 13 Νοεμβρίου. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά που παρουσιάζουν οι μετρήσεις στις 29 Οκτωβρίου. Η χρήση διαφορικού probe για τη μέτρηση της τάσης (κόκκινη γραμμή) φαίνεται να επηρεάζει αρκετά την τιμή της παραμέτρου Z_4 προς τα κάτω.



Εικόνα 6.3: Συμπεριφορά του σκυροδέματος για θετική τάση φόρτισης.

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

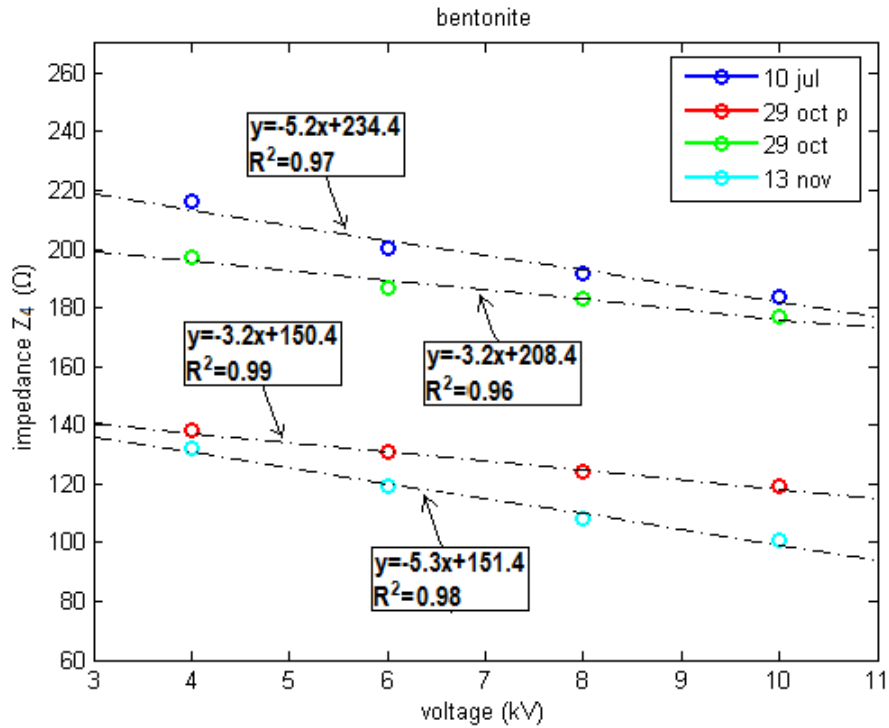


Εικόνα 6.4: Συμπεριφορά του σκυροδέματος για αρνητική τάση φόρτισης.

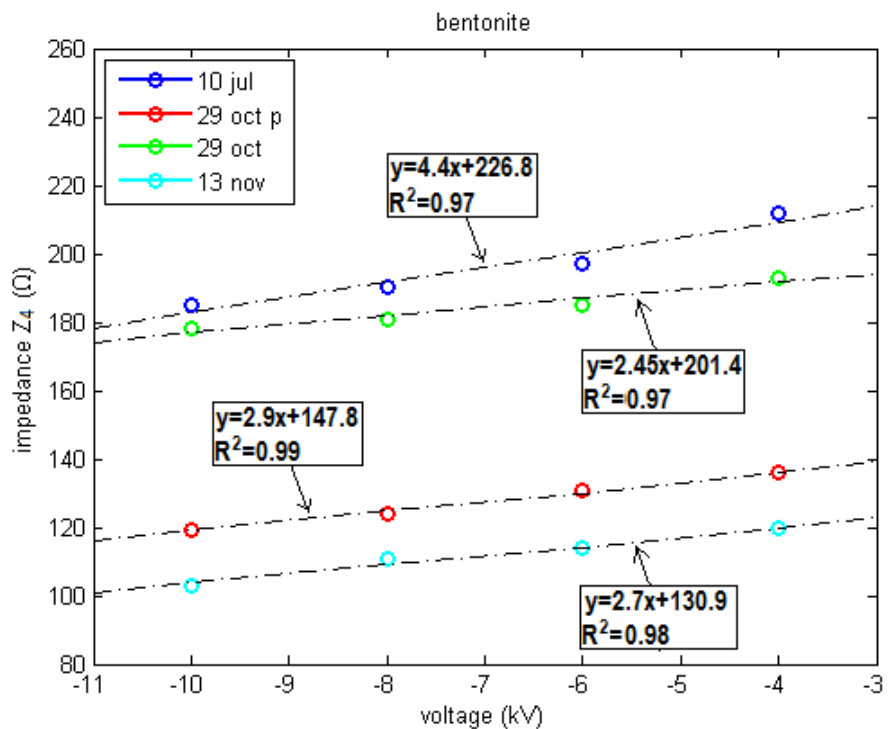
6.3 Μπετονίτης

Πρόκειται για ένα βελτιωτικό υλικό που βρίσκει συχνά εφαρμογή τις τελευταίες δεκαετίες στα συστήματα γείωσης. Αποτελεί ένα φυσικό ορυκτό με περιεκτικότητα αργίλου που έχει προκύψει από ηφαιστειακές αντιδράσεις στο πέρασμα του χρόνου. Η συμπεριφορά του φαίνεται στις εικόνες 6.5 και 6.6 τόσο για τη θετική όσο και για την αρνητική τάση φόρτισης. Μοιάζει με εκείνη του σκυροδέματος κυρίως στις κλίσεις των ευθειών αλλά όχι τόσο στις τιμές της παραμέτρου Z_4 . Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά που παρατηρείται στις 10 Ιουλίου σε σχέση με το σκυρόδεμα, εξαιτίας της έντονης ξηρασίας ο μπετονίτης χάνει μεγάλο μέρος της υγρασίας του με αποτέλεσμα η μεταβατική αντίσταση να είναι αυξημένη. Οι γραμμές τάσης φαίνεται να προσεγγίζουν αρκετά καλά τις πραγματικές γραφικές παραστάσεις. Όπως και στο σκυρόδεμα παρατηρείται μεγάλη διαφορά ανάμεσα στη μέτρηση με τη χρήση διαφορικού probe και χωρίς στις 29 Οκτωβρίου. Και σε αυτό το υλικό η τιμή της παραμέτρου Z_4 μειώνεται αυξανόμενης της τάσης. Οι ακριβείς αριθμητικές τιμές των γραφημάτων μπορούν να βρεθούν στο κεφάλαιο 5 στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων του αντίστοιχου υλικού.

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα



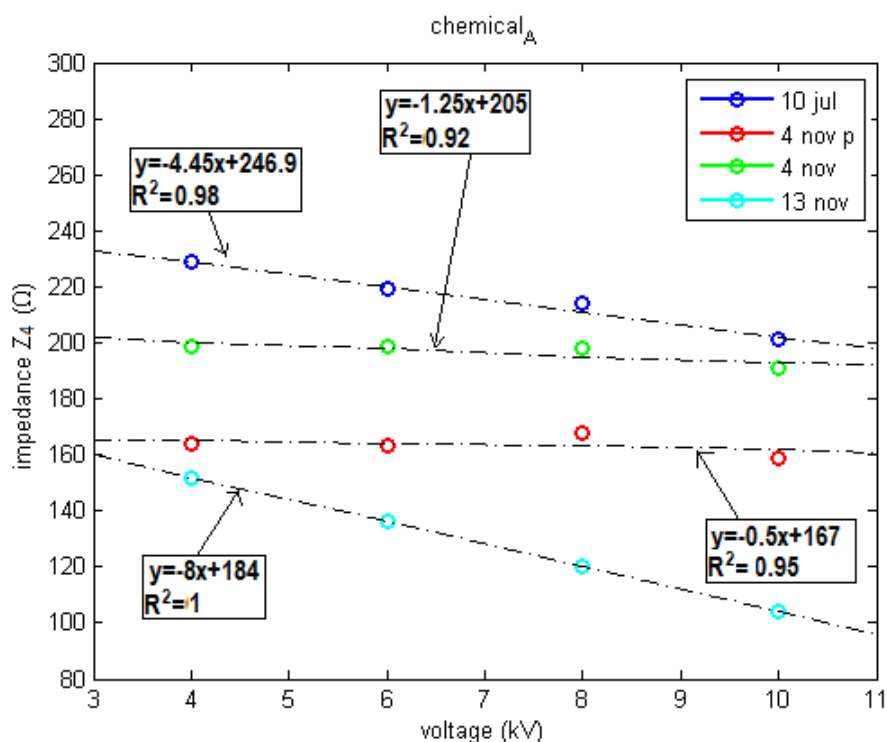
Εικόνα 6.5: Συμπεριφορά του μπετονίτη για θετική τάση φόρτισης.



Εικόνα 6.6: Συμπεριφορά του μπετονίτη για αρνητική τάση φόρτισης.

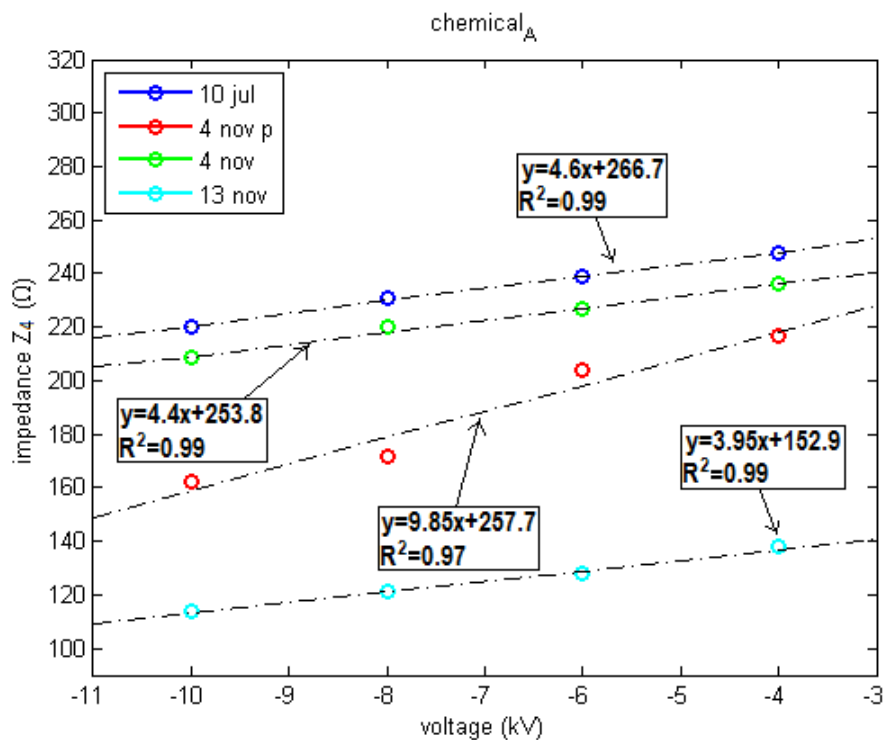
6.4 Χημικό υλικό Α

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στις 13 Νοεμβρίου με θετική τάση φόρτισης παρατηρείται αρκετά έντονη κλίση της γραμμής τάσης. Το ίδιο ακριβώς παρατηρείται στις μετρήσεις της 4ης Νοεμβρίου με τη χρήση διαφορικού probe. Και σε αυτό το βελτιωτικό υλικό υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στη μέτρηση με τη χρήση διαφορικού probe και χωρίς. Οι τιμές της μεταβατικής αντίστασης στις 10 Ιουλίου παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη διαφορά με εκείνες της 13ης Νοεμβρίου γεγονός που προδίδει την εξάρτηση του υλικού από την υγρασία του εδάφους. Η τιμή της παραμέτρου Z_4 μειώνεται αυξανόμενης της τάσης. Γενικά το υλικό δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δεν είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υλικά. Η συμπεριφορά του χημικού υλικού Α φαίνεται στις εικόνες 6.7 και 6.8.



Εικόνα 6.7: Συμπεριφορά του χημικού υλικού Α για θετική τάση φόρτισης.

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

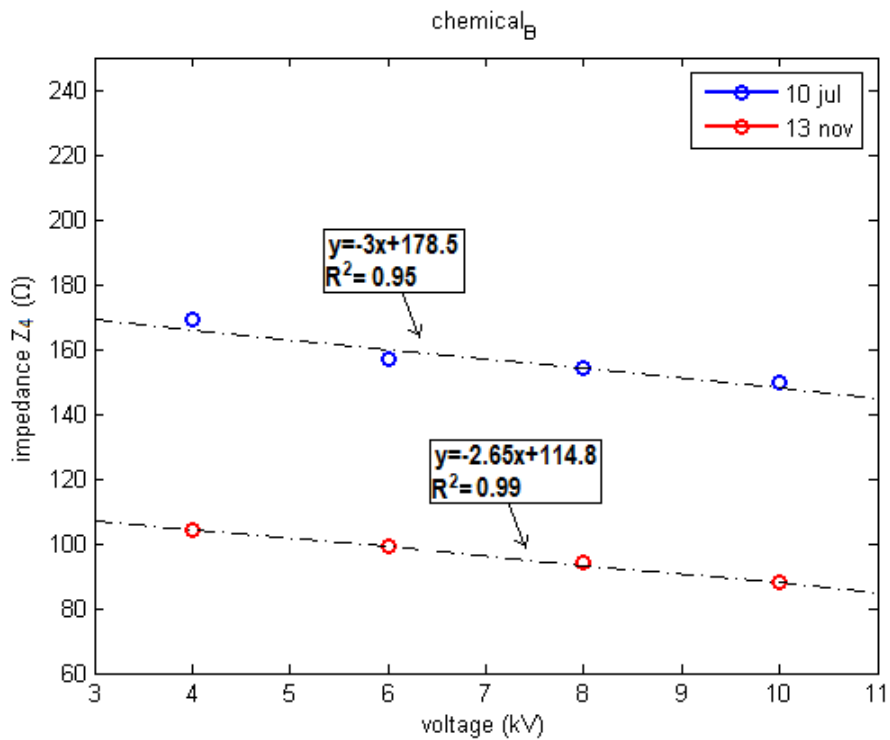


Εικόνα 6.8: Συμπεριφορά του χημικού υλικού A για αρνητική τάση φόρτισης.

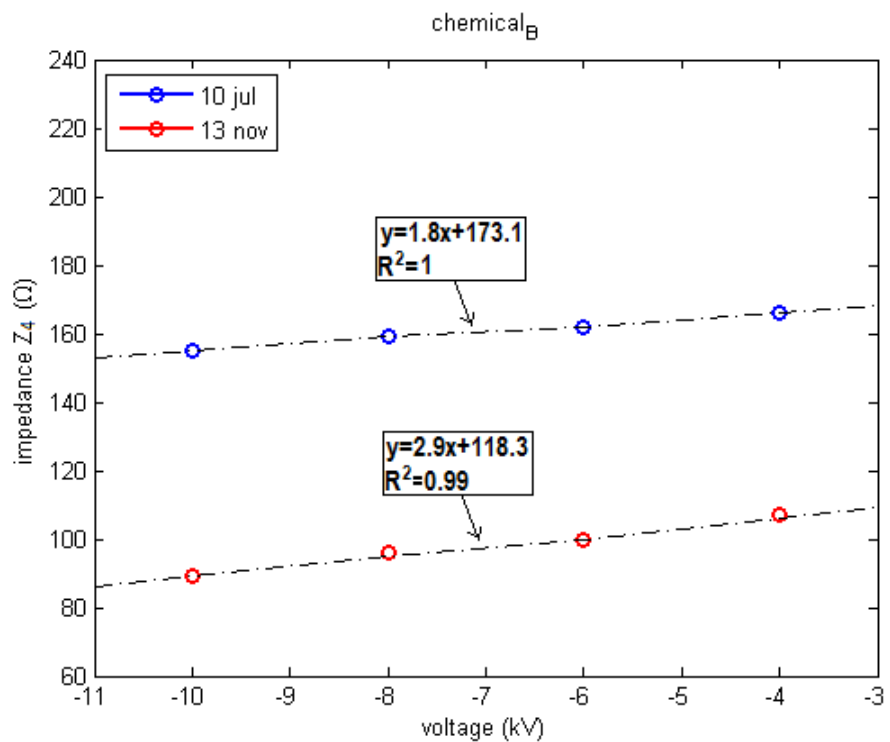
6.5 Χημικό υλικό B

Όπως και στα υπόλοιπα υλικά και στο χημικό υλικό B η μεταβατική αντίσταση μειώνεται αυξανόμενης της τάσης. Η συμπεριφορά του χημικού υλικού B φαίνεται στις εικόνες 6.9 και 6.10. Οι κλίσεις των εξομαλυμένων ευθειών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Αξιοσημείωτη είναι η πτώση της τιμής της παραμέτρου Z_4 στις 13 Νοεμβρίου λόγω της υγρασίας που έχει απορροφήσει το υλικό. Το συγκεκριμένο βελτιωτικό υλικό είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό σε σχέση με τα υπόλοιπα και παρουσιάζει ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα. Οι ακριβείς αριθμητικές τιμές των γραφημάτων μπορούν να βρεθούν στο κεφάλαιο 5 στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων του αντίστοιχου υλικού.

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα



Εικόνα 6.9: Συμπεριφορά του χημικού υλικού B για θετική τάση φόρτισης.



Εικόνα 6.10: Συμπεριφορά του χημικού υλικού B για αρνητική τάση φόρτισης.

6.6 Γενικά συμπεράσματα-Σύγκριση

Στις εικόνες 6.11 έως 6.14 παρουσιάζονται γραφήματα για όλα τα βελτιωτικά υλικά στις 10 Ιουλίου και στις 13 Νοεμβρίου τόσο για θετική όσο και για αρνητική τάση φόρτισης. Οι συγκεκριμένες ημερομηνίες είναι οι μόνες στις οποίες ελήφθησαν πλήρεις μετρήσεις σε όλα τα ηλεκτρόδια. Οι λόγοι που δεν ελήφθησαν πλήρεις μετρήσεις σε όλες τις επισκέψεις ήταν η απότομη βροχόπτωση και ο διπλάσιος αριθμός μετρήσεων που έπρεπε να πραγματοποιηθεί με τη χρήση του διαφορικού probe. Με προσεκτική παρατήρηση των γραφημάτων είναι δυνατόν να προκύψουν ιδιαίτερα χρήσιμα και ουσιαστικά συμπεράσματα. Να αναφερθεί εκ νέου σε αυτό το σημείο ότι η 10η Ιουλίου ήταν μια καλοκαιρινή μέρα μέσα σε περίοδο καύσωνα ενώ η 13η Νοεμβρίου μια μέρα της οποίας είχε προηγηθεί έντονη βροχόπτωση. Το φυσικό έδαφος παρουσιάζει με διαφορά τις μεγαλύτερες τιμές μεταβατικής αντίστασης σε σύγκριση με τα βελτιωτικά υλικά εδάφους, στοιχείο που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα βελτιωτικά υλικά ελαττώνουν όχι μόνο την αντίσταση γείωσης βιομηχανικής συχνότητας αλλά και τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση γείωσης. Η τιμή της μεταβατικής αντίστασης Z_4 βελτιώνεται αρκετά οποιοδήποτε βελτιωτικό υλικό χρησιμοποιήσουμε σε σύγκριση πάντα με το φυσικό έδαφος. Η πτωτική τάση της τιμής του Z_4 αυξανόμενης της τάσης παρατηρείται σε όλα τα ηλεκτρόδια τόσο στη θετική όσο και στην αρνητική φόρτιση. Στις 10 Ιουλίου τη χαμηλότερη μεταβατική αντίσταση παρουσιάζουν το σκυρόδεμα και το χημικό υλικό B ενώ ακολουθούν ο μπετονίτης και το χημικό υλικό A με μεγάλη διαφορά από το φυσικό έδαφος. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της χρησιμότητας των βελτιωτικών υλικών εδάφους σε περίοδο ξηρασίας. Στις 13 Νοεμβρίου την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν το χημικό υλικό B και ο μπετονίτης ενώ ακολουθούν το σκυρόδεμα και το χημικό υλικό A. Για να είναι πιο ουσιαστική η σύγκριση μεταξύ των βελτιωτικών υλικών εδάφους παρουσιάζεται στον πίνακα 6.1 η κοστολόγηση εγκατάστασης για το κάθε ηλεκτρόδιο.

Το σκυρόδεμα αποτελεί αναμφισβήτητα μια αποδεκτή και οικονομική λύση ως βελτιωτικό υλικό εδάφους. Είναι αρκετά σταθερό και δεν χάνει εύκολα την υγρασία που εμπεριέχει σε περιόδους ξηρασίας.

Ο μπετονίτης φαίνεται να έχει καλύτερη συμπεριφορά όταν το έδαφος παρουσιάζει αξιοσημείωτη υγρασία. Σε περιόδους ξηρασίας η αντίστασή του μεγαλώνει αρκετά με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει καλή σταθερότητα. Επιβεβαιώνονται στην παρούσα

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

διπλωματική εργασία τα συμπεράσματα άλλων ερευνητών που καταγράφονται στο κεφάλαιο 3 και αναφέρουν ότι ο μπετονίτης χάνει σχετικά εύκολα την υγρασία που εμπεριέχει καθώς είναι ένα υλικό έντονης υγροσκοπικής φύσεως, οπότε η χρήση του ενδείκνυται κυρίως σε περιοχές με υγρό κλίμα. Όταν ο μπετονίτης χάνει την υγρασία του συρρικνώνεται με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η αντίσταση επαφής του με το έδαφος.

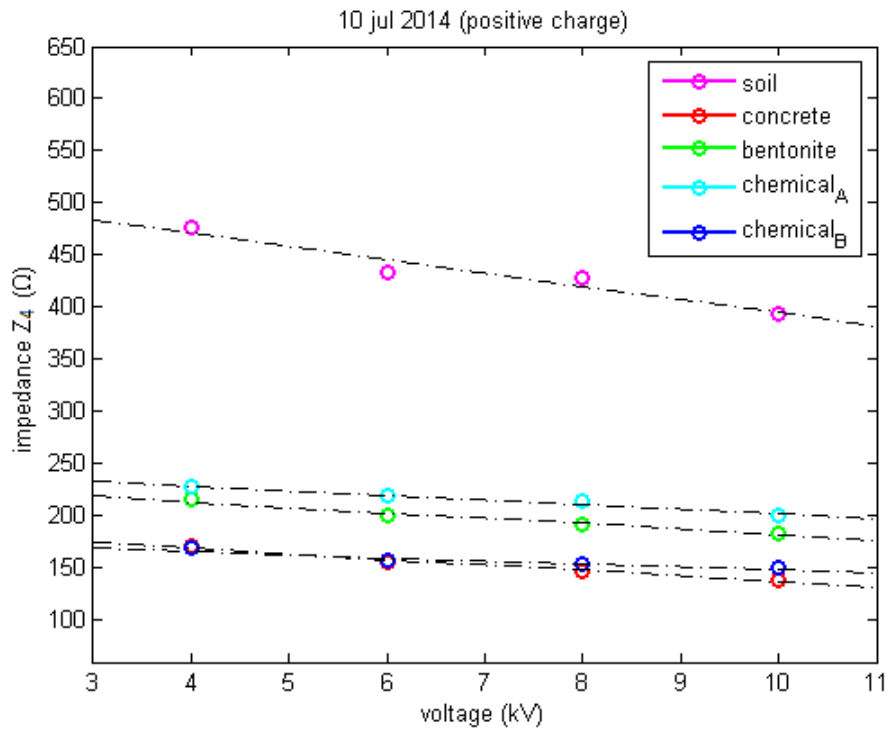
Η συμπεριφορά του χημικού υλικού Α θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μέτρια. Σε περίοδο ξηρασίας η μεταβατική του αντίσταση είναι σχετικά υψηλή ενώ έπειτα από έντονη βροχόπτωση η συμπεριφορά του βελτιώνεται χωρίς ωστόσο να υπερισχύει των υπολοίπων βελτιωτικών υλικών. Θα μπορούσε ίσως να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις, όμως αν λάβουμε υπόψη μας τα στοιχεία κοστολόγησης του πίνακα 6.1 δεν υπάρχει ουσιαστικός λόγος χρήσης του χημικού υλικού Α καθώς η τιμή του είναι ελάχιστα χαμηλότερη από εκείνη του σκυροδέματος.

Το χημικό υλικό Β θα μπορούσε να χαρακτηριστεί με βάση τα γραφήματα που ακολουθούν ως το βέλτιστο σε ότι αφορά τη συμπεριφορά της μεταβατικής του αντίστασης. Παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή τόσο σε περίοδο ξηρασίας όσο και έπειτα από έντονη βροχόπτωση. Παρατηρείται μια αξιοσημείωτη σταθερότητα και η περαιτέρω έρευνα της συμπεριφοράς του δείχνει να έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η χρήση του ενδεχομένως να περιορίζεται σε εγκαταστάσεις υψηλών απαιτήσεων λόγω του υψηλού κόστους του που είναι περίπου διπλάσιο από εκείνο του σκυροδέματος και του μπετονίτη όπως φαίνεται στον πίνακα 6.1.

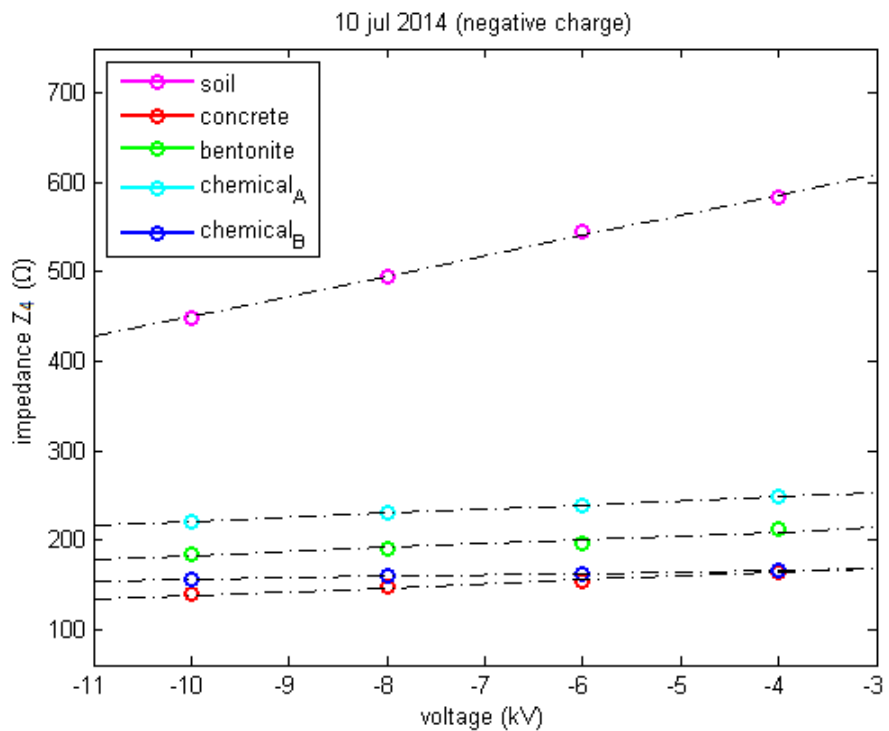
	Ηλεκτρόδιο G1	Ηλεκτρόδιο G2	Ηλεκτρόδιο G3	Ηλεκτρόδιο G4	Ηλεκτρόδιο G5
Κόστος ηλεκτροδίου[€]	13,48	13,48	13,48	13,48	13,48
Κόστος εργασίας[€]	20	120	115	115	100
Κόστος βελτιωτικού[€]	0	19,12	42,75	14,54	224,0
Σύνολο [€]	33,48	152,60	171,23	143,02	337,48

Πίνακας 6.1: Ανάλυση κόστους εγκατάστασης των ηλεκτροδίων γείωσης. [1]

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

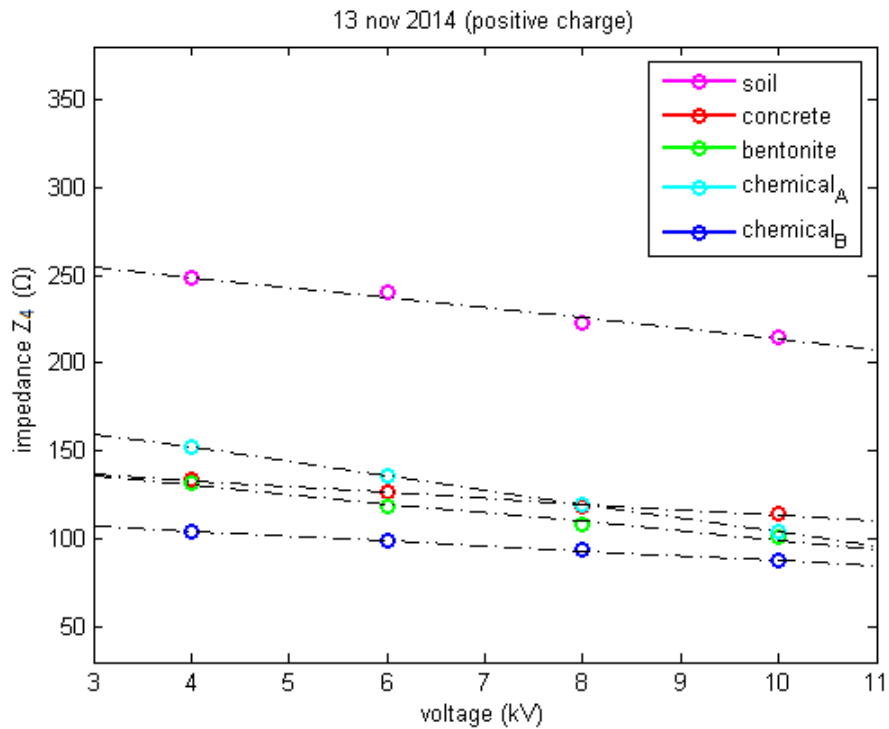


Εικόνα 6.11: Σύγκριση των βελτιωτικών υλικών εδάφους στις 10 Ιουλίου για θετική τάση φόρτισης.

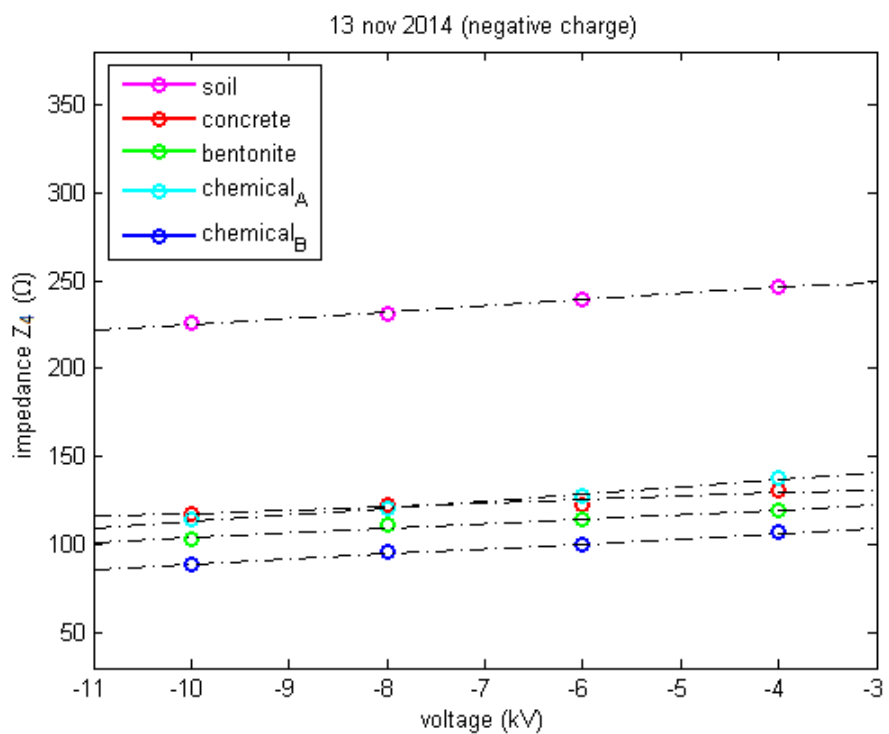


Εικόνα 6.12: Σύγκριση των βελτιωτικών υλικών εδάφους στις 10 Ιουλίου για αρνητική τάση φόρτισης.

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα



Εικόνα 6.13: Σύγκριση των βελτιωτικών υλικών εδάφους στις 13 Νοεμβρίου για θετική τάση φόρτισης.



Εικόνα 6.14: Σύγκριση των βελτιωτικών υλικών εδάφους στις 13 Νοεμβρίου για αρνητική τάση φόρτισης.

6.7 Επόμενη μέρα

Όπως σε κάθε επιστημονική έρευνα, πόσο μάλλον όταν πρόκειται για την πειραματική διερεύνηση ενός φαινομένου, δεν είναι δυνατόν να τεθούν όρια ή να θεωρηθεί ότι η έρευνα που έχει ήδη πραγματοποιηθεί είναι πλήρης και ότι δεν επιδέχεται αμφισβήτηση. Έτσι και στην παρούσα διπλωματική εργασία υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης και περαιτέρω διερεύνησης. Ένα βασικό σημείο που αφορά την πειραματική διαδικασία είναι ο τρόπος μέτρησης της τάσης. Προτείνεται στα επόμενα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν στη συγκεκριμένη διάταξη και θα αφορούν τη μελέτη της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας, η μέτρηση της τάσης να γίνει αποκλειστικά και μόνο με τη χρήση διαφορικού probe προκειμένου να θεωρηθεί πιο ακριβής. Ως επόμενο βήμα στην έρευνα που έχει ήδη πραγματοποιηθεί προτείνεται η ανύψωση της τάσης φόρτισης πέρα από τα 10kV με τη χρήση κατάλληλης κρουστικής γεννήτριας. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή η καταγραφή ρευμάτων της τάξεως των kA και η παρατήρηση και μελέτη φαινομένων ιονισμού του εδάφους. Περαιτέρω να αναφερθεί ότι σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα σε ότι αφορά τους κανόνες και τις αποστάσεις ασφαλείας κατά τη λήψη των μετρήσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε επίσης η επαλήθευση (ή η απόρριψη) των συμπερασμάτων που προέκυψαν μέσω θεωρητικής προσομοίωσης. Τέλος, θα μπορούσαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα διπλωματική εργασία να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός θεωρητικού μοντέλου που θα προσομοιώνει τη μεταβατική συμπεριφορά του κάθετου ηλεκτροδίου γείωσης που είναι εγκιβωτισμένο σε βελτιωτικό υλικό εδάφους.

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

[1] Β.Π. Ανδροβιτσανέας, Φ.Ε. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γόνος και Ι.Α. Σταθόπουλος
“Χρήση Βελτιωτικών Υλικών Εδάφους σε Συστήματα Γείωσης” Σύνοδος “Αθήνα
2011” 15 & 16 Δεκεμβρίου 2011.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας Matlab για τον υπολογισμό της παραμέτρου Z_4 .

```
filename = 'file.xlsx';% εύρεση του  $Z_4$  για θετική τάση φόρτισης
```

```
T = xlsread(filename,'A:A');
```

```
I = xlsread(filename,'B:B');
```

```
V = xlsread(filename,'C:C');
```

```
Is = smooth(I,13);
```

```
Vs = smooth(V);
```

```
[min position] = min(Is)
```

```
Vm=Vs(position)
```

```
Im=abs(min)
```

```
Z4=Vm/Im
```

```
filename = 'file.xlsx'; % εύρεση του  $Z_4$  για αρνητική τάση φόρτισης
```

```
T = xlsread(filename,'A:A');
```

```
I = xlsread(filename,'B:B');
```

```
V = xlsread(filename,'C:C');
```

```
Is = smooth(I,13);
```

```
Vs = smooth(V);
```

```
[max position] = max(Is)
```

```
Vm=abs(Vs(position))
```

```
Im=max
```

```
Z4=Vm/Im
```