



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

**Μεταβατική συμπεριφορά γειωτών
εντός βελτιωτικών υλικών εδάφους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Π. Σταματίου

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Δρ. Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Αθήνα, Ιούλιος 2016



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

198

Μεταβατική συμπεριφορά γειωτών εντός βελτιωτικών υλικών εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Π. Σταματίου

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Ιουλίου 2016.

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Μαρία Π. Σταματίου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Μαρία Π. Σταματίου, 2016.

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 τη συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	III
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	III
ABSTRACT.....	IV
KEY WORDS.....	IV
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	V
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ειδική αντίσταση εδάφους.....	2
1.3 Αντίσταση γείωσης	6
1.3.1 Υπολογισμός Αντίστασης Γείωσης	7
1.4 Μεταβατική συμπεριφορά κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	17
ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΗΣ.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Προδιαγραφές και εργαστηριακές δοκιμές	17
2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	18
2.3 Παρατηρήσεις.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	33
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	33
3.1 Τοποθεσία	33
3.2 Πειραματική διάταξη.....	36
3.3 Πειραματικός εξοπλισμός	39
3.4 Μετρήσεις	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	51
ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ	51
4.1 Κυκλωματικό μοντέλο για ηλεκτρόδιο χωρίς βελτιωτικό γείωσης	51
4.2 Κυκλωματικό μοντέλο για ηλεκτρόδιο με βελτιωτικό γείωσης	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	61
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	61
5.1 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων	61
5.2 Ανάλυση.....	66
5.1.1 Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης με την αύξηση της τάσης φόρτισης.....	66
5.1.2 Εξάρτηση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης από την πολικότητα της φόρτισης.	66
5.1.3 Σχέση της σύνθετης κρουστικής αντίστασης με την εποχή.	67
5.1.4 Συνεισφορά των βελτιωτικών στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.	68
5.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	81
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ.....	81
6.1 Πειραματική Διαδικασία.....	81
6.2 Συμπεράσματα	82
6.3 Επόμενη μέρα	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	93
Π ₁ Πειραματικά παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος από τις στάθμες των ±4kV, ±6kV, ±8kV	93
Π ₂ Κώδικας κυκλωματικού στοιχείου MODEL	103

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συμβολή στη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά εδάφους. Για τον σκοπό αυτόν, πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων σε υπαίθρια πειραματική διάταξη στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, με στόχο την ανάλυση και αξιολόγηση της απόδοσης τεσσάρων διαφορετικών βελτιωτικών υλικών γείωσης, υπό κρουστική καταπόνηση. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται, υλοποιείται και προτείνεται στο EMPT-ATP ένα κύκλωμα προσομοίωσης της πειραματικής διαδικασίας, για τη μοντελοποίηση και περαιτέρω μελέτη της σύνθετης κρουστικής αντίστασης γείωσης.

Λέξεις κλειδιά

Σύστημα γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, κρουστική σύνθετη αντίσταση, μεταβατική συμπεριφορά, βελτιωτικά υλικά γείωσης.

Abstract

The primary goal of this diploma thesis is to contribute to the study of the transient behaviour of vertical grounding rods, encased in ground enhancing compounds. For this purpose, a series of tests were conducted on an outdoor experimental layout set in the National Technical University of Athens campus, in order to evaluate the performance of four different ground enhancing compounds under lightning currents. Finally, an equivalent circuit for the simulation of the above experiment developed in EMTP-ATP is presented, aiming at further investigation of impulse impedance behaviour.

Key words

Grounding system, soil resistivity, impulse impedance, transient behaviour, ground enhancing compounds

Πρόλογος

Στο **Κεφάλαιο 1** της παρούσας εργασίας που αφορά τα συστήματα γείωσης, επεξηγούνται ο ρόλος και τα είδη της γείωσης. Στη συνέχεια, ορίζεται η ειδική αντίσταση εδάφους και οι τρόποι μέτρησής της, ενώ εισάγεται η έννοια της αντίστασης γείωσης. Τέλος, γίνεται αναφορά στη μεταβατική συμπεριφορά κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης και στις βασικές μεθόδους για τη μοντελοποίηση τους.

Το **Κεφάλαιο 2** αναφέρεται στα βελτιωτικά υλικά γείωσης. Αρχικά, καταγράφονται οι προδιαγραφές που απαιτείται να πληρούν τα υλικά αυτά και οι δοκιμές στις οποίες υπόκεινται για την αξιολόγησή τους με βάση διεθνείς κανονισμούς. Ακολουθεί μία περιληπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνητικών εργασιών που αφορούν στη χρήση βελτιωτικών υλικών γείωσης για τη βελτίωση των συστημάτων γείωσης, από ερευνητές ανά τον κόσμο, μέχρι σήμερα.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας. Γίνεται μία περιγραφή της τοποθεσίας και της ανάλυσης του εδάφους όπου διεξήχθη το πείραμα και στη συνέχεια καταγράφεται η πειραματική διάταξη και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται μερικά ενδεικτικά παλμογραφήματα του κρουστικού ρεύματος και της τάσης.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται η κυκλωματική προσέγγιση της μεταβατικής αντίστασης γείωσης με τη βοήθεια του EMTP-ATP. Προτείνονται δύο μοντέλα, ένα για την προσομοίωση κατακόρυφου ηλεκτροδίου γείωσης εντός φυσικού εδάφους και ένα για όμοιο ηλεκτρόδιο εγκιβωτισμένο σε βελτιωτικό υλικό. Για κάθε μοντέλο ακολουθεί περιγραφή και επεξήγηση του ρόλου και των τιμών των παραμέτρων του.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρατίθενται τα αποτελέσματα της εργασίας. Το πρώτο τμήμα του κεφαλαίου αναφέρεται στα πειραματικά αποτελέσματα και παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης των ηλεκτροδίων της πειραματικής διάταξης με την αύξηση της τάσης φόρτισης και την αλλαγή της υγρασίας του εδάφους. Στο δεύτερο τμήμα, που αφορά στην προσομοίωση της διάταξης που προτάθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο,

παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα συνδυαστικά παλμογραφήματα για την τάση και το ρεύμα από τα πειραματικά δεδομένα και την κυκλωματική προσέγγιση.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια σύνοψη της ερευνητικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε και διατυπώνονται συμπεράσματα, που προκύπτουν συνολικά, τόσο από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, όσο και από τα αποτελέσματα των κυκλωματικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν. Τέλος γίνονται προτάσεις για επέκταση της παρούσας εργασίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την ανάθεση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την κρίσιμη συνεισφορά του σε κάθε στάδιο της ερευνητικής διαδικασίας.

Τον κ. Βασίλειο Π. Ανδροβιτσάνεα, Διδάκτορα Μηχανικό Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας για την καθοδήγηση του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε.

Την κυρία Ελένη Π. Νικολοπούλου Υποψήφια Διδάκτορα και Μηχανικό Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθεια της και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για το ευχάριστο και δημιουργικό κλίμα.

Την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κεφάλαιο 1

Συστήματα Γείωσης

1.1 Εισαγωγή

Γείωση ονομάζεται η αγώγιμη σύνδεση ενός σημείου ενός κυκλώματος με τη γη ή κάποιο άλλο σημείο μηδενικού δυναμικού. Το σύστημα γείωσης, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο αγωγών τοποθετημένων μέσα στο έδαφος, είναι αναπόσπαστο κομμάτι κάθε ηλεκτρικής εγκατάστασης. Ο βασικός ρόλος ενός συστήματος γείωσης είναι η συλλογή των ρευμάτων σφαλμάτων ή κεραυνοπληξιών και η ελεγχόμενη διάχυσή τους προς τη γη, με τη μικρότερη δυνατή πτώση δυναμικού. Με τον τρόπο αυτό προστατεύεται τόσο ο άνθρωπος από αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, όσο και ο εξοπλισμός, ενώ παράλληλα, περιορίζεται ο θόρυβος και οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ζεύξεις.

Οι γειώσεις ανάλογα με τον ρόλο που έχουν σε ένα κύκλωμα, διακρίνονται στις εξής:

- Γείωση λειτουργίας
- Γείωση προστασίας
- Γείωση ασφαλείας

Γείωση λειτουργίας είναι η γείωση ενός τμήματος της 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 (έμμεση γείωση).

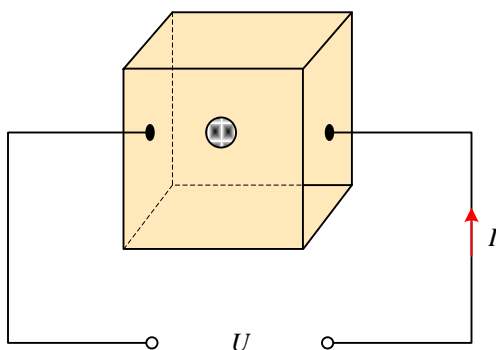
Γείωση προστασίας ονομάζουμε την χωρίς παρεμβολή άλλων αντιστάσεων (πλην της, αντίστασης γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης) γείωση κάθε αγώγιμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου, που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγώγιμα μέρη μίας εγκατάστασης 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 μανδυών 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.

Γείωση ασφαλείας ονομάζεται κάθε γείωση μιας εγκατάστασης που χρησιμεύει για να διοχετεύονται, προς τη γη, ρεύματα σφάλματος από εξωτερικά ατμοσφαιρικά αίτια, όπως οι κεραυνοί και χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκομένων ανθρώπων και αντικειμένων 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.

Απαραίτητα χαρακτηριστικά ενός **γειωτή** ή **ηλεκτροδίου γείωσης** είναι η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και η αντοχή σε καταπονήσεις από εξωτερικούς παράγοντες. Για τον λόγο αυτόν προτιμώνται υλικά όπως ο χαλκός και ο χάλυβας (θερμά επιψευδαργυρωμένος, ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένος ή ανοξείδωτος) [1], [2].

1.2 Ειδική αντίσταση εδάφους

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν ένα σύστημα γείωσης είναι η ειδική αντίσταση εδάφους, που ορίζεται ως η αντίσταση του υλικού του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 m^3$), όταν τοποθετούνται ηλεκτρόδια στις πλευρές του [1], όπως στο Σχήμα 1.1.

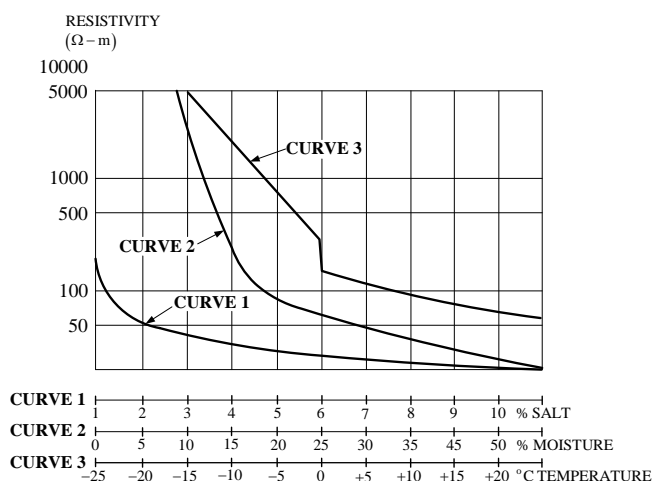


Σχήμα 1.1 Ειδική αντίσταση εδάφους [2].

Η ειδική αντίσταση εδάφους συμβολίζεται με ρ και μετριέται σε $[\Omega \cdot \text{m}]$, ενώ τα βασικά χαρακτηριστικά του τύπου του εδάφους που καθορίζουν την τιμή της είναι:

- Η περιεκτικότητά του σε υγρασία.
- Η περιεκτικότητά του σε άλατα.
- Η θερμοκρασία.
- Η πίεση.
- Η μορφή της τάσης και η ένταση του πεδίου.
- Το μέγεθος των κόκκων του.

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η εξάρτηση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους από τα τρία πρώτα χαρακτηριστικά του



Σχήμα 1.2 Η επίδραση της υγρασίας, των αλάτων και της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [3].

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι οι οποίες απαιτούν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων μέσα στο

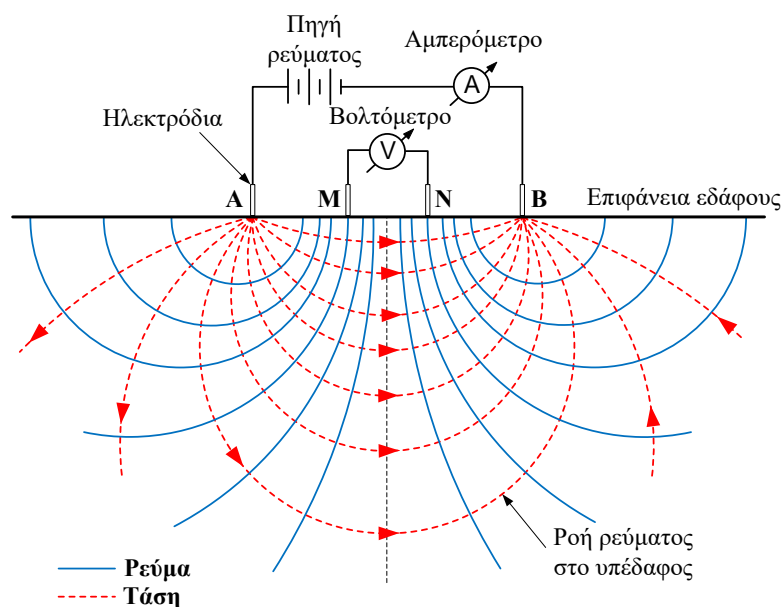
έδαφος και την έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αυτών. Η γενική μέθοδος περιλαμβάνει τέσσερα ηλεκτρόδια, δύο από τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του πεδίου (τα A, B), γι' αυτό και ονομάζονται ηλεκτρόδια ρεύματος, ενώ τα άλλα δύο, που καλούνται ηλεκτρόδια δυναμικού, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Συγκεκριμένα, εγχύεται ρεύμα στο ηλεκτρόδιο A, το οποίο εξέρχεται από το ηλεκτρόδιο B, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου. Στη συνέχεια, με βάση τη σχέση προσδιορισμού της τάσης σε ένα σημείο:

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (1.1)$$

όπου r_A , r_B οι αποστάσεις από το σημείο αυτό, υπολογίζεται η διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων M,N ως

$$U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (1.2)$$

AM, BM, AN, BN οι αντίστοιχες αποστάσεις των ηλεκτροδίων [2]. Η αντίστοιχη διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



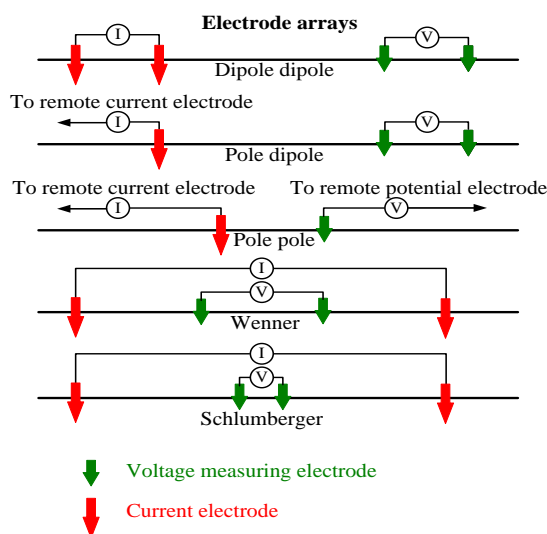
Σχήμα 1.3 Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης [2].

Από την ένταση του ρεύματος και τη διαφορά δυναμικού υπολογίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η οποία όμως εξαρτάται από την διάταξη, ενώ από την επεξεργασία αυτής προκύπτει η κατανομή της πραγματικής

ειδικής αντίστασης ρ . Η κυριότερη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης είναι η μέθοδος των τεσσάρων σημείων, αν και στη βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης, η μέθοδος των τριών και των δύο σημείων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε διάφορες παραλλαγές που έχουν να κάνουν κυρίως με τη διάταξη των ηλεκτροδίων. Κάποιες από αυτές είναι οι εξής:

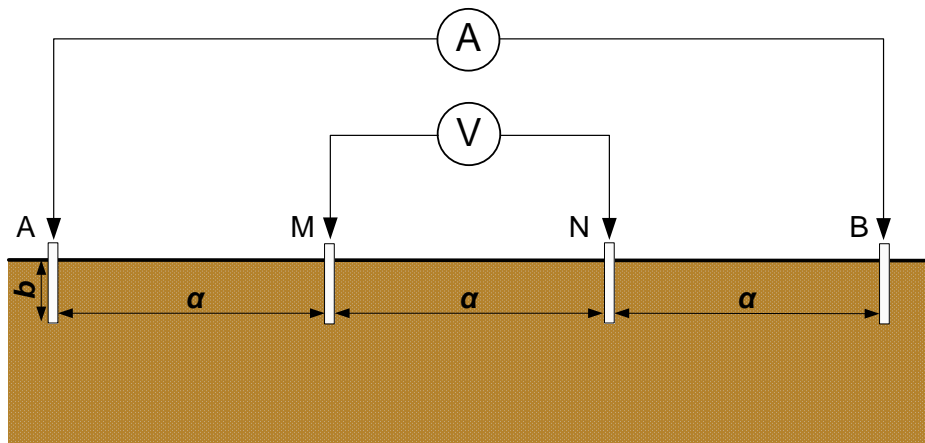
- Μέθοδος Wenner
- Μέθοδος Schlumberger-Palmer
- Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου
- Μέθοδος Lee
- Μέθοδος διπόλου-διπόλου
- Τετραγωνική διάταξη

Η αντίστοιχη διάταξη για κάθε μία από αυτές φαίνεται στο Σχήμα 1.4



Σχήμα 1.4 Διατάξεις μέτρησης για τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων [2].

Από τις παραπάνω μεθόδους, πιο συχνά χρησιμοποιείται η μέθοδος Wenner λόγω της ευκολίας στην εφαρμογή της. Σε αυτήν, τα τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετούνται με οριζόντια στοίχιση, σε ίσες αποστάσεις a μεταξύ τους, ενώ το βάθος b στο οποίο εισέρχονται στο έδαφος ενδείκνυται να μην ξεπερνά το $1/20$ της απόστασης a . Στη συνέχεια, όπως περιγράφηκε παραπάνω, εγχύεται ρεύμα στα A, B, ενώ η τάση μετριέται από τα M, N.



Σχήμα 1.5 Η μέθοδος Wenner [2].

Η ζητούμενη ρ προκύπτει από τον τύπο :

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} = \frac{4\pi a R}{n}, \quad 1 < n < 2 \quad (1.3)$$

Στην περίπτωση που $a \ll b$ η σχέση γίνεται:

$$\rho = 4\pi a R \quad (1.4)$$

ενώ όταν $b \ll a$:

$$\rho = 2\pi a R \quad (1.5)$$

1.3 Αντίσταση γείωσης

Η αντίσταση γείωσης, η οποία μετριέται μέσω του γειωτή, ή ηλεκτροδίου γείωσης, ορίζεται ως η διαφορά δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και της άπειρης γης (ενός απόμακρου σημείου, στην επιφάνεια του εδάφους, σε μεγάλη απόσταση από το γειωτή, με μηδενικό δυναμικό), προς την αντίστοιχη ένταση του ρεύματος, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στον ίδιο χώρο. Η αντίσταση γείωσης εκφράζει την αντίσταση που συναντά το ρεύμα κατά την διάβασή του από ένα αγωγίμο μέσο, προς το έδαφος γύρω από αυτό, είναι δηλαδή μια ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο. Είναι, προφανώς, ανάλογη με την ειδική αντίσταση του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη με την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος, ενώ μπορεί να

θεωρηθεί ως η συνισταμένη των εν σειρά, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως R_d .

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.6)$$

Η ισοδύναμη αντίσταση γείωσης μπορεί να θεωρηθεί ότι συνίσταται από τρία μέρη :

- ❖ Την αντίσταση του αγωγού που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με το υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα.
- ❖ Την αντίσταση επαφής μεταξύ της επιφάνειας του ηλεκτροδίου και του εδάφους που το περιβάλλει.
- ❖ Την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο γείωσης [1], [2].

1.3.1 Υπολογισμός Αντίστασης Γείωσης

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο, να γίνει αναφορά στον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Λόγω της γεωμετρίας μιας τέτοιας ράβδου το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό της χωρητικότητας ενός μεμονωμένου κυλίνδρου, με μήκος πολύ μεγάλο σε σχέση με την ακτίνα του. Σύμφωνα με τον E. Hallen αυτή προκύπτει από τη σχέση [4]:

$$\frac{C}{l} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1,22741}{4\lambda^2} + \frac{2,17353}{8\lambda^3} + \frac{11,0360}{16\lambda^4} + \dots \quad (1.7)$$

όπου

$$\lambda = \ln(2l/r)$$

$2l$ = το μήκος του κυλίνδρου σε *cm*

r = η ακτίνα του κυλίνδρου σε *cm*

C = η χωρητικότητα σε *Farad*.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης της ράβδου θεωρούμε δύο παράλληλες αγώγιμες πλάκες με αντίθετα φορτία $+q$, $-q$, σε απόσταση τόσο μικρή ώστε να αμελείται το φαινόμενο των άκρων. Από τα αναπύγματα της (1.6) για ένα

κατακόρυφο ηλεκτρόδιο σύμφωνα με τον Dwight προκύπτει η ζητούμενη σχέση [5]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (1.8)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο, l το μήκος, και r η ακτίνα του. Για τα τελευταία θα πρέπει να ισχύει $l/r > 10$ [2].

Στην ειδική περίπτωση ηλεκτροδίων εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικό υλικό γείωσης χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_1} - 1 \right) - \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) + \frac{\rho_2}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) \quad (1.9)$$

ή μετά από απλουστεύσεις η :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{\rho_2}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_2} - 1 \right) \quad (1.10)$$

όπου r_1, r_2 οι ακτίνες της ράβδου και του βελτιωτικού που το περιβάλλει αντίστοιχα, ρ_2 η ειδική αντίσταση του εδάφους γύρω από το βελτιωτικό και ρ_1 η ειδική αντίσταση του ίδιου του βελτιωτικού.

1.4 Μεταβατική συμπεριφορά κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης

Η απόκριση ενός συστήματος γείωσης σε υψηλή κρουστική καταπόνηση ονομάζεται μεταβατική συμπεριφορά και εξαρτάται τόσο από το ίδιο το σύστημα, τη μορφή του αλλά και το σημείο έγχυσης, όσο και από την ειδική αντίσταση του εδάφους και το φαινόμενο του ιονισμού σε αυτό, αν οι συνθήκες ευνοούν την εκδήλωσή του, ενώ εξίσου σημαντική είναι και η μορφή του εγχυόμενου ρεύματος [6]. Ήδη από τις πρώτες μελέτες του Towne το 1929 [7] παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά, ενώ είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της μόνιμης κατάστασης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

Λόγω της μικρής διάρκειας του φαινομένου παρατηρείται αύξηση της **σύγχρονης αντίδρασης** της σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου, που οδηγεί σε αύξηση της συχνότητας και, συνεπώς, της συνολικής αντίστασης. Η αύξηση,

αυτή, της συχνότητας ενισχύει επίσης και το **επιδερμικό φαινόμενο** που οδηγεί σε περαιτέρω άνοδο της τιμής της σύνθετης αντίστασης.

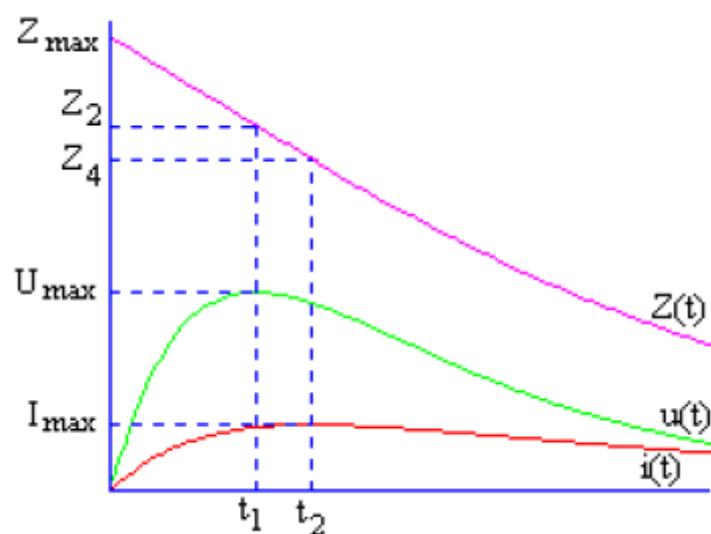
Καθώς ο χρόνος μετώπου της κρουστικής διέγερσης είναι πολύ μικρός, μειώνεται το **ενεργό μήκος** (effective length) του ίδιου του γειωτή.

Το ίδιο το **έδαφος** επηρεάζεται από την κρουστική καταπόνηση καθώς η ξηρότητα που επιφέρει το υψηλό ρεύμα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής του αντίστασης.[6]

Ορίζεται ως κρουστική σύνθετη αντίσταση γείωσης, ο λόγος της μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης του ρεύματος ως προς την άπειρη γη, προς το εγγεόμενο ρεύμα [6].

$$Z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (1.11)$$

Ακολουθεί το Σχήμα 1.6, με τα χαρακτηριστικά σημεία των καμπυλών του ρεύματος και της τάσης, από τα οποία προκύπτουν οι ορισμοί των παραμέτρων (1.12) έως (1.15) της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 1.6 Προσδιορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης [5].

$$Z_1 = \max(z(t)) \quad (1.12)$$

$$Z_2 = \frac{u(t_1)}{i(t_1)} \quad (1.13)$$

$$Z_3 = \frac{u(t_1)}{i(t_2)} \quad (1.14)$$

$$Z_4 = \frac{u(t_2)}{i(t_2)} \quad (1.15)$$

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 την αντίστοιχη στιγμιαία τιμή του ρεύματος, Z_3 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος και Z_4 είναι ο λόγος της τάσης όταν το ρεύμα γίνεται μέγιστο, προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος [6]. Ισχύει:

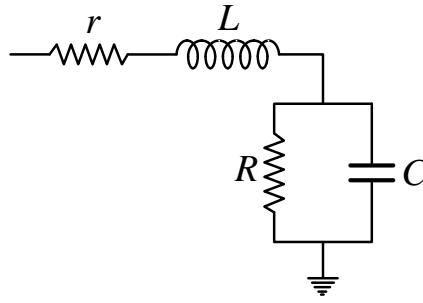
$$Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 \quad (1.16)$$

Η επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός της σύνθετης κρουστικής αντίστασης γίνεται από την (1.15).

Για την καλύτερη μελέτη αυτής της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, κρίθηκε απαραίτητη η μοντελοποίησή της, με την οποία ασχολήθηκαν αρκετοί ερευνητές από το 1980 μέχρι σήμερα. Οι κυριότερες κατηγορίες, στις οποίες ταξινομούνται τα διάφορα μοντέλα της μεταβατικής συμπεριφοράς, περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους:

1.4.1 Κυκλωματικά Μοντέλα

Κυκλωματικά μοντέλα είναι αυτά που περιλαμβάνουν τις συγκεντρωμένες παραμέτρους του κυκλώματος του ηλεκτροδίου γείωσης, δηλαδή την επιμήκη αντίσταση, την αυτεπαγωγή του ηλεκτροδίου και τον εγκάρσιο κλάδο, που αποτελείται από αντίσταση και χωρητικότητα προς γη, συνδεδεμένες παράλληλα. Η μεθολογία της προσέγγισης αυτής περιλαμβάνει τον χωρισμό του συστήματος σε πεπερασμένα τμήματα και τη δημιουργία του ισοδύναμου κυκλώματος. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι παράμετροι του κυκλώματος και το κύκλωμα επιλύεται με τη βοήθεια των εξισώσεων Kirchoff. Ένα τέτοιο ισοδύναμο κύκλωμα για κατακόρυφο ηλεκτρόδιο πρότεινε ο Rudenberg [8]:



Σχήμα 1.7 Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβατικής αντίστασης κατακόρυφου ηλεκτροδίου γείωσης [8].

Οι εξισώσεις που το περιγράφουν είναι οι εξής:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right) \quad (1.17)$$

$$G = \frac{2\pi}{\rho \left[\ln \left(\frac{2l}{a} \right) \right]} \quad (1.18)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r l}{\ln \left(\frac{2l}{a} \right)} \quad (1.19)$$

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} \right) \quad (1.20)$$

όπου l το μήκος του ηλεκτροδίου, a η ακτίνα του, μ διαπερατότητα του εδάφους και ϵ_r η σχετική του επιτρεπτότητα.

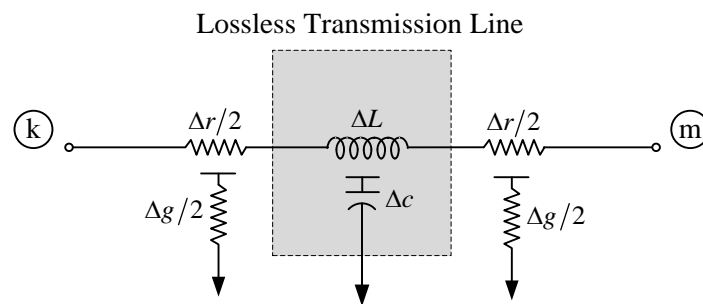
Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά απλή, ενώ μπορεί να συμπεριλάβει τις αμοιβαίες ζεύξεις και τα μη γραμμικά φαινόμενα.

1.4.2 Μοντέλα Γραμμών Μεταφοράς

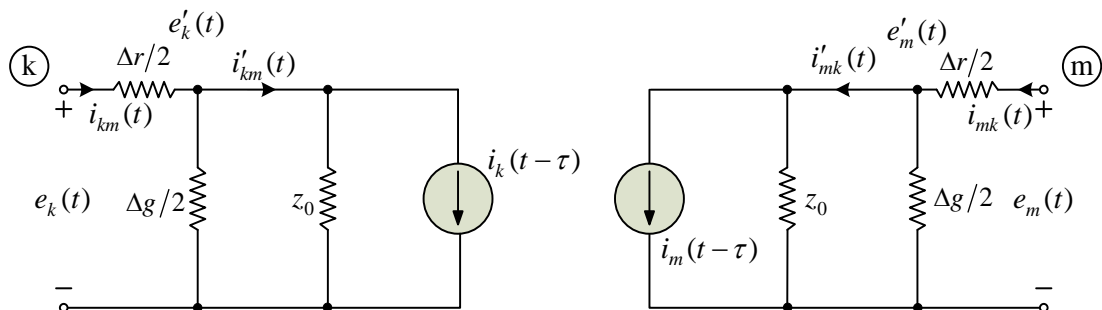
Τα μοντέλα γραμμών μεταφοράς περιλαμβάνουν καταναμημένες παραμέτρους ενώ μπορούν να εφαρμοστούν τόσο για απλά ηλεκτρόδια όσο και για σύνθετα συστήματα γείωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος ήταν η πρώτη προσέγγιση του φαινομένου διότι αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί

οριζόντιος αγωγός γείωσης, ο οποίος έχει παρόμοια συμπεριφορά με τις εναέριες γραμμές μεταφοράς.

Η πρώτη εμφάνιση του μοντέλου έγινε το 1983 σε μελέτη των A.P.Meliopoulos και M.G.Moharam [9], οι οποίοι αντικατέστησαν κάθε τμήμα του κυκλώματος με μία γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες και δύο αγωγιμότητες διαρροής προς τη γη σε διακλάδωση, ενώ όλες οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος (Σχήμα 1.8) ήταν ανεξάρτητες της συχνότητας. Τα ισοδύναμα μοντέλα που παρουσιάζονται στην εργασία τους είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 1.8 Ισοδύναμο κύκλωμα τμήματος αγωγού γείωσης [9].



Σχήμα 1.9 Ωμικό ισοδύναμο ενός αγωγού γείωσης μικρού μήκους [9].

Το συνολικό ισοδύναμο κύκλωμα περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$[Y] \cdot [e(t)] = [i(t)] + [b(t-h)] \quad (1.21)$$

όπου Y η μήτρα αγωγιμοτήτων του κυκλώματος, $e(t)$ το διάνυσμα των τάσεων στους κόμβους, $i(t)$ το διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται στους κόμβους, και $b(t-h)$ το διάνυσμα των προηγούμενων τιμών.

Στη συνέχεια οι ίδιοι ερευνητές βελτίωσαν το μοντέλο ώστε να μπορεί να υπολογίζει απόκριση σε οποιαδήποτε υπερδιέγερση, με εξαρτώμενες, πλέον, από τη συχνότητα, παραμέτρους. Για να το επιτύχουν αυτό, βασίστηκαν στις στατικές εξισώσεις Maxwell.

Η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς μπορεί να εφαρμοστεί είτε στο πεδίο του χρόνου είτε της συχνότητας, ενώ μπορεί να συμπεριλάβει τόσο τις αμοιβαίες ζεύξεις όσο και το φαινόμενο του ιονισμού.

1.4.3 Προσέγγιση Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου

Το μοντέλο Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων Maxwell με ελάχιστες όμως προσεγγίσεις, γι' αυτό και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ακρίβεια από τα προηγούμενα. Μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τη μέθοδο των ροπών (method of moment), είτε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method).

Η μέθοδος των ροπών είναι ο μετασχηματισμός της σχετικής ολοκληρωτικής εξίσωσης του Maxwell (1.22) σ' ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους, που αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές του ρεύματος βάσει μερικών κατάλληλων επεκτάσεων.

Τη μέθοδο αυτή εφάρμοσαν πρώτοι οι Grcev και Dawalibi το 1990 [10], βασιζόμενοι, όπως αναφέρθηκε στην:

$$\mathbf{E}^s = \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int_l \mathbf{t}' \cdot I_l(\mathbf{r}') G_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dl \quad (1.22)$$

όπου

$$\gamma^2 = -\omega^2\mu\epsilon \text{ και}$$

$$G_n(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = G_l(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + G_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + G_s(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (1.23)$$

Με μ συμβολίζεται η μαγνητική και με ϵ η ηλεκτρική επιτρεπτότητα ενώ γ^2 είναι η σταθερά διάδοσης του κύματος στο μέσο. Με G συμβολίζεται η

συνάρτηση Green, ενώ τα διανύσματα r και t αναφέρονται σε ακτίνα και μήκος κυλίνδρου αντίστοιχα.

Κατά μήκος του αγωγού γείωσης θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση (οριακή συνθήκη):

$$\mathbf{t} \cdot (\mathbf{E}^i + \mathbf{E}^s) = I \cdot Z_s \cdot \Delta l \quad (1.24)$$

όπου η Z_s αναφέρεται στην ανά μονάδα μήκους σύνθετη αντίσταση του αγωγού με ρεύμα I , ενώ το \mathbf{E}^i περιγράφεται από τους ερευνητές ως το εντυπωμένο ηλεκτρικό πεδίο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1995 από τους B.Nekhoul et al [11], οι οποίοι βασίστηκαν αρχικά στις μερικές διαφορικές εξισώσεις Maxwell για το διανυσματικό ($\vec{\mathbf{A}}$) και το βαθμωτό (U) δυναμικό και, στη συνέχεια, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τις λύσεις που βασίζονται στη φυσική αρχή ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο σύστημα. Από τα παραπάνω προέκυψαν οι εξισώσεις:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{\mathbf{W}}) \cdot (\nabla \times \vec{\mathbf{A}}) + \frac{1}{\mu} (\nabla \cdot \vec{\mathbf{W}}) (\nabla \cdot \vec{\mathbf{A}}) + \sigma \cdot (j\omega \vec{\mathbf{W}} \cdot \vec{\mathbf{A}} + \vec{\mathbf{W}} \cdot \nabla U) \right] d\Omega = 0 \quad (1.25)$$

$$\int_{\Omega} \left[\sigma \cdot \nabla w \cdot (j\omega \vec{\mathbf{A}} + \nabla U) \right] d\Omega = 0 \quad (1.26)$$

όπου $\vec{\mathbf{W}}$ η συνάρτηση βάρους το διανυσματικού, και w η συνάρτηση βάρους του βαθμωτού δυναμικού για στοιχειώδη όγκο $d\Omega$.

Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν επίσης την εξίσωση (1.27) για να εκφράσουν το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό $\vec{\mathbf{A}}$ που αφορά τον αέρα ή άλλη μη αγώγιμη περιοχή.

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{\mathbf{W}}) \cdot (\nabla \times \vec{\mathbf{A}}) + \frac{1}{\mu} (\nabla \cdot \vec{\mathbf{W}}) (\nabla \cdot \vec{\mathbf{A}}) \right] d\Omega = 0 \quad (1.27)$$

Στη συνέχεια χώρισαν το σύστημα σε N τμήματα αφού η λύση απαιτεί το μετασχηματισμό των εξισώσεων του συστήματος σε γραμμικές.

Η προσέγγιση με τη θεωρία των πεδίων, παρότι μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκα συστήματα, παρουσιάζει δυσκολίες στον ορισμό των ορίων που απαιτούν οι εξισώσεις που την περιγράφουν κι αυτό, διότι, αναφέρεται σε ανοικτό περιβάλλον (αέρας και γη).

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η θεωρητική προσέγγιση της μόνιμης και της μεταβατικής κατάστασης των συστημάτων γείωσης. Είναι πλέον σαφές, πως απαραίτητη προϋπόθεση ενός συστήματος γείωσης είναι η διατήρηση της αντίστασής του σε χαμηλή τιμή. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βελιωτικά υλικά γείωσης και οι αντίστοιχες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτόν.

Κεφάλαιο 2

Βελτιωτικά Υλικά Γείωσης

2.1 Εισαγωγή

Η βασική απαίτηση ενός συστήματος γείωσης είναι η όσο το δυνατόν χαμηλότερη τιμή αντίστασης, ώστε να παρέχει αποτελεσματική προστασία τόσο στον άνθρωπο όσο και σε εγκαταστάσεις και ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, σε περίπτωση κεραυνού ή βραχυκυκλώματος αλλά και διαρροών ρεύματος. Ελάττωση της τιμής αυτής της αντίστασης γείωσης μπορεί να επιτευχθεί με τη μεταβολή του μεγέθους ή της μορφής των ηλεκτροδίων γείωσης, του βάθους τοποθέτησης τους, ή με την επιλογή πλήθους ηλεκτροδίων σε ενιαία διάταξη. Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, οι παραπάνω παρεμβάσεις είτε δεν είναι δυνατές, λόγω δομής του εδάφους ή περιορισμένου χώρου, είτε δεν είναι αρκετές ειδικά σε περιοχές με πολύ ξηρό έδαφος. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατή η διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους, σε μία μικρή μόνο ακτίνα γύρω από το ηλεκτρόδιο, εγκιβωτίζοντας αυτό σε κάποιο υλικό πολύ υψηλής αγωγιμότητας. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο, αυξάνεται, φαινομενικά, η ενεργός διάμετρος του ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα να έχουμε πτώση στην αντίσταση γείωσης.

2.2 Προδιαγραφές και εργαστηριακές δοκιμές

Για να χαρακτηριστεί ένα τέτοιο υλικό ως βελτιωτικό υλικό γείωσης θα πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές και να έχει περάσει από τους απαραίτητους ελέγχους ποιότητας, με βάση τα Ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα [12], όπως:

- Υψηλή αγωγιμότητα.

- Να είναι ασφαλές στη χρήση του και φιλικό προς το περιβάλλον.
- Να είναι μόνιμο και να διατηρεί τις ιδιότητές του.
- Να είναι φυσικά και χημικά αδρανές με το ηλεκτρόδιο γείωσης, για να αποφεύγεται η διάβρωση του ηλεκτροδίου
- Εύκολο και απλό στην επεξεργασία.

Πέραν, βέβαια, από τις παραπάνω τεχνικές απαιτήσεις ένα βελτιωτικό υλικό γείωσης θα πρέπει επίσης να έχει χαμηλό κόστος τόσο στην αγορά, αλλά ακόμα περισσότερο στη μεταφορά και την εγκατάσταση.

Οι έλεγχοι στους οποίους υπόκεινται τα υλικά αυτά πριν από τη έγκρισή τους είναι οι εξής [12]:

- ❖ Δοκιμή διαρροής (leaching test)
- ❖ Υπολογισμός της ποσότητας Θείου (Sulfur test)

Αποδεκτές είναι τιμές μικρότερες του 2%.

- ❖ Προσδιορισμός της ειδικής αντίστασής του (Determination of the resistance)

Για τον σκοπό αυτόν, εφαρμόζεται η μέθοδος των τεσσάρων σημείων ώστε να επιβεβαιωθεί τιμή αντίστασης το πολύ ίση με την τιμή από τον κατασκευαστή.

- ❖ Δοκιμή διάβρωσης (Corrosion test)

Κατά τη δοκιμή αυτή χρησιμοποιούνται ποτενσιοδυναμικές μέθοδοι αντίστασης πόλωσης (ASTM G59-97 και ASTM G102-89), με σκοπό να επιβεβαιωθεί ότι ηλεκτρόδια γείωσης από κράμα χαλκού έχουν αντίσταση πόλωσης μεγαλύτερη από $4\Omega m^2$ για μη επιθετικά περιβάλλοντα και από $8\Omega m^2$ για επιθετικά περιβάλλοντα και γαλβανισμένα ηλεκτρόδια γείωσης έχουν αντίστοιχα αντίσταση πόλωσης $3\Omega m^2$ για μη επιθετικά περιβάλλοντα, και $7,6\Omega m^2$ για επιθετικά περιβάλλοντα.

2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως βελτιωτικά υλικά εδάφους ήταν διάφοροι **τύποι αλάτων**, συχνά αναμειγμένα με το χώμα. Η ιδέα προέκυψε από την ηλεκτρολυτική ιδιότητα της αγωγιμότητας, χαρακτηριστικό παράδειγμα της οποίας είναι το ίδιο το νερό, αφού η ειδική αντίσταση του

θαλασσινού νερού είναι $1\Omega\text{m}$, ενώ η αντίστοιχη του βρόχινου ξεπερνά τα $1000\Omega\text{m}$. Τα μειονεκτήματα όμως της χρήσης αυτών των αλάτων παρουσιάστηκαν, ήδη, από το 1960 από τους Clark και Watkins [13]. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές επεσήμαναν ότι τέτοιες ουσίες διαλύονται στο νερό, με αποτέλεσμα με την πάροδο του χρόνου και τις βροχωπτώσεις τα οφέλη που προσέφερε η τοποθέτησή τους γύρω από τα ηλεκτρόδια, όσον αφορά στην μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, να χάνονται. Πέραν τούτου, βρέθηκε ότι το χλωριούχο νάτριο (NaCl) έχει την ικανότητα να διαβρώνει τα μέταλλα με τα οποία έρχεται σε επαφή. Παρ' ότι αυτό θεωρητικά θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση του υλικού περιμετρικά του ηλεκτροδίου και σε απόσταση από αυτό, στην πράξη το υλικό διασπείρεται, με την πάροδο του χρόνου, εντός του εδάφους και απαιτείται επανέγχυση. Για να αντιμετωπίσουν, αρχικά, το πρόβλημα της διαλυτότητας στο νερό, έκαναν πειράματα με ουσίες όπως φερροκυανίδιο του χαλκού, πυριτικά άλατα νατρίου, ακρυλαμίδη και μείγμα ένυδρου γραφίτη σε μορφή όμως γέλης, με την προθήκη καταλυτών. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά καθώς προέκυψε ότι οι γέλες δεν είναι υδατοδιαλυτές και, παρότι συρρικνώνονται σε περιόδους ξηρασίας, επανέρχονται στην προηγούμενη κατάστασή τους με την επαφή τους με νερό. Με κάποιες από αυτές τις ουσίες ασχολήθηκαν και άλλοι ερευνητές όπως ο Sanik [14], ενώ ο Higashimura [15] δοκίμασε επίσης ακρυλαμίδη αλλά σε μορφή ένυδρου διαλύματος. Τα κύρια συμπεράσματα από τα πειράματα με άλατα ήταν η μείωση της αντίστασης γείωσης με την προσθήκη αυτών των υλικών, και η άμεση εξάρτηση της τιμής της αντίστασης επαφής από την υγρασία και τον τύπο του εδάφους γενικότερα. Παρ' όλα αυτά, το πρόβλημα της διάβρωσης των ηλεκτροδίων από την επαφή με τα άλατα παρέμεινε άλυτο, γι' αυτό και οι έρευνες στράφηκαν προς διαφορετικά υλικά.

Οι Fagan και Lee [16] έκαναν τις πρώτες δοκιμές χρησιμοποιώντας σκυρόδεμα σαν βελτιωτικό υλικό, εκμεταλλευόμενοι την αλκαλική του σύνθεση και την υγροσκοπική του φύση. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά καθώς το σκυρόδεμα λόγω της ιδιότητάς του να απορροφά και να συγκρατεί την υγρασία από το περιβάλλον έδαφος, διατηρεί σε χαμηλές τιμές την αντίσταση γείωσης ακόμα και σε συνθήκες υψηλής ξηρασίας.

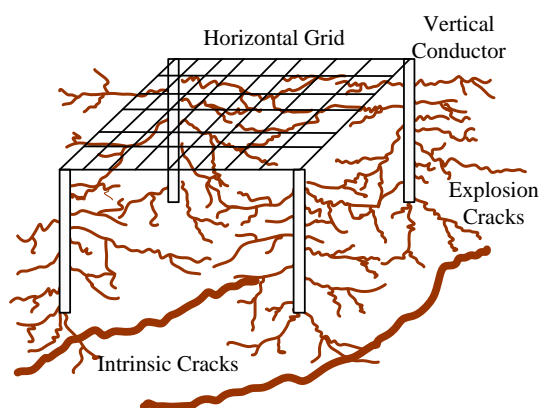
Στις ίδιες ιδιότητες βάσισαν την ιδέα τους και οι Kutter-Lange [17], Mc Gowan [18], Jones [19] και Veledar [20], για τη χρήση του μπεντονίτη σε συστήματα γείωσης. Ο μπεντονίτης είναι ένα πέτρωμα προερχόμενο από τη μετατροπή της ηφαιστειακής τέφρας. Αποτελείται κυρίως από το αργιλικό ορυκτό μοντμοριλλονίτη, ή αλλιώς, ένυδρο πυριτιούχο υδροξείδιο του νατρίου, του ασβεστίου, του αλουμινίου και του μαγνησίου ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$), σε ποσοστό μεγαλύτερο από 80%. Όταν η περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη είναι μικρότερη (60-80%), το υλικό χαρακτηρίζεται ως “μπεντονιτική άργιλος. Ο μοντμοριλλονίτης ανήκει στα αργιλικά ορυκτά, δομής 2:1, αποτελείται δηλαδή από δύο φύλλα τετραέδρων πυριτίου που εμπεριέχουν ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου, σιδήρου και μαγνησίου. Στο διαστρωματικό χώρο, μπορούν να προσροφηθούν κατιόντα και μεγαλομόρια νερού, γι αυτό ο μοντμοριλλονίτης έχει την ιδιότητα της διόγκωσης. Ο μοντμοριλλονίτης χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη προσροφητική ικανότητα, περίπου το 75% του όγκου του, δεν διαβρώνεται με το πέρασμα του χρόνου και έχει πολύ χαμηλή ειδική αντίσταση ($2,5\Omega m$ σε 300% σχετική υγρασία) [2], [21], [22].

Οι ερευνητές διεξήγαγαν πειράματα με μπεντονίτη σε διαφορετικά εδάφη, τόσο σε σύσταση, όσο και σε υγρασία, τα δε αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η αντίσταση γείωσης παρουσίασε συνολική και σταθερή, καθ’ όλο το έτος, μείωση κατά 36% σε σχέση με ηλεκτρόδια χωρίς βελτιωτικό υλικό. Ακόμη μεγαλύτερη μείωση, της τάξης του 60%, πέτυχαν ο Sato και οι συνεργάτες του [23] σε πειράματα σε ημισφαιρικά ηλεκτρόδια και πλέγματα, επιλέγοντας αυτήν τη φορά μείγματα από μπεντονίτη, NaCl και νερό. Βέβαια και σε αυτήν την περίπτωση δεν κατάφεραν να αποφύγουν τη διάβρωση που επέφεραν τα άλατα στα ηλεκτρόδια, αλλά και τη διάλυση του ίδιου του μείγματος με την πάροδο του χρόνου. Ακολούθησε ο Takeushi [24], οποίος μαζί με τους συνεργάτες του παρουσίασε πειραματικά αποτελέσματα με μείωση από 30% έως 50% στην αντίσταση γείωσης, με τη χρήση μείγματος σκυροδέματος και ινών άνθρακα. Στη συνέχεια ο Liang [25], με ένα στερεό υλικό κατασκευασμένο στην Κίνα, κατάφερε αντίστοιχη μείωση που έφτανε το 80%. Τη μείωση αυτήν την απέδωσε στην ιδιότητα του υλικού αυτού να σχηματίζει ένα στρώμα διαπερατότητας περίπου δέκα εκατοστών γύρω από την αρχική του ακτίνα, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της μετρούμενης αντίστασης. Ο Yamane και η ομάδα του

[26], χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά το 1993, υδροαπορροφητικά πολυμερή στα πειράματά τους, είτε μόνα τους, οπότε παρουσίασαν μείωση της αντίστασης γείωσης κατά 20%, είτε σε μείγμα με το ίδιο το χώμα οπότε η μείωση έφτανε το 40%. Τα συνθετικά πολυμερή, παρόμοια με τα προηγούμενα υλικά που αναφέρθηκαν, απορροφούν και συγκρατούν το νερό ενώ είναι ανθεκτικά σε μικροοργανισμούς, αλλά το βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των μειγμάτων μπεντονίτη είναι η μεγαλύτερη αντοχή τους στη διάβρωση και η τεράστια εξοικονόμηση υλικών, αφού για το ίδιο σύστημα γείωσης απαιτείται μόνο το 1/160 της αντίστοιχης ποσότητας μπεντονίτη.

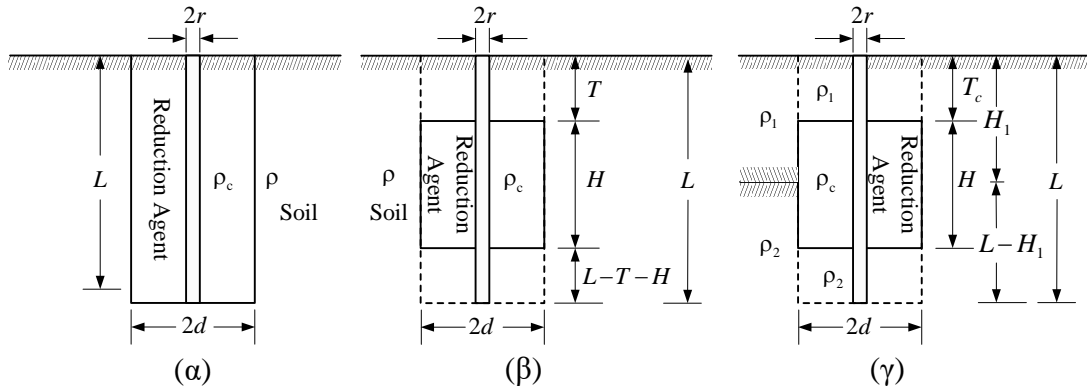
Ακολούθησαν ο Kostic και οι συνεργάτες [27] του οι οποίοι χρησιμοποίησαν μπεντονίτη και ίλυ γεώτρησης πετρελαίου για τη μελέτη βρόχων γείωσης. Το πρωτότυπο αυτής της έρευνας πέρα από την προσθήκη της ίλυσ, η οποία δεν απεδήχθη ιδιαίτερα ωφέλιμη, ήταν η χρήση πούδρας μπεντονίτη η οποία, μάλιστα, είχε καλύτερα αποτελέσματα από το εναιώρημα, κάτι που εξηγείται από τη μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής της με την υγρασία του εδάφους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσέγγιση του Meng [28], ο οποίος χρησιμοποίησε ελεγχόμενα εκρηκτικά για να δημιουργήσει ρωγμές στο εσωτερικό της οπής, στην οποία θα τοποθετηθεί το ηλεκτρόδιο και στη συνέχεια εισήγαγε στις ρωγμές αυτές βελτιωτικό υλικό υπό πίεση. Η μεθοδολογία αυτή απέφερε πολύ θετικά αποτελέσματα καθώς αυξήθηκε η επιφάνεια επαφής του συστήματος γείωσης με το ίδιο το έδαφος, ενώ το υλικό στις ρωγμές αυτές έφτασε σε πιο βαθιά στρώματα, όπου το έδαφος παρουσιάζει μικρότερη ειδική αντίσταση. Παρ'όλα αυτά η συγκεκριμένη μεθοδολογία δε συναντάται συχνά λόγω του μεγάλου της κόστους.



Σχήμα 2.1 Το σύστημα γείωσης στα πειράματα του Meng [2].

Ακολούθησαν οι L.-H. Chen και S.-D. Chen [29]–[31], οι οποίοι πειραματίστηκαν αρχικά με μείγμα κοκκώδους σκωρίας υψικαμίνου με νερό, τσιμέντο και αλάτι, με το οποίο κάλυψαν μερικώς ή ολικώς κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης. Η μείωση της αντίστασης γείωσης που πέτυχαν έφτασε το 40%.



Σχήμα 2.2 Ράβδος γείωσης (α) πλήρως καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε ομοιογενές έδαφος (β) μερικώς καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε ομοιογενές έδαφος, (γ) μερικώς καλυμμένη από βελτιωτικό υλικό, σε διστρωματικό έδαφος [29].

Οι ερευνητές έκαναν και θεωρητική μελέτη για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, διατυπώνοντας τις εξισώσεις, (2.1) για την περίπτωση του Σχήματος 2.1.(α), και (2.2) για το ηλεκτρόδιο του Σχήματος 2.2.(β):

$$R = \frac{\rho_c}{2\pi L} \left\{ \ln \frac{2L}{r} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} + \frac{\rho - \rho_c}{2\pi L} \times \left\{ \ln \frac{2L}{d} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right] + \frac{d}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right\} \quad (2.1)$$

$$R = \frac{\rho \rho_c}{2\pi [H\rho + (L-H)\rho_c]} \times \left\{ \ln \frac{2L}{r} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} + \frac{\rho(\rho - \rho_c)H}{2\pi L [H\rho + (L-H)\rho_c]} \times \left\{ \ln \frac{2L}{d} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right] + \frac{d}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right\} \quad (2.2)$$

Τα αποτελέσματα της θεωρητικής προσέγγισης των εξισώσεων (2.1), (2.2), εμφάνισαν απόκλιση, από 10% έως 27,5%, σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις, μέγεθος που δικαιολογείται, καθώς, αφενός μεν η ειδική αντίσταση του βελτιωτικού υλικού μετρήθηκε εντός εργαστηρίου και όχι στο χώρο του πειράματος, αφετέρου δε το έδαφος στον χώρο του πειράματος ήταν πολυστρωματικό. Σε επόμενη κοινή τους εργασία [31], μελέτησαν τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας, ενός υποπροϊόντος των θερμικών σταθμών παραγωγής, σε μείγμα με τσιμέντο και νερό, η δε μείωση της αντίστασης γείωσης που επετεύχθη ήταν 35%. Ο Chen στη συνέχεια εισήγαγε την «*περιοχή κορεσμού*», που ορίζει την ελάχιστη αντίσταση γείωσης που είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη χρήση βελτιωτικών υλικών γείωσης [32]. Το ποσοστό μείωσης ορίστηκε ως:

$$R_g = \frac{R_{wo} - R_w}{R_{wo}} \quad (2.3)$$

όπου R_{wo} είναι η αντίσταση γείωσης χωρίς βελτιωτικό υλικό και R_w είναι η αντίστοιχη με βελτιωτικό υλικό. Ακολουθούν ο συντελεστής μείωσης της αντίστασης γείωσης για τις ράβδους των Σχημάτων 2.2.(α) και 2.2.(β):

$$R_g = \frac{(\rho - \rho_c) \ln \frac{d}{r}}{\rho \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)} \quad (2.4)$$

$$R_g = \frac{H(\rho - \rho_c) \ln \frac{d}{r}}{\left[H\rho + (L - H)\rho_c \right] \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)} \quad (2.5)$$

και ο βέλτιστος όγκος του βελτιωτικού, όπου H το ύψος και d η ακτίνα του υλικού.

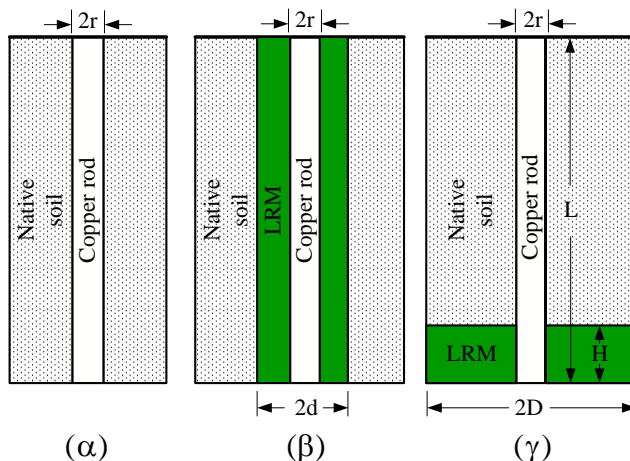
$$d = re^{\frac{2\pi\Delta R [H\rho + (L-H)\rho_c]}{\rho(\rho - \rho_c)H}} \quad (2.6)$$

$$H = \frac{4\pi L^2 \cdot \Delta R \cdot \rho_c}{\rho(\rho - \rho_c)} \quad (2.7)$$

όπου:

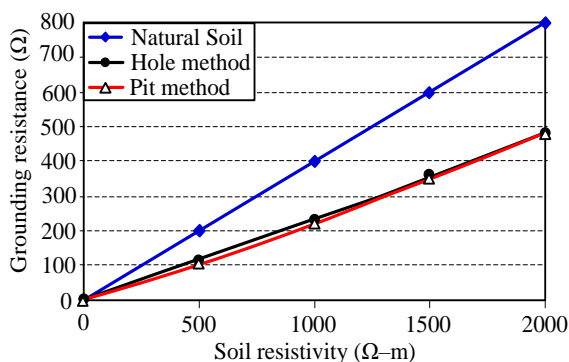
$$\Delta R = \frac{\rho(\rho - \rho_c)H}{2\pi L [H\rho + (L-H)\rho_c]} \ln \frac{d}{r} \quad (2.8)$$

Με στόχο την εύρεση της βέλτιστης ποσότητας του υλικού αλλά και των κατάλληλων διαστάσεων αυτού, αλλά και της διάταξης, ενέργησαν και ο Al-Arainy με τους συνεργάτες του [33], οι οποίοι μάλιστα παρουσίασαν και προσομοίωση της μεθόδου τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Διατάξεις γείωσης: Κατακόρυφη ράβδος (α) στο φυσικό έδαφος, (β) πλήρως καλυμμένη με βελτιωτικό υλικό, (γ) σε βελτιωτικό υλικό, εγγερόμενο σε κυκλικό σκάμμα στη βάση της ράβδου [2].

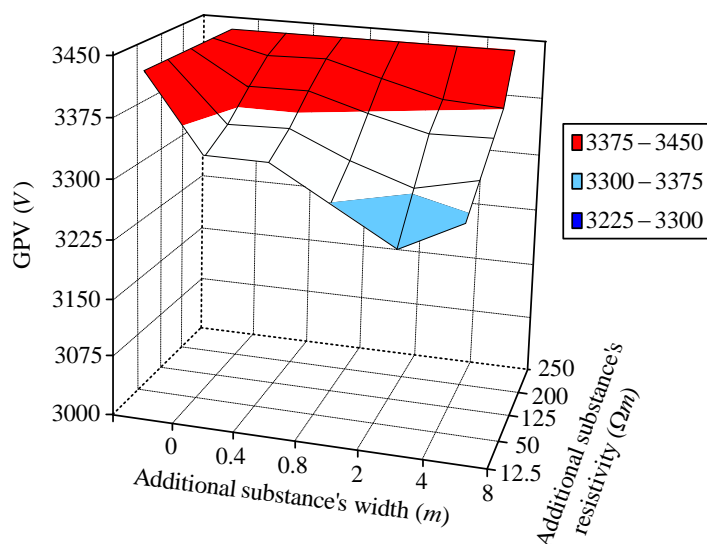
Στη συνέχεια εφάρμοσαν τεχνικές βελτιστοποίησης μέσω Matlab από τις οποίες προέκυψαν οι παρακάτω κατανομές:



Σχήμα 2.4 Σύγκριση των δύο μεθόδων ως προς την ελάττωση της αντίστασης γείωσης όταν $\rho_c=2\Omega\text{-m}$ και $L=2,4\text{m}$ [2].

Ο Torres [35] στα πειράματά του χρησιμοποίησε αυτό που ονόμασε χημικό ηλεκτρόδιο, μία κούφια, δηλαδή, κατακόρυφη ράβδο την οποία γέμιζε, στη συνέχεια, με βελτιωτικό υλικό. Οι δοκιμές με το νέο αυτό ηλεκτρόδιο, που ήταν αρκετά μεγαλύτερο σε διάμετρο από τα συνηθισμένα ηλεκτρόδια, ήταν μεν ικανοποιητικές, αλλά όχι αρκετά ώστε να προτείνεται μία τόσο ακριβή μέθοδος.

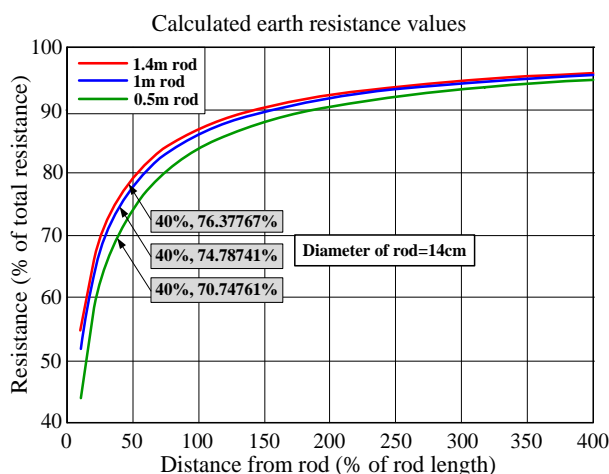
Με την προσομοίωση του φαινομένου ασχολήθηκε ο Habjanič [36], ο οποίος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπολόγισε κρίσιμα, για την ασφάλεια του ανθρώπου και του εξοπλισμού, μεγέθη, όπως η τάση επαφής, η ανύψωση του δυναμικού της γης και οι βηματικές τάσεις σε ένα πλέγμα γείωσης. Βασικό συμπέρασμα της έρευνας του ήταν η εξάρτησή της κατανομής των δυναμικών από τον όγκο και την αντίσταση του βελτιωτικού.



Σχήμα 2.5: Τρισδιάστατο γράφημα της επίδρασης του πλάτους και της ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού στο GPR, στην περίπτωση διστρωματικού μοντέλου εδάφους [2].

Εξίσου καλά αποτελέσματα με τον μπεντονίτη αποδείχθηκε ότι έχουν και πολλά φυτικά υλικά, όπως η τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, σε πείραμα που έκανε ο Kumarasinghe [37] το 2008. Το παράδειγμά του ακολούθησαν και ο Eduful με την ομάδα του [38]–[40], οι οποίοι εξέτασαν υλικά όπως πάστα από πυρηνέλαιο φοίνικα, πούδρα από φλοιό κακάο, στάχτη από ελαστικά και στάχτη από ξύλο δέντρου. Στη συνέχεια μετά από δοκιμές διατύπωσαν τον *κανόνα της ακτίνας κρίσιμης αντίστασης του ηλεκτροδίου* σύμφωνα, με τον οποίο, η τιμή

της αντίστασης γείωσης αρχίζει να σταθεροποιείται σε απόσταση ίση με το 40% του μήκους του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 2.6 Αντίσταση γείωσης συναρτήσει της απόστασης από το ηλεκτρόδιο [2].

Προσπάθεια προσομοίωσης του φαινομένου έκανε και ο Galván [41], [42], ο οποίος θέλησε να μοντελοποιήσει τη σχέση αντίστασης γείωσης-ειδικής αντίστασης εδάφους. Στη συνέχεια της έρευνάς του [43], [44], ασχολήθηκε με τη μελέτη διαφόρων βελτιωτικών υλικών τα οποία υπέβαλε σε μία σειρά εργαστηριακών δοκιμών για προσδιορισμό των μηχανικών και ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων, με σκοπό να εξετάσει την καταλληλότητά τους για τη χρήση τους ως βελτιωτικά υλικά γείωσης.

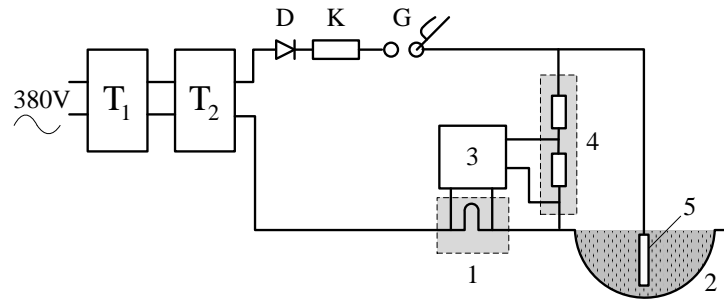
Μια νέα διάταξη πρότεινε η Wan Ahmad [45], [46] η οποία στα πειράματα της χρησιμοποίησε αρχικά φυτικά υλικά και στη συνέχεια άλλα χημικά, τοποθετημένα όμως σε κυκλικές αύλακες γύρω από τα ηλεκτρόδια. Οι μετρήσεις στα φυτικά υλικά διήρκεσαν 138 ημέρες, ενώ αυτές στα χημικά υλικά 141 ημέρες. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά θετικά και μάλιστα έφτασαν μέχρι και 59,58% μείωση της αντίστασης γείωσης.

Ο Lim [47]–[49], ασχολήθηκε με τη μελέτη του σκυροδέματος και του μπεντονίτη και έκανε διάφορες δοκιμές, τόσο εργαστηριακές, όσο και στο ύπαιθρο, χρησιμοποιώντας μείγματα από τα παραπάνω υλικά. Κατέληξε σε ποσοστό μπεντονίτη στο μείγμα 30%, ποσοστό με το οποίο παρουσιάστηκε μεγάλη βελτίωση των ιδιοτήτων του μείγματος συγκρινόμενο με το απλό σκυρόδεμα.

Όλες οι έρευνες που αναφέρθηκαν, μέχρι στιγμής, αφορούσαν συνθήκες μόνιμης κατάστασης, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τη βέλτιστη ποσότητα και τις διαστάσεις των βελτιωτικών υλικών, την αντοχή τους με την πάροδο του χρόνου, των καιρικών συνθηκών αλλά και την αλληλεπίδραση με διαφορετικά εδάφη. Μια ολοκληρωμένη μελέτη συστημάτων γείωσης, όμως, θα πρέπει να περιλαμβάνει και τη συμπεριφορά τους στη μεταβατική κατάσταση, αφού αυτός είναι και ένας από τους βασικούς ρόλους του, η διοχέτευση των υψηλών κεραυνικών ρευμάτων στη γη με ελεγχόμενο και ασφαλή, για τους ανθρώπους, τρόπο. Τέτοιου είδους, όμως έρευνα απαιτεί ακριβό και συνήθως ογκώδη εξοπλισμό, καθώς και κατάλληλες καιρικές συνθήκες. Για τους λόγους αυτούς, οι περισσότεροι μελετητές έκαναν πειράματα υπό κλίμακα στο εργαστήριο ή χρησιμοποίησαν προγράμματα λογισμικού, όπως είναι και το EMTP-ATP, που χρησιμοποιήθηκε και στη συγκεκριμένη εργασία, για την προσομοίωση του φαινομένου. Φυσικά όπως σε κάθε προσομοίωση θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ο παράγοντας του σφάλματος προκειμένου να οδηγήσει μια έρευνα σε ασφαλή συμπεράσματα.

Οι πρώτες προσπάθειες για την πειραματική μελέτη του φαινομένου είχαν ολοκληρωθεί ήδη από το 1981 από την Liu [50], η οποία διεξήγαγε μετρήσεις στο ύπαιθρο σε διαφόρων τύπων ηλεκτρόδια με και χωρίς βελτιωτικό υλικό, υπό κρουστικά ρεύματα μεγέθους έως 34kA. Η μείωση της αντίστασης γείωσης βρέθηκε ανάλογη της ποσότητας του υλικού γύρω από τα ηλεκτρόδια και έφτασε σε τιμή μέχρι και 73,4%.

Τη μεταβατική συμπεριφορά συστήματος γείωσης με βελτιωτικά υλικά γείωσης μελέτησε και η Tu με τους συνεργάτες της [51], [52], αυτήν τη φορά, όμως, στο χώρο του εργαστηρίου, σε μοντέλο υπό κλίμακα. Στην πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7, φαίνεται το μοντέλο του κατακόρυφου ηλεκτροδίου διαμέτρου 0,4mm χωρίς βελτιωτικό υλικό και 4mm μαζί με το βελτιωτικό (5) μέσα σε ημισφαιρική λεκάνη διαμέτρου 5m από χάλυβα, γεμισμένη με ψιλή άμμο (2). Με T_1 και T_2 σημειώνονται ο ρυθμιστής τάσης και ο μετασχηματιστής αντίστοιχα, ενώ, απαραίτητα στη διάταξη τοποθετήθηκε ο διαιρέτης τάσης (4), η μετρητική αντίσταση για το ρεύμα R_{shunt} (1), και το σύστημα συλλογής δεδομένων (3). Τα στοιχεία D , K , G χρησιμεύουν για την κατασκευή της κρουστικής κυματομορφής και η λειτουργία τους θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.7 Διάταξη προσομοίωσης των Tu et al [52].

Σκοπός του πειράματος ήταν να μελετηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο, όπως η ειδική αντίσταση του εδάφους, η διάταξη του συστήματος, οι διαστάσεις και ο τύπος του ηλεκτροδίου, το ύψος της κρουστικής κυματομορφής αλλά και η μορφή της. Για τον λόγο αυτόν έγιναν δοκιμές για διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης της άμμου (από $100\Omega\text{m}$ έως $5103\Omega\text{m}$), και με διαφορετικούς τύπους ηλεκτροδίων. Επέλεξαν μείγμα μπεντονίτη με προσμίξεις NaOH , NaCl , ασβεστίου, πούδρας γύψου, σκόνης άνθρακα και σφιχτής αργίλου με συνολική ειδική αντίσταση $1,47\Omega\text{m}$ σε 300% υγρασία και ειδική πυκνότητα $1,2\text{g/cm}^3$.

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προτάθηκαν οι πειραματικοί τύποι που ακολουθούν:

Κρουστική αντίσταση γείωσης ηλεκτροδίου με βελτιωτικό:

$$R_f = (1 - \eta_f) R_i \quad (2.9)$$

όπου R_i η κρουστική αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου χωρίς βελτιωτικό.

Ποσοστό μείωσης της κρουστικής αντίστασης γείωσης με βελτιωτικό:

$$\eta_f = a + 3,14 \times 10^{-5} \rho \quad (2.10)$$

όπου με ρ συμβολίζεται η ειδική αντίσταση του εδάφους ενώ a είναι μία σταθερά που σχετίζεται με την αντίσταση και τη δομή του εδάφους.

Ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης βιομηχανικής συχνότητας ηλεκτροδίου με βελτιωτικό υλικό:

$$\eta = 0,236 + 1,9 \times 10^{-5} \rho \quad (2.11)$$

Ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου με βελτιωτικό:

$$l_e = 5,222(\rho T)^{0,379} / I_M^{0,097} \quad (2.12)$$

όπου I_M η μέγιστη τιμή του εφαρμοζόμενου κρουστικού ρεύματος και T ο χρόνος μετώπου του εφαρμοζόμενου κρουστικού ρεύματος.

Τα βασικά συμπεράσματα αφορούσαν στην αύξηση του ενεργού μήκους των ηλεκτροδίων με τη χρήση βελτιωτικού υλικού και στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης των ηλεκτροδίων, λόγω της χρήσης του βελτιωτικού απο 25% έως 45%.

Με παρόμοια διάταξη εργάστηκαν και η Nor με την ομάδα της [53], [54] οι οποίοι όμως χρησιμοποίησαν θεικό χαλκό (CuSO_4) σε μείγμα με αλάτι και νερό και αλάτι (NaCl) σε μείγμα με άμμο και υγρή άργιλο. Το κρουστικό ρεύμα που χρησιμοποίησε η Nor ήταν μεγέθους 5kA. Το πρώτο μείγμα, το οποίο είχε βέλτιστη συμπεριφορά για ποσοστό νερού 25% και θεικού χαλκού 2,5%, είχε την εντονότερη απόκλιση από τη γραμμική απόκριση σε σχέση με τα υπόλοιπα. Όλα τα μείγματα, ανεξαρτήτως συστατικών και ποσοστών πρόσμιξης, εμφάνισαν μείωση της αντίστασης γείωσης όσο αυξανόταν το ρεύμα, κάτι που οφείλεται σε θερμικές διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα όταν το σύστημα εισέρχεται στη μεταβατική κατάσταση, καθώς και στο φαινόμενο του ιονισμού. Η μείωση αυτή γινόταν πιο ήπια για μείγματα με υψηλή αγωγιμότητα, ενώ τα μείγματα με ελάχιστη έως μηδενική υγρασία, λόγω υψηλής χωρητικότητας και ειδικής αντίστασης, εμφάνισαν έντονες αρχικές ταλαντώσεις. Από τη συνολική σύγκριση των δύο μειγμάτων καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από το NaCl .

Με τη σειρά του, ο Κόκκινος και οι συνεργάτες του, πραγματοποίησαν μία σειρά δοκιμών, αρχικά στο εργαστήριο και εν συνεχεία στο ύπαιθρο. Στα εργαστηριακά πειράματα [55], χρησιμοποίησαν κατακόρυφα ηλεκτρόδια σε μείγματα άμμου-χαλικιού σε διαφορετικά ποσοστά, με βελτιωτικά υλικά και χωρίς, καθώς και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς σε απόσταση 8,5cm από το ηλεκτρόδιο γείωσης. Στη θέση της χαλύβδινης λεκάνης, του αντίστοιχου πειράματος της Tu [52], χρησιμοποιήθηκαν βαρέλια (39×55)cm από PVC, ενώ επέλεξαν μια φορητή υβριδική γεννήτρια 12kV, 6kA και μία κρουστική γεννήτρια Marx για την παραγωγή κυματομορφών 1,2/50μs. Το βασικό συμπέρασμα ήταν η πτώση, όπως αναμενόταν, της διαφοράς δυναμικού ηλεκτροδίου γείωσης-ηλεκτροδίου αναφοράς, στη διάταξη που περιείχε

βελτιωτικό υλικό γείωσης. Στις υπαίθριες δοκιμές [56], χρησιμοποίησαν γαλβανισμένες ταινίες γείωσης μήκους 10m και κατακόρυφα ηλεκτρόδια, ενώ ως βελτιωτικό υλικό επέλεξαν σκυρόδεμα, με και χωρίς μονωτικό στρώμα πίσσας, μείγμα σκυροδέματος με Cerecit CC197, σε διάφορα ποσοστά πρόσμιξης, και διάφορα άλλα εμπορικά υλικά. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ειδικό όργανο υψηλής συχνότητας, που κατέγραφε τη σύνθετη αντίσταση γείωσης από 10Hz έως 1MHz, εύρος στο οποίο απέδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα τα παραπάνω βελτιωτικά υλικά.

Ακολούθησαν τα πειράματα του Laverde [57], ο οποίος με την εφαρμογή κρουστικής τάσης 1,2/50μs και 220kV σε ηλεκτρόδια με τσιμέντο και με μπεντονίτη, κατέληξε στο ότι ο τελευταίος έχει χαμηλότερη τάση διάσπασης, πιθανόν λόγω της μικρότερης ειδικής του αντίστασης. Σε παρόμοιο συμπέρασμα κατέληξε και ο Lim [58], με τη διαφορά ότι επέλεξε να χρησιμοποιήσει εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας. Επίσης, σε συμφωνία με την έρευνα του Laverde παρατηρήθηκαν υαλώματα στα υλικά και την άμμο μετά τη λήξη του μεταβατικού φαινομένου. Ο Hu [59] χρησιμοποίησε λυόμενη γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων 8/20μs και (1-10)kA και κατέληξε σε 60% μείωση της αντίστασης γείωσης, σε φόρτιση βιομηχανικής συχνότητας και αντίστοιχη μείωση 52% υπό κρουστικό ρεύμα. Τέλος, ο Ανδροβιτσανέας και οι συνεργάτες [60] πραγματοποίησαν δοκιμές κρουστικής καταπόνησης σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια πραγματικής κλίμακας, εγκατεστημένα σε υπαίθριο χώρο εντός βελτιωτικών υλικών, με χρήση φορητής γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων μορφής 8/20μs.

2.3 Παρατηρήσεις

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα ποσοστά μέσης μείωσης της αντίστασης γείωσης που επετεύχθησαν με χρήση βελτιωτικών υλικών γείωσης, από έρευνες και μελέτες που έχουν διεξαχθεί τις τελευταίες δεκαετίες σε διάφορες χώρες του κόσμου. Βέβαια θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι οι τιμές αυτές προέκυψαν κατά κύριο λόγο από πειράματα στο εργαστήριο και εμπεριέχουν σημαντικό σφάλμα. Η απόκλιση αυτή έχει να κάνει σε μεγάλο βαθμό με την υγρασία, η οποία στο πραγματικό περιβάλλον είναι μεταβλητή και ανάλογη της, επίσης, μεταβλητής θερμοκρασίας, της εποχής και του εδάφους,

αλλά και με το γεγονός ότι το ίδιο το βελτιωτικό υλικό συγκρατεί καλύτερα την υγρασία στο εσωτερικό του όταν βρίσκεται μέσα στο έδαφος. Επίσης, μεγάλης σημασίας είναι και αλληλεπίδραση του υλικού με το ίδιο το έδαφος, η οποία γίνεται εντονότερη με τον καιρό, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η πυκνότητά του αλλά και η ειδική του αντίσταση.

Βελτιωτικά υλικά	Έδαφος με $\rho < 100 \Omega \text{m}$	Έδαφος με $200 \Omega \text{m} < \rho < 1500 \Omega \text{m}$	Έδαφος με $\rho > 2000 \Omega \text{m}$	Συμπεριφορά
Φυτικά παρασκευάσματα				
PCOC			~50%	Έντονη μεταβλητότητα μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων.
Τύρφη κοκοφοίνικα, πούδρα κακάο, πούδρα ρυζιού κ.α.			80–85%	Καλή απόδοση σε υγρές και ξηρές περιόδους.
Αλάτι (NaCl)		~67%		Έντονα διαβρωτικό για τα ηλεκτρόδια και διαλύεται γρήγορα στο έδαφος.
Χημικά παρασκευάσματα				
Gels πυριτικών αλάτων, gel φερροκυανιδίου Cu, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, CuSO_4 κ.α.		30–40%		Διαβρωτικά για τα ηλεκτρόδια, επικίνδυνα για το έδαφος λόγω μόλυνσης και διαλύονται γρήγορα.
Υδρόφιλα πολυμερή		40–60%	40–60%	Μη διαβρωτικά για τα ηλεκτρόδια, δε διαλύονται στο έδαφος, αμφίβολα για τη μόλυνση του εδάφους.
Συνθετικά παρασκευάσματα				
Έλν γεώτρησης πετρελαίου		25–35%		Πολύ χαμηλή διάβρωση των ηλεκτροδίων.
Κοκκώδη σκωρία υψικαμίνου	40%			Διαβρωτική για τα ηλεκτρόδια.
Ιπτάμενη τέφρα	35–40%			Μη διαβρωτική.
Στάχτη από ελαστικά			16–24%	Μη διαβρωτική, εξαιρετική σταθερότητα μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων.
Μπεντονίτης		23–36%	35–55%	Αδρανές υλικό με καλύτερη συμπεριφορά στις υγρές περιόδους.
Σκυρόδεμα		30–40%	32–47%	Αδρανές υλικό με εξαιρετική συμπεριφορά μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων.

Πίνακας 2.1 Μείωση της ειδικής αντίστασης γείωσης με τη χρήση διαφόρων βελτιωτικών υλικών γείωσης [2].

Από τον Πίνακα 2.1 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Από τα φυτικά παρασκευάσματα, φαίνεται να ξεχωρίζουν υλικά όπως η τύρφη κοκοφοίνικα, η πούδρα κακάο και η πούδρα ρυζιού. Η χρήση των συγκεκριμένων υλικών σε έδαφος με υψηλή ειδική αντίσταση επιφέρει εξαιρετικό ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης, ενώ χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική σταθερότητα σε μεταβολές τις υγρασίας. Αρκετά καλά αποτελέσματα, σε έδαφος με υψηλή ειδική αντίσταση, εμφανίζει και ο μπεντονίτης, η απόδοση του οποίου όμως μειώνεται σε περιόδους ξηρασίας, λόγω της έντονης υδροσκοπικής του φύσης. Από τα παραπάνω βελτιωτικά υλικά, τη μεγαλύτερη αξιοπιστία φαίνεται να έχει το σκυρόδεμα, αφού διατηρεί ένα ικανοποιητικό ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης σε εδάφη με μικρότερη ειδική αντίσταση και σε περιόδους ξηρασίας.

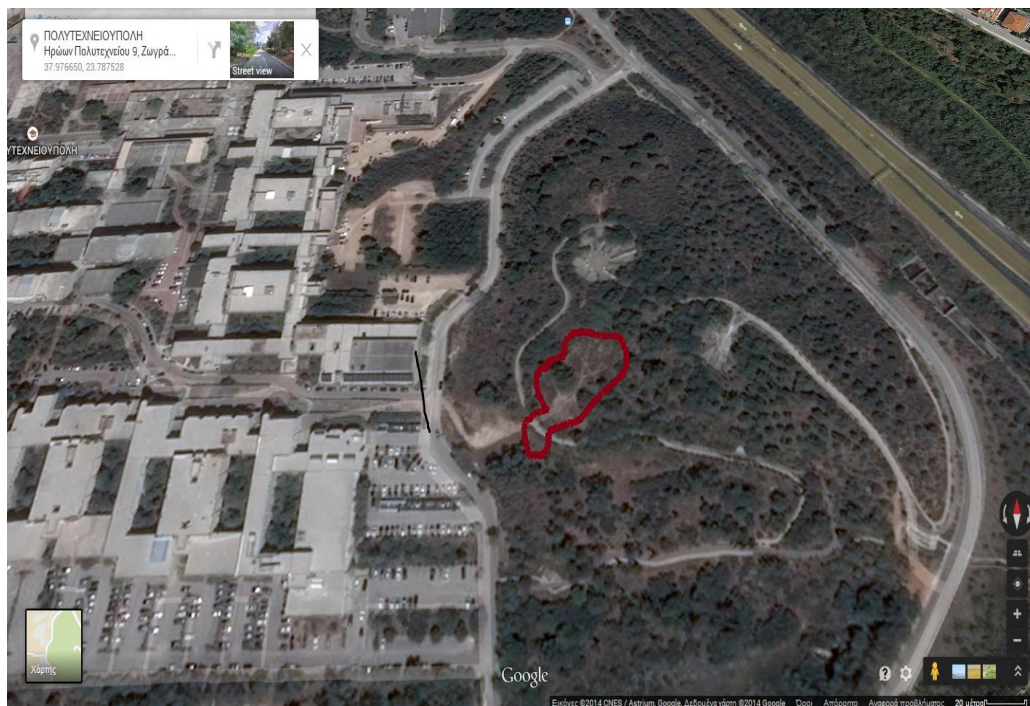
Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στη χρήση βελτιωτικών υλικών γείωσης, για την μείωση της αντίστασης γείωσης και ακολουθεί η διερεύνηση της μεταβατικής συμπεριφοράς τεσσάρων βελτιωτικών υλικών, μέσα από την πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική Διαδικασία

3.1 Τοποθεσία

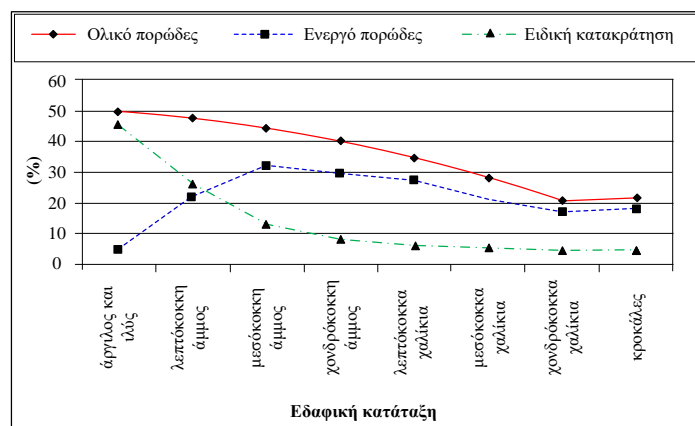
Για τη διεξαγωγή του πειράματος υλοποιήθηκε, στο πλαίσιο έρευνας που πραγματοποιήθηκε το 2011 από τον Β. Π. Ανδροβιτσανέα [61], διάταξη κατακόρυφων ράβδων γείωσης, οι οποίες εγκαταστάθηκαν στον υπαίθριο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, κοντά στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. Η ακριβής τοποθεσία φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1 Δορυφορική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης [61].

Για τις ανάγκες της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία, είναι σημαντική η μελέτη του ίδιου του εδάφους στην περιοχή της διάταξης. Από δημοσιευμένη εργασία των Φραγκογιάννη και των

συνεργατών του [62], το έδαφος της περιοχής το οποίο χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκη άμμος, αποτελείται από χαλίκι και κροκάλες σε ποσοστό 54,78%, από άμμο σε ποσοστό 39,47% και από άργιλο σε ποσοστό 5,74%, σύμφωνα με κοκκομετρική ανάλυση σε πολλαπλά δείγματα εδάφους. Σύμφωνα με τους συγγραφείς το έδαφος αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, που μεταφράζεται σε μικρή ικανότητα συγκράτησης του νερού από το έδαφος. Για την κατανόηση της σχέσης του τύπου του εδάφους, με την ικανότητα του να συγκρατεί το νερό, παρατίθεται το Σχήμα 3.1.

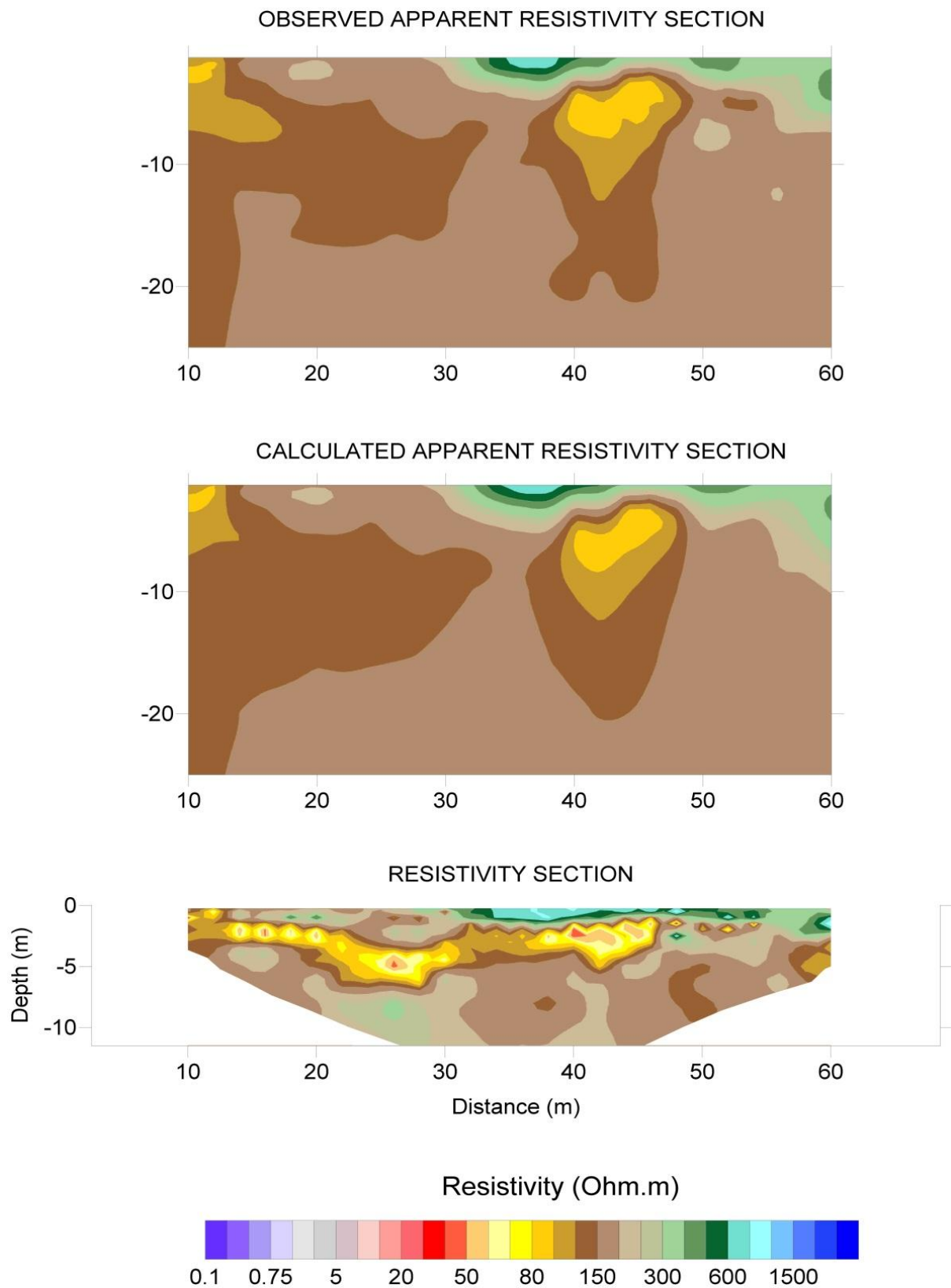


Σχήμα 3.1: Μεταβολή του πορώδους και της ειδικής κατακράτησης σε σχέση με τον τύπο του εδάφους [62].

Επίσης, με την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροτομογραφίας, στη συγκεκριμένη τοποθεσία, διαμορφώνεται μια ακριβή και λεπτομερή εικόνα της κατανομής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους [61]. Από τη συγκεκριμένη έρευνα, στην οποία χρησιμοποιήθηκε η συσκευή SYSCAL Pro Switch-48, προέκυψε το γεωηλεκτρικό μοντέλο του εδάφους με τις πραγματικές τιμές ειδικής αντίστασης για κάθε περιοχή σάρωσης.



Εικόνα 3.2: Συσκευή μέτρησης SYSCAL Pro Switch-48 (αριστερά) και βοηθητικά ηλεκτρόδια με τα καλώδια μέτρησης [61].



Σχήμα 3.2 Ηλεκτροτομογραφίας στην περιοχή της πειραματικής διάταξης [61].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρείται ένα στρώμα εδάφους με πυκνή κροκκαλοπαγή δομή και πολύ υψηλή αντίσταση (600 με 1000 Ωm) που ξεκινάει

από το μέσο περίπου της εξεταζόμενης περιοχής και εκτείνεται προς τον νότο. Αντιθέτως, προς την άλλη πλευρά (προς βόρεια) το εν λόγω στρώμα εμφανίζει μια πιο χαλαρή δομή. Στο μεγαλύτερο τμήμα του εδάφους (από 10m και 47m) και για μικρό βάθος (1m έως 6m) υπάρχει στρώμα με λίθους πάχους 2m από άργιλο και αντίσταση 80Ωm, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος ανιχνεύεται ένα συνεκτικά κροκαλολατιποπαγές στρώμα υπεδάφους αντίστασης 150Ωm, που περιλαμβάνει καστανόχρωμες χερσαίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις, δηλαδή συνεκτικούς αργιλοπηλούς με διάσπαρτες κροκάλες και λατίπες [61].

3.2 Πειραματική διάταξη

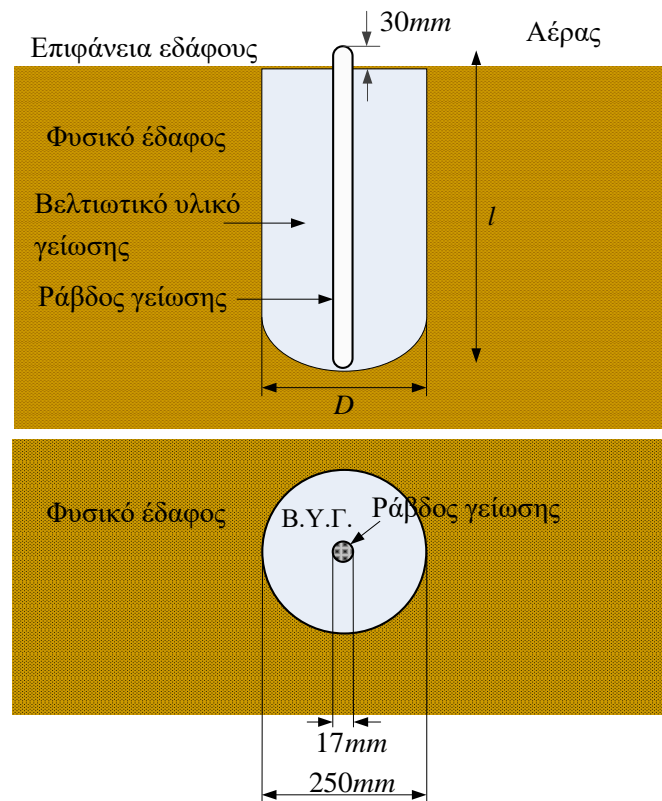
Για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης της συμπεριφοράς των κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, εντός βελτιωτικών υλικών, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, χρησιμοποιήθηκαν 6 ράβδοι γείωσης St/e-Cu τύπου A με διαστάσεις 17x1500mm, και πάχος επιχάλκωσης 254μm οι οποίες τοποθετήθηκαν στο χώρο που οριοθετείται από την κόκκινη γραμμή της εικόνας 3.1. [61]. Μία από αυτές τοποθετήθηκε απευθείας στο έδαφος, ενώ οι υπόλοιπες εγκιβωτίστηκαν σε πέντε διαφορετικά βελτιωτικά υλικά γείωσης με την αντιστοίχιση που ακολουθεί, στα οποία θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω.

- G1 : Φυσικό έδαφος (Soil)
- G2 : Σκυρόδεμα (Concrete)
- G3 : Μπεντονίτης (Bentonite)
- G4 : Συνθετικό Υλικό A (Compound A)
- G5 : Συνθετικό Υλικό B (Compound B)

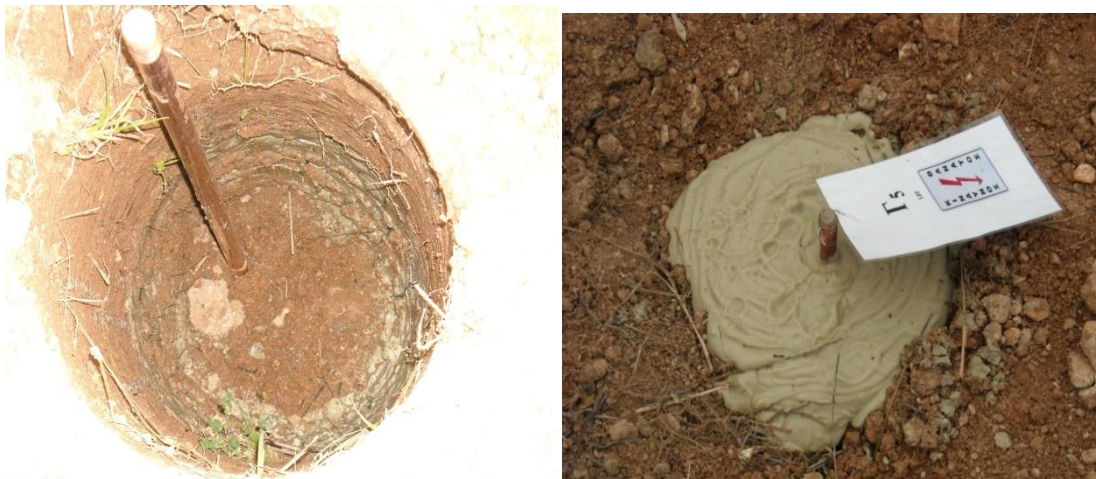
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η 6^η ράβδος, η οποία είχε εγκιβωτιστεί στο συνθετικό υλικό C, αφαιρέθηκε από την πειραματική διάταξη δύο χρόνια μετά την τοποθέτησή της, λόγω απορρόφησης του υλικού από το έδαφος.

Εκτός από τα παραπάνω, τοποθετήθηκαν 17 βοηθητικά ηλεκτρόδια (A₁ έως A₁₇), μήκους 0,5m, ίδιου τύπου με τα εξεταζόμενα ηλεκτρόδια, για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης. Τα έξι

εξεταζόμενα ηλεκτρόδια εισήχθησαν σε ορύγματα διαμέτρου $D=0,25\text{m}$ και βάθους $l=1,6\text{m}-1,65\text{m}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 και την Εικόνα 3.5.



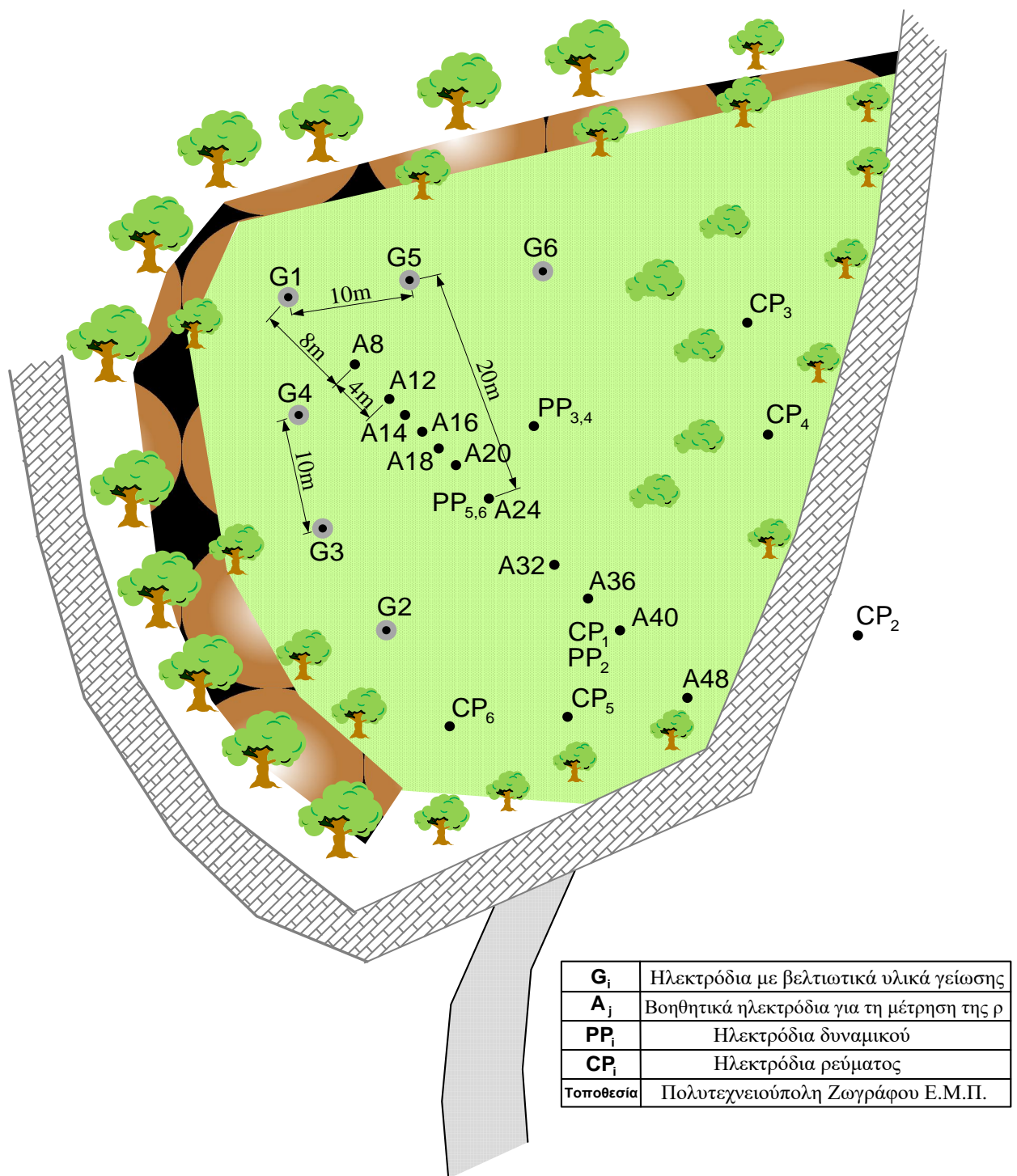
Σχήμα 3.3 Ράβδος G μέσα στο βελτιωτικό υλικό [2].



Εικόνα 3.3 Εγκιβωτισμός ηλεκτροδίων σε βελτιωτικό υλικό γείωσης [2].

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η διάταξη των ηλεκτροδίων, όπου με PP και CP συμβολίζονται τα ηλεκτρόδια δυναμικού (potential probes) και ρεύματος

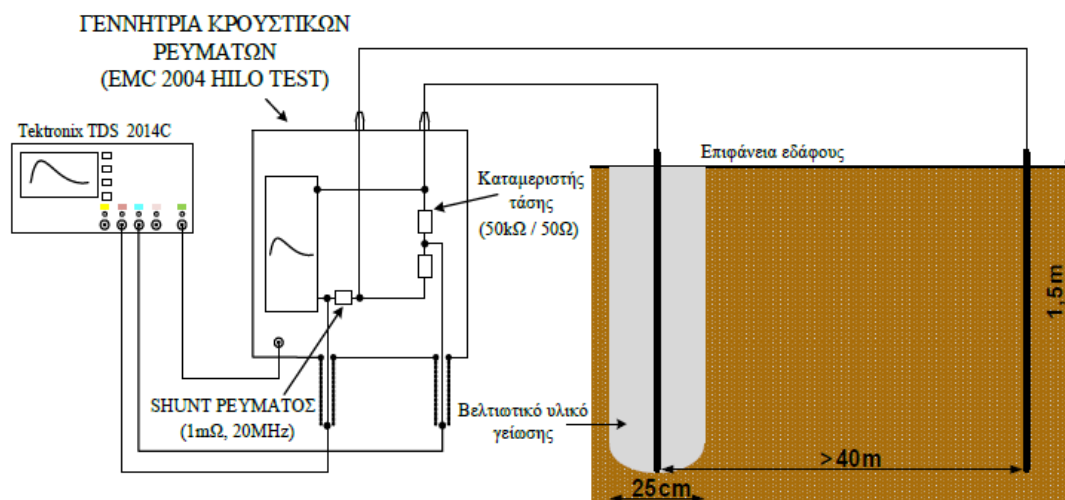
(current probes) αντίστοιχα, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης με τη μέθοδο πτώσης δυναμικού.



Σχήμα 3.4 Πειραματική διάταξη ηλεκτροδίων γείωσης [2].

Για τη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης εντός βελτιωτικών υλικών, πραγματοποιήθηκε η πειραματική διάταξη

του Σχήματος 3.5, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του Λ. Α. Τόσκα [65] και διεξήχθησαν μετρήσεις της $u(t)$ και του $i(t)$ σε κάθε ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 3.5 Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων εντός βελτιωτικών υλικών γείωσης [2].

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μια φορητή γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων, η οποία συνδέθηκε μέσω ομοαξονικών καλωδίων με έναν παλμογράφο, για τη μέτρηση και καταγραφή των κρουστικών κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος. Για την τροφοδότηση του κυκλώματος χρειάστηκαν επίσης μία βενζινογεννήτρια και ένας σταθεροποιητής τάσης. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, η μέτρηση της τάσης γινόταν από τον καταμεριστή της γεννήτριας, ενώ η μέτρηση του ρεύματος, από την αντίσταση μέτρησης R_{shunt} , όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη.

Στο Σχήμα 3.5 εικονίζεται, επίσης, ένα δεύτερο ηλεκτρόδιο St/e-Cu τύπου A, ίδιων διαστάσεων με το εξεταζόμενο. Πρόκειται για το ηλεκτρόδιο της απόμακρης γης, το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση άνω των 40m από το εξεταζόμενο ηλεκτρόδιο.

3.3 Πειραματικός εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης είναι ο εξής:

3.3.1 Φορητή γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων HILO/TEST:EMC-2004

Η γεννήτρια παράγει κρουστικό ρεύμα μορφής 8/20μs πλάτους 2kA έως 25kA υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος. Διαθέτει δύο εξόδους για τη μέτρηση, πρώτον μεν της τάσης, μέσω ενός καταμεριστή τάσης 1000:1, δεύτερον δε του ρεύματος μέσω της αντίστασης μέτρησης R_{shunt} , που έχει τιμή 1mΩ. Οι δύο αυτές εξοδοί συνδέονται με τον παλμογράφο για την εμφάνιση των αντιστοιχών κυματομορφών.

LCD μονάδα ελεγχόμενη από μικροεπεξεργαστή	8×40 χαρακτήρες
Parralel printer interface for on-line documentation	25-way D υποδοχή
Οπτική διεπαφή για απομακρυσμένο έλεγχο	Ενσωματωμένη
Εξωτερική Είσοδος Ενεργοποίησης	10V στα 1kΩ
Εξωτερική Έξοδος Ενεργοποίησης	10V στα 1kΩ
Μέγιστη Τιμή Τάσης Φόρτισης	0,2-10kV, ±2%
Πολικότητα Παλμού Εξόδου	POS/NEG/ALT
Μέγιστη Αποθηκευόμενη Ενέργεια	1500J
Πυκνωτής Αποθήκευσης Ενέργειας	30μF στα 10kV
Χρόνος Φόρτισης	<20sec
Υποδοχή για εξωτερικό safety interlock loop και εξωτερικές πράσινες και κόκκινες προειδοποιητικές ενδείξεις σύμφωνα με το VDE0104	24V = 230V, 60W
Κύρια Παροχή	230V, 50/60Hz
Διαστάσεις Πλαισίου w×h×d	556×470×600mm ³
Βάρος	65kg
Plug in κρουστικού ρεύματος	8/20μsec, 25kA
Κρουστικό ρεύμα εξόδου ρυθμιζόμενο μέσω της τάσης φόρτισης	2-25kA ±5%
Κυματομορφή του κρουστικού ρευματος εξόδου σύμφωνα με το IEC 60	8/20μsec ±20%
Κυμάτωση	<30%
Αντίσταση Μέτρησης Ρεύματος ενσωματωμένη	1mΩ, 20MHz

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων.



Εικόνα 3.4 Γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων.

3.3.2 Παλμογράφος Tektronix TDS 2014C

Ο παλμογράφος διαθέτει τέσσερα κανάλια, ενώ για τη διεξαγωγή των συγκεκριμένων μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τα CH2 και CH3. Μέσω θύρας USB δίνει τη δυνατότητα για μεταφορά, αποθήκευση και μετέπειτα επεξεργασία δεδομένων από άλλη συσκευή.

Οθόνη (QVGA LCD)	TFT
Εύρος Ζώνης	100MHz
Κανάλια	4
Εξωτερική Είσοδος Ενεργοποίησης	Περιλαμβάνεται
Ρυθμός Δειγματοληψίας	2GS/s
Μήκος Εγγραφής	25000 σημεία σε όλες τις βάσεις χρόνου
Κάθετη Ανάλυση	8Bits
Κάθετη Ευαισθησία	2mV σε 5V/div
Κάθετη Ακρίβεια DC	±3%
Κάθετη Εστίαση	Κάθετη ανάπτυξη ή σύμπτυξη σε τρέχουσα η σταματημένη κυματομορφή
Μέγιστη Τάση Εισόδου	300VRMS CATII, υποβαθμισμένη στα 20dB/dec, πάνω από 100kHz έως 13Vp-p AC στα 3MHz
Εύρος Θέσης	20mV σε 200mV/div+2V, >200mV σε 5V/div+50V
Όριο Εύρους Ζώνης	20MHz
Σύζευξη Εισόδου	AC, DC, GND

Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου	1MΩ παραλληλη με 20pF
Εύρος Βάσης Χρόνου	2,5ns σε 50sec/div
Ακρίβεια Βάσης Χρόνου	50ppm
Οριζόντια Εστίαση	Οριζόντια ανάπτυξη ή σύμπτυξη σε τρέχουσα η σταματημένη κυματομορφή

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά παλμογράφου.



Εικόνα 3.5 Παλμογράφος.

3.3.3 Ομοαξονικά Καλώδια

Τα ομοαξονικά καλώδια που επιλέχθηκαν ήταν τύπου RG 223U MIL-C-17 εσωτερικής αντίστασης 50Ω, και χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση των εξόδων της κρουστικής γεννήτριας με τα κανάλια του παλμογράφου.

3.3.4 Βενζινογεννήτρια

Την απαιτούμενη για τη διεξαγωγή του πειράματος τάση τροφοδοσίας παρείχε μία βενζινογεννήτρια SINCR8 ονομαστικών μεγεθών: 3kW/220V, 50Hz, 3000RPM

Κινητήρας	Τετράχρονος, μονοκύλινδρος, αερόψυκτος
Καύσιμο	Αμόλυβδη βενζίνη

Ισχύς	3kW
Τάση	230V
Ρεύμα	13A
Συχνότητα	50Hz
Στροφές	3000rpm
Σ.Ι.	1
Βάρος	35kg

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά βενζινογεννήτριας.



Εικόνα 3.6 Βενζινογεννήτρια.

3.3.5 Σταθεροποιητής Τάσης

Ο σταθεροποιητής τάσης της Εικόνας 3.7, με τάση εξόδου 230V, παρεμβαλλόταν μεταξύ της βενζινογεννήτριας και του πειραματικού κυκλώματος.



Εικόνα 3.7 Σταθεροποιητής τάσης.

Η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.8, ενώ στην 3.9 εικονίζεται μία από τις εξεταζόμενες ράβδους, εγκιβωτισμένη εντός βελτιωτικού υλικού, συνδεδεμένη με τη γεννήτρια των κρουστικών ρευμάτων.



Εικόνα 3.8 Πειραματική διάταξη.

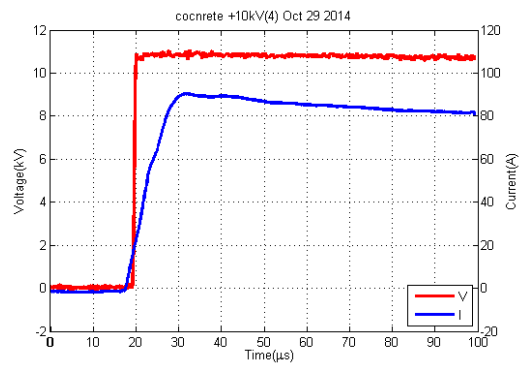
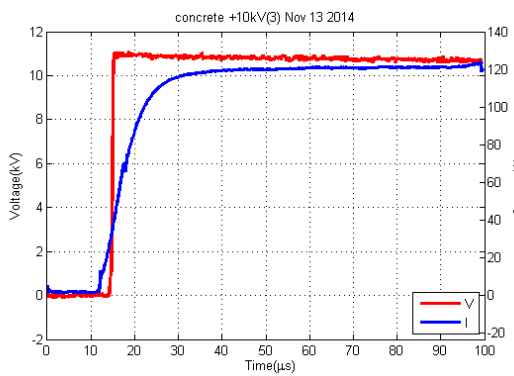
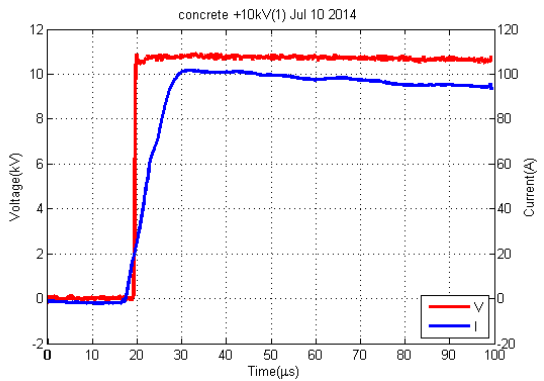
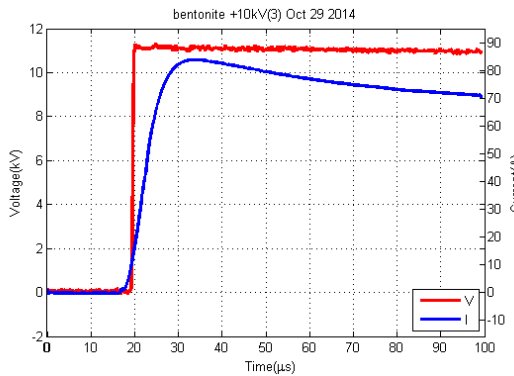
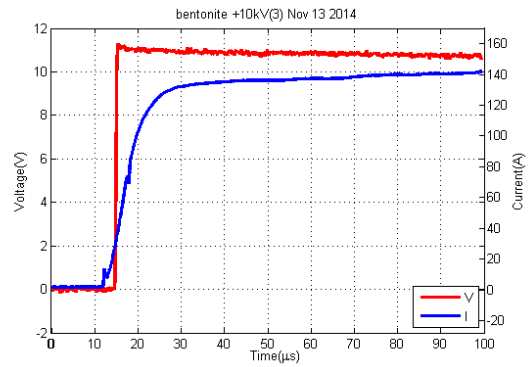
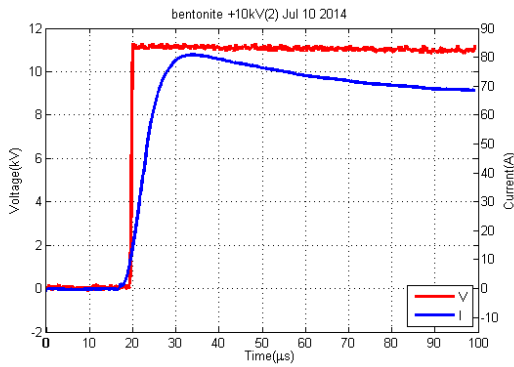
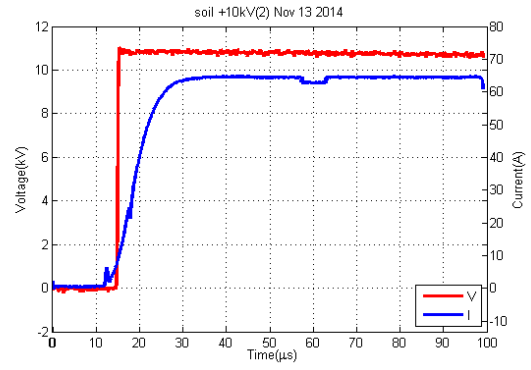
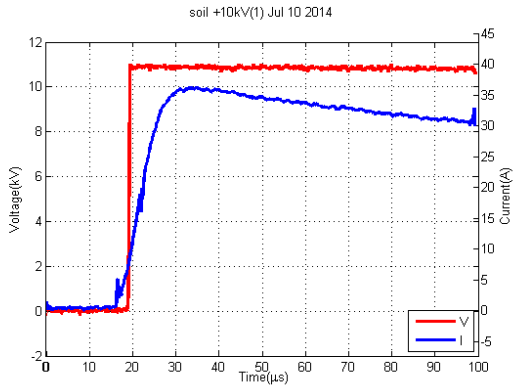


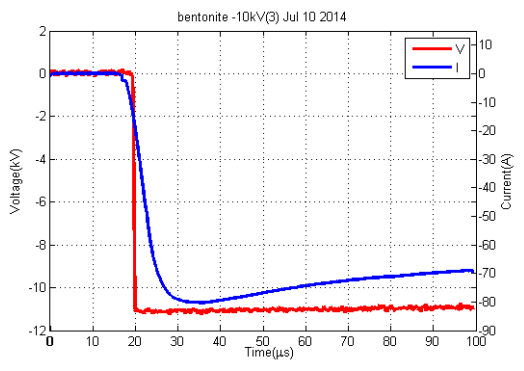
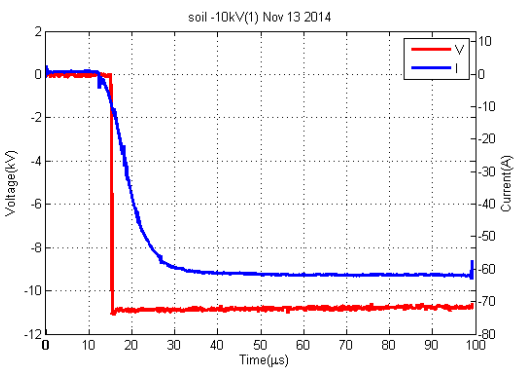
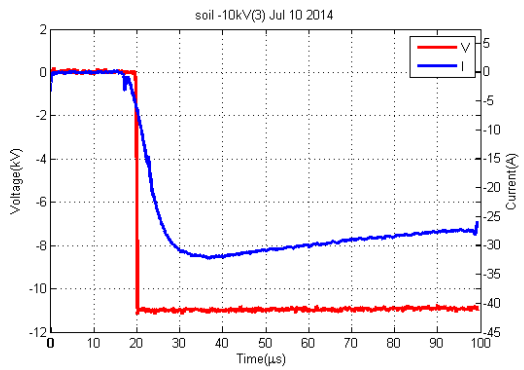
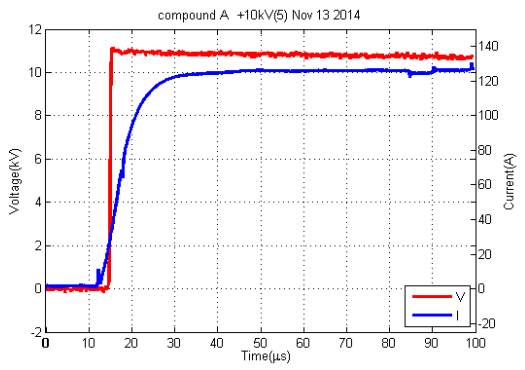
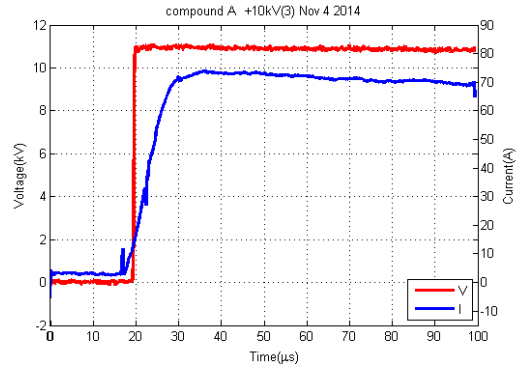
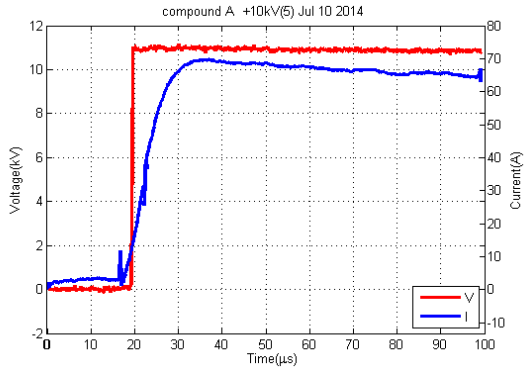
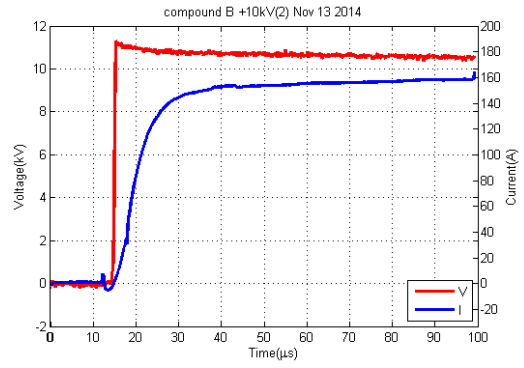
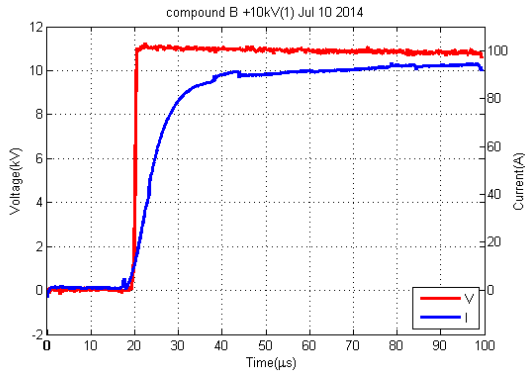
Εικόνα 3.9 Ράβδος γείωσης εντός βελτιωτικού υλικού υπό κρουστική καταπόνηση.

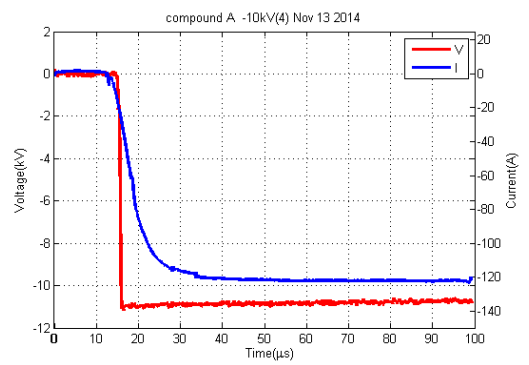
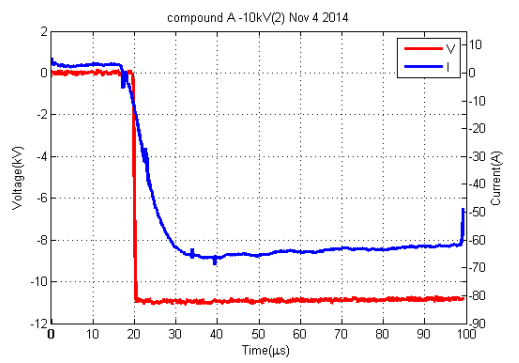
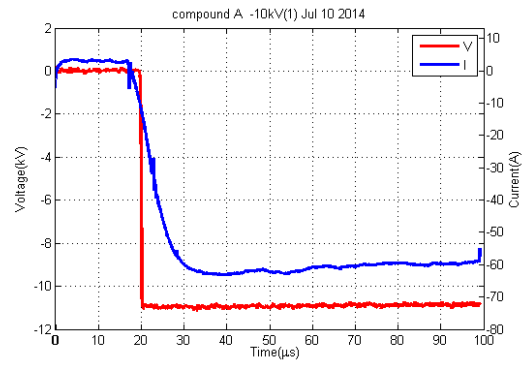
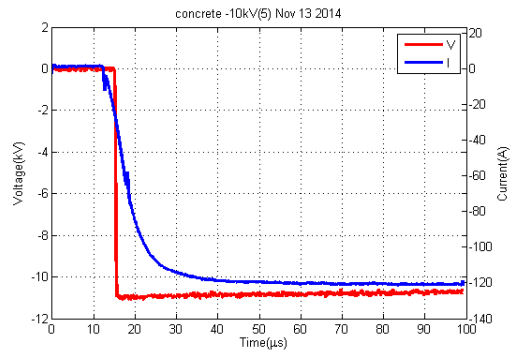
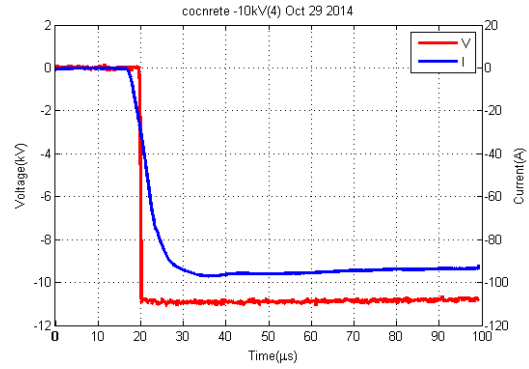
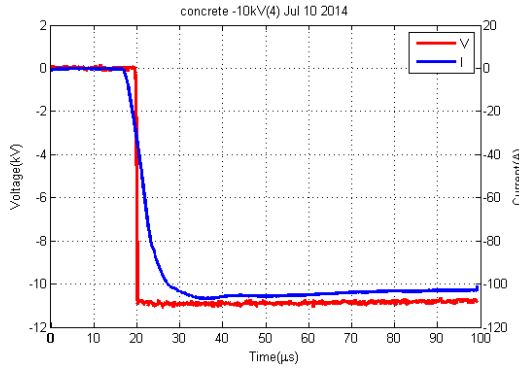
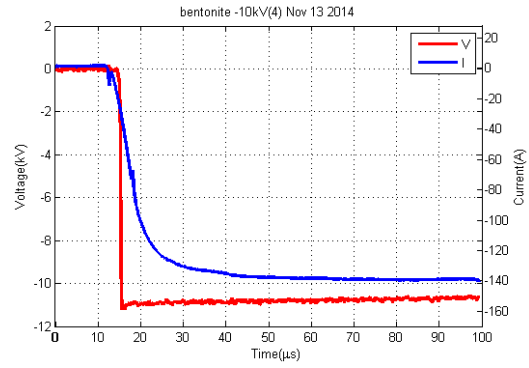
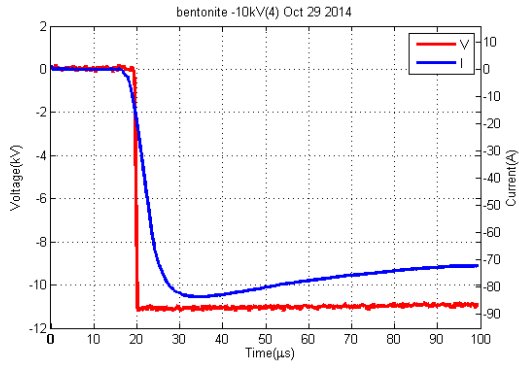
3.4 Μετρήσεις

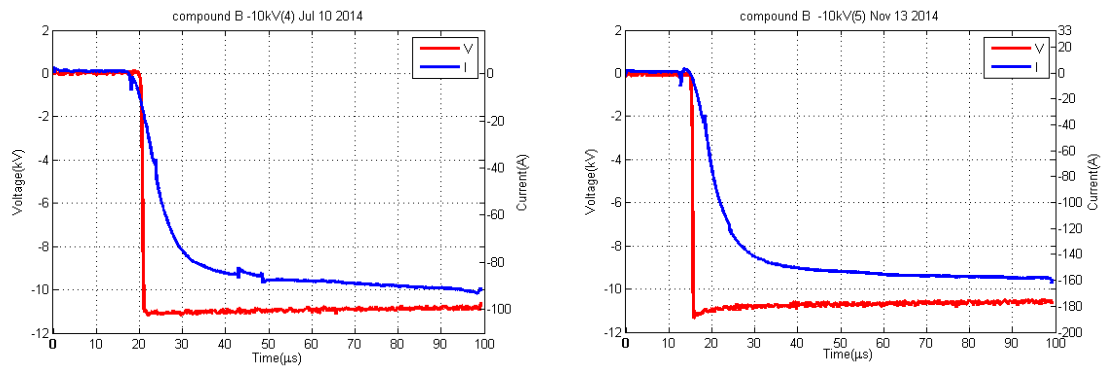
Με τη διάταξη, που αναλύθηκε παραπάνω, ελήφθησαν μετρήσεις σε τρεις χρονικές περιόδους, τον Ιούλιο, τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο του 2014. Σε κάθε ημερομηνία λαμβάνονταν 5 μετρήσεις, κατά μέσο όρο, σε οκτώ διαφορετικές στάθμες φόρτισης για κάθε ηλεκτρόδιο που εξεταζόταν. Έτσι καταγράφησαν μετρήσεις για τάση φόρτισης $\pm 4\text{kV}$, $\pm 6\text{kV}$, $\pm 8\text{kV}$ και $\pm 10\text{kV}$. Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος από τον παλμογράφο εισήχθησαν στη συνέχεια στο Matlab για την, κατά το δυνατόν, καλύτερη εξομάλυνση του περιεχόμενου θορύβου. Εκεί, τέλος, υπολογίστηκαν για κάθε μία μέτρηση ξεχωριστά, αλλά και σε μέσο όρο, οι κρουστικές σύνθετες αντιστάσεις των εξεταζόμενων ηλεκτροδίων, που ορίζονται από την (1.15), ως ο λόγος της τάσης την χρονική στιγμή t_i που το ρεύμα λαμβάνει την μέγιστη τιμή του, προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος:

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες πειραματικές κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος για τις στάθμες φόρτισης $\pm 10\text{kV}$ και για όλα τα υλικά, μετά την εφαρμογή του φίλτρου για την απαλοιφή του θορύβου.









Σχήμα 3.6 Παλμογραφήματα τάσης και ρεύματος για τάση φόρτισης $\pm 10\text{kV}$.

Στη συνέχεια, με βάση το κύκλωμα της πειραματικής διάταξης και τις κυματομορφές των μεγεθών της τάσης και του ρεύματος, γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφηκε, με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου EMTP-ATP.

Κεφάλαιο 4

Κυκλωματική Προσέγγιση Μεταβατικής Αντίστασης Γείωσης

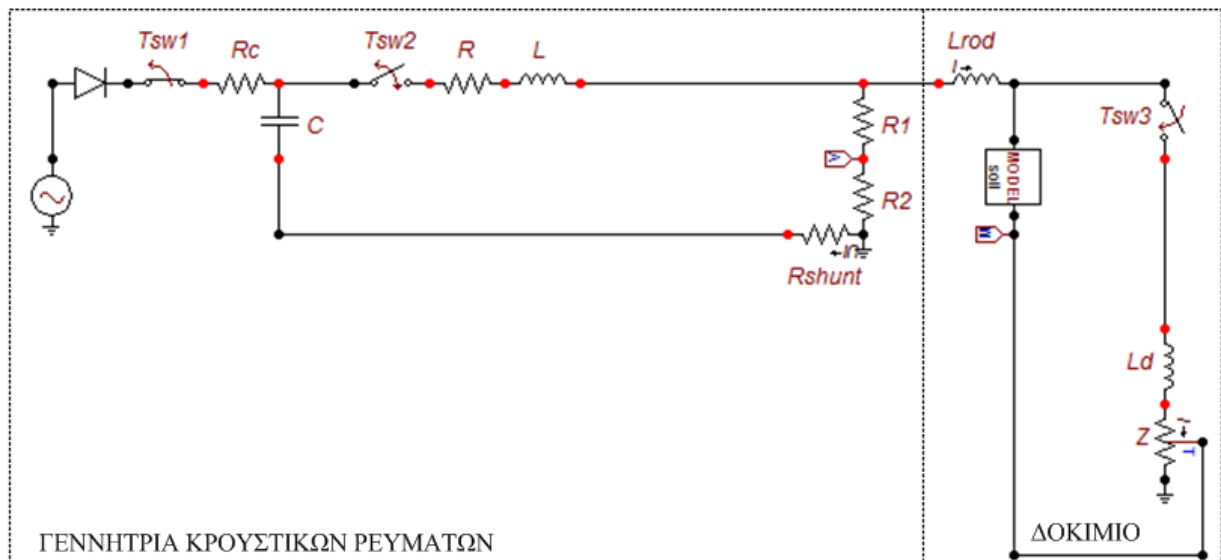
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η κυκλωματική προσέγγιση της μεταβατικής κατάστασης κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, η προσομοίωση δηλαδή της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων ATP-EMTP. Το κύκλωμα, που φαίνεται στην Εικόνα 4.1, σχεδιάστηκε στο ATP-DRAW, ενώ για τις διάφορες τιμές εισόδου το ATP-PlotXY έδινε τις αντίστοιχες κυματομορφές.

4.1 Κυκλωματικό μοντέλο για ηλεκτρόδιο χωρίς βελτιωτικό γείωσης

Αρχικά, υλοποιήθηκε στο λογισμικό EMTP-ATP το προτεινόμενο μοντέλο για την προσομοίωση της σύνθετης κρουστικής αντίστασης σε κατακόρυφη ράβδο γείωσης χωρίς βελτιωτικό. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε σε δημοσιευμένη εργασία των Nor και Haddad [67]. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν πειραματική διάταξη ημισφαιρικού ηλεκτροδίου υπό κλίμακα, για τη μελέτη της επίδρασης του ιονισμού του εδάφους στη μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης. Στη συνέχεια, παρουσίασαν την κυκλωματική προσέγγιση του φαινομένου, η οποία βασίστηκε στις πειραματικές κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του ηλεκτροδίου, υπό κρουστική καταπόνηση. Με την κατάλληλη τροποποίηση του συγκεκριμένου μοντέλου για την προσαρμογή του στην πειραματική διάταξη της παρούσας εργασίας και την αξιοποίηση των παλμογραφημάτων της τάσης

και του ρεύματος που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σχεδιάστηκε το κύκλωμα του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας-ηλεκτροδίου γείωσης στο ATP.

Το αριστερό τμήμα του κυκλώματος όπως οριοθετείται και στο σχήμα, αποτελεί την γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων. Μία πηγή AC σε σειρά με μία δίοδο φορτίζει τον πυκνωτή κρούσης C , κατά την εκφόρτιση του οποίου στα ωμικοεπαγωγικά στοιχεία του κυκλώματος, παράγονται οι κρουστικές κυματομορφές. Τον πυκνωτή ακολουθεί η ωμική αντίσταση R , που αντιπροσωπεύει τις αντιστάσεις των αγωγών του κυκλώματος και η αυτεπαγωγή L που αποτελείται από την αυτεπαγωγή των αγωγών του κυκλώματος καθώς και αυτήν που προστίθεται στο κύκλωμα για τη δημιουργία της κρίσιμης απόσβεσης. Η R_{shunt} είναι η αντίσταση μέτρησης που καταλήγει στον παλμογράφο για την εμφάνιση της κυματομορφής του ρεύματος, ενώ οι R_1 , R_2 είναι οι αντιστάσεις του καταμεριστή τάσης. Η χρονική έναρξη του φαινομένου ορίζεται από τους διακόπτες T_{sw1} και T_{sw2} . Συγκεκριμένα ο T_{sw1} , που είναι αρχικά κλειστός όπως φαίνεται στο σχήμα, ανοίγει όταν ολοκληρωθεί η φόρτιση του πυκνωτή C . Στη συνέχεια για να εκκινήσει η εκφόρτιση αυτού, κλείνει ο T_{sw2} , ο οποίος προσομοιώνει τον σπινθηριστή της κρουστικής γεννήτριας. Οι τιμές των παραμέτρων της γεννήτριας παρατίθενται στον πίνακα 4.1.

AC Source	Μεταβλητή, ανάλογα με την πειραματική μέτρηση που προσομοιώνεται κάθε φορά
T_{sw1}	$T_{cl}=-1$ (sec), $T_{op}=0$ (sec)
R_c	0,66567 (Ω)
C	30 (μF)
T_{sw2}	$T_{op}=0$ (sec), $T_{cl}=14$ (μsec)-20 (μsec) ανάλογως την εποχή και το υλικό
R	0,208 (Ω)
L	0,00193 (mH)
R_1	50 (k Ω)
R_2	50 (Ω)
R_{shunt}	1 (m Ω)

Πίνακας 4.1 Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος της γεννήτριας.

Το δεξί τμήμα του κυκλώματος είναι το δοκίμιο, στην περίπτωση μας η κάθετη ράβδος γείωσης. Η L_{rod} είναι η ισοδύναμη αυτεπαγωγή του ηλεκτροδίου και υπολογίζεται από τον τύπο 4.1 [66]:

$$L_{rod} = 2 \times l \times \ln\left(\frac{4 \times l}{d}\right) \times 10^{-7} \quad (4.1)$$

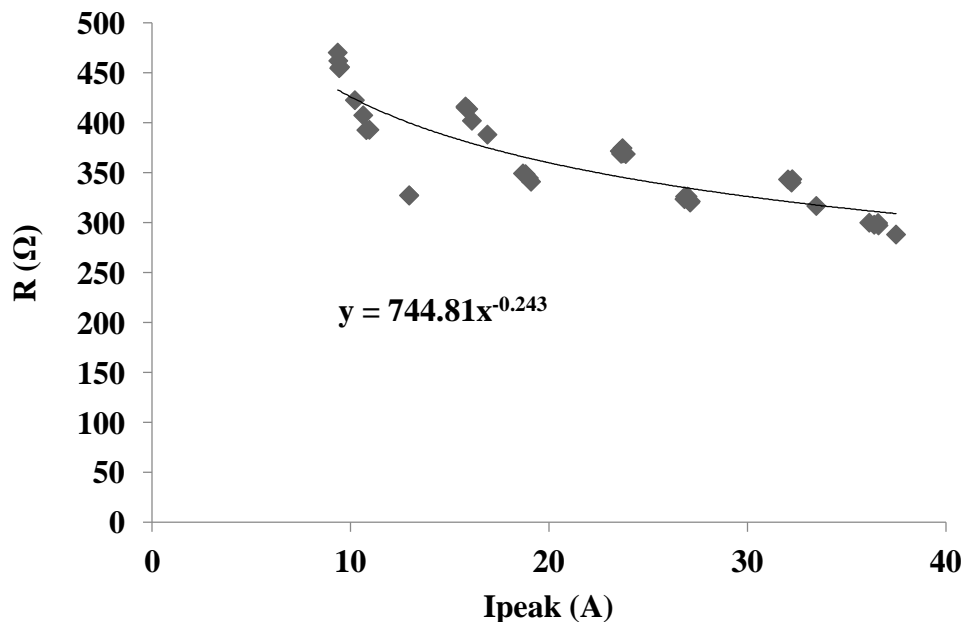
όπου l το μήκος και d η ακτίνα της ράβδου. Ο διακόπτης T_{sw3} προσομοιώνει την έναρξη και τη λήξη του μεταβατικού φαινομένου, ενώ το επαγωγικό στοιχείο L_d , η τιμή του οποίου προκύπτει με δοκιμές, εμφανίζεται μετά τον διακόπτη για να ληφθεί υπ'όψιν η χρονική καθυστέρηση μέχρι την έναρξη της μεταβατικής κατάστασης. Η αντίσταση Z αντιπροσωπεύει τη σύνθετη κρουστική αντίσταση του ηλεκτροδίου, η τιμή της οποίας είναι μεταβλητή και προσδιορίζεται κάθε χρονική στιγμή από το στοιχείο *MODEL*, στο οποίο έχει συνταχθεί ο κώδικας που παρατίθεται στο Παράρτημα Π₂.

Στο μοντέλο αρχικά εισάγεται η R_{ho0} , που είναι η αντίσταση μόνιμης κατάστασης, η τιμή της οποίας εξαρτάται από την εποχή και το υλικό. Ο κώδικας, στη συνέχεια, δέχεται σαν είσοδο το I_{rod} , δηλαδή το στιγμιαίο ρεύμα που διαρρέει το ηλεκτρόδιο και το οποίο μετριέται στο κύκλωμα, πάνω στην αυτεπαγωγή L_{rod} , και υπολογίζει την απόλυτη τιμή του I_{abs} .

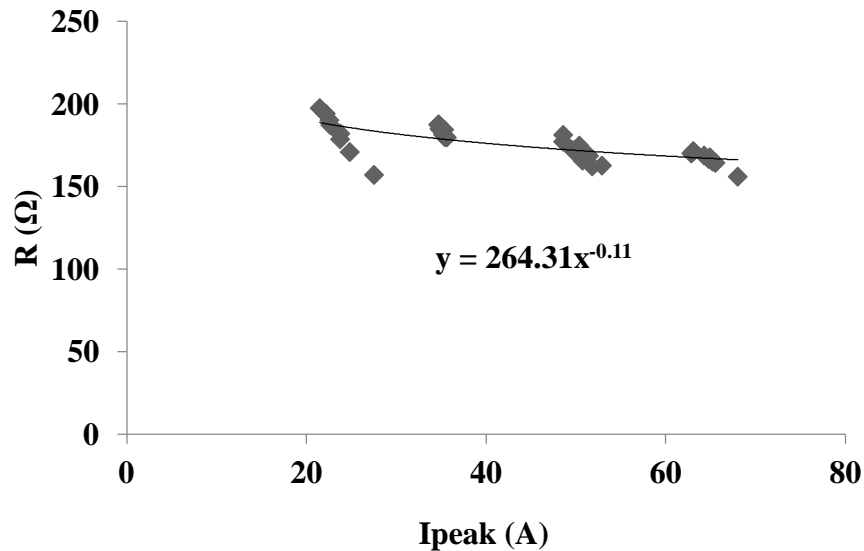
Κατά την εκτέλεση του βασικού βρόχου του κώδικα, το *MODEL soil* δίνει την τιμή R_{ho0} στην κρουστική σύνθετη αντίσταση R_{rod} , όταν ο χρόνος t είναι ίσος με το μηδέν, ή όταν το ρεύμα που μετρείται στην αυτεπαγωγή L_{rod} είναι μηδενικό. Σε κάθε άλλη περίπτωση η έξοδος R_{rod} , που αντιστοιχεί στη Z του κυκλώματος, προσδιορίζεται από μία εκθετική συνάρτηση του I_{abs} . Η συνάρτηση αυτή, η οποία διαφέρει για κάθε υλικό αλλά και για κάθε εποχή μετρήσεων, προσδιορίστηκε για το ηλεκτρόδιο G_I , με βάση τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, για τον Ιούλιο, για όλες τις στάθμες τάσης θετικές και αρνητικές και για όλες τις επαναληπτικές μετρήσεις της κάθε στάθμης, υπολογίστηκε η κρουστική σύνθετη αντίσταση Z , μέσω της σχέσης (1.15).

Στη συνέχεια, τα ζευγάρια τιμών (R, I_{peak}) που δημιουργήθηκαν αποτυπώθηκαν γραφικά και, από το διάγραμμα διασποράς τους, προέκυψε η γραμμή τάσης και αντίστοιχα η ζητούμενη εξίσωση αντίστασης-ρεύματος που εισάγεται στο *MODEL*.

Τα διαγράμματα αυτά, με τις αντίστοιχες γραμμές τάσης για τον Ιούλιο και το Νοέμβριο, φαίνεται στα Σχήματα 4.2.α και 4.2.β αντίστοιχα.



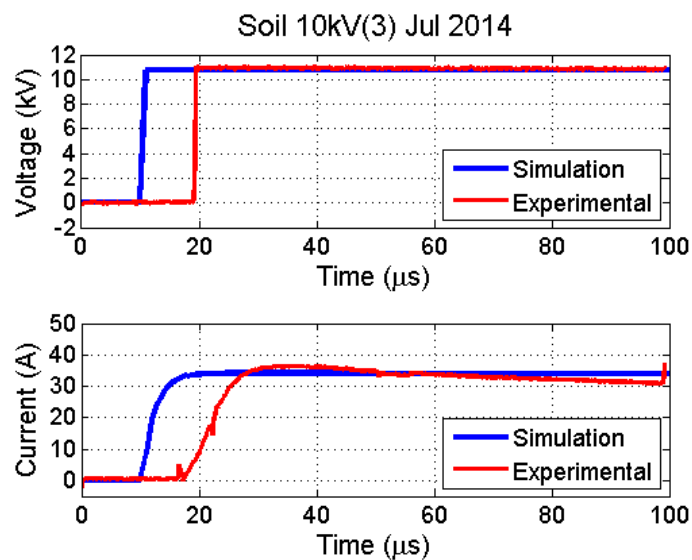
Σχήμα 4.2.α Εξίσωση για την R_{rod} από τις μετρήσεις του Ιουλίου.



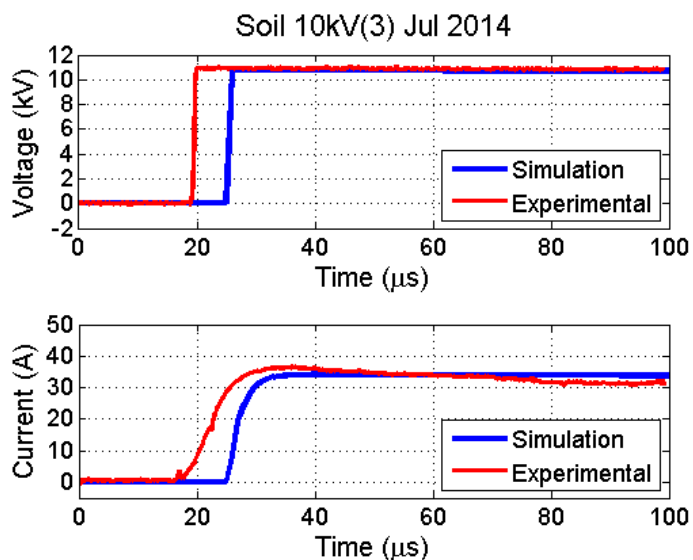
Σχήμα 4.2.β Εξίσωση για την R_{rod} από τις μετρήσεις του Νοεμβρίου.

Στο σημείο, αυτό παρατίθενται κάποια ενδεικτικά παλμογραφήματα που ελήφθησαν από το κύκλωμα του Σχήματος 4.3, κατά το στάδιο των δοκιμών για την επιλογή των τελικών τιμών των παραμέτρων.

Στα Σχήματα 4.3.α και 4.3.β παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές, για την επιλογή της παραμέτρου T_{op} του διακόπτη T_{sw2} .

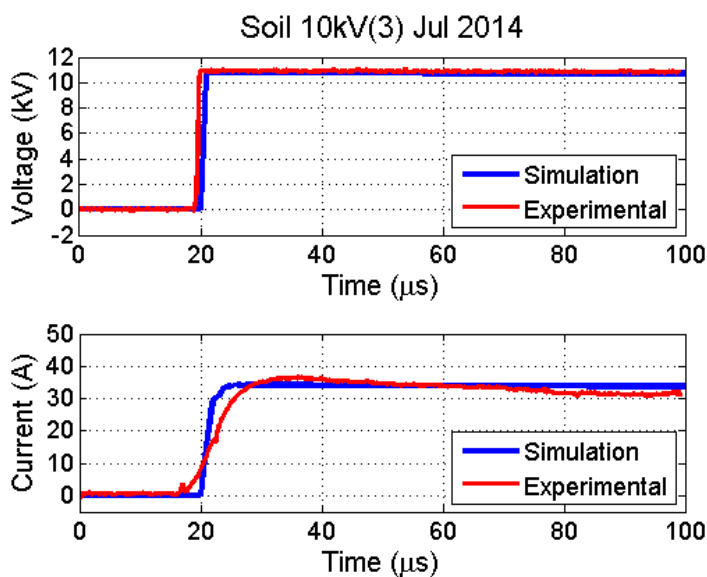


Σχήμα 4.3.α Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για το ηλεκτρόδιο G1, για $T_{op}=10(\mu s)$.

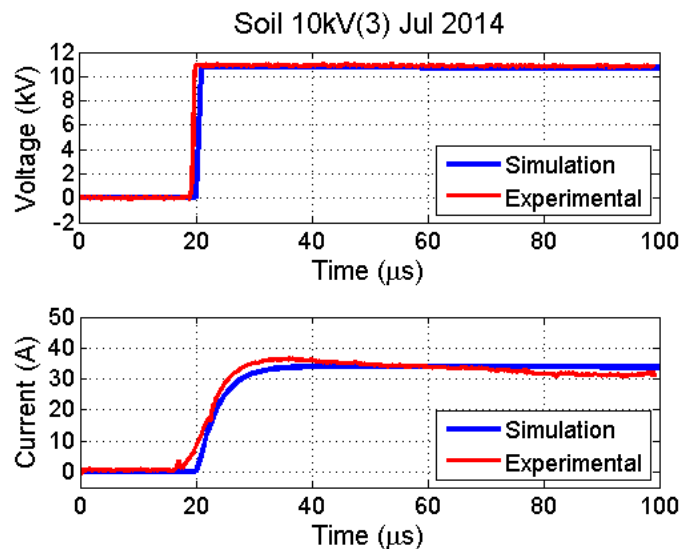


Σχήμα 4.3.β Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για το ηλεκτρόδιο G1,
για $T_{op}=25(\mu s)$.

Αντίστοιχα, η επίδραση της μεταβολής της τιμής της αυτεπαγωγής L_d στην κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.4.α και 4.4.β.



Σχήμα 4.4.α Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για το ηλεκτρόδιο G1,
για $L_d=0,1\mu H$.



Σχήμα 4.4.β Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για το ηλεκτρόδιο G₁, για L_d=0,8μH.

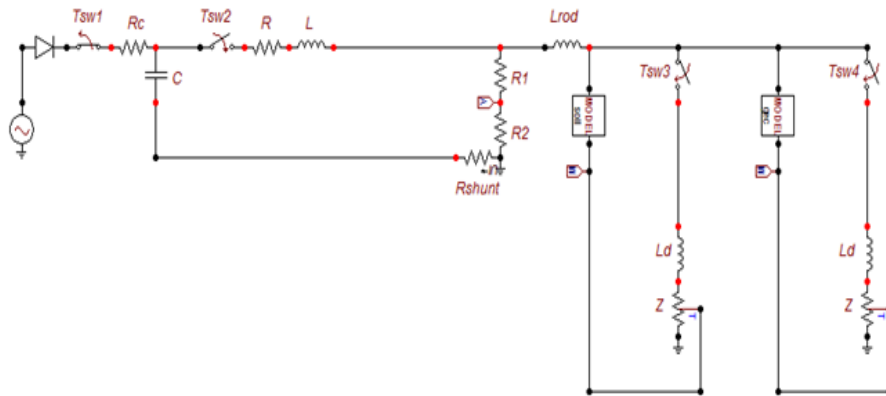
Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τελικές τιμές που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους κυκλώματος του ηλεκτροδίου G₁.

G ₁ (soil)	Ιούλιος	Νοέμβριος
L _{rod}	1,75989 (μH)	
R _{rod}	744,81·Γ ^{-0,243}	264,31·Γ ^{-0,11}
L _d	0,4 (mH)	
T _{sw2}	T _{cl} =0 (sec), T _{op} =20 (μsec)	
T _{sw3}	T _{cl} =0 (sec), T _{op} =1 (sec)	

Πίνακας 4.2 Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος ηλεκτροδίου G₁.

4.2 Κυκλωματικό μοντέλο για ηλεκτρόδιο με βελτιωτικό γείωσης

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια προσομοίωσης της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης ηλεκτροδίου εγκιβωτισμένου σε βελτιωτικό υλικό γείωσης. Για τον σκοπό αυτόν, προστέθηκε στο κύκλωμα του Σχήματος 4.1 ένας κλάδος παράλληλος στον κλάδο του ηλεκτροδίου, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα της κρουστικής σύνθετης αντίστασης λόγω του βελτιωτικού υλικού γύρω από τη ράβδο. Το κύκλωμα αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.5 Ισοδύναμο κύκλωμα κατακόρυφου ηλεκτροδίου σε βελτιωτικό γείωσης.

Λόγω της προσθήκης βελτιωτικού υλικού γύρω από τις ράβδους, αλλάζει η φαινόμενη διατομή αυτών και αντίστοιχα σύμφωνα με τη σχέση (4.1) αλλάζει και η αυτεπαγωγή L_{rod} . Ο διακόπτης T_{sw4} ανοίγει και κλείνει στον ίδιο χρόνο με τον T_{sw3} , ενώ και το επαγωγικό στοιχείο που ακολουθεί, έχει τον ίδιο ρόλο και την ίδια τιμή με το αντίστοιχο στον πρώτο κλάδο. Το κυκλωματικό στοιχείο *MODEL gec* (ground enhancing compound) δίνει σαν έξοδο τη συνιστώσα της σύνθετης κρουστικής αντίστασης γείωσης λόγω του βελτιωτικού υλικού. Περιγράφεται από τον κώδικα που αναλύθηκε παραπάνω, με μόνες διαφορές την τιμή της αντίστασης μόνιμης κατάστασης, που εδώ αφορά το βελτιωτικό που εξετάζεται κάθε φορά και την τελική εξίσωση για την R_{rod} , δηλαδή τη Z του Σχήματος 4.5. Η εξίσωση αυτή, η οποία προφανώς είναι διαφορετική για κάθε υλικό αλλά και για κάθε εποχή μετρήσεων, προσδιορίστηκε με δοκιμές, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να ταυτίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο με τα πειραματικά. Στον πίνακα 4.3 παρατίθενται όλες οι τιμές των παραμέτρων του κυκλώματος αλλά και οι εξισώσεις για το R_{rod} για τα ηλεκτρόδια G_2 έως G_5 . Παρατηρείται ότι σε κάθε υλικό διαφέρει λίγο ο χρόνος στον οποίο κλείνει ο διακόπτης T_{sw2} . Οι τιμές αυτές προέκυψαν μετά από δοκιμές ώστε η έναρξη του μεταβατικού φαινομένου στην προσομοίωση να συμπίπτει χρονικά με την πειραματική.

G2 (Concrete)	Ιούλιος	Νοέμβριος
L_{rod}	0,953416 (μH)	
R_{rod}	$301 \cdot I^{0,16}$	$350 \cdot I^{0,15}$

L_d	0,5 (mH)	0,6 (mH)
T_{sw2}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=20$ (μ sec)	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=14,5$ (μ sec)
T_{sw3}, T_{sw4}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=1$ (sec)	

G3 (Bentonite)	Ιούλιος	Νοέμβριος
L_{rod}	0,953416 (μ H)	
R_{rod}	$520 \cdot I^{-0,21}$	$322 \cdot I^{-0,19}$
L_d	0,5 (mH)	0,6 (mH)
T_{sw2}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=20$ (μ sec)	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=14,5$ (μ sec)
T_{sw3}, T_{sw4}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=1$ (sec)	

G4 (Compound A)	Ιούλιος	Νοέμβριος
L_{rod}	0,953416 (μ H)	
R_{rod}	$465 \cdot I^{-0,10}$	$340 \cdot I^{-0,14}$
L_d	0,9 (mH)	0,6 (mH)
T_{sw2}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=20$ (μ sec)	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=14$ (μ sec)
T_{sw3}, T_{sw4}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=1$ (sec)	

G5 (Compound B)	Ιούλιος	Νοέμβριος
L_{rod}	0,953416 (μ H)	
R_{rod}	$305 \cdot I^{-0,14}$	$260 \cdot I^{-0,19}$
L_d	0,9 (mH)	0,6 (mH)
T_{sw2}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=20$ (μ sec)	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=16$ (μ sec)
T_{sw3}, T_{sw4}	$T_{cl}=0$ (sec), $T_{op}=1$ (sec)	

Πίνακας 4.3 Παράμετροι ισοδυνάμου κυκλώματος κατακόρυφου ηλεκτροδίου με βελτιωτικό υλικό γείωσης.

Κεφάλαιο 5

Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

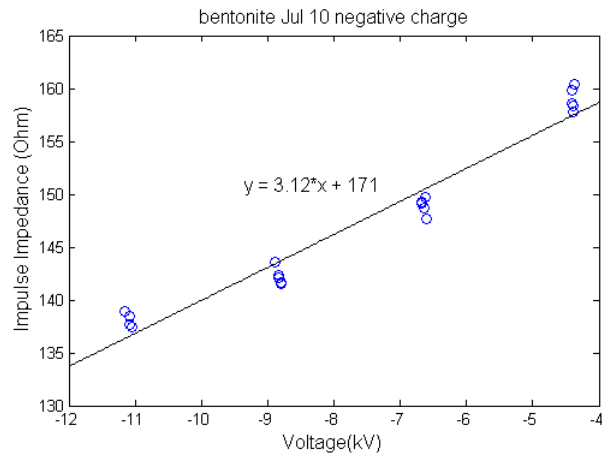
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κρουστική σύνθετη αντίσταση όπως προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις, πρώτα ανά υλικό και μετά ανά ημερομηνία. Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος για διάφορες στάθμες φόρτισης και για όλα τα υλικά από την κυκλωματική προσομοίωση.

5.1 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

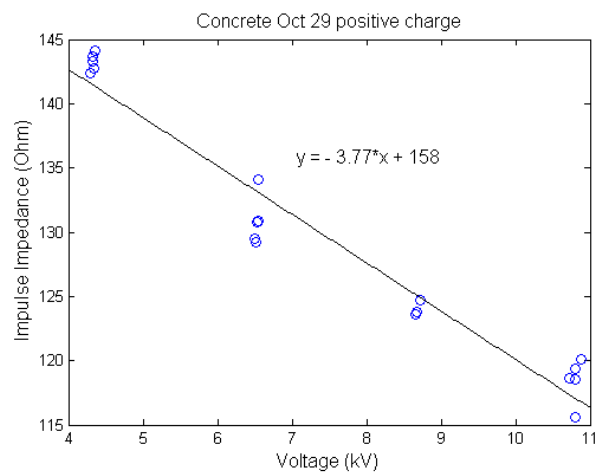
Για την αξιολόγηση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης των ηλεκτροδίων του πειράματος είναι απαραίτητο να μελετηθούν:

- Η μεταβολή της τιμής της με τη μεταβολή της τάσης φόρτισης.
- Η εξάρτησή της από την εποχή του χρόνου στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις (η εξάρτησή της δηλαδή κυρίως από την υγρασία του εδάφους).
- Η επίδραση των βελτιωτικών υλικών γείωσης στη μείωση της τιμής της.
- Η σύγκριση των τεσσάρων βελτιωτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

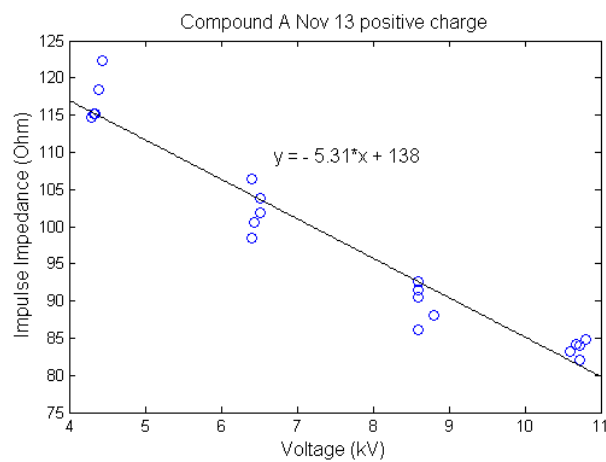
Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ξανά οι τιμές της κρουστικής σύνθετης αντίστασης που υπολογίστηκαν από τη σχέση 1.15, οι οποίες αυτή τη φορά, παραστάθηκαν σε διαγράμματα διασποράς ως προς την τάση φόρτισης. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε η γραμμή τάσης, με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά επιλέχθηκε πολυώνυμο δευτέρου βαθμού, για να είναι πιο εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Μερικά ενδεικτικά διαγράμματα με τις αντίστοιχες γραμμές τάσης φαίνεται στα Σχήματα 5.1.α έως 5.1.γ.



Σχήμα 5.1.α Διάγραμμα διασποράς και γραμμή τάσης για τις μετρήσεις του Ιουλίου στον μπεντονίτη.

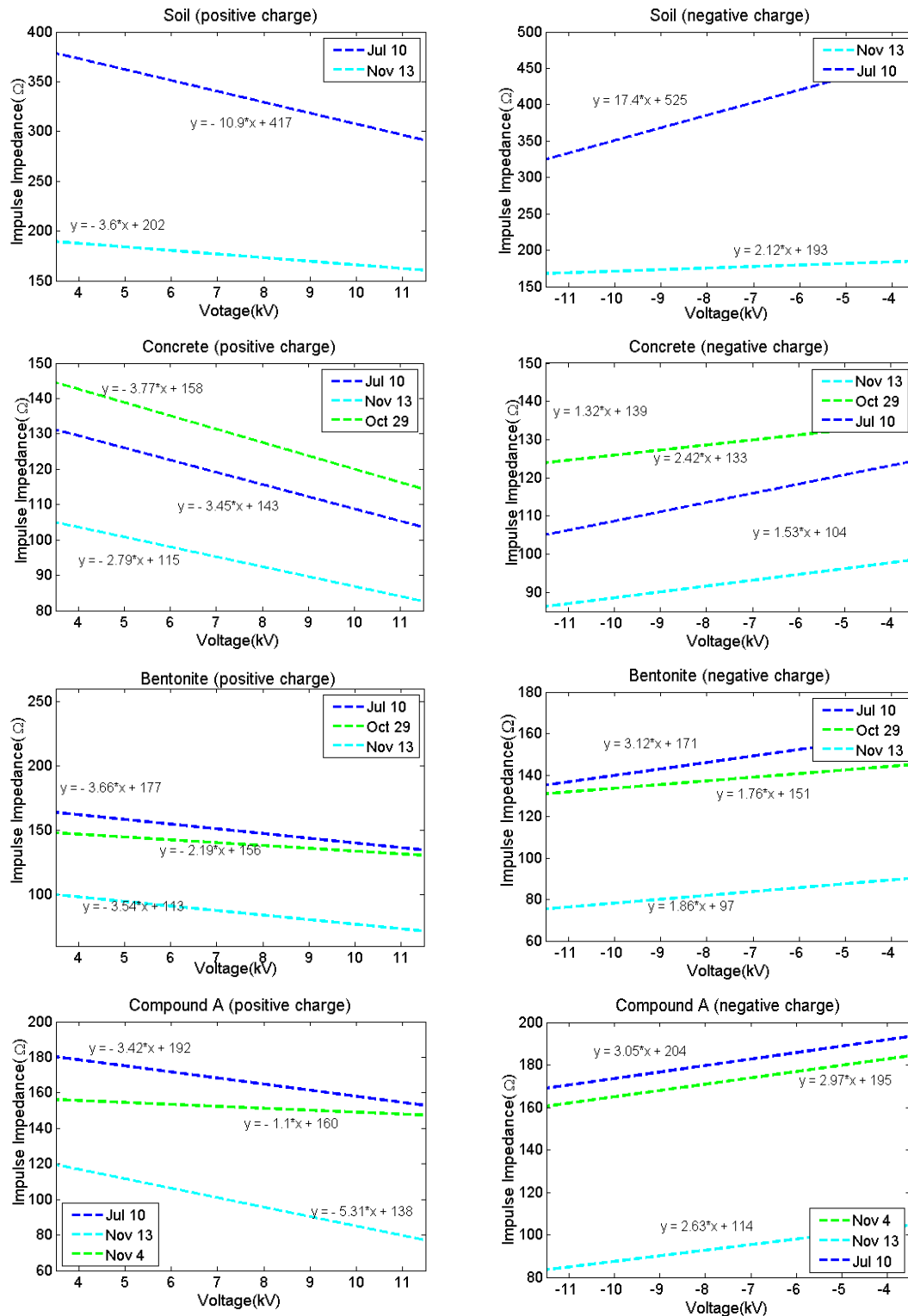


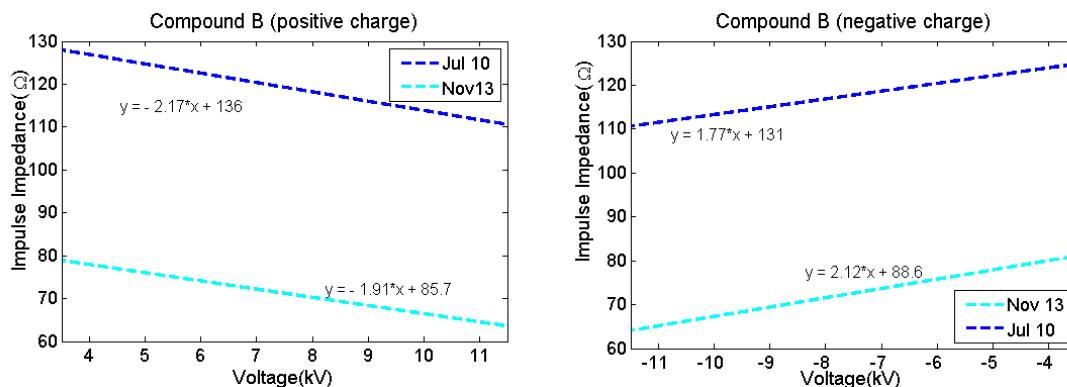
Σχήμα 5.1.β Διάγραμμα διασποράς και γραμμή τάσης για τις μετρήσεις του Οκτωβρίου στο σκυρόδεμα.



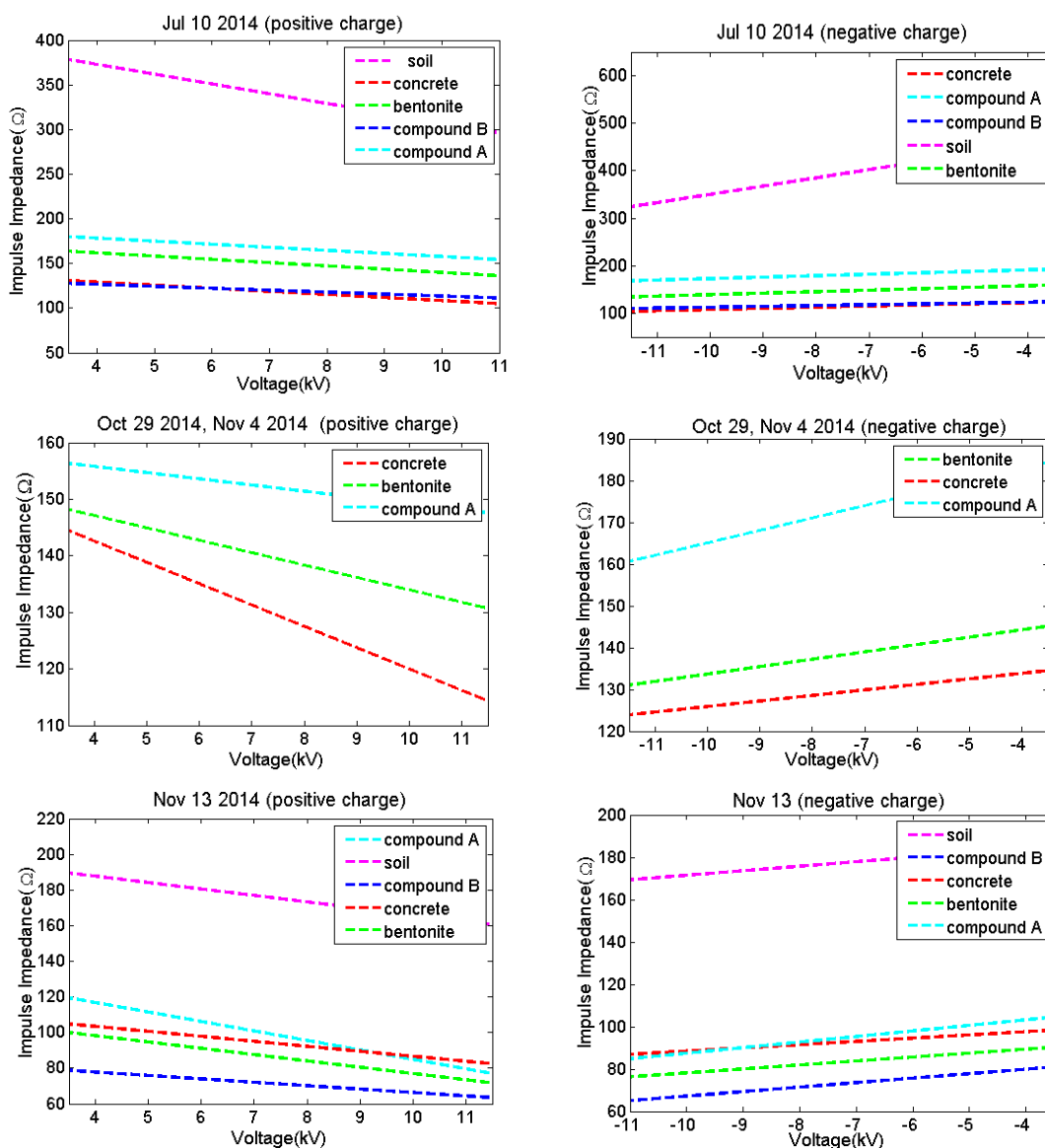
Σχήμα 5.1.γ Διάγραμμα διασποράς και γραμμή τάσης για τις μετρήσεις του Νοεμβρίου στο συνθετικό υλικό Α.

Ακολουθούν τα γραφήματα που παρουσιάζουν τη μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, κάθε υλικού, συναρτήσει του επιπέδου της τάσης φόρτισης, για διαφορετικές χρονικές περιόδους.





Σχήμα 5.2 Μεταβολή κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της τάσης φόρτισης (ανά υλικό).



Σχήμα 5.3 Μεταβολή κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της τάσης φόρτισης (ανά εποχή).

Χρησιμοποιώντας και πάλι τις τιμές της σχέσης 1.15, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των κρουστικών σύνθετων αντιστάσεων, ανά υλικό και ανά εποχή. Οι τιμές αυτές, που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1, αντιστοιχούν στη μέση τιμή των πέντε μετρήσεων που διεξήχθησαν σε κάθε ηλεκτρόδιο.

	-4kV	-6kV	-8kV	-10kV	+4kV	+6kV	+8kV	+10kV
Soil								
<i>Ιούλιος</i>	453,0	406,98	370,56	336,70	369,44	346,16	323,3	296,46
<i>Νοέμβριος</i>	181,0	184,16	173,58	169,12	185,34	183,52	168,04	164,18
Concrete								
<i>Ιούλιος</i>	123,9	115,82	111,42	104,96	130,14	118,34	112,36	106,36
<i>Οκτώβριος</i>	136,7	128,08	123,36	117,72	143,26	130,9	124,06	117,94
<i>Νοέμβριος</i>	98,66	91,7	91,36	87,96	104,24	95,34	90,2	86,02
Bentonite								
<i>Ιούλιος</i>	158,94	148,88	142,22	138,0	163,14	149,34	143,96	137,7
<i>Οκτωβριος</i>	144,4	138,92	135,32	132,52	148,28	139,64	137,12	132,22
<i>Νοέμβριος</i>	89,3	84,32	82,26	76,42	98,62	88,48	81,1	75,82
Compound A								
<i>Ιούλιος</i>	191,58	185,0	175,66	171,8	179,08	166,96	165,12	154,6
<i>Νοέμβριος (1^η μέτρηση)</i>	182,32	176,28	167,34	163,14	155,72	151,76	152,88	147,28
<i>Νοέμβριος (2^η μέτρηση)</i>	103,88	95,96	89,98	86,96	117,14	102,18	89,76	83,62
Compound B								
<i>Ιούλιος</i>	123,88	122,6	109,16	115,48	128,56	120,72	115,48	113,84
<i>Νοέμβριος</i>	79,76	76,88	71,66	65,72	77,48	73,84	69,66	65,46

Πίνακας 5.1 Μέσες τιμές της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του κάθε εξεταζόμενου κατακόρυφου ηλεκτροδίου γείωσης.

5.2 Ανάλυση

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω διαγράμματα και από τον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται στις παραγράφους 5.1.1 έως 5.1.4.

5.1.1 Μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης με την αύξηση της τάσης φόρτισης.

Η πρώτη παρατήρηση που προκύπτει από τα γραφήματα της κρουστικής σύνθετης αντίστασης των Σχημάτων 5.2 και 5.3, είναι η άμεση σχέση της τιμής της Z με την τάση φόρτισης. Συγκεκριμένα, όλα ανεξαιρέτως τα ηλεκτρόδια και σε όλες τις περιόδους μετρήσεων, παρουσιάζουν μείωση της τιμής της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, καθώς αυξάνεται σε απόλυτη τιμή η τάση φόρτισης. Η κλίση των γραμμών τάσης για όλα τα ηλεκτρόδια είναι σχετικά μικρή, σε όλες τις ημερομηνίες, ενώ μοναδική εξαίρεση αποτελεί το ηλεκτρόδιο που είναι εγκιβωτισμένο στο φυσικό έδαφος. Το G_1 εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία στην αύξηση της τάσης φόρτισης, σε περιόδους που το έδαφος παρουσιάζει έντονη ξηρασία. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται από τα αντίστοιχα γραφήματα του Σχήματος 5.2, σύμφωνα με τα οποία, η κλίση των γραμμών τάσης για το G_1 και για τις δύο πολικότητες, είναι τριπλάσια τον Ιούλιο, σε σχέση με αυτών του Νοεμβρίου.

5.1.2 Εξάρτηση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης από την πολικότητα της φόρτισης.

Η επίδραση της πολικότητας στην τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γίνεται περισσότερο αισθητή στις μετρήσεις του Ιουλίου για το ηλεκτρόδιο G_1 . Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, η μέση τιμή της Z για το G_1 , στη στάθμη των -4kV , εμφανίζει ποσοστιαία απόκλιση 22,6% σε σχέση με αυτήν της αντίστοιχης θετικής πολικότητας. Στη στάθμη των -6kV το αντίστοιχο ποσοστό είναι 17,5%, στη στάθμη των 8kV είναι 14,6%, ενώ στη στάθμη των 10kV το ποσοστό αυτό πέφτει στο 13,6%. Στις μετρήσεις του Νοεμβρίου η πολικότητα δε φαίνεται να

επηρεάζει την κρουστική σύνθετη αντίσταση του ηλεκτροδίου G_1 , αφού το ποσοστό της αντίστοιχης απόκλισης δεν ξεπερνά το 3,3%, σε καμία στάθμη φόρτισης. Στα ηλεκτρόδια με τα βελτιωτικά υλικά γείωσης η τιμή της Z επηρεάζεται σε πολύ μικρότερο βαθμό από την πολικότητα της τάσης φόρτισης, η αλλαγή της οποίας, ανάλογα με το υλικό, προκαλεί είτε μείωση, είτε αύξηση στη Z . Συγκεκριμένα, η μέγιστη απόκλιση, ως προς τη θετική πολικότητα, που εμφανίζει η κρουστική σύνθετη αντίσταση του G_2 , είναι στη στάθμη των 4kV και δεν ξεπερνά το -5% τους μήνες Ιούλιο και Οκτώβριο και το -5,5% τον Νοέμβριο, παρουσιάζει δηλαδή, για όλες τις ημερομηνίες, μεγαλύτερη τιμή στη θετική πολικότητα. Αμελητέα είναι η διαφορά που καταγράφεται με την αλλαγή της πολικότητας στον μπεντονίτη, με μοναδική εξαίρεση τη στάθμη των +4kV του Νοεμβρίου, όπου η ποσοστιαία απόκλιση φτάνει το -9,5%. Το συνθετικό υλικό Α εμφανίζει μέγιστη απόκλιση που φτάνει το 11% τον Ιούλιο και το 17% τον Νοέμβριο, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά του συνθετικού υλικού Β δεν ξεπερνούν σε καμία ημερομηνία το 6%.

5.1.3 Σχέση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης με την εποχή.

Η μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους έχει επαληθευτεί από μεγάλο πλήθος ερευνητικών εργασιών, ομοίως και στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα στο φυσικό έδαφος η τιμή της Z μειώνεται έως και 60%, στη στάθμη των -4kV, τον Νοέμβριο σε σχέση με τον Ιούλιο, ενώ ακολουθούν το συνθετικό υλικό Α με μέγιστη μείωση 49,4% στη στάθμη των -10kV, ο μπεντονίτης με ποσοστό μείωσης 44,9% στη στάθμη των +10kV και το συνθετικό υλικό Β με μείωση 43,1% στη στάθμη των -8kV. Εξαίρεση αποτελεί και στη μεταβατική κατάσταση το ηλεκτρόδιο G_2 , η τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του μειώνεται μόνο κατά 20% στις μετρήσεις του Νοεμβρίου έναντι αυτών του Ιουλίου.

Παρ' ότι η μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης σε ένα σύστημα γείωσης είναι επιθυμητή, εξίσου σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ενός βελτιωτικού υλικού είναι η ικανότητά του να διατηρεί την τιμή της Z σε χαμηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν στο

πλαίσιο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [65], αποτελούν ένα καλό δείγμα για τη συμπεριφορά αυτή, καθώς περιλαμβάνουν δύο ακραίες καταστάσεις: μια περίοδο έντονης ξηρασίας και μια άλλη έντονων βροχοπτώσεων άρα και υψηλής υγρασίας. Συγκεκριμένα συγκρίνοντας τις τιμές της Z για Ιούλιο και Νοέμβριο τόσο στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, υπολογίζεται για το σκυρόδεμα συνολική μέση τιμή διακύμανσης που δεν ξεπερνά το 20% τη στιγμή που το ίδιο ποσοστό στον μπεντονίτη πλησιάζει το 45%. Η διαφορά αυτή ανάμεσα σε αυτά τα βελτιωτικά υλικά εμφανίζεται και στις τιμές της αντίστασης μόνιμης κατάστασης και αποτελεί προφανώς ένα μεγάλο μειονέκτημα για τον μπεντονίτη και τη χρήση του σε εδάφη με μεγάλη ξηρασία.

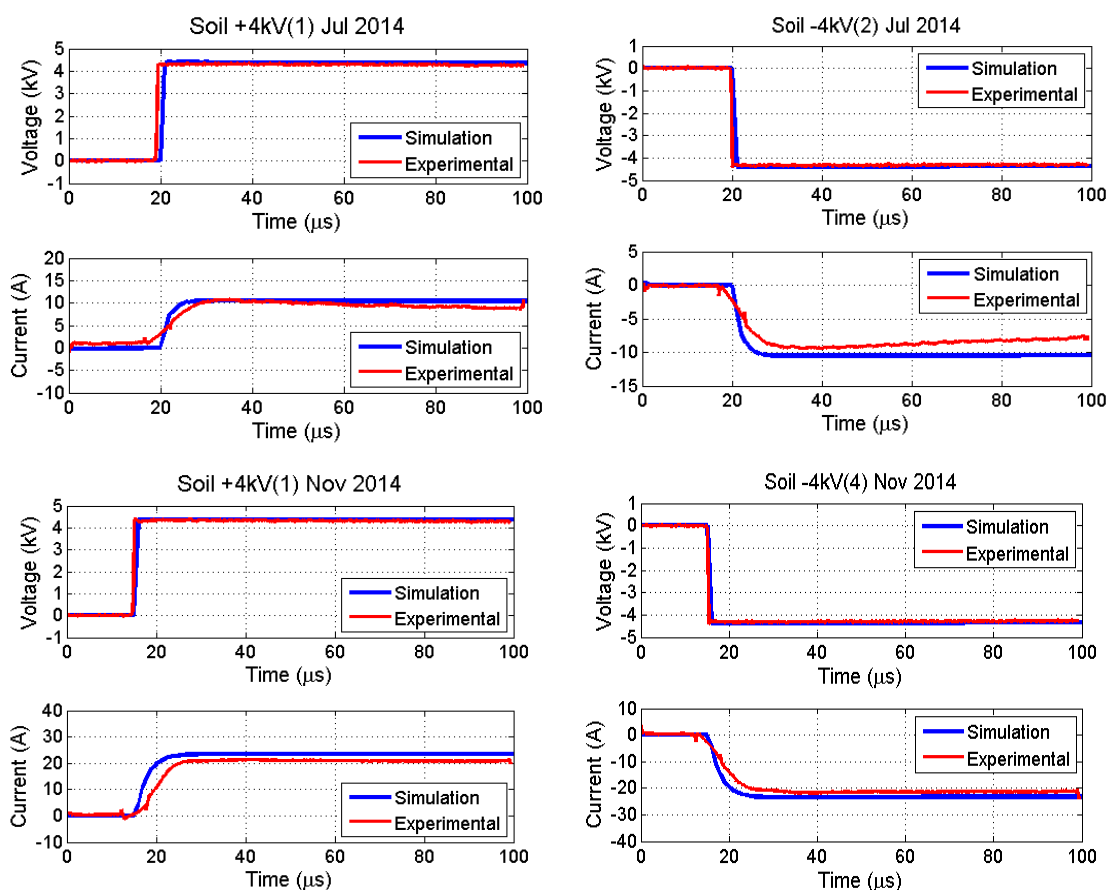
5.1.4 Συνεισφορά των βελτιωτικών στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.

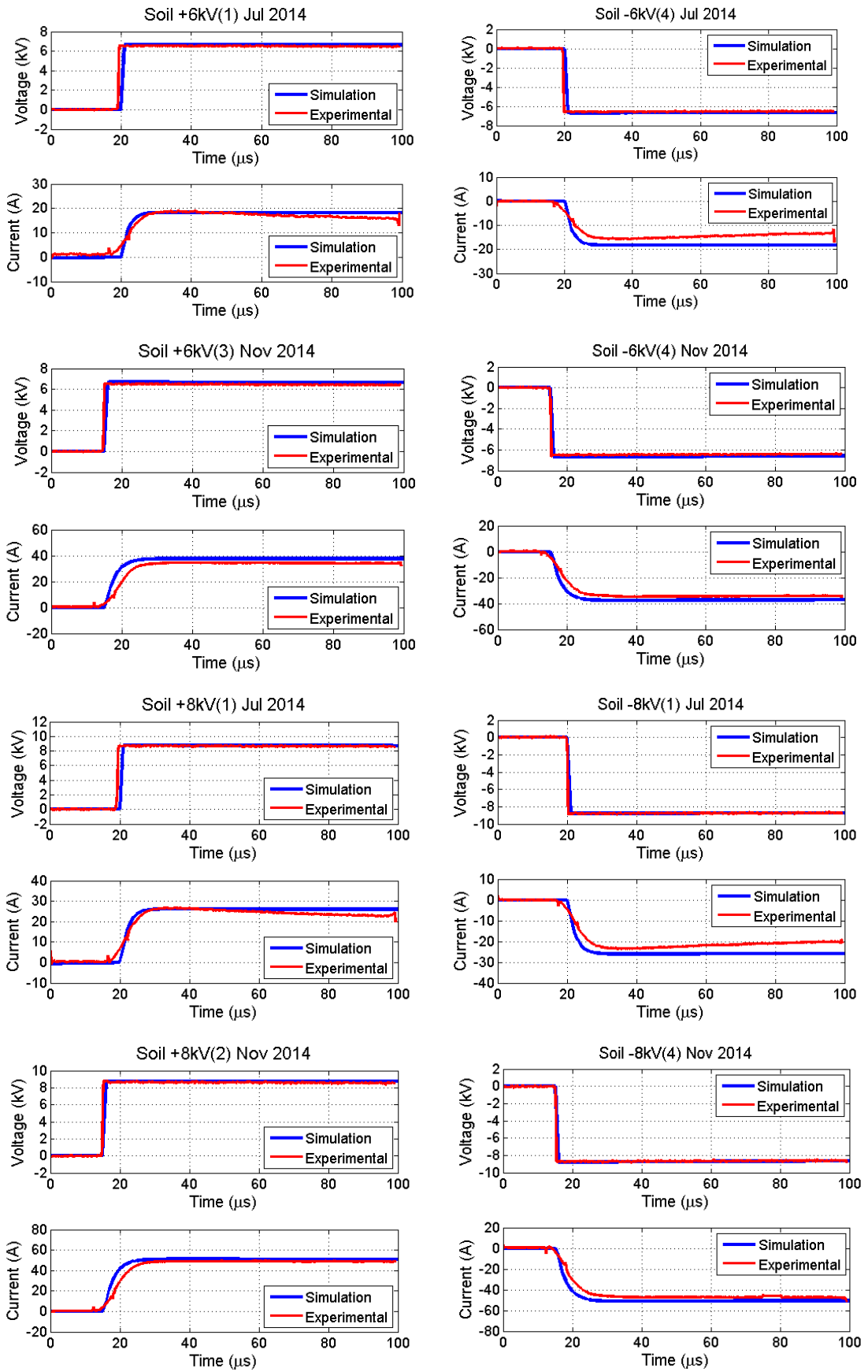
Από τα διαγράμματα 5.2, 5.3 και τον πίνακα 5.1 παρατηρούμε την τεράστια επίδραση των βελτιωτικών υλικών γείωσης στη μείωση της κρουστικής αντίστασης γείωσης τόσο στη μέτρηση χαμηλής συχνότητας, όσο και στη μεταβατική. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η γεωμετρία όλων των ηλεκτροδίων και η πειραματική διάταξη είναι ίδιες, μπορούμε να αποδώσουμε τη μεγαλύτερη αυτή μείωση της Z στα ηλεκτρόδια G_2 έως G_5 εξ ολοκλήρου στις ιδιότητες των βελτιωτικών υλικών που τα περιβάλλουν. Αναλυτικότερα, σε σχέση με το G_1 , το ηλεκτρόδιο G_2 , που περιβάλλεται από σκυρόδεμα, εμφανίζει μέση τιμή μείωσης της Z που φτάνει το 68% τον Ιούλιο, ποσοστό παραπάνω από ικανοποιητικό για μία εποχή με μεγάλη ξηρασία όπως αυτή του καλοκαιριού. Το αντίστοιχο ποσοστό για τον Νοέμβριο κυμαίνεται λίγο κάτω από 50%. Το ηλεκτρόδιο G_3 , που περιβάλλεται από μπεντονίτη, ξεπερνά κατά 5% το ποσοστό του σκυροδέματος τον Νοέμβριο, κάτι που οφείλεται στην ικανότητά του να συγκρατεί την έντονη υγρασία των φθινοπωρινών βροχοπτώσεων, λόγω της υγροσκοπικής του φύσης. Αντίστοιχα, τον Ιούλιο η μέση τιμή της μείωσης δεν ξεπερνά το 60% σε σχέση με αυτή του φυσικού εδάφους, ενώ και στις μετρήσεις του Οκτωβρίου η μείωση της Z είναι σχεδόν 10% μικρότερη σε σχέση με αυτήν του σκυροδέματος. Το ποσοστό μείωσης, για τον Ιούλιο, του υλικού Α ξεπερνά το 50% και για το υλικό Β το 65%, αλλά ακόμα σημαντικότερο είναι το

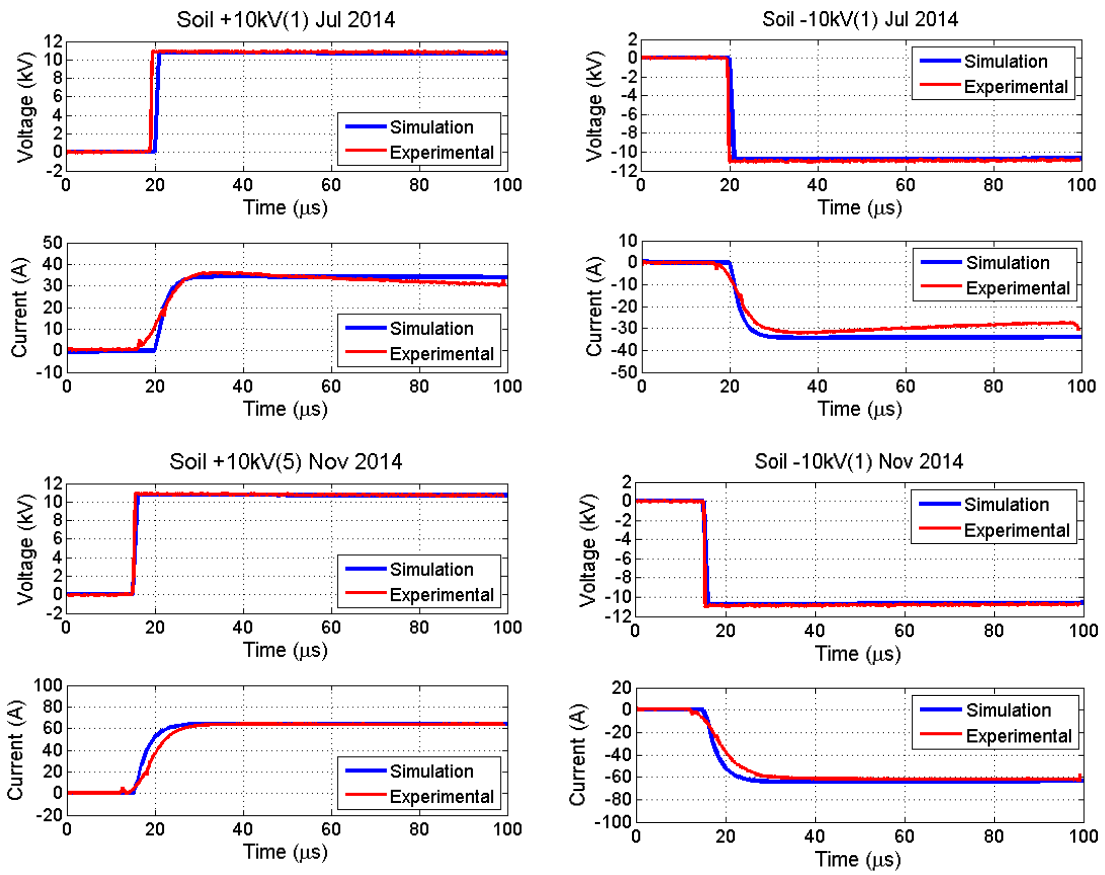
αντίστοιχο ποσοστό για το υλικό Β τον Νοέμβριο, το οποίο αγγίζει το 59%, το μεγαλύτερο δηλαδή για τον μήνα αυτό.

5.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

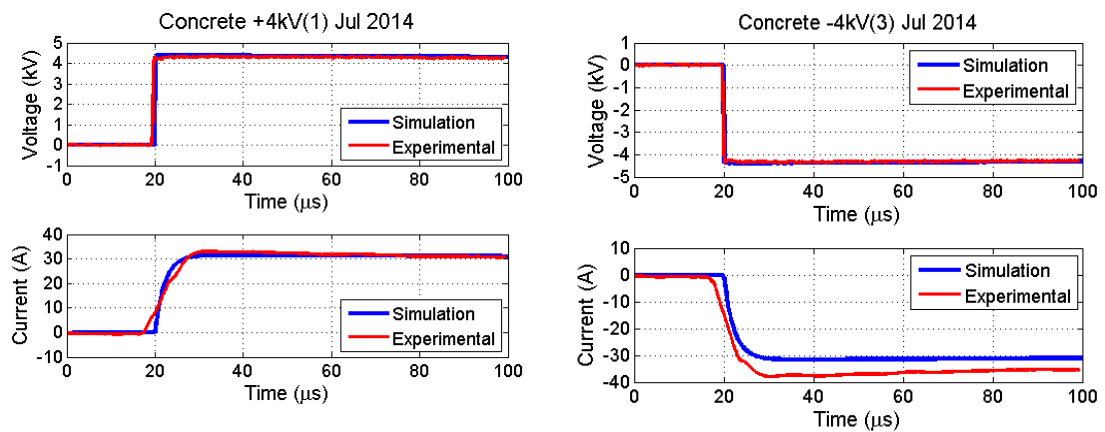
Στον πίνακα 5.2 παρατίθενται μερικές ενδεικτικές κυματομορφές για την τάση και το ρεύμα από όλες τις στάθμες φόρτισης, που προέκυψαν από τα κυκλώματα της προσομοίωσης. Στα γραφήματα φαίνονται τόσο οι πειραματικές καμπύλες που καταγράφησαν από τον παλμογράφο, όσο και αυτές από την κυκλωματική προσέγγιση στο ATP, για την ευκολότερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

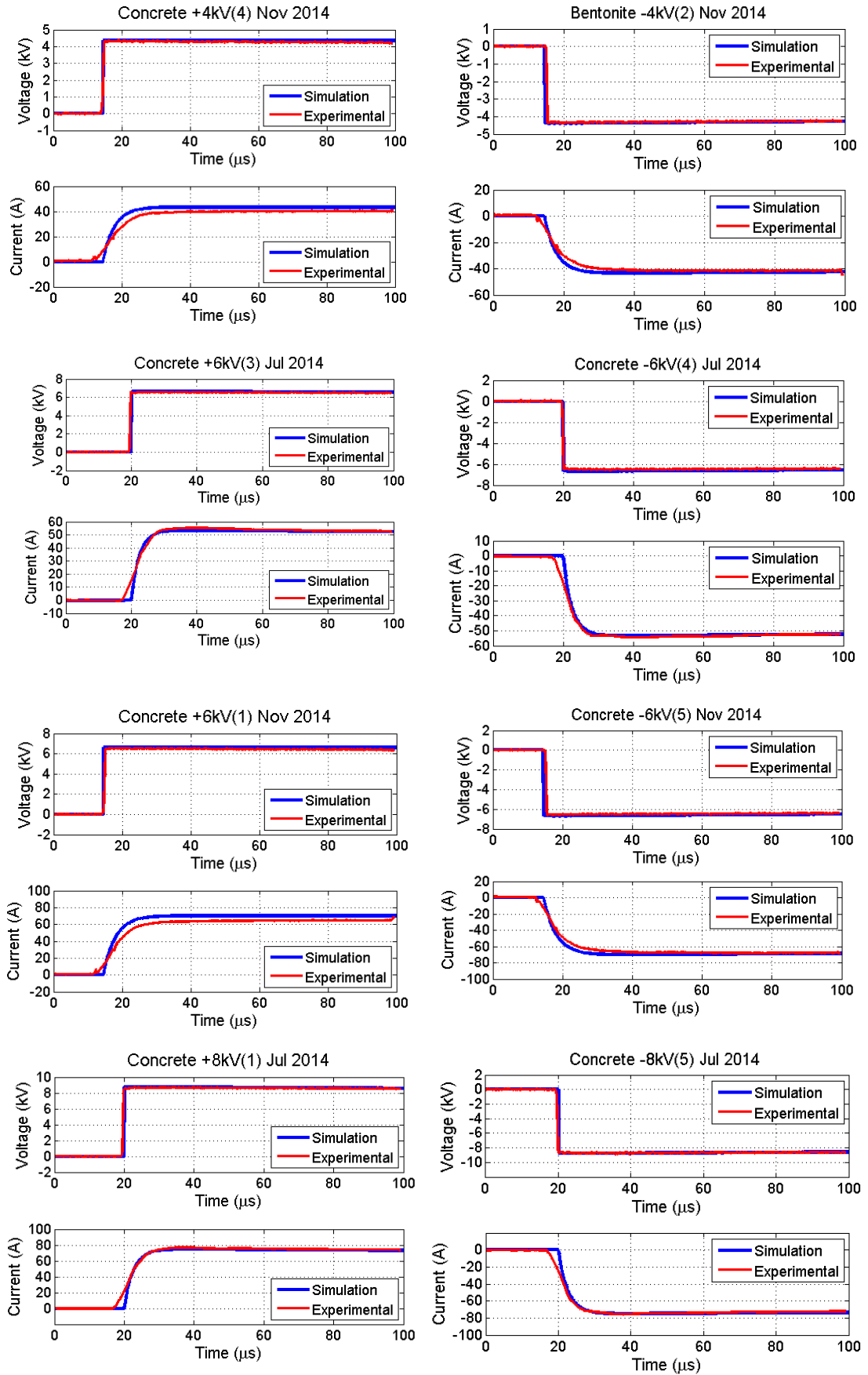


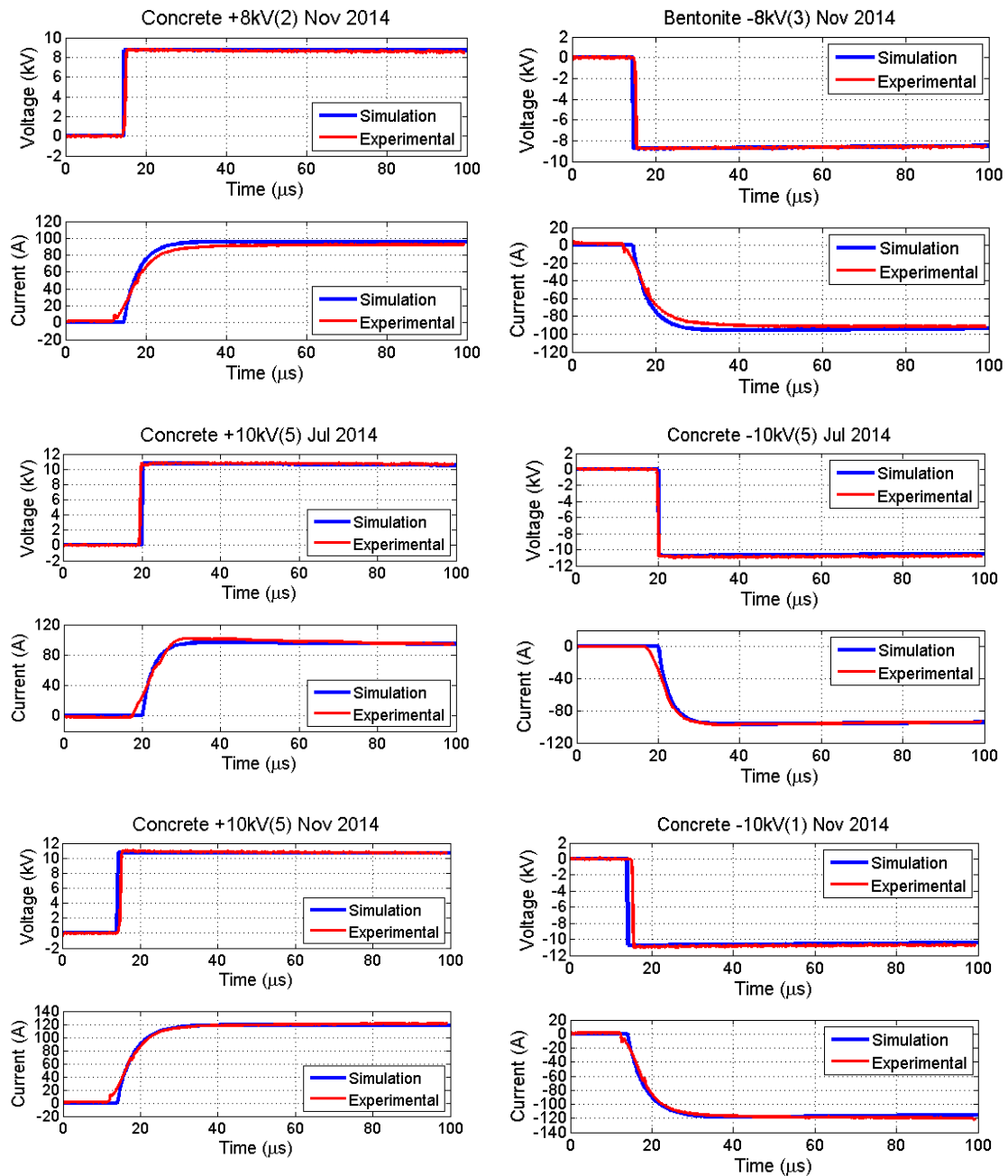




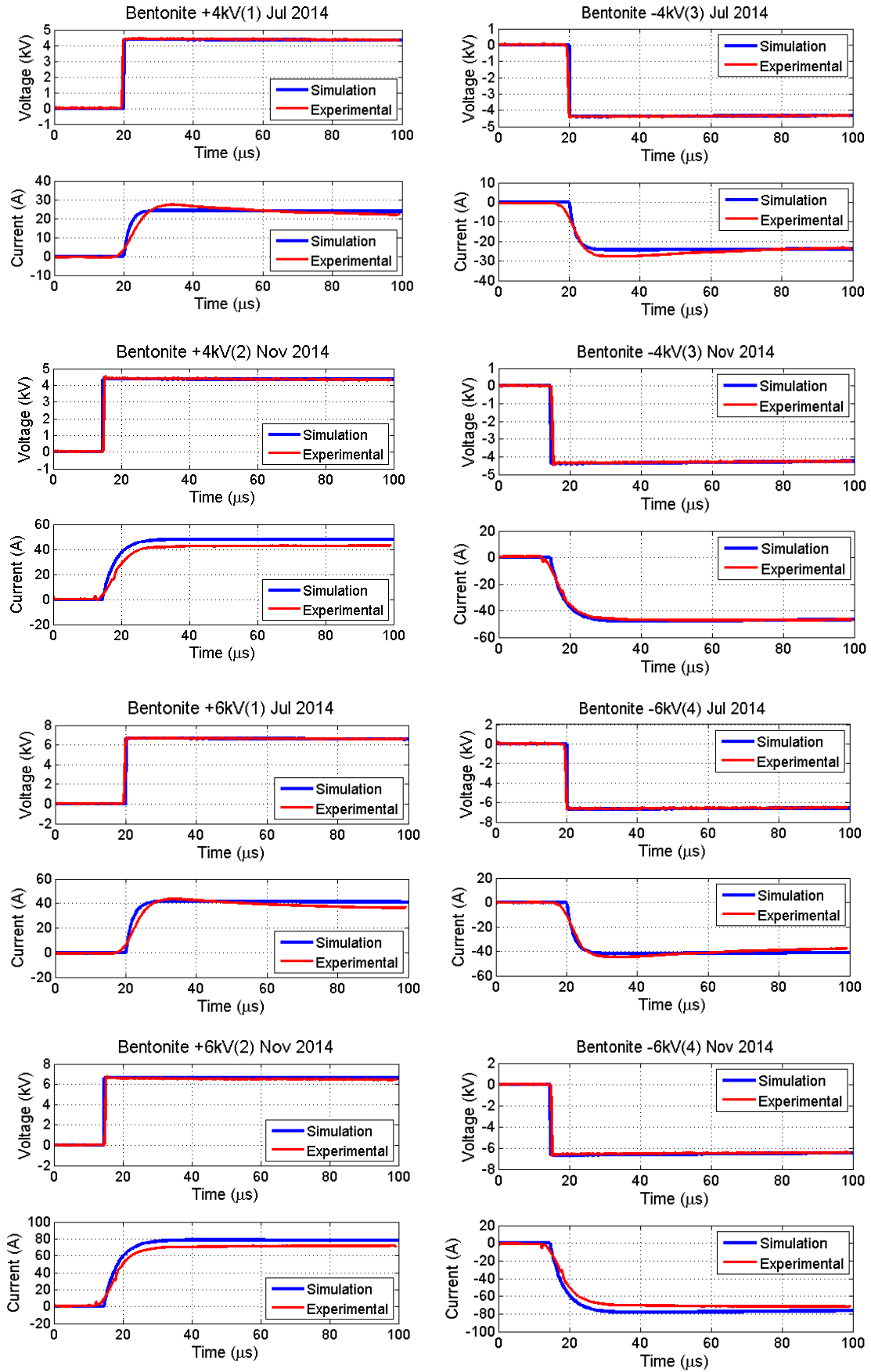
Σχήμα 5.4.α Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου G_1 .

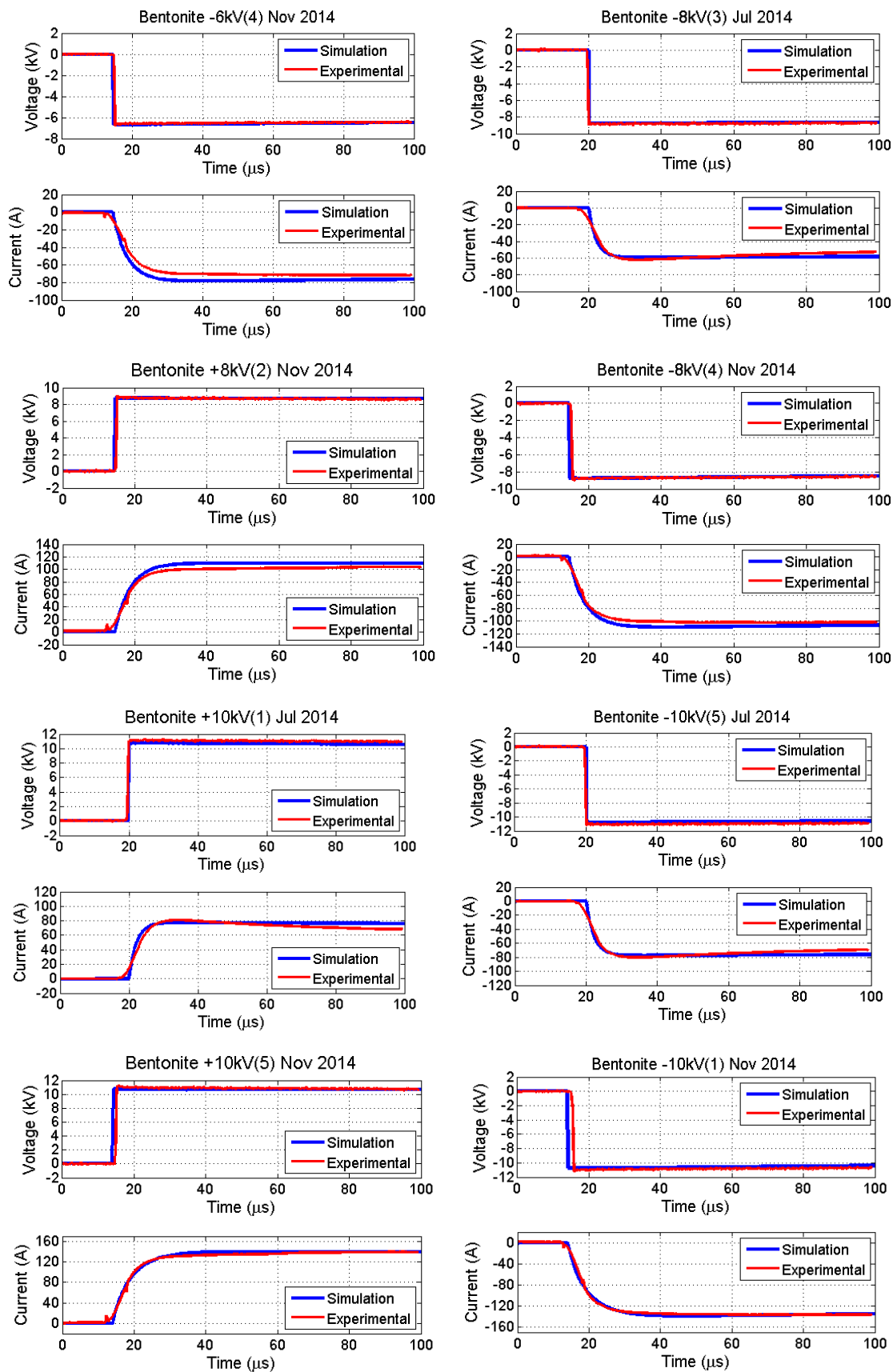




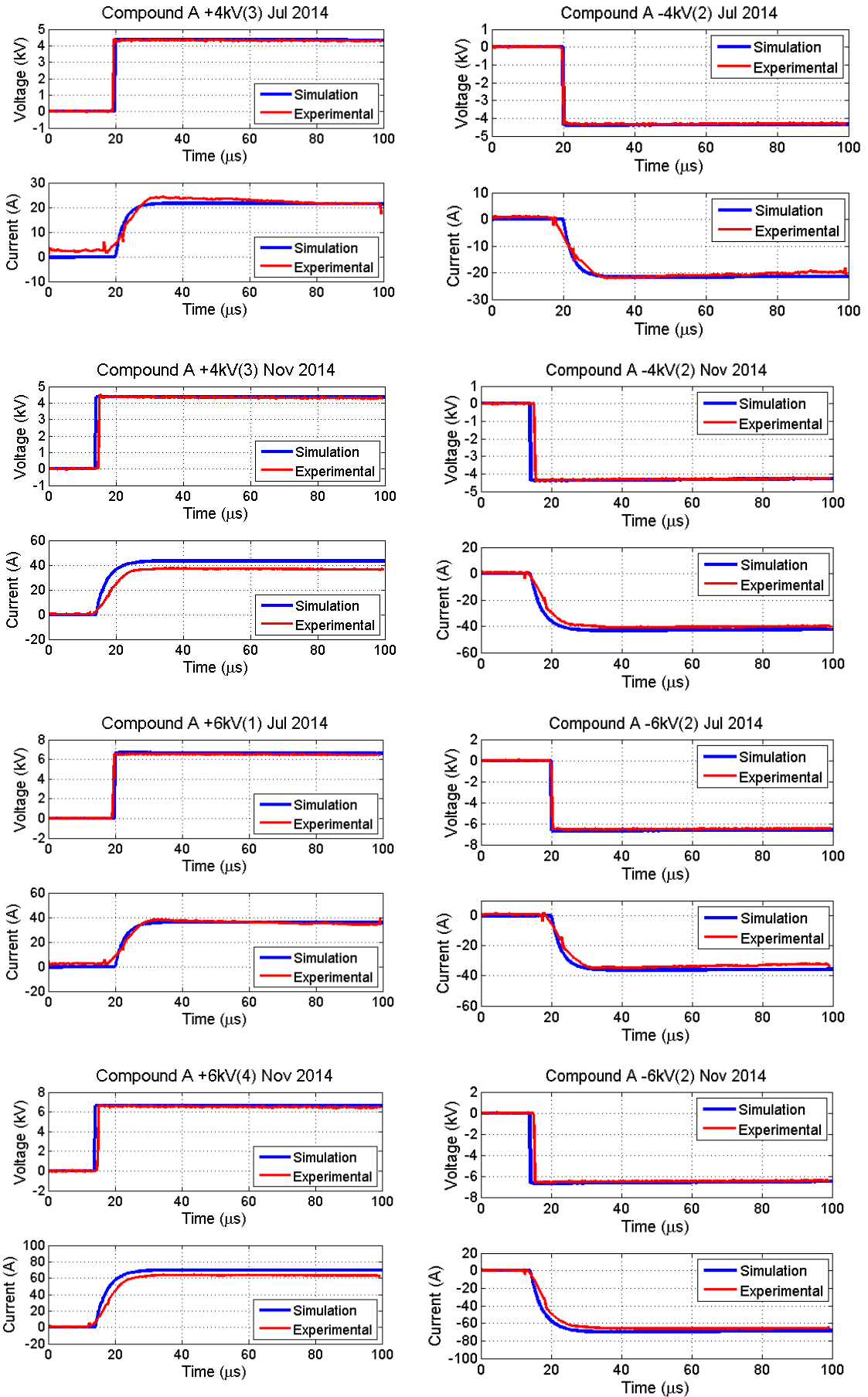


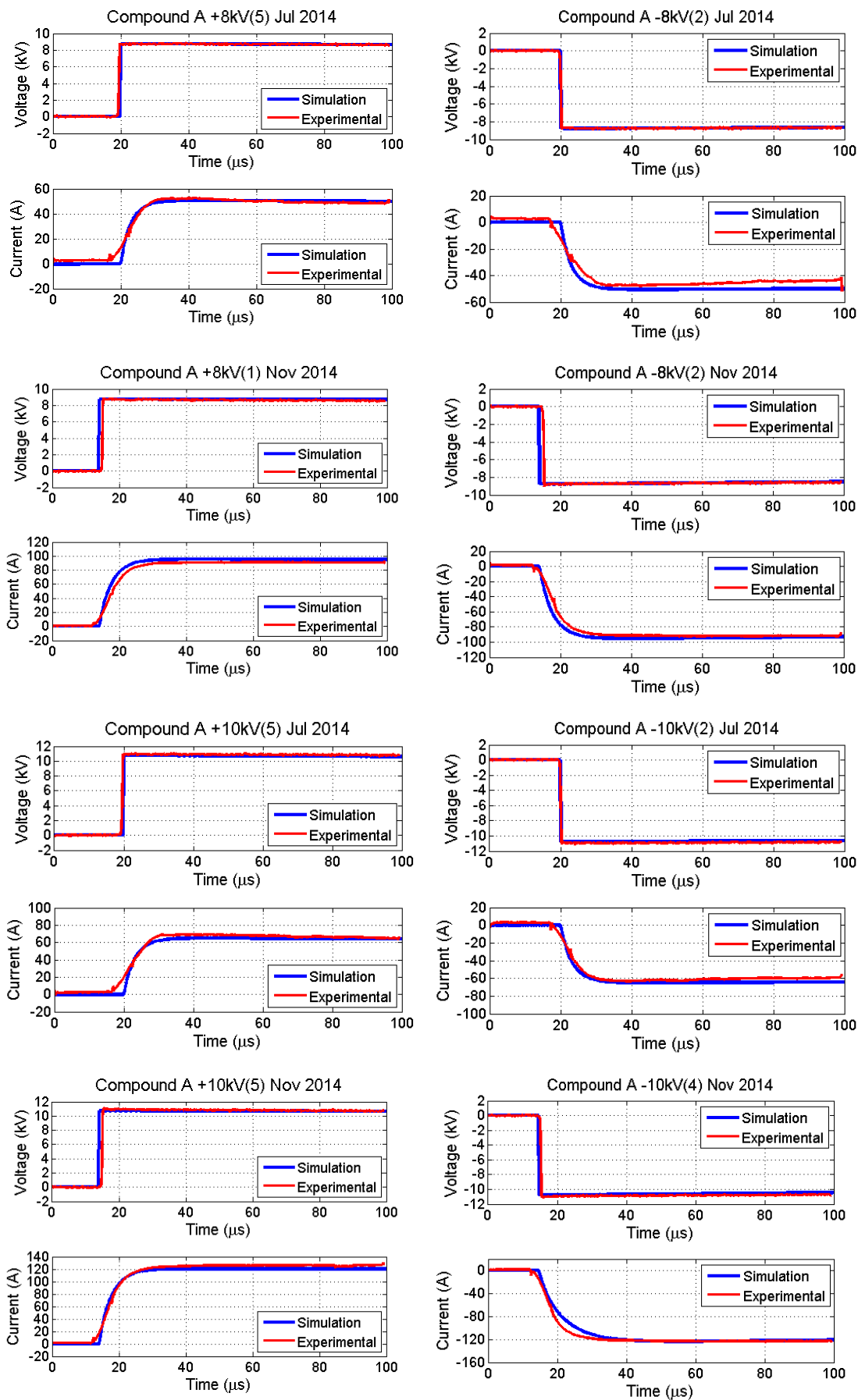
Σχήμα 5.4.β Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου G_2 .



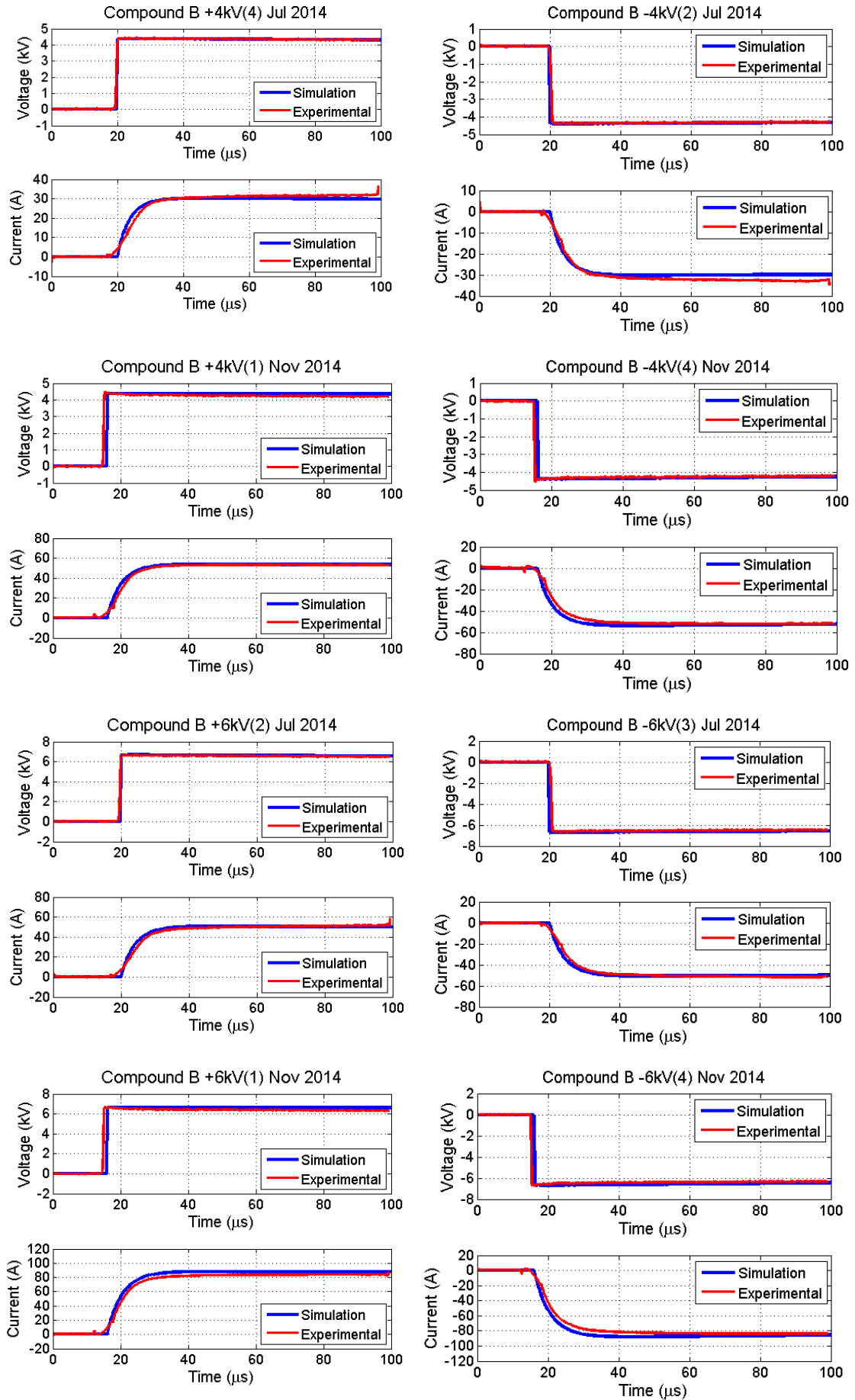


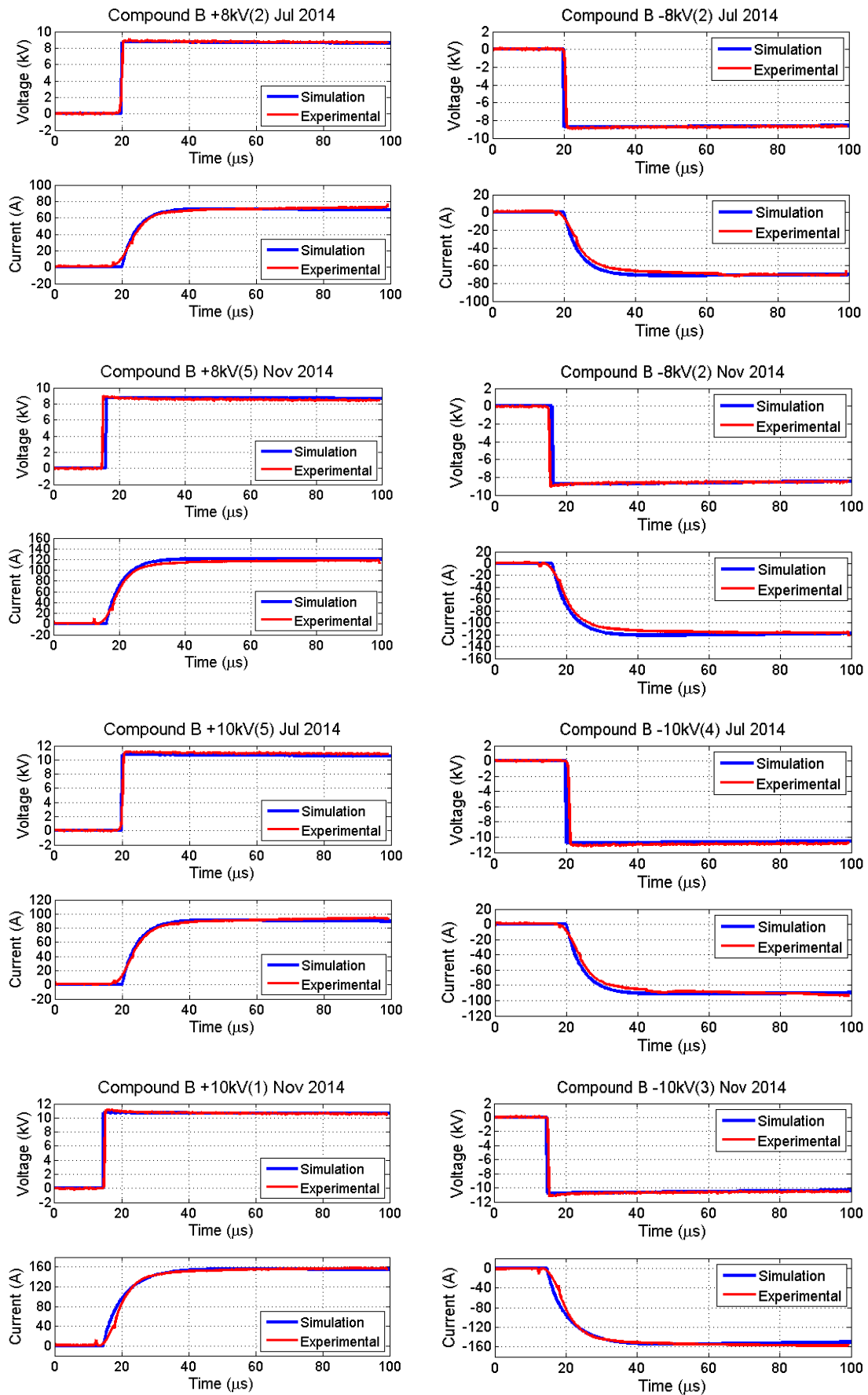
Σχήμα 5.4.γ Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου G_3 .





Σχήμα 5.4.δ Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου G_4 .





Σχήμα 5.4.δ Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση και το ρεύμα του ηλεκτροδίου G_5 .

Η σύγκλιση μεταξύ πειραματικών παλμογραφημάτων και γραφημάτων προσομοίωσης είναι πολύ ικανοποιητική, καθώς, όπως είναι εμφανές, προσεγγίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό τόσο τα peak της τάσης και του ρεύματος, όσο και η κλίση τους μετά το peak. Πιο συγκεκριμένα, οι κυματομορφές της τάσης προσεγγίζονται, με ελάχιστη απόκλιση, σε όλες ανεξαιρέτως τις στάθμες και για όλα τα υλικά. Όσο για το ρεύμα, μικρές διαφορές συναντώνται κυρίως στα αποτελέσματα για το ηλεκτρόδιο G₁, όπου παρατηρούμε ότι η καμπύλη της προσομοίωσης έχει ταχύτερη άνοδο μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή της, ενώ στη συνέχεια, μειώνεται με μικρότερη κλίση σε σχέση με την πειραματική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της απόκλισης αποτελεί το παλμογράφημα του Ιουλίου, στη στάθμη των -4kV. Μάλιστα, η απότομη κλίση στην πειραματική κυματομορφή του ρεύματος παρατηρείται κυρίως στις μετρήσεις του Ιουλίου, γεγονός που οφείλεται στην έντονη ξηρασία της καλοκαιρινής περιόδου. Αντίθετα, οι αντίστοιχες αποκλίσεις στην καμπύλη του ρεύματος για τα ηλεκτρόδια με τα βελτιωτικά υλικά γείωσης είναι αμελητέες.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα-Επόμενη Μέρα

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας εργασίας διατυπώνονται γενικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και παρατίθενται προτάσεις για τη βελτίωση και συνέχισή της.

6.1 Πειραματική Διαδικασία

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, εγκιβωτισμένων σε βελτιωτικά υλικά, και η προσομοίωση αυτής με τη χρήση του EMTP-ATP.

Αρχικά, ελήφθησαν μετρήσεις από την πειραματική διαδικασία που διεξήχθη στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [65], κατά την εκπόνηση της οποίας, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με κρουστικό ρεύμα πάνω σε πέντε κατακόρυφες ράβδους γείωσης, οι τέσσερις από τις οποίες ήταν εγκιβωτισμένες σε βελτιωτικά υλικά γείωσης. Από τη γνώση της ειδικής αντίστασης του κάθε υλικού αλλά και του ίδιου του χώματος, στην περιοχή όπου διεξήχθη το πείραμα και, με βάση τα παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία, προσδιορίστηκε η κρουστική σύνθετη αντίσταση για κάθε μία από τις εξεταζόμενες ράβδους. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν τα γραφήματα 5.2 και 5.3 που παρουσιάζουν τη μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης των ηλεκτροδίων συναρτήσει της τάσης φόρτισης. Κατόπιν μελετήθηκε ο τρόπος κατά τον οποίο επηρεάζεται η κρουστική σύνθετη αντίσταση για κάθε υλικό, από την εποχή του χρόνου.

Το επόμενο μέρος της εργασίας αφορούσε την προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας. Αρχικά σχεδιάστηκε το κύκλωμα της γεννήτριας και στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι παράμετροι της προσομοίωσης του ηλεκτροδίου G_1 όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Τέλος έγινε

προσπάθεια προσέγγισης της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του κάθε βελτιωτικού που χρησιμοποιήθηκε και παρουσιάστηκαν οι κυματομορφές προσομοίωσης της τάσης και του ρεύματος, ώστε να αξιολογηθεί η σύγκλιση της προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα.

6.2 Συμπεράσματα

Από προηγούμενες έρευνες, ήταν ήδη γνωστά τα οφέλη της χρήσης βελτιωτικών υλικών για τη μείωση της αντίστασης γείωσης μόνιμης κατάστασης. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται τόσο στην πολύ χαμηλή τιμή της ειδικής αντίστασης των υλικών αυτών, όσο και στην συμπαγή τους σύσταση η οποία έχει πολύ καλύτερη επαφή με το ηλεκτρόδιο που περιβάλλει, σε σχέση με το φυσικό έδαφος.

Εκτός όμως από τη μόνιμη κατάσταση, ελάττωση παρουσιάζεται και στην σύνθετη κρουστική αντίσταση γείωσης με την χρήση των υλικών αυτών, ανάλογη βέβαια του υλικού αλλά και της υγρασίας του εδάφους, όπως παρουσιάζεται γραφικά στα σχήματα 5.2 και 5.3. Μετά από προσεκτική σύγκριση και ανάλυση καταλήγουμε πως τα ηλεκτρόδια G_2 και G_5 φαίνεται να υπερέχουν των υπολοίπων. Συγκεκριμένα, η κρουστική σύνθετη αντίσταση του ηλεκτροδίου G_2 , που περιβάλλεται από σκυρόδεμα, επιδεικνύει εξαιρετική σταθερότητα τόσο στην αλλαγή πολικότητας της τάσης φόρτισης, όσο και στη μεταβολή της υγρασίας του εδάφους, καθώς εμφανίζει τη μικρότερη μετρούμενη απόκλιση ανάμεσα στο μέσο όρο των τιμών του Ιουλίου και αυτών του Νοεμβρίου, σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. Αυτά, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος, καθιστούν το σκυρόδεμα το πιο ευρέως διαδεδομένο βελτιωτικό υλικό γείωσης τις τελευταίες δεκαετίες. Αξιόλογη σταθερότητα παρουσιάζει και το υλικό B, το οποίο μάλιστα στις μετρήσεις του Νοεμβρίου παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση από όλα τα υλικά, αλλά το τεράστιο κόστος του—σχεδόν διπλάσιο από αυτό του σκυροδέματος—το καθιστά μάλλον ακατάλληλο για ευρεία χρήση. Ακολουθεί σε απόδοση το ηλεκτρόδιο G_3 , το οποίο αν και προκαλεί αξιόλογη μείωση στη σύνθετη κρουστική αντίσταση γείωσης στη μέτρηση του Νοεμβρίου, εμφανίζει τεράστια απόκλιση στη μετρούμενη Z τον

Ιούλιο. Η εξάρτηση της απόδοσης του από την υγρασία εξηγείται από την υγροσκοπική φύση του μπεντονίτη, ο οποίος σε περιόδους μεγάλης ξηρασίας, όπως οι καλοκαιρινοί μήνες, συρρικνώνεται, με αποτέλεσμα να χάνει την επαφή του με το ηλεκτρόδιο, το οποίο περιβάλλει. Η έντονη εποχική διακύμανση του μπεντονίτη τον αποκλείει ουσιαστικά από χώρες όπως η Ελλάδα, αλλά σε ένα περιβάλλον με υψηλή υγρασία καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, το φυσικό αυτό ορυκτό αποτελεί αρκετά καλή επιλογή. Τέλος, το χημικό υλικό Α αν και πολύ οικονομικό, δεν είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθώς παρουσιάζει μέτρια αποτελέσματα και αρκετά έντονη εξάρτηση από την υγρασία, κάτι που φαίνεται από τη μεγάλη απόκλιση στις μετρήσεις του Ιουλίου, σε σχέση με αυτές του Νοεμβρίου.

6.3 Επόμενη μέρα

Μια ολοκληρωμένη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης με τη χρήση βελτιωτικών υλικών απαιτεί βέβαια περαιτέρω διερεύνηση. Αρχικά, η αντοχή των υλικών αυτών στην κρουστική καταπόνηση θα πρέπει να επανελεγχθεί μετά την πάροδο ετών, επομένως κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή επαναληπτικών μετρήσεων και η εκ νέου αξιολόγηση της απόδοσης τους. Προτείνεται, επίσης, η διεύρυνση της μελέτης, ώστε με την κατάλληλη τιμή κρουστικού ρεύματος, να περιλαμβάνει και το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους. Κάτι τέτοιο, βέβαια, είναι εξαιρετικά δύσκολο, καθώς απαιτεί τη χρήση ογκώδους και ακριβού εξοπλισμού, ο οποίος δύσκολα θα μπορεί να μεταφερθεί στον υπαίθριο χώρο όπου βρίσκονται τα ηλεκτρόδια. Παράλληλα, βέβαια, θα έπρεπε να ενημερωθούν και τα κυκλωματικά μοντέλα που προτάθηκαν στην παρούσα εργασία, ώστε να περιλαμβάνουν τις παραμέτρους που σχετίζονται με τον ιονισμό του εδάφους. Επίσης, η μελέτη αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλα εδάφη, με τα ίδια η διαφορετικά υλικά, ώστε να προκύψει μια πλήρης εικόνα για την απόδοσή τους σε συνάρτηση με γεωλογικούς παράγοντες, ενώ, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η χρήση διαφορετικής διάταξης ηλεκτροδίων γείωσης, όπως για παράδειγμα πλεγμάτων γείωσης, η οποία θα απαιτούσε, βέβαια, και τις αντίστοιχες αλλαγές στα κυκλωματικά μοντέλα. Τέλος, μια μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς

συστημάτων γείωσης θα εμπλουτιζόταν, σε μεγάλο βαθμό, με μετρήσεις σε ένα πραγματικό και ολοκληρωμένο σύστημα σύστημα γείωσης.

Βιβλιογραφία

- [1] Φανή Η. Ασημακοπούλου «Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διδακτορική Διατριβή, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2011.
- [2] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας «Συμβολή στη Μελέτη της Συμπεριφοράς Συστημάτων Γείωσης με Προσθήκη Βελτιωτικών Υλικών», Διδακτορική Διατριβή, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2016.
- [3] ANSI/IEEE Std 80-2013, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, April 2013.
- [4] E. Hallén, “Lösung zweier potentialprobleme der elektrostatik”, Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, Vol. 21A, No. 22, Stochholm, 1929.
- [5] H. B. Dwight, “Calculation of resistances to ground”, AIEE Transactions on Electrical Engineering, Vol. 55, No. 12, pp. 1319–1328, December 1936.
- [6] Ιωάννης Φ. Γκόνοσ, «Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2002.
- [7] H. M. Towne, “Impulse characteristics of driven grounds”, General Electric Review, Vol. 31, No. 11, pp. 605–609, November 1929.
- [8] R. Rudenberg, “Electrical shock waves in power systems: Travelling waves in lumped and distributed circuit elements”, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, ISBN 011281, 1st edition, 1968.
- [9] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, “Transient analysis of grounding systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 2, pp. 389–399, February 1983.
- [10] L. Grcev and F. Dawalibi, “An electromagnetic model for transients in grounding system”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp. 1773–1781, November 1990.
- [11] 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.
- [12] IEC/EN 62561-7:2012, “Lightning Protection System Components (LPSC)-Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds, January 2012.

- [13] R. J. Clark and B. O. Watkins, "Some chemical treatments to reduce the resistance of ground connections", *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 79, No. 3, pp. 1016–1023, December 1960.
- [14] I. H. Sanik, *Bull Scheiz Electrotechn.*, Vol 44, No. 25, s. 1052, 1953.
- [15] E. Higashimura, Y. Sekimoto and E. Hatabu, "Earth resistance-reducing agent and method of reducing earth resistance by use of same", *United States Patent*, Appl. No. 212.658, publ. No. US3857991 A, December 31st, 1974.
- [16] E. J. Fagan and R. H. Lee, "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/August 1970.
- [17] H. Kutter and W. Lange, "Grounding improvement by using bentonite", *Elektrie*, Vol. 21, No. 11, pp.421–424, 1967.
- [18] K. L. Mc Gowan, "Use of conductive backfills in reducing transmission tower surge impedance and footing resistance", *Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting*, San Francisco, California, USA, July 20th–25th, 1975.
- [19] W. R. Jones, "Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1343–1346, July 1980.
- [20] M. Veledar, Z. Timic, S. Skok and Z. First, "Improvement of grounding properties by using bentonite", *Proceedings of the CIGRE Paris Conference*, paper 22-06, 1982.
- [21] Hosterman, J.W. and S.H. Patterson, *Bentonite and Fuller's earth resources of the United States*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1522. United States Government Printing Office, Washington D.C., USA 1992.
- [22] <http://www.orykta.gr/>, Ιούλιος 2016.
- [23] T. Sato, T. Morimoto and Y. Kiyotani, "Decrement and ground resistance by the chemical treatment", *Electrical Communication Laboratory Technical Journal*, Vol. 16, pp. 1211–1215, 1967. (in Japanese)
- [24] K. Takeuchi, Y. Miyamoto, K. Tsurumaki and S. Sakagami, "Application of ground resistance reducing materials to model grounding mesh", *The Institute of Electrical Engineers of Japan Technical Report*, PE-89-148, 1989. (in Japanese)
- [25] Y. Huai-Liang, "Research on the mechanism of grounding resistance-reducing agent and the used quantity", *Proceedings of the 3rd International Conference*

- on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, July 8th–12th, 1991, Vol. 2, pp. 1230–1233.
- [26] H. Yamane, T. Ideguchi and M. Tokuda, “A new ground resistance-reducing material based on water-absorbent polymer”, *Electronics and Communications in Japan, Part 1*, Vol. 77, No. 5, pp. 68–78, May 1994. (Translated from *Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi*, Vol. 76-B-II, No. 3, pp. 173–180, March 1993).
- [27] M. B. Kostic, Z. R. Radakovic, N. S. Radovanovic and M. R. Tomasevic-Canovic, “Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud”, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 146, No. 1, pp. 1–6, January 1999.
- [28] Q. Meng, J. He, F. P. Dawalibi and J. Ma, “A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp. 911–916, July 1999.
- [29] L.-H. Chen, J.-F. Chen, T.-J. Liang, and W.-I Wang, “A study of grounding resistance reduction agent using granulated blast furnace slag”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 973–978, July 2004.
- [30] S.-D. Chen, “Granulated blast furnace slag used to reduce grounding resistance”, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 151, No. 3, pp. 361–366, May 2004.
- [31] S.-D. Chen, L.-H. Chen, C.-K. Cheng and J.-F. Chen, “An experimental study on the electrical properties of fly ash in the grounding system”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 7, No. 2, art. 7, pp. 1–19, September 2006.
- [32] L.-H. Chen, J.-F. Chen, T.-J. Liang and W.-I Wang, “A research on used quantity of ground resistance reduction agent for ground systems”, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 20, No. 4, pp. 408–421, May 2010.
- [33] A. A. Al-Arainy, Y. Khan, M. I. Qureshi, N. H. Malik and F. R. Pazheri, “Optimized pit configuration for efficient grounding of the power system in high resistivity soils using low resistivity materials”, *Proceedings of the 4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, Kuala Lumpur, Malaysia, April 19th–21st, 2011.
- [34] A. A. Al-Arainy, N. H. Malik, M. I. Qureshi and Y. Khan, “Grounding pit optimization using low resistivity materials for applications in high resistivity

- soils”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 12, No. 1, art. 3, 2011, pp. 1–18.
- [35] C. Romualdo-Torres, R. Velázquez-Sánchez and J. Loza-Rodríguez, “The application of backfills for improving the grounding resistance of power systems”, *Proceedings of the 2005/2006 IEEE PES, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA, May 21st–24th, 2006*, pp. 947–950.
- [36] A. Habjanič, M. Trlep and J. Pihler, “The influence of an additional substance in the trenches surrounding the grounding grid’s conductors on the grounding grid’s performance”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 4, pp. 1257–1260, April 2007.
- [37] N. Kumarasinghe, “A low cost lightning protection system and its effectiveness”, *Proceedings of the 20th International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, USA, April 21st–23rd, 2008*.
- [38] G. Eduful, J. E. Cole and F. M. Tetteh, “Palm Kernel Oil Cake as an alternative to earth resistance-reducing agent”, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 115–121, 2009.
- [39] P. Y. Okyere, G. Eduful and E. A. Frimpong, “Evaluation of four local materials as backfill to achieve a low earth electrode resistance”, *Journal of Science and Technology (Ghana)*, Vol. 29, No. 2, pp. 126–130, August 2009.
- [40] G. Eduful, J. E. Cole and P. Y. Okyere, “Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance”, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2009), San Francisco, USA, October 20th–22nd, 2009*, pp. 514–519.
- [41] A. D. Galván, E. E. Gaona and G. G. Pretelín, “Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods”, *Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA), Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009*, pp. 335–341.
- [42] A. D. Galván, G. G. Pretelín and E. E. Gaona, “Practical evaluation of ground enhancing compounds for high soil resistivities”, *Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010*, pp. 1233-1–1233-4.
- [43] A. D. Galván, D. M. Soto and J. M. G. Malo, “Evaluation under controlled conditions of ground enhancing compounds used in grounding rods”,

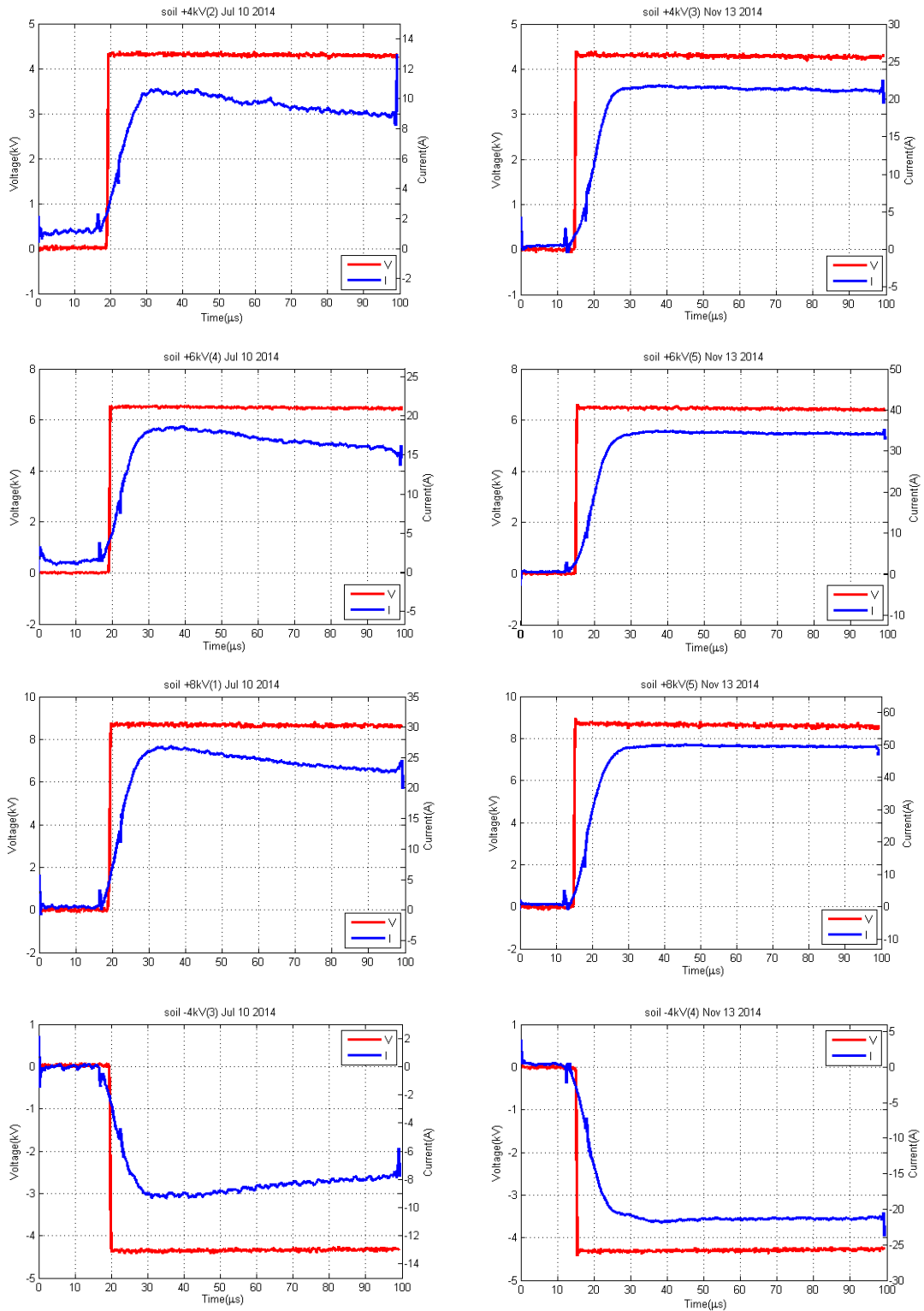
- Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA), Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009, pp. 343–346.
- [44] J. M. G. Malo, D. M. Soto and A. D. Galván, “Corrosion assessment of a ground electrode in contact with ground enhancing compounds”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1232-1–1232-2.
- [45] J. Jasni, L. K. Siow, M. Z. A. Ab Kadir and W. F. Wan Ahmad, “Natural materials as grounding filler for lightning protection system”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1101-1–1101-6.
- [46] W. F. Wan Ahmad, M. S. Abdul Rahman, J. Jasni, M. Z. A. Ab Kadir and H. Hizam, “Chemical enhancement materials for grounding purposes”, Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010), Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1106-1–1106-6.
- [47] S. C. Lim, C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir and S. D. Buba, “Preliminary results of the performance of grounding electrodes encased in bentonite-mixed concrete”, Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012.
- [48] S. C. Lim, C. Gomes and M. Z. A. Ab Kadir, “Characterizing of bentonite with chemical, physical and electrical perspectives for improvement of electrical grounding systems”, International Journal of Electrochemical Science, Vol. 8, pp. 11429–11447, August 2013.
- [49] S. C. Lim, M. Z. A. Ab Kadir, C. Gomes and N. Azis, “Steady state performance of improvised Ufer grounding practice”, Proceedings of the 32nd International Conference on Lightning Protection (ICLP 2014), Shanghai, China, October 11th–18th, 2014, pp. 572–580.
- [50] J. Liu, L. Y. Ye, X. P. Zhang and G. R. Xia, “The impulse property of grounding device covered with long-term chemical low resistivity material under high impulse current”, High Voltage Technique, No. 4, pp. 1–8, 1981. (in Chinese)
- [51] Y. Tu, J. He and R. Zeng, “Influences of Low-Resistivity-Materials on lightning impulse properties of grounding devices”, Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2004), Avignon, France, September 13th–16th, 2004.

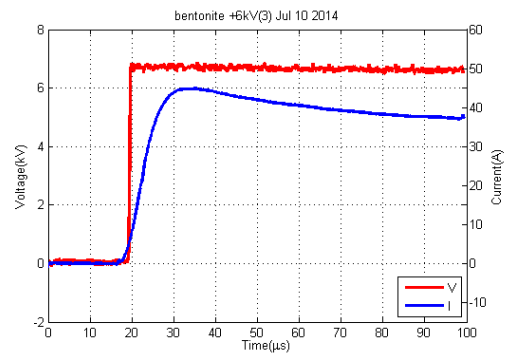
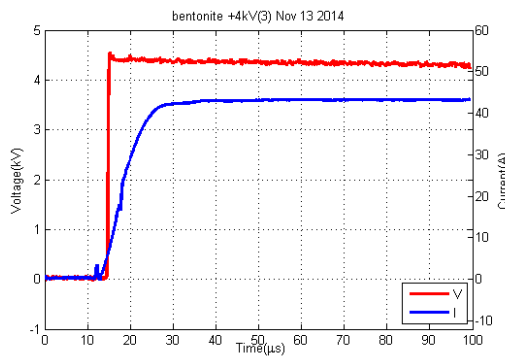
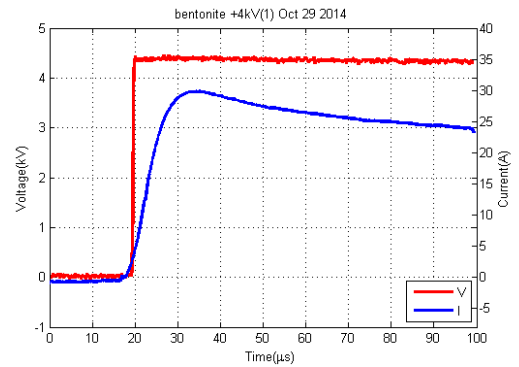
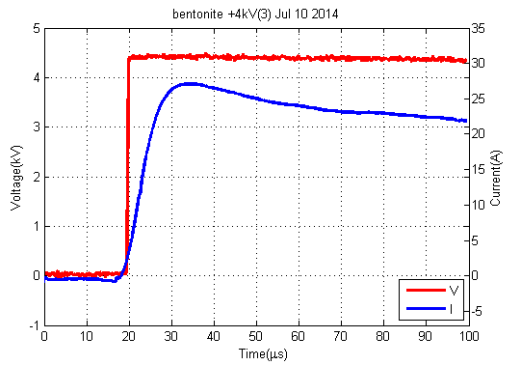
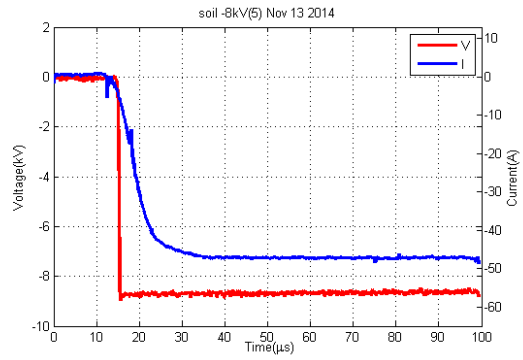
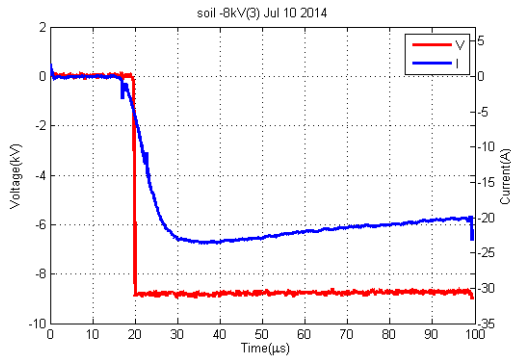
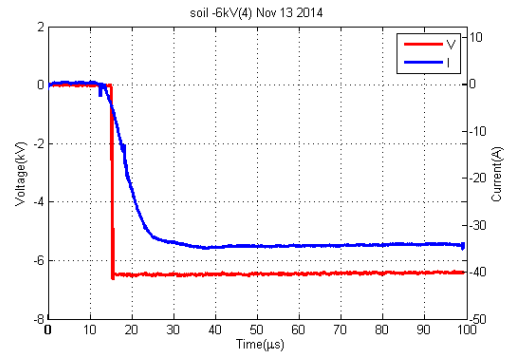
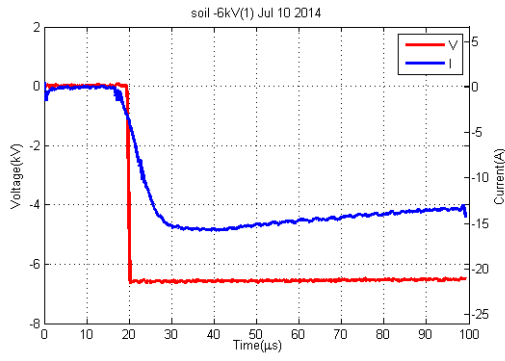
- [52] Y. Tu, J. He and R. Zeng, "Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, pp. 1706–1713, July 2006.
- [53] N. M. Nor, "Effect of enhancement materials when mixed with sand under high impulse conditions", *Proceedings of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Denpasar, Bali, Indonesia, June 26th–30th, 2006, pp. 916–919.
- [54] N. M. Nor, A. Haddad and H. Griffiths, "Performance of earthing systems of low resistivity soils", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 4, pp. 2039–2047, October 2006.
- [55] N. Kokkinos, J. Koutsoubis, A. Rousseau and D. Kokkinos, "Impulse testing of soil samples for lightning earthing design", *Proceedings of the 29th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2008)*, Uppsala, Sweden, June 23rd–26th, 2008, pp. 5a-6-1–5a-6-10.
- [56] D. Kokkinos, N. Kokkinos, J. Koutsoubis and A. Rousseau, "High frequency behavior of soil improver compounds", *Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2010)*, Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010, pp. 1400-1–1400-5.
- [57] V. Laverde, M. Z. A. Ab Kadir and C. Gomes, "Performance of backfill materials under impulse and AC testings", *Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012)*, Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, pp. 121-1–121-7.
- [58] S. C. Lim, C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir, G. Nourirad and Z. A. Malek, "Behaviour of backfill materials for electrical grounding systems under high voltage conditions", *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 811–826, June 2015.
- [59] W. Hu, S. Yu, R. Cheng and J. He, "A testing research on the effect of conductive backfill on reducing grounding resistance under lightning", *Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012)*, Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, pp. 155-1–155-4.
- [60] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds", *Electric Power Systems Research*, 2015, DOI: 10.1016/j.epsr.2015.11.032.

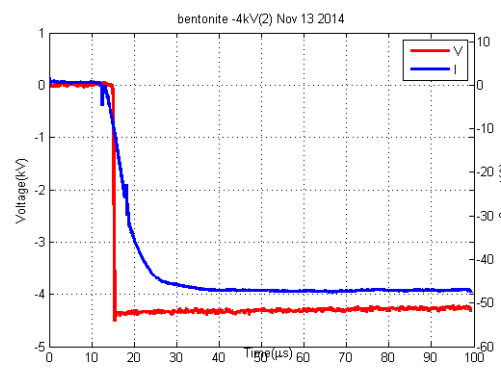
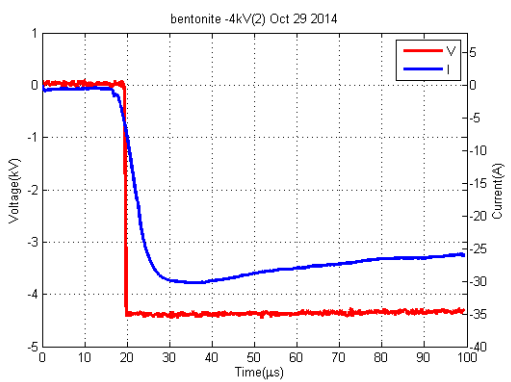
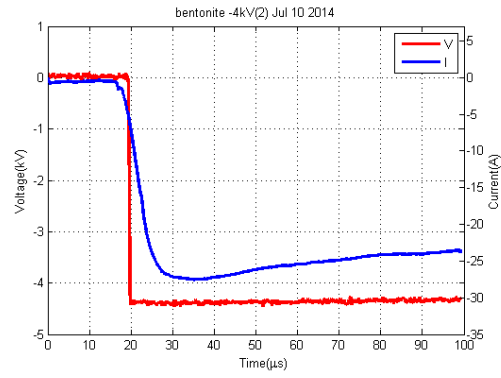
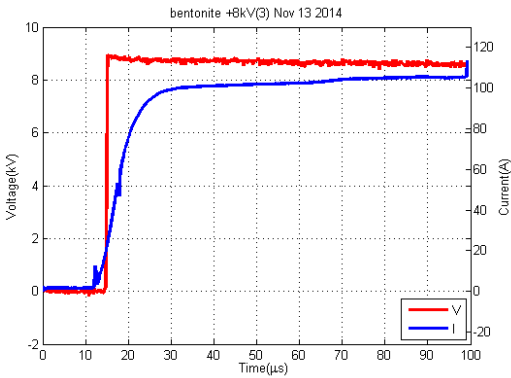
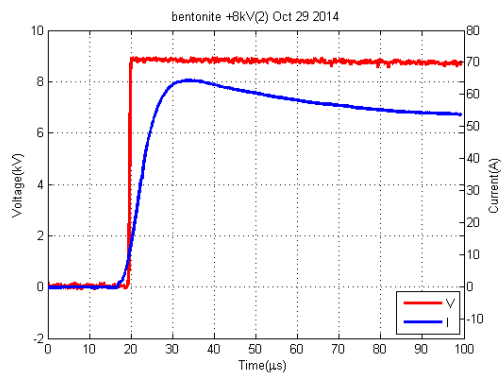
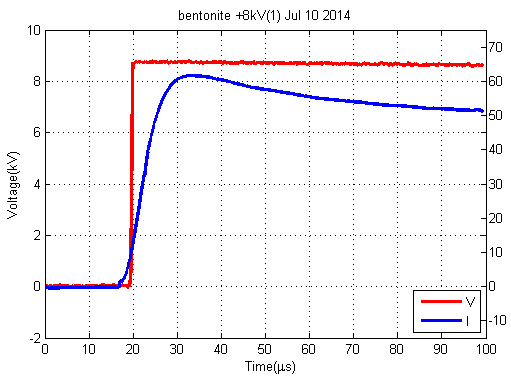
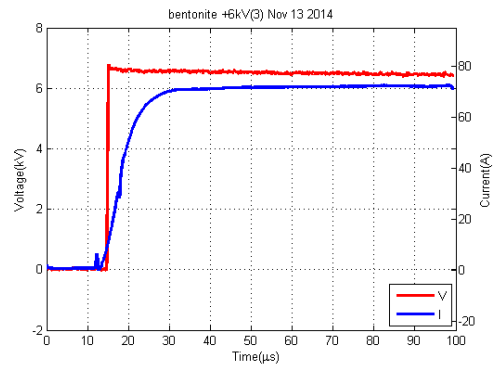
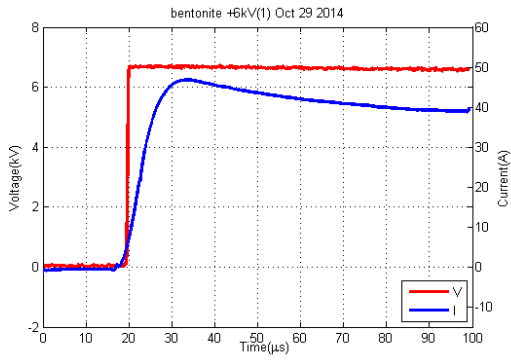
- [61] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση Μικροεδάφους σε Συστήματα Γείωσης Εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα 2011.
- [62] G. Fragoiannis, N. Papatheodorou and S. Stamataki, “Evaluation of Thermal Performance of Ground-Source Energy Systems. A geophysics supported approach”, Proceedings of the World Renewable Energy Congress (WREC), Glasgow, Scotland, UK, July 21st–25th, 2008.
- [63] <http://www.geo.auth.gr>, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας.
- [64] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Performance of ground enhancing compounds during the year”, Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Vienna, Austria, September 2nd–7th, 2012, paper 231.
- [65] Λεάρτ Α. Τόσκα, «Πειραματική Μελέτη Μεταβατικής Συμπεριφοράς Κατακόρυφων Ηλεκτροδίων Γείωσης Εγκιβωτισμένων σε Βελτιωτικά Υλικά Εδάφους», Διπλωματική Εργασία, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2015.
- [66] I. F. Gonos, F. V. Topalis, I. A. Stathopoulos, “Transient Impedance of Grounding Rods”, ISH 1999, London.
- [67] N. Mohamad Nor, A. Haddad, H. Griffiths, “Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses”, IEEE Transactions in Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006.

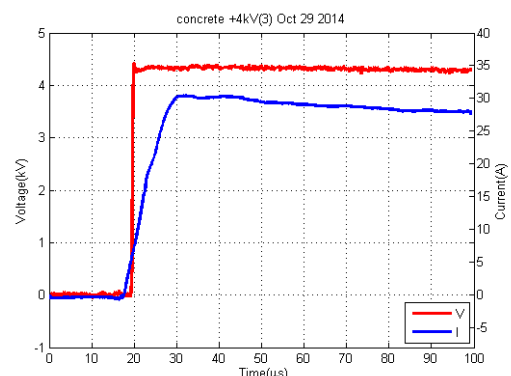
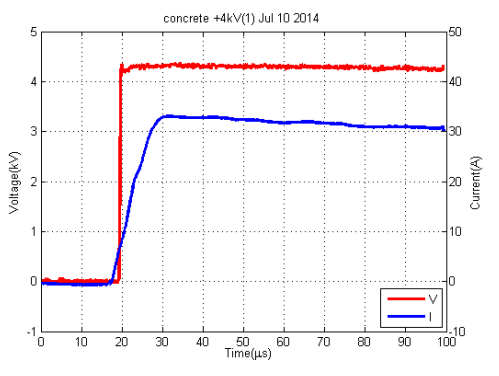
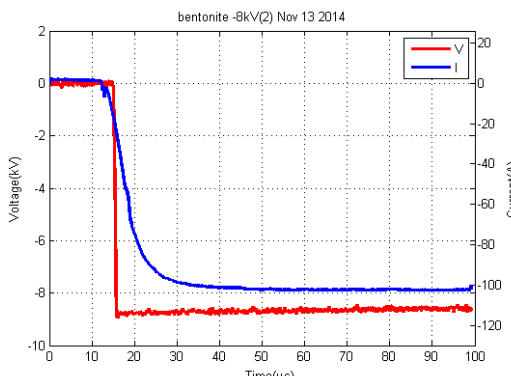
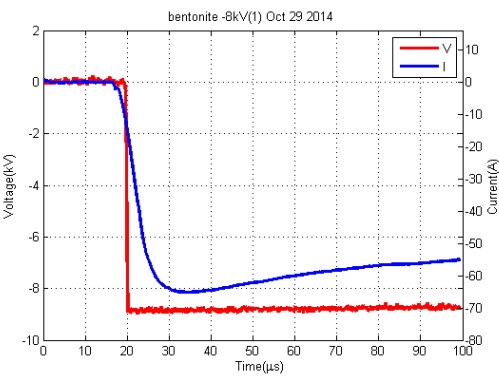
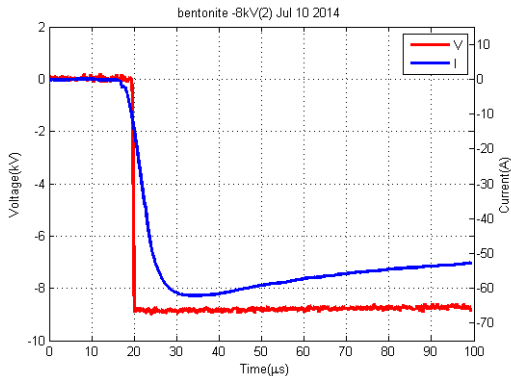
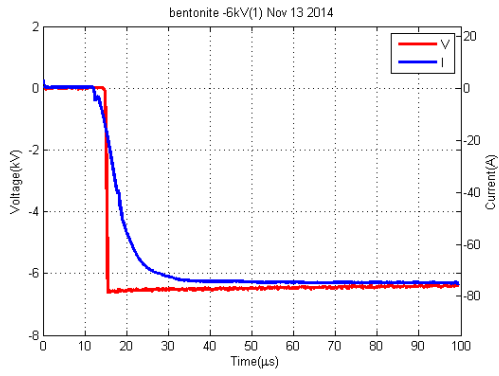
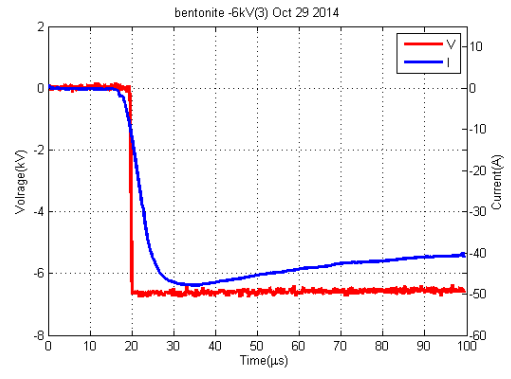
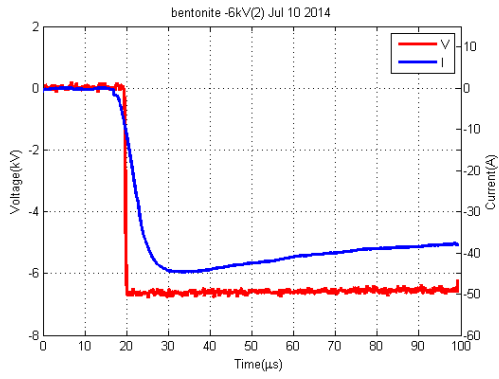
Παράρτημα

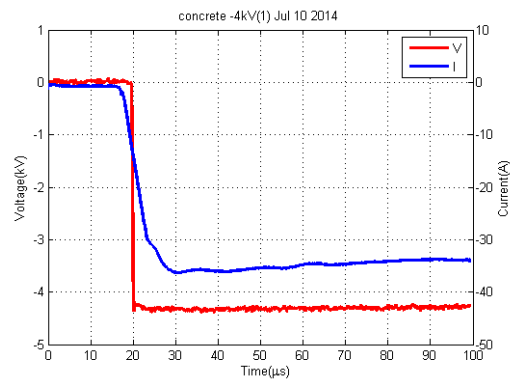
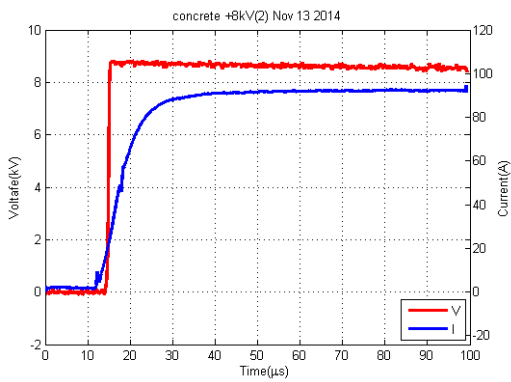
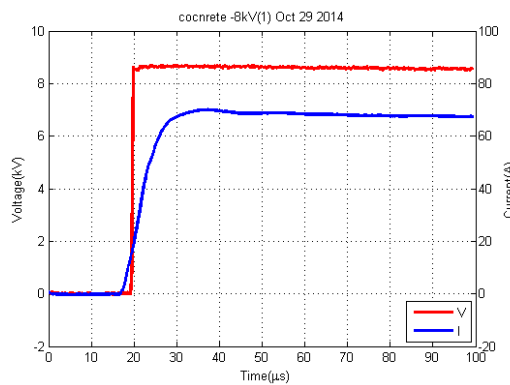
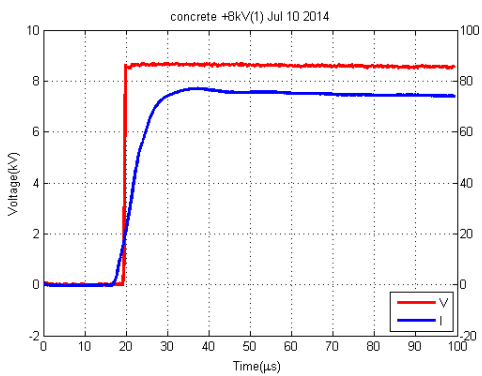
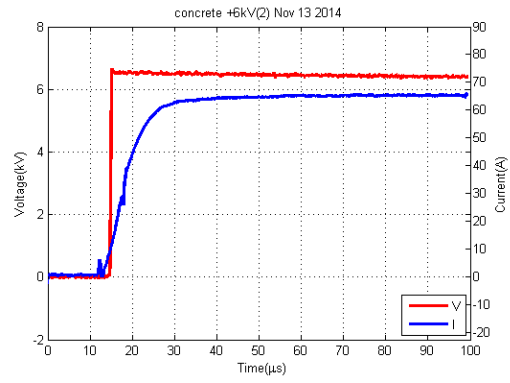
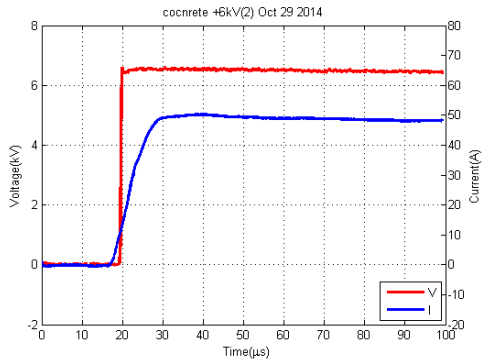
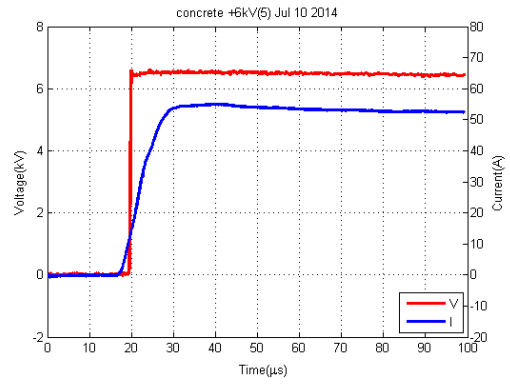
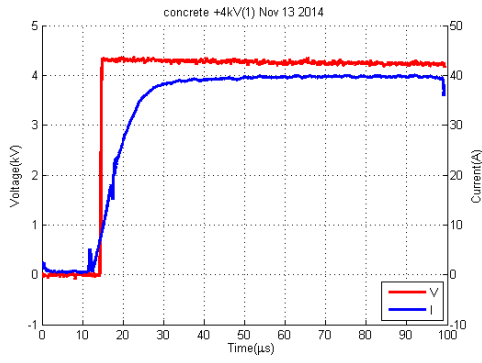
Π₁ Πειραματικά παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος από τις στάθμες των $\pm 4\text{kV}$, $\pm 6\text{kV}$, $\pm 8\text{kV}$

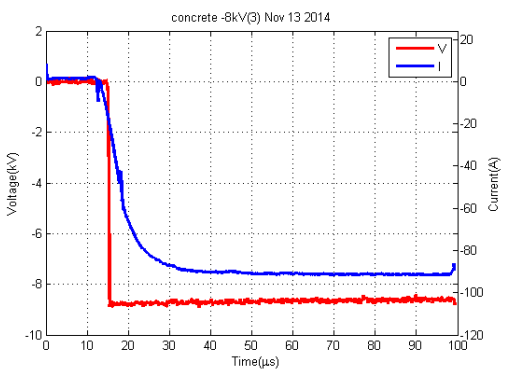
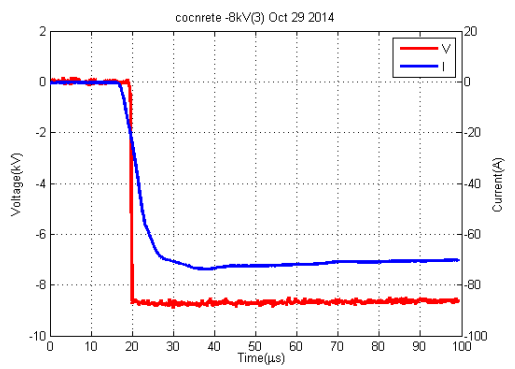
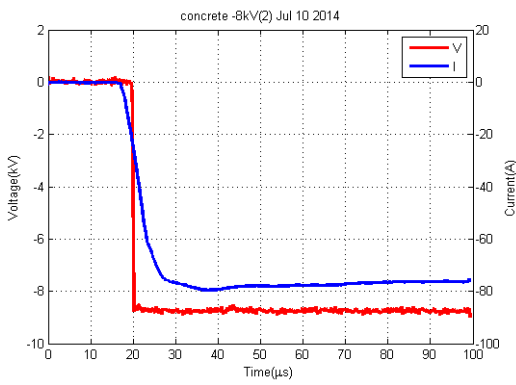
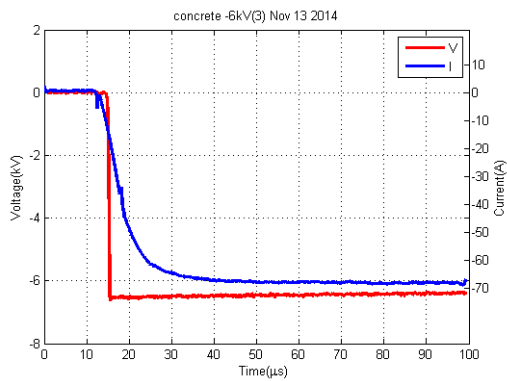
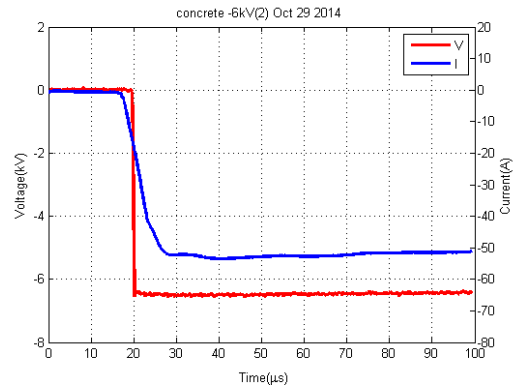
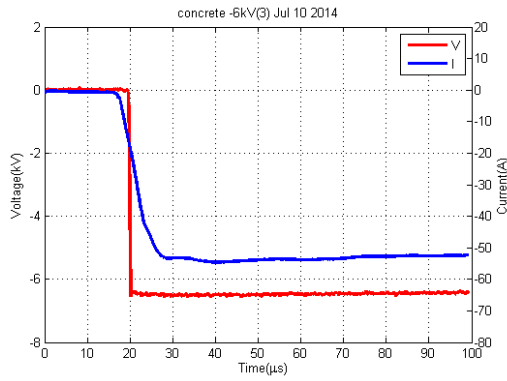
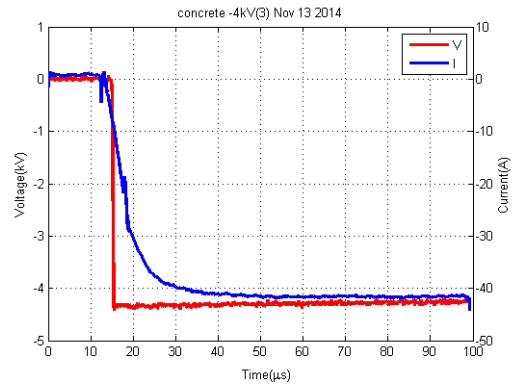
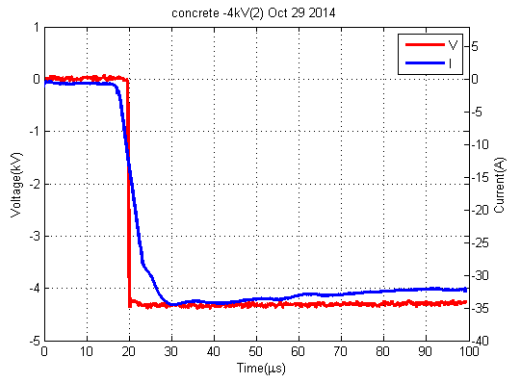


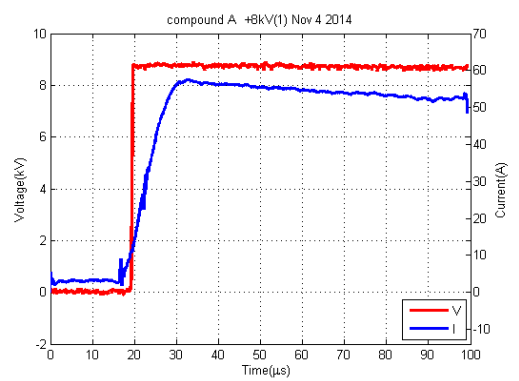
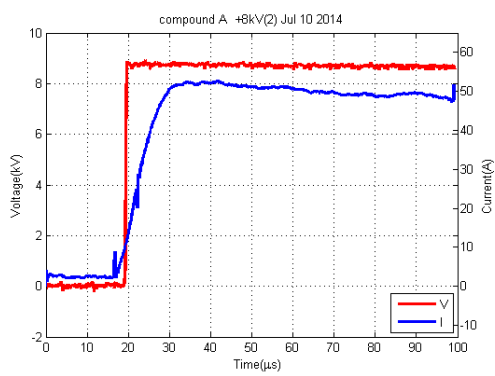
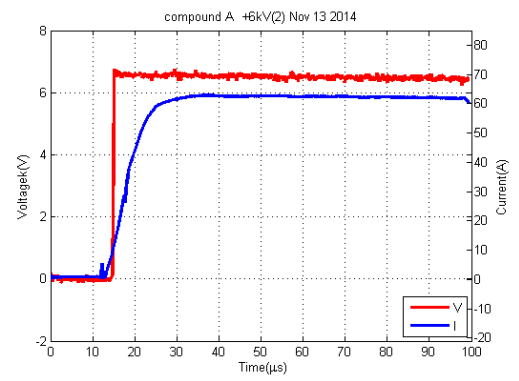
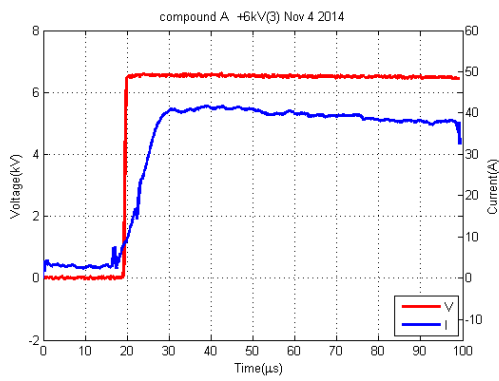
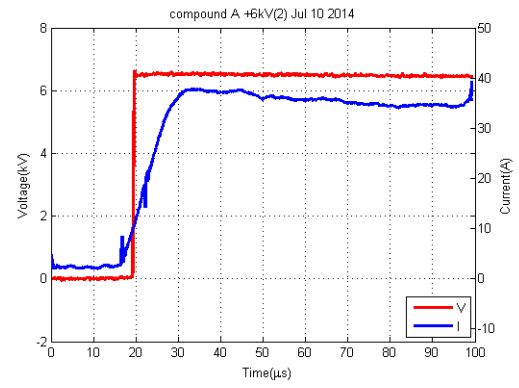
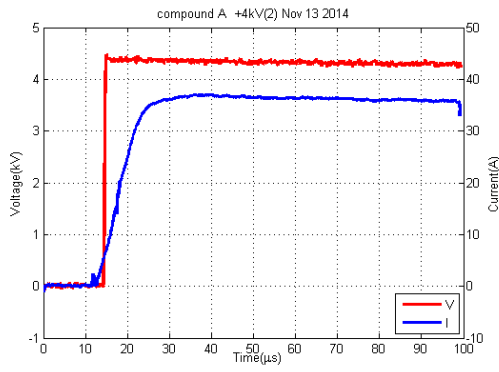
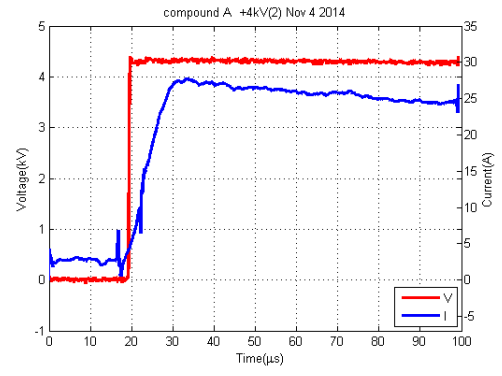
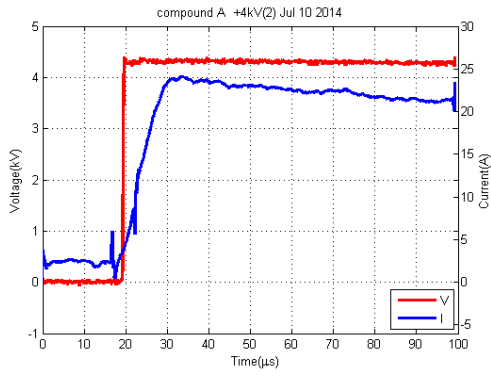


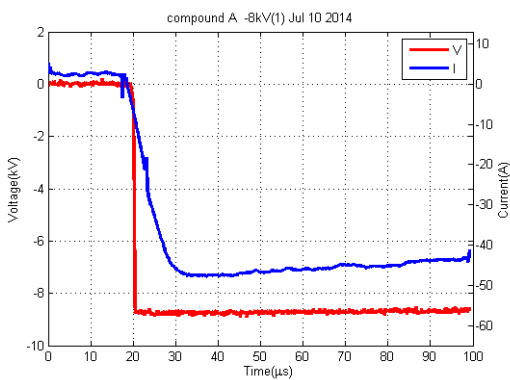
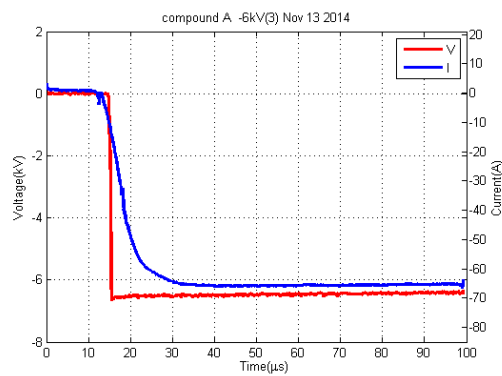
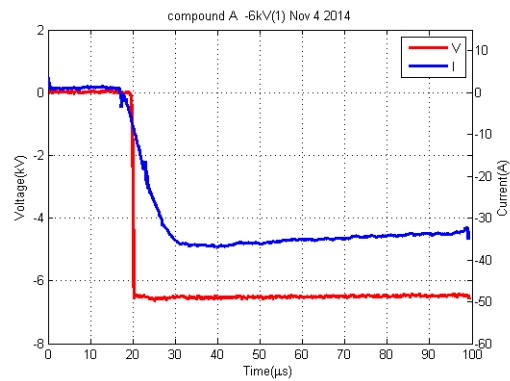
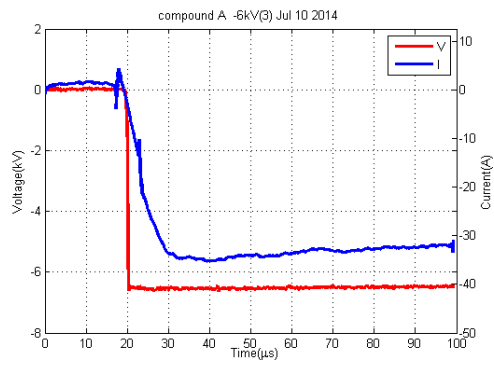
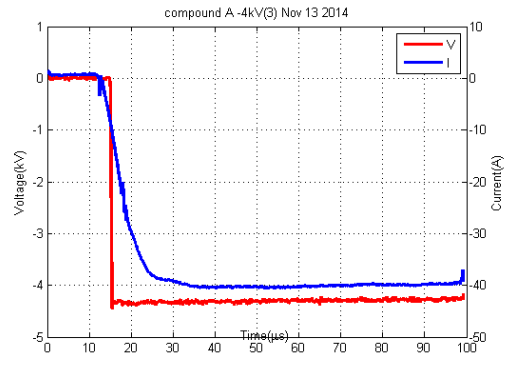
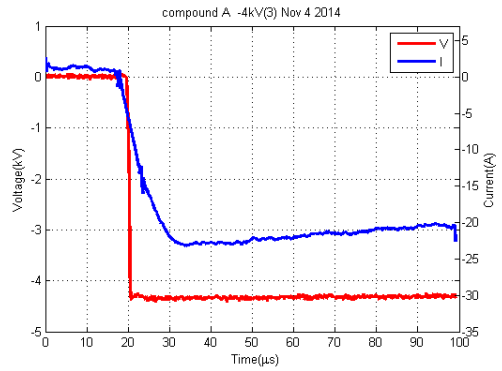
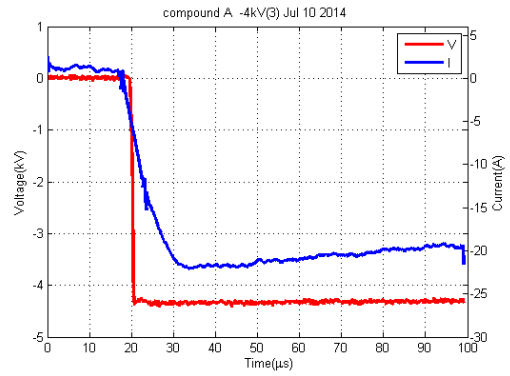
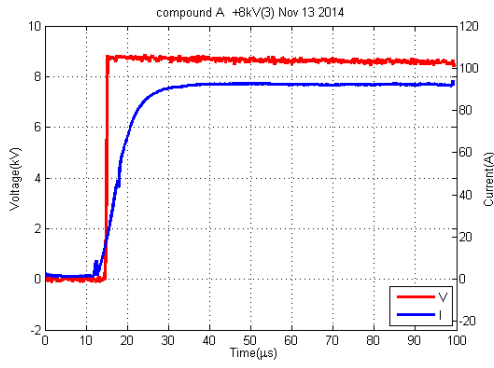


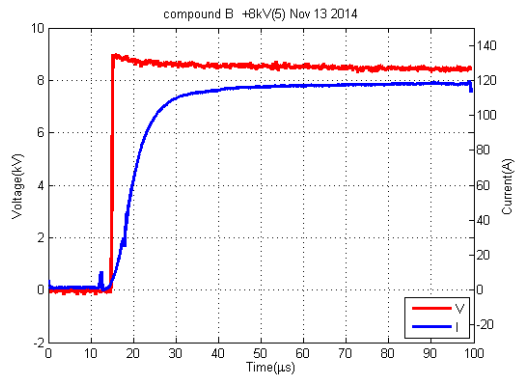
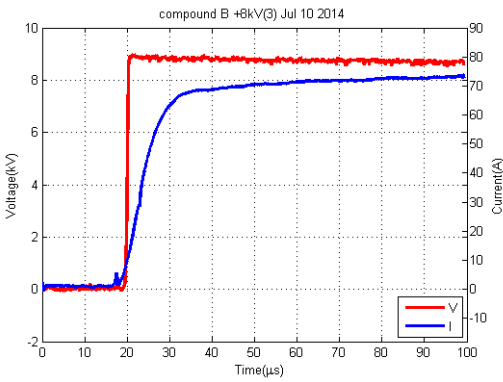
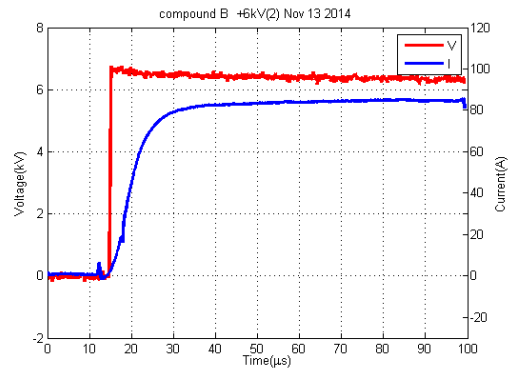
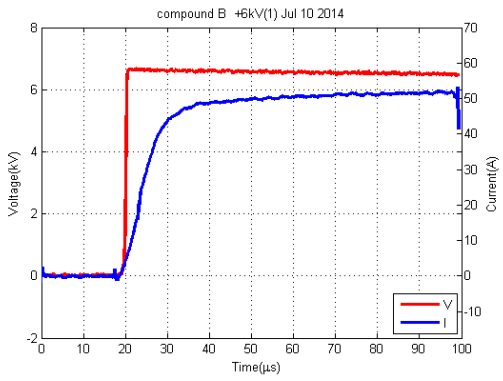
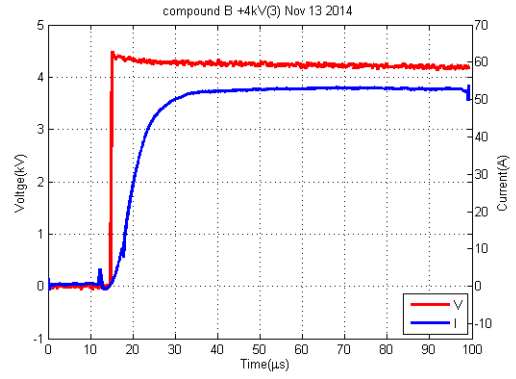
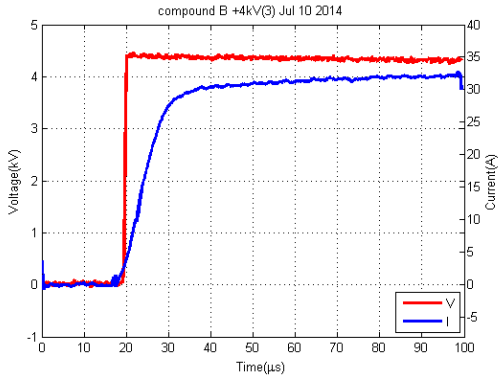
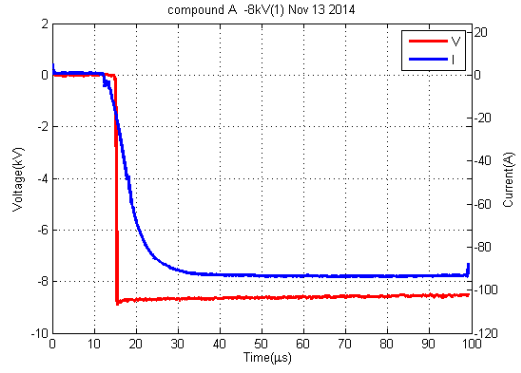
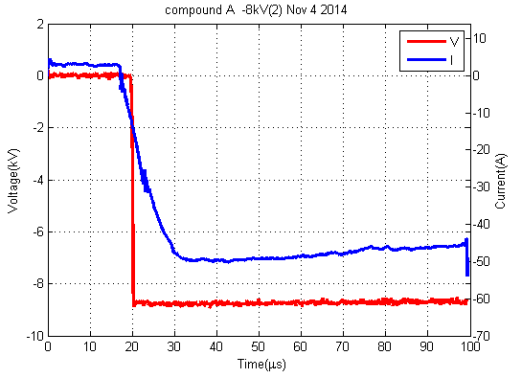


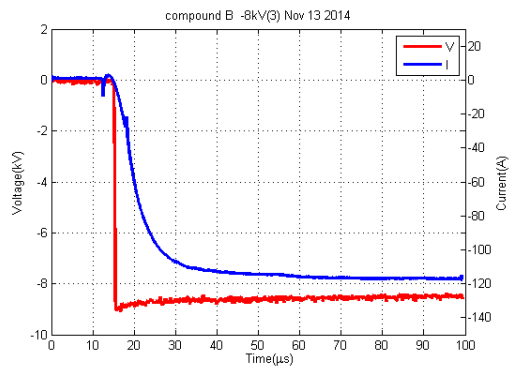
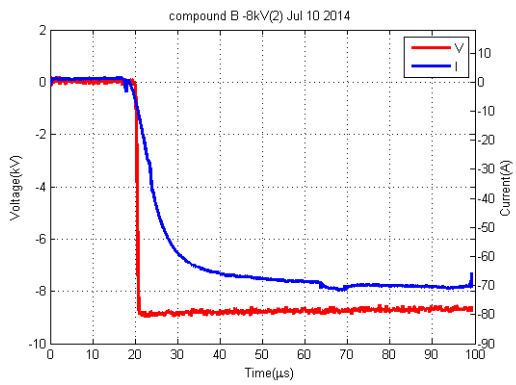
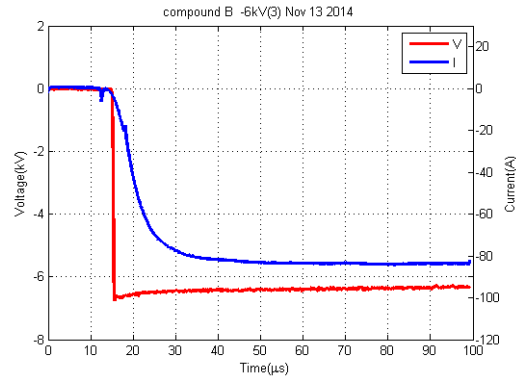
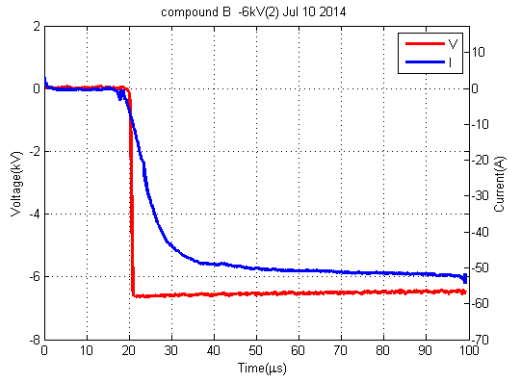
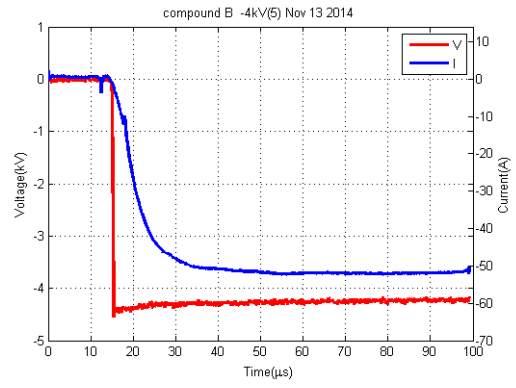
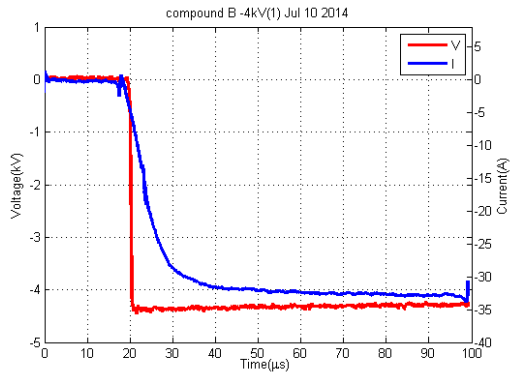












Π₂ Κώδικας κυκλωματικού στοιχείου MODEL

```
MODEL soil
  DATA
    Rho0
  VAR
    Iabs, Rrod
  INPUT
    Irod
  OUTPUT
    Rrod
  EXEC
    Iabs:=ABS(Irod)
    IF Iabs=0 OR t=0 THEN
      Rrod:=Rho0
    ELSE
      Rrod:=264.31*Iabs**(-0.11)
    ENDIF
  ENDEXEC
ENDMODEL
```