

# ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

**Μαρκαντωνάκη Γ. Χαριτωμένη**

Επιβλέποντες:

**Ιωάννης Αθ. Σταθοπουλος,**

**Φανη Η. Ασημακοπουλου,** Υποψήφια Δρ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

Τριμελής Επιτροπή:

**Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος,** Καθηγητης ΕΜΠ

**Φραγκίσκος Β. Τοπάλης,** Καθηγητης ΕΜΠ

**Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος,** Καθηγητης ΕΜΠ

## 1. Εισαγωγή

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η κυκλωματική προσέγγιση του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους σε συστήματα γείωσης. Αρχικά, εισάγονται και αναλύονται έννοιες, όπως η γείωση και τα είδη της, και περιγράφονται τα μοντέλα που έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται η μεταβατική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου γείωσης, όταν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο, και τα προτεινόμενα ισοδύναμα κυκλώματα του ιονισμού του εδάφους, τα οποία προσομοιώνονται στο πρόγραμμα PSCAD/EMTDC. Τέλος, στην εργασία αυτή περιγράφονται τα δεδομένα από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ και παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων που προέκυψαν από προσομοίωση.

## 2. Γενικά για ένα Σύστημα Γείωσης

Είναι γνωστό ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει έναν δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει τις πιθανότητες ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς. Συνεπώς, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα:

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

Ακολουθούν χρήσιμοι ορισμοί μεγεθών: [1]

**Γείωση** είναι η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιου μεγέθους, που να θεωρείται γη. Σκοπός της γείωσης είναι ο καθορισμός και η διατήρηση του δυναμικού της γης ή του αγώγιμου σώματος στους αγωγούς που συνδέονται με αυτό.

**Βηματική τάση** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω βηματισμού.

**Τάση επαφής** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ ενός γειωμένου μεταλλικού ικριώματος και ενός σημείου της επιφάνειας της γης σε οριζόντια απόσταση 1m .

**Ηλεκτρόδιο γείωσης ή γειωτής** είναι ένας αγωγός εμπηγμένος στη γη, ο οποίος διαχέει το ρεύμα στη γη.

**Αντίσταση γείωσης** είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου

σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή  $R = \frac{V}{I}$ . Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι για το λόγο αυτό μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου.

Η αντίσταση γείωσης, την οποία μετράμε σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους, και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Για τον λόγο αυτό, είναι επιθυμητό το μεγάλο μέγεθος των συστημάτων γείωσης και το υλικό των ηλεκτροδίων είναι κατά κανόνα χαλκός επικασσιτερωμένος ή γαλβανισμένος χάλυβας, για την αποφυγή οξειδωσης.

Οι γειώσεις ανάλογα με τον σκοπό ύπαρξής τους διακρίνονται στα παρακάτω τρία είδη:

**Γείωση λειτουργίας:** Ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους, ή για την αποφυγή υπερτάσεων. Αυτή διακρίνεται σε:

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

**Γείωση προστασίας:** Καλείται η 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 μιας εγκατάστασης ή κατασκευής τα οποία δεν συμμετέχουν στη λειτουργία της (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, 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 ή αντικεραυνικής προστασίας:** Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον προστατευόμενο χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων, των χώρων

επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοικτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη.

### 3. Μηχανισμοί Διάσπασης του Εδάφους

Παρόλο, που οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί [2] και η συμπεριφορά τους είναι πλήρως κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος), τότε μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους.

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

Σύμφωνα με το **θερμικό μηχανισμό**, που προτάθηκε από τους Snowden et al. [3], όταν το ρεύμα εγχέεται μέσω του συστήματος γείωσης στο έδαφος, λόγω του φαινομένου Joule, θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, που είναι παγιδευμένο στο έδαφος, και μείωση της ειδικής του αντίστασης. Καθώς το ρεύμα επιλέγει να ρέει μέσω του δρόμου μικρότερης αντίστασης θα διαρρεύσει εκείνα τα μονοπάτια, που παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση (και συνεπώς έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία) προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Στις περιοχές εκείνες, που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ξεπερνάει μία κρίσιμη τιμή, εκδηλώνεται διάσπαση του εδάφους.

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ο **ιονισμός του εδάφους** και προτάθηκε από τους Leadon et al [4]. Ο μηχανισμός του ιονισμού του εδάφους είναι ηλεκτρική διαδικασία και λαμβάνει χώρα, όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους.

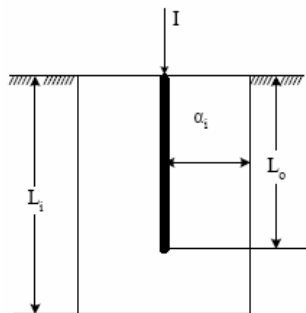
## 4. Μοντέλα για τον Ιονισμό του Εδάφους

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω.

### 4.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων

Οι Bellaschi et al. [5] και ο Πετρόπουλος [6] θεώρησαν ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου. Με άλλα λόγια, μοντελοποίησαν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων.

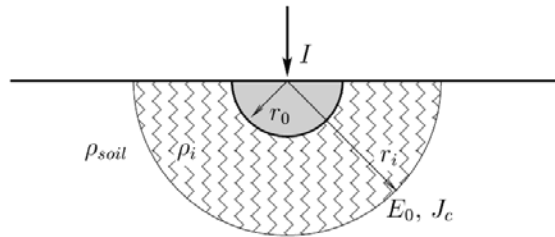
Ο Bellaschi και οι συνεργάτες του [7] έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκενώσεων και κατ' επέκταση τη μείωση της αντίστασης.



Σχήμα 1. Μοντέλο Bellaschi

Ο Γ. Μ. Πετρόπουλος σε άρθρο του [6] αναφέρει ότι η αντίσταση των γειώσεων υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων παίρνει τιμές κατά πολύ μικρότερες από εκείνες που μετρώνται με μεθόδους διέλευσης ασθενών εναλλασσομένων ρευμάτων. Η μείωση αυτή της αντίστασης αποδίδεται σε ηλεκτρικές εκκενώσεις, οι οποίες βραχυκυκλώνουν τη σχετικά υψηλή αντίσταση μεταξύ των αγωγίμων τμημάτων του εδάφους καταλαμβάνοντας έναν χώρο στον οποίο η αγωγιμότητα γίνεται πολύ μεγαλύτερη απ' ό τι στο υπόλοιπο έδαφος. Τότε το ηλεκτρόδιο εμφανίζεται σαν να έχει αυξημένες διαστάσεις

και συνεπώς παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση ως προς τη γη. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκενώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στον χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης έναν συγκεκριμένο χώρο εκκενώσεων για κάθε τάση, διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο χώμα με μία ημισφαιρική επιφάνεια, η ακτίνα του οποίου εξαρτάται από την τιμή της τάσης.



Σχήμα 2. Μοντέλο Πετρόπουλου

Η αντίσταση μονίμου καταστάσεως του ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο:

$$R_0 = \frac{\rho_{soil}}{2\pi r_0} \quad (1)$$

όπου  $R_0$  είναι η αντίσταση μονίμου καταστάσεως σε  $\Omega$

$r_0$  είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου σε m

$\rho_{soil}$  είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε  $\Omega m$

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

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

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

$I$  είναι το επιβαλλόμενο ρεύμα σε A

$r$  είναι η απόσταση από το ηλεκτρόδιο σε m

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

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_{soil}} \quad (3)$$

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

$E_c$  είναι η κρίσιμη ένταση ιονισμού σε  $V/m$

$\rho_{soil}$  είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε  $\Omega m$

Από τις εξισώσεις (1.2) και (1.3) μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της περιοχής ιονισμού, η οποία δίδεται από τον τύπο:

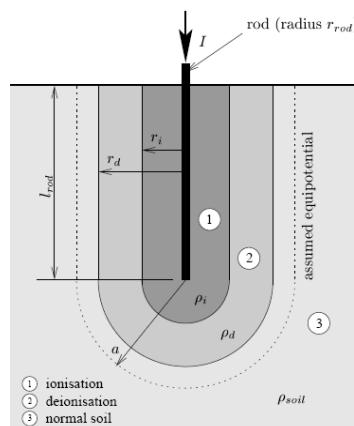
$$r_i = \sqrt{\frac{\rho_{soil} I}{2\pi E_c}} \tag{4}$$

### 4.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

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

Το 1974 οι Liew και Darveniza [8] πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων ειδών χώματος σε κρουστικά ρεύματα, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ιστροπικό, δηλαδή, η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις.

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



Σχήμα 3. Μοντέλο Liew και Darveniza

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

ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \varrho &= \varrho_{soil} \text{ για } J < J_c & (\alpha) \\ \varrho &= \varrho_{soil} e^{-t/\tau_1} \text{ για } J \geq J_c & (\beta) \end{aligned} \quad (5)$$

όπου  $\tau_1$  είναι η χρονική σταθερά ιονισμού κατά την αύξηση του ρεύματος

$t$  είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του ιονισμού

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

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

Η περιοχή 3 στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού και μπορούμε να γράψουμε:

$$\varrho = \varrho_{soil} \text{ για } r > r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (6)$$

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

$$\varrho = \varrho_i + (\varrho_{soil} - \varrho_i) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2}\right) \left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \text{ για } r < r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (7)$$

όπου

$\varrho_i$  είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης, όταν η πυκνότητα του ρεύματος

( $J$ ) είναι ίση με την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ρεύματος ( $J_c$ )

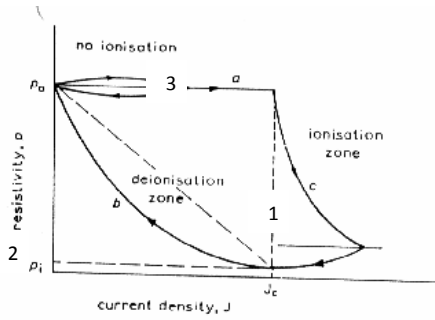
$\tau_2$  είναι η χρονική σταθερά απιονισμού

$t$  είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του απιονισμού

Στην περιοχή 1 για την οποία ισχύουν  $r < r_{cm}$  και  $J \geq J_c$ . εξακολουθούν να εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού και η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται σύμφωνα με την (7). Η διαδικασία αυτή θα σταματήσει όταν η πυκνότητα ρεύματος  $J$  θα πάρει τιμές μικρότερες από  $J_c$ , οπότε θα αρχίσει η διαδικασία του απιονισμού.

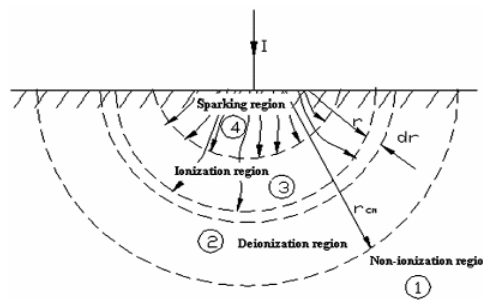
Το παρακάτω Σχήμα 4 δείχνει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης, καθώς το εγγεόμε-  
νο ρεύμα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται.





Σχήμα 4. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος.

Οι J. Wang, A.C. Liew και M. Darveniza σε εργασία τους το 2005 [9] εισήγαγαν και την περιοχή όπου εκδηλώνονται τόξα. Χάρην απλότητας θεώρησαν ότι οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ημισφαιρικές. Κατ’ αυτόν τον τρόπο η συνολική αντίσταση μπορεί να υπολογισθεί αθροίζοντας το στοιχειώδη ημισφαιρικά κελύφη πλάτους dr.



Σχήμα 5. Μοντέλο Wang: (1) μη ιονισμένη περιοχή, (2) περιοχή απιονισμού, (3) περιοχή ιονισμού, (4) περιοχή τόξων

Μπορούν να θεωρηθούν 4 περιοχές:

Η περιοχή 1, όπου  $r > r_{cm}$  και  $J < J_c$ , στην οποία το έδαφος δεν ιονίστηκε καθόλου και επομένως η τιμή της ειδικής αντίστασης παρέμεινε σταθερή ( $\rho_{soil}$ ).

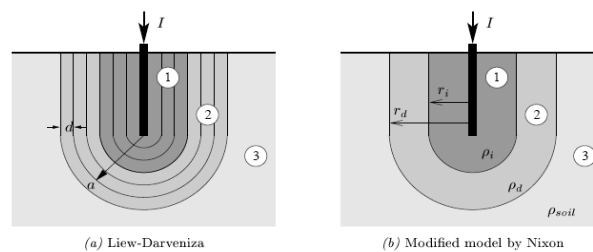
Η περιοχή 2, όπου  $r < r_{cm}$  και  $J < J_c$ . Σε αυτήν την περιοχή η πυκνότητα του ρεύματος είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή ιονισμού και η τιμή της ειδικής αντίστασης ανακτά την αρχική τιμή της σύμφωνα με τον τύπο (7).

Η περιοχή 3, όπου  $r < r_{cm}$  και  $J_s > J \geq J_c$ . Σε αυτήν την περιοχή θα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα ο ιονισμός μέχρι τη στιγμή που  $J = J_c$  οπότε και θα ξεκινήσει η διαδικασία απιονισμού.

Η περιοχή 4, όπου  $r < r_{cm}$  και  $J \geq J_s$  στην οποία εμφανίζονται τόξα και η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μηδενική.

Το 2006 ο K.J. Nixon [10] πρότεινε μία απλοποίηση του μοντέλου των Liew – Darveniza

(1974). Το μοντέλο των Liew - Darveniza υπέθετε ότι η ζώνη ιονισμού (απιονισμού αντίστοιχα) αποτελείται από στοιχειώδη κελύφη, στα οποία η πυκνότητα ρεύματος μεταβάλλεται κάθε στιγμή, και συνεπώς για τον υπολογισμό της συνολική αντίστασης της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η αντίσταση κάθε κελύφους. Ο Νίχον εκτίμησε ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) μπορεί να θεωρηθεί ίδια σε όλο τον όγκο της ζώνης και μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα ρεύματος που ρέει στο εξωτερικό όριο της ζώνης. Στο Σχήμα 6 μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαφορά μεταξύ του μοντέλου των Liew και Darveniza και του μοντέλου που πρότεινε ο Νίχον.



Σχήμα 6. Διαφορές μεταξύ του μοντέλου των Liew – Darveniza και του μοντέλου του Nixon (1) Περιοχή ιονισμού, (2) Περιοχή απιονισμού, (3) Περιοχή όπου δεν έχει λάβει χώρα ο ιονισμός

### 4.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του ιονισμού έχει προταθεί από τους Sekioka et al [11]. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας, εφόσον η ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με τις εκφορτίσεις στον αέρα.

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

Οι Cooray et al. [12] εισήγαγαν ένα φυσικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων. Στο μοντέλο τους λαμβάνουν υπ' όψιν τη δημιουργία ιονισμένων οχρών εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση

αυτών των οχετών, ως συνάρτηση της ροής του ρεύματος μέσω αυτών, διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή θερμότητας και την απαγωγή της από τους οχετούς και την εξαρτημένη από τη θερμοκρασία αγωγιμότητα του αέρα.

## 5. Ιονισμός – Ηλεκτρόδια Γείωσης

Ο ιονισμός του εδάφους [1] είναι μία διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα όταν η πυκνότητα ρεύματος, που εγχέεται από το σύστημα γείωσης στο έδαφος, είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει μία ένταση ηλεκτρικού πεδίου αρκετά υψηλότερη από μια κρίσιμη τιμή  $E_c$ .

### 5.1 Κρουστική σύνθετη αντίσταση

Η κρουστική (μεταβατική) σύνθετη αντίσταση ενός συστήματος γείωσης ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης του ρεύματος ως προς την άπειρη γη προς το εγχεόμενο ρεύμα [8], [13], [14].

$$\tilde{z}(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (8)$$

Αυτή η τιμή εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη μορφή του επιβαλλόμενου ρεύματος.

### 5.2 Κρουστική συμπεριφορά ηλεκτροδίου γείωσης

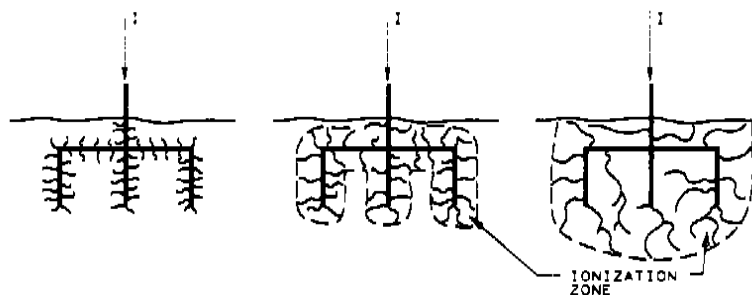
Η συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, που διεγείρονται από μεγάλου πλάτους κρουστικά ρεύματα (όπως τα κεραυνικά ή τα οφειλόμενα σε σφάλματα) ουσιαστικά διαφέρει από εκείνη που παρατηρείται για ρεύματα μικρών συχνοτήτων και μικρού πλάτους και έχει αποτελέσει πεδίο εκτεταμένης έρευνας από πλήθος ερευνητών. Το κρίσιμο μέγεθος που καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης σε κεραυνικά ρεύματα ή ρεύματα σφάλματος είναι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση ή αλλιώς κρουστική αντίσταση του συστήματος γείωσης. Από πειράματα έχει παρατηρηθεί ότι η κρουστική αντίσταση λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από την τιμή της αντίστασης γείωσης μονίμου καταστάσεως. Από την άλλη, σε πλήθος πειραμάτων έχει παρατηρηθεί το

φαινόμενο η μεταβατική σύνθετη αντίσταση γείωσης να εμφανίζει τιμές μικρότερες από τις τιμές της μόνιμης κατάστασης. Η συμπεριφορά αυτή έχει αποδοθεί στο φαινόμενο της διάσπασης του εδάφους.

Το 1928 ο Towne [15] διεξήγαγε κρουστικές δοκιμές σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια. Διαπίστωσε ότι η αντίσταση γείωσης σε κρουσικό ρεύμα είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση γείωσης στη μόνιμη κατάσταση. Μάλιστα όσο αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης τόσο μειώνεται η τιμή της μεταβατικής αντίστασης.

Το 1958 ο Korsuncev [16] εφήρμοσε τη μέθοδο ομοιότητας για τον υπολογισμό των μεταβατικών χαρακτηριστικών διαφόρων ηλεκτροδίων.

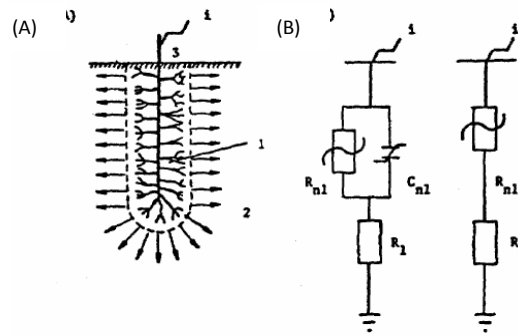
Ο Korsuncev υπέθεσε ότι η ζώνη εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο, ότι η  $E_c$  ορίζει την περιοχή εντός της οποίας η ειδική αντίσταση θεωρείται μηδενική και αγνόησε φαινόμενα της χρονικής υστέρησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, καθώς το εγχεόμενο ρεύμα αυξάνεται, η ζώνη ιονισμού γύρω από το σύστημα γείωσης συνεχώς επεκτείνεται.



Σχήμα 7. Ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού γύρω από ηλεκτρόδιο

Οι Kosztaluk et al. [17] πρότειναν ένα αναλογικό μοντέλο υπολογισμού της κρουστικής αντίστασης γείωσης, που λαμβάνει υπ' όψιν του τόσο το θερμικό μηχανισμό όσο και το μηχανισμό ιονισμού.

Έτσι, η κρουστική αντίσταση μπορεί ν' αναπαρασταθεί από ένα μη γραμμικό στοιχείο  $Z_n$ , που περιγράφει τη ζώνη όπου εκδηλώνονται τόξα, και ένα γραμμικό στοιχείο  $R_l$  εν σειρά με το  $Z_n$ , το οποίο προσομοιώνει τον ηλεκτρολυτικό μηχανισμό. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται οι ζώνες και τα ισοδύναμα κυκλώματά τους. Το μη γραμμικό στοιχείο  $Z_n$  μοντελοποιείται από μία μη γραμμική αντίσταση  $R$  παράλληλα με έναν μη γραμμικό πυκνωτή  $C_n$  (η συμβολή του οποίου μπορεί να αμεληθεί).



Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση της ζώνης εκδήλωσης τόξων (1) και της ζώνης εκδήλωσης του θερμικού μηχανισμού (2) ενός απλού ηλεκτροδίου (A) και κυκλωματικά ισοδύναμα αυτών (B)

Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι για υψηλές τιμές της τάσης ο χρόνος μετώπου της τάσης και του ρεύματος ήταν αρκετά μικρός και μάλιστα η κυματομορφή του ρεύματος παρουσίαζε δύο μέγιστες τιμές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9. Αυτή η 'δεύτερη' κορυφή της κυματομορφής του ρεύματος συμβαίνει με κάποια χρονική καθυστέρηση και είναι ένδειξη του φαινομένου του ιονισμού.

Από την κυματομορφή του ρεύματος είναι δυνατόν να υπολογιστούν δύο χρόνοι  $t_1$  και  $t_2$ , που αντιστοιχούν στη στιγμή έναρξης του ιονισμού και στο δεύτερο μέγιστο του ρεύματος. Καθώς μάλιστα αυξάνεται η αγωγιμότητα του χώματος και η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, οι χρόνοι αυτοί μειώνονται. Βάσει των παραπάνω όρισαν δύο τιμές αντίστασης: Μία τιμή που περιγράφει την αντίσταση πριν την εκδήλωση του φαινομένου του ιονισμού ( $R_1(t)$ ) και μία που αντιστοιχεί στην μεταβατική αντίσταση όταν έχει συμβεί ο ιονισμός και μάλιστα έχει λάβει τη μέγιστη έκτασή του ( $R_2(t)$ ), οι οποίες περιγράφονται από τους τύπους:

$$R_1 = \frac{V_{I_{peak1}}}{I_{peak1}} \tag{9}$$

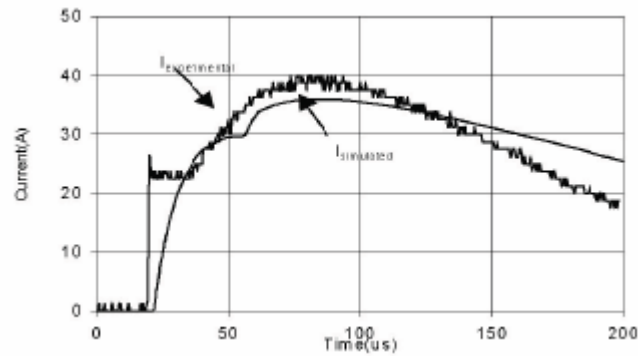
$$R_2 = \frac{V_{I_{peak2}}}{I_{peak2}} \tag{10}$$

όπου  $I_{peak1}$  είναι η πρώτη μέγιστη τιμή του ρεύματος

$I_{peak2}$  είναι δεύτερη μέγιστη τιμή του ρεύματος

$V_{I_{peak1}}$  είναι τάση τη στιγμή που συμβαίνει το πρώτο μέγιστο του ρεύματος

$V_{I_{peak2}}$  είναι τάση τη στιγμή που συμβαίνει το πρώτο μέγιστο του ρεύματος



Σχήμα 9. Τα ίχνη των δύο κορυφών για την κυματομορφή του ρεύματος

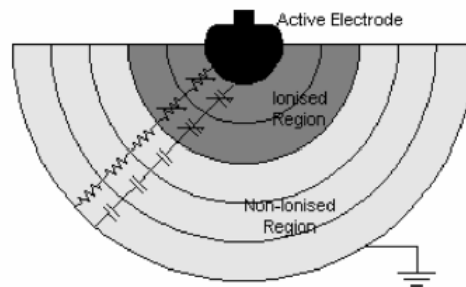
Οι συγγραφείς θεώρησαν ότι η ζώνη ιονισμού επεκτείνεται ομοιόμορφα, η σταθερά ιονισμού είναι τι και ότι ακολουθεί ισοδυναμική κατανομή σε κάθε στοιχειώδες κέλυφος γύρω από το ηλεκτρόδιο, η αντίσταση κάθε κελύφους θα μειώνεται, καθώς το έδαφος ιονίζεται. Η δυναμική αυτού του μηχανισμού μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση :

$$R(t) = R_1(t) \left( \frac{R_2(t)}{R_1(t)} + e^{-t/\tau_i} \right) \quad (11)$$

όπου  $R_1$  είναι η αντίσταση πριν τον ιονισμό

$R_2$  είναι η αντίσταση μετά τον ιονισμό

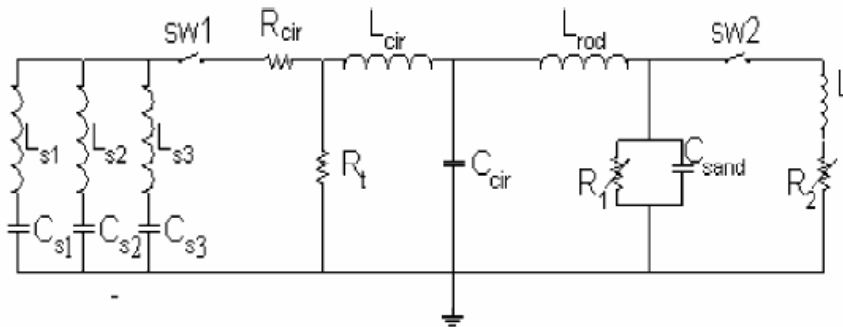
$\tau_i$  είναι η χρονική σταθερά εξέλιξης του ιονισμού



Σχήμα 10. Σχηματική αναπαράσταση του δοχείου δοκιμών και των ζωνών ιονισμού

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται τα ισοδύναμα ηλεκτρικά στοιχεία, για την προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού. Όπως φαίνεται, το έδαφος αναπαρίσταται από στοιχειώδεις παράλληλες αντιστάσεις (η τιμή των οποίων καθορίζεται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και τις διαστάσεις των περιοχών) ανάλογες προς την  $R_1$  και χωρητικότητες που αντιστοιχούν στην αγωγιμότητα του εδάφους. Η περιοχή του ιονισμού αντιπροσωπεύεται από αντιστάσεις με πολύ μικρότερες τιμές που σε ιδανική προσομοίωση τείνουν προς το μηδέν. Καθώς η περιοχή του ιονισμού αυξάνεται, η συνολική αντίσταση του υπό

δοκιμή εδάφους μειώνεται (αντίστοιχα προς την  $R_2$ ). Αυτό το σκεπτικό οδηγεί στη μορφοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος, που φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 11.

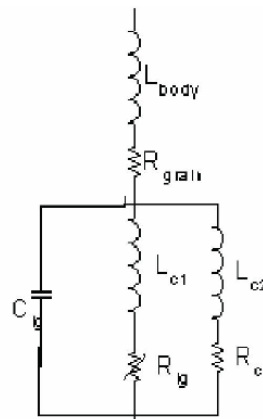


Σχήμα 11. Ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους

Το ισοδύναμο κύκλωμα [18] αποτελείται από δύο κύριους παράλληλους κλάδους, που προσομοιώνουν την κατάσταση πριν τον ιονισμό και λαμβάνουν υπ' όψιν τα φαινόμενα του ιονισμού συμπεριλαμβάνοντας την σταθερά καθυστέρησης του φαινομένου. Οι δύο αυτοί κλάδοι αποτελούνται από ένα κύκλωμα αντίστασης-πυκνωτή, και μάλιστα η αντίσταση είναι εκείνη που έχει πολύ έντονη μη γραμμική χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος. Κατά τον ιονισμό, το ρεύμα που διαρρέει τη μεταβλητή αντίσταση  $R_1$  είναι εκείνο που κυριαρχεί και έτσι ο πυκνωτής μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν παίζει μεγάλο ρόλο. Συμπερασματικά οι δύο κύριοι παράλληλοι κλάδοι προσομοιώνουν την προ-ιονισμού κατάσταση, η οποία μπορεί να παρασταθεί από την  $R_1$  και χωρητικότητες,  $C_{sand}$ , και λαμβάνουν υπόψη το στάδιο με τις επιδράσεις του ιονισμού, που παριστάνεται από αρκετά χαμηλότερες αντιστάσεις,  $R_2$ . Εδώ η χωρητικότητα εξαλείφεται εξαιτίας της χαμηλής της επίδρασης στο στάδιο του ιονισμού. Από την άλλη πλευρά, ένα επαγωγικό στοιχείο  $L$  εμφανίζεται για να ληφθεί υπόψη η χρονική καθυστέρηση μέχρι την έναρξη του ιονισμού  $t_1$ . Όμως αυτή η χρονική καθυστέρηση είναι ανεξάρτητη των πλατών της τάσης. Ο διακόπτης SW1 αναπαριστά το σπινθηριστή της κρουστικής γεννήτριας, και ο SW2 χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού. Κατά τους συγγραφείς η παράλληλη χωρητικότητα  $C_{sand}$  δεν έχει επίδραση στα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και συνεπώς μπορεί να μη ληφθεί υπόψη.

Για χρονικές καθυστερήσεις που εξαρτώνται από τις εφαρμοζόμενες τάσεις οι Haddad et al πρότειναν το ισοδύναμο μοντέλο καθοδικού αλεξικέραυτου ZnO [19]. Όπως φαίνε-

ται στο Σχήμα 12, το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα αποτελείται από δύο τμήματα: ένα που μεταφέρει το υψηλού πλάτους ρεύμα εκφόρτισης και αποτελείται από μια υψηλής τιμής μη γραμμική αντίσταση  $R_{lg}$  και μια χαμηλή αυτεπαγωγή  $L_{c1}$ , ενώ ένα παράλληλο δίκτυο υπάρχει για να μεταφέρει τα ρεύματα χαμηλού πλάτους και αποτελείται από μια γραμμική αντίσταση  $R_c$  και μια υψηλή αυτεπαγωγή  $L_{c2}$ .



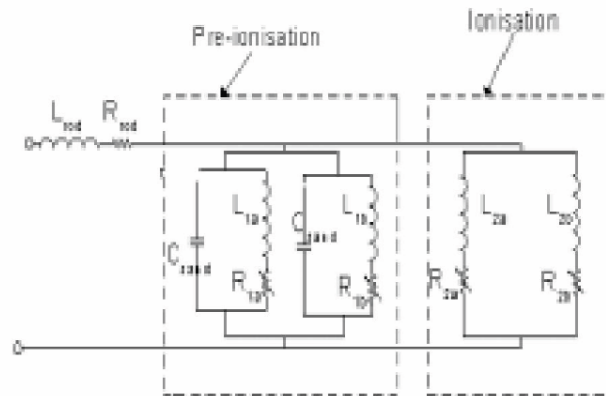
Σχήμα 12. Προτεινόμενο ισοδύναμο κύκλωμα καθοδικού αλεξικέραυτου ZnO

Παρατηρούμε ότι τα ισοδύναμα κυκλώματα των Σχημάτων 11 και 12 είναι παρόμοια. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι για το μοντέλο του καθοδικού αλεξικέραυτου ZnO οι συγγραφείς έχουν χρησιμοποιήσει αυτεπαγωγή και στους δύο παράλληλους κλάδους για να λάβουν υπόψη τις χρονικές καθυστερήσεις, καθώς τα επίπεδα τάσης αυξάνονται.

Οι συγγραφείς εκμεταλλευόμενοι την ομοιότητα της διαδικασίας του ιονισμού με αυτή της συμπεριφοράς των καθοδικών αλεξικέραυνων πρότειναν ένα βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους [19], που θα περιλαμβάνει αυτεπαγωγές και στα δύο παράλληλα δίκτυα έτσι ώστε να λάβουν υπόψη την επίδραση της χρονικής καθυστέρησης.

Το νέο αυτό βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 13, όπου υψηλές αυτεπαγωγές ( $L_{1b}$  και  $L_{2b}$ ) είναι σε σειρά με τις  $R_{1b}$  και  $R_{2b}$  για να αναπαραστήσουν το στάδιο προ-ιονισμού που μεταφέρει χαμηλά πλάτη ρεύματος, ενώ χαμηλές αυτεπαγωγές ( $L_{1a}$  και  $L_{2a}$ ) είναι σε σειρά με τις  $R_{1a}$  και  $R_{2a}$  για να αναπαραστήσουν το στάδιο ιονισμού που μεταφέρει υψηλά πλάτη ρεύματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές  $R_{1a}$ ,  $R_{2a}$ ,  $R_{1b}$ ,  $R_{2b}$  προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα.

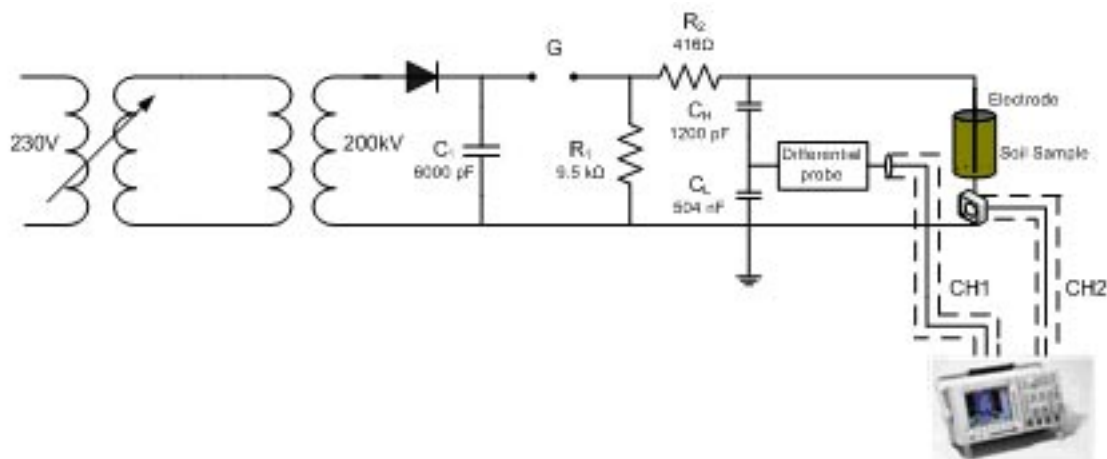




Σχήμα 13. Βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα του ιονισμού του εδάφους

## 6. Πειραματική Διάταξη – Πειραματική Διαδικασία

Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας.



Σχήμα 14. Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας Messwandler-Bau GmbH Bamberg
- τράπεζα χειρισμών StAG MWB 616
- σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator 3kW
- διαφορικός καταμεριστής MD 200 Schaffner WS-30
- αμπεροτσιμπίδα Current Monitor Pearson Model 8260
- παλμογράφος Tektronix TDS 3052

- ομοαξονικά καλώδια Ecoflex
- κλωβός Faraday
- υγρόμετρο – θερμόμετρο TESTO 625
- digital power meter WT210, Yokogawa



Σχήμα 15. Λυόμενη μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια



Σχήμα 16. Διαφορικός καταμεριστής MD200 Schaffner



Σχήμα 17. Αμπεροτσιμπίδα



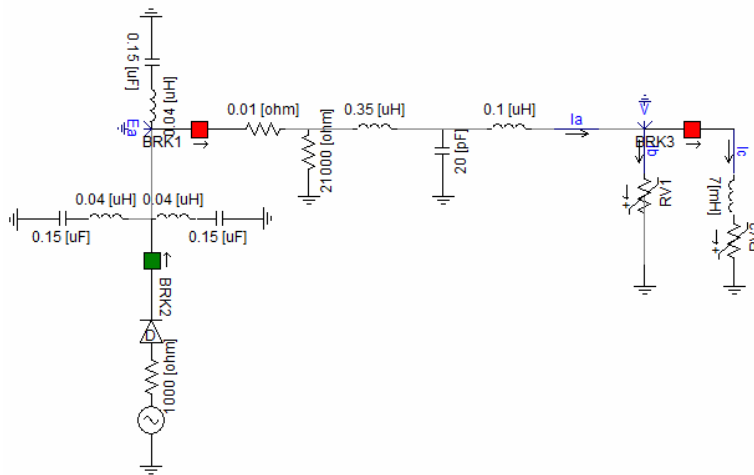
Σχήμα 18. Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

## 7. Κυκλωματική Προσέγγιση του Ιονισμού του Εδάφους

### 7.1 Κυκλωματικό μοντέλο

Στο πρόγραμμα PSCAD σχεδιάστηκε το κύκλωμα του Σχήματος 11, με τιμές των στοιχείων που φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 19.

Τα μεγέθη που αφορούν στην AC γεννήτρια είναι: RMS τιμή 27 kV, συχνότητα 50 Hz.



Σχήμα 19. Το κύκλωμα στο πρόγραμμα PSCAD

Ο διακόπτης BRK1 αναπαριστά το σπινθηριστή της κρουστικής γεννήτριας και κλείνει στα 10 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός). Ο διακόπτης BRK3 χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού και κλείνει στα 10.06 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός). Όπως φαίνεται στο σχήμα, έχουμε προσθέσει μία διόδο κι ένα διακόπτη BRK2, ο οποίος ανοίγει στα 5 ms (αρχική κατάσταση: κλειστός), στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την έγκαιρη φόρτιση της κρουστικής γεννήτριας. Επιπρόσθετα, η παράλληλη χωρητικότητα  $C_{sand}$  του Σχήματος 11 δεν υπάρχει στο Σχήμα 19. Αυτό συμβαίνει, διότι σύμφωνα με τους Nor et al [18] αυτή η χωρητικότητα δεν έχει επίδραση στα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και συνεπώς μπορεί να μη ληφθεί υπόψη.

Οι εμπειρικές εκφράσεις για τις τιμές των μεταβλητών αντιστάσεων  $R_1$  (RV1 στο Σχήμα 19) και  $R_2$  (RV2 στο Σχήμα 19) που προτείνονται [18] ανάλογα με την περιεκτικότητα του χώματος σε νερό (1%, 3%, 10%) είναι :

$$1\% : R_1 \text{ (k}\Omega\text{)} = 16.9 * I^{-0.811} \quad \& \quad R_2 \text{ (k}\Omega\text{)} = 17.61 * I^{-0.878} \quad (12)$$

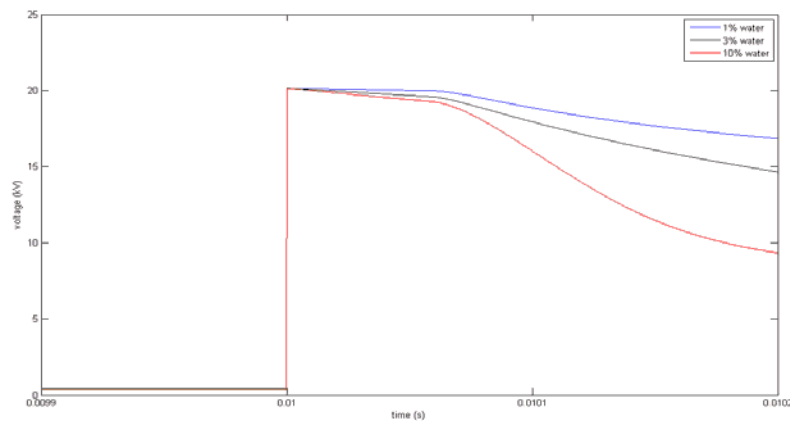
$$3\% : R_1 \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.74 * I^{-0.551} \quad \& \quad R_2 \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.63 * I^{-0.865} \quad (13)$$

$$10\% : R_1 \text{ (k}\Omega\text{)} = 5.492 * I^{-0.502} \quad \& \quad R_2 \text{ (k}\Omega\text{)} = 6.323 * I^{-0.791} \quad (14)$$

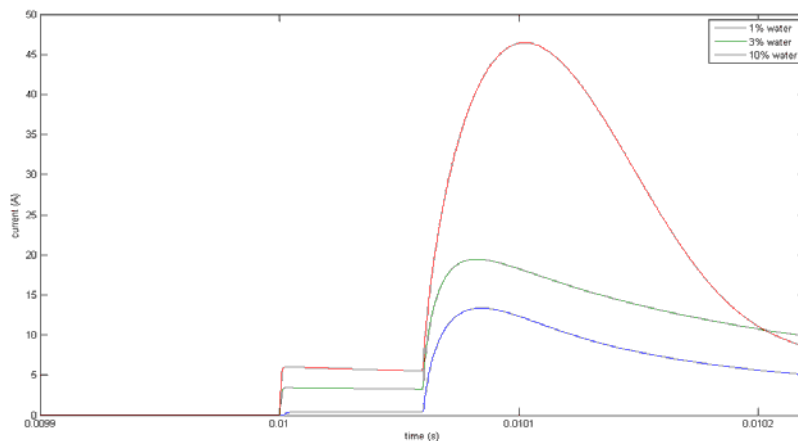
Οι συντελεστές των τιμών για τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  έχουν πολλαπλασιαστεί επί 1000, ώστε να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες σε  $\Omega$  τιμές.

## 7.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης - παρατηρήσεις

Για καθεμιά από τις τρεις περιεκτικότητες της άμμου σε υγρασία παρουσιάζονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στα μεγέθη  $V$  και  $I_a$ .



Σχήμα 20 Διάγραμμα τάσης  $V$  - χρόνου



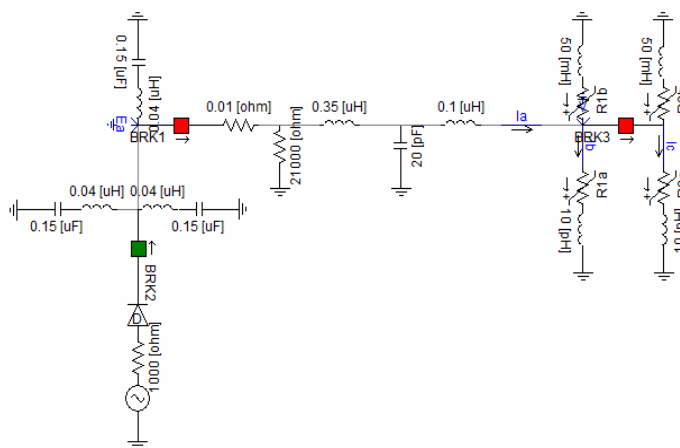
Σχήμα 21. Διάγραμμα ρεύματος  $I_a$  - χρόνου

Από το Σχήμα 20 διαπιστώνουμε ότι αύξηση της περιεκτικότητας οδηγεί τη διαφορά δυναμικού  $V$ , αφού φτάσει στη μέγιστη τιμή της, να μειώνεται με πιο γρήγορο και απότομο ρυθμό., καθώς η αντίσταση του δοκιμίου μειώνεται. Μάλιστα, ο ρυθμός αυτός μεταβάλλεται μετά την ενεργοποίηση του διακόπτη BRK3, οπότε η συνολική αντίσταση του φορτίου μειώνεται με αποτέλεσμα τη μεταβολή του χρόνου εκφόρτισης της κρουστικής γεννήτριας.

Από το Σχήμα 21 παρατηρούμε ότι αύξηση της περιεκτικότητας του χώματος σε νερό οδηγεί σε μείωση της αντίστασης του δοκιμίου και συνεπώς σε αύξηση του ρεύματος για δεδομένο επίπεδο φόρτισης στην εκδήλωση του φαινομένου, που υλοποιείται μέσω της ενεργοποίησης του διακόπτη BRK3. Έτσι, τη χρονική στιγμή  $t = 10.06 \text{ ms}$  που κλείνει ο BRK3 η συνολική αντίσταση μειώνεται, με αποτέλεσμα το ρεύμα να αυξάνεται. Η ύπαρξη της δεύτερης κορυφής σε αυτό το διάγραμμα οφείλει την παρουσία της στις δύο αντιστάσεις: την προ-ιονισμού αντίσταση  $R_1$  και τη μετά-ιονισμού αντίσταση  $R_2$ .

### 7.3 Βελτιωμένο κυκλωματικό μοντέλο

Στο πρόγραμμα PSCAD σχεδιάστηκε το κύκλωμα του Σχήματος 13, με τιμές των στοιχείων που φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 22.



Σχήμα 22. Το κύκλωμα στο πρόγραμμα PSCAD

Οι εμπειρικές εκφράσεις για τις τιμές των μεταβλητών αντιστάσεων  $R_{1a}$ ,  $R_{1b}$ ,  $R_{2a}$  και  $R_{2b}$  για 3% περιεκτικότητα του χώματος σε νερό που προτείνονται [19] είναι :

$$R_{1a} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.74 * I^{-0.551} * 10 \tag{15}$$

$$R_{1b} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.74 * I^{-0.551} * 0.53 \tag{16}$$

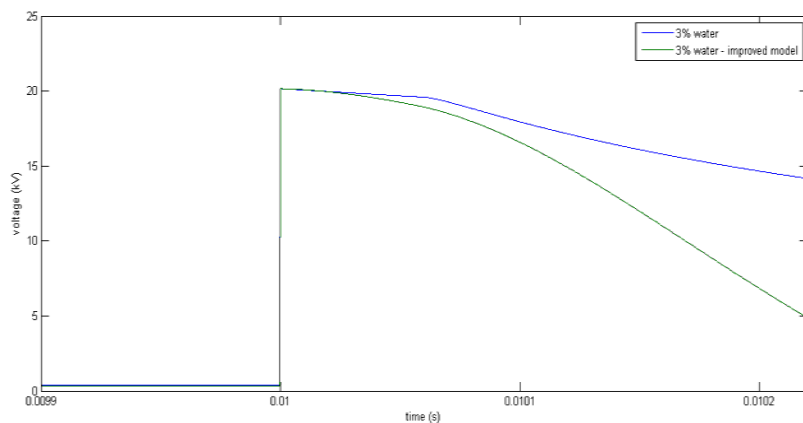
$$R_{2a} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.63 * I^{-0.65} * 10 \tag{17}$$

$$R_{2b} \text{ (k}\Omega\text{)} = 7.63 * I^{-0.65} * 0.53 \tag{18}$$

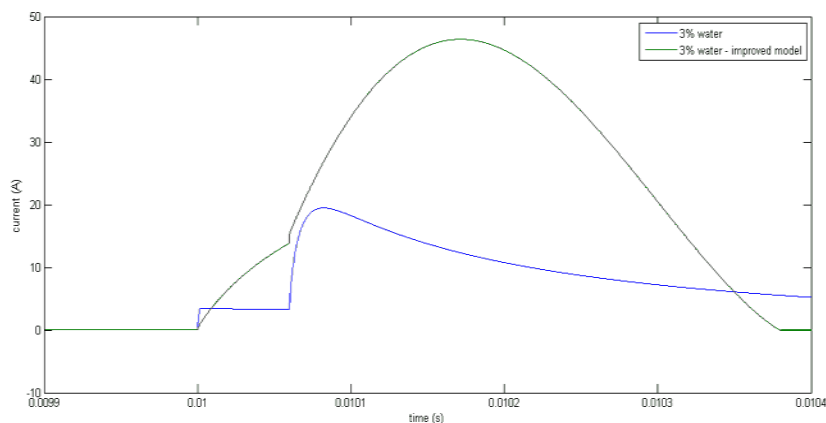
Όπως και πριν, οι συντελεστές των τιμών για τις αντιστάσεις  $R_{1a}$ ,  $R_{1b}$ ,  $R_{2a}$  και  $R_{2b}$  έχουν πολλαπλασιαστεί επί 1000, ώστε να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες σε  $\Omega$  τιμές και οι παράλληλες χωρητικότητες  $C_{sand}$  δεν έχουν επίδραση [19] στα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και γι' αυτό δεν υπάρχουν στο Σχήμα 22.

#### 7.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης βελτιωμένου κυκλωματικού μοντέλου - παρατηρήσεις

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στα μεγέθη  $V$  και  $I_a$  για περιεκτικότητα του χώματος σε νερό 3% του απλού προτεινόμενου ισοδύναμου κυκλώματος σε συνδυασμό με αυτά του βελτιωμένου ισοδύναμου κυκλώματος του ιονισμού του εδάφους.



Σχήμα 23. Διάγραμμα τάσης  $V$  - χρόνου



Σχήμα 24. Διάγραμμα ρεύματος  $I_a$  - χρόνου

Πρέπει να αναφερθούμε στην επιλογή των τιμών των μεταβλητών αντιστάσεων. Η  $R_{1a}$  είναι παράλληλη με τη  $R_{1b}$  και ομοίως η  $R_{2a}$  με τη  $R_{2b}$ . Προκειμένου η χρονική καθυστέρηση να εξαρτάται από το πλάτος της τάσης, θα πρέπει να υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών  $R_{1a}$  και  $R_{1b}$ , καθώς και των  $R_{2a}$  και  $R_{2b}$ , έτσι ώστε ο ένας κλάδος να

μεταφέρει υψηλότερα πλάτη ρεύματος από τον άλλο. Μία χαμηλή τιμή αυτεπαγωγής τοποθετείται σε σειρά με την αντίσταση που έχει μεγάλο πλάτος ρεύματος. Η  $R_{1b}$  και  $R_{2b}$  ανήκουν στον κλάδο υψηλού πλάτος, επομένως οι αυτεπαγωγές  $L_{1b}$  και  $L_{2b}$  θα πρέπει να έχουν χαμηλότερη τιμή από τις  $L_{1a}$  και  $L_{2a}$ . Με εμπειρικό τρόπο προέκυψαν οι σχέσεις (15) – (18) που αναφέραμε.

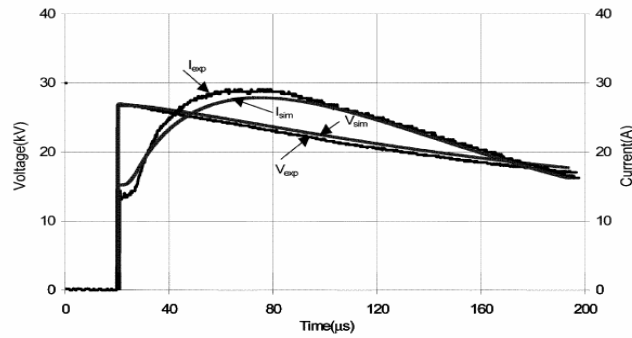
Ακολούθως, θα σχολιάσουμε την επιλογή των τιμών των αυτεπαγωγών  $L_{1a}$ ,  $L_{1b}$ ,  $L_{2a}$  και  $L_{2b}$ , οι οποίες είναι σε σειρά με τις αντιστάσεις  $R_{1a}$ ,  $R_{1b}$ ,  $R_{2a}$  και  $R_{2b}$  αντίστοιχα. Βέβαια, είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε την τιμή μη γραμμικής αυτεπαγωγής, που να προσομοιώνει ορθά την επίδραση των πλατών της τάσης και του ρεύματος στον χρόνο της κορυφής του ρεύματος. Έτσι, χαμηλές τιμές αυτεπαγωγών ( $L_{1a}$  και  $L_{2a}$ ) συνδέονται με τις μη γραμμικές αντιστάσεις ( $R_{1a}$  και  $R_{2a}$ ), ενώ υψηλές τιμές αυτεπαγωγών ( $L_{1b}$  και  $L_{2b}$ ) με τις σχεδόν γραμμικές αντιστάσεις ( $R_{1b}$  και  $R_{2b}$ ), ώστε να λάβουν υπόψη την χρονική καθυστέρηση στο ρεύμα.

Εδώ [19] οι τιμές των αυτεπαγωγών βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα, ώστε οι χρονικές καθυστερήσεις στο ρεύμα να εξαρτώνται από τα επίπεδα τάσης. Για να πετύχουμε ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των εμπειρικών αποτελεσμάτων και αυτών που προέκυψαν από την προσομοίωση οι  $L_{1a}$  και  $L_{2a}$  έχουν την τιμή 10  $\mu\text{H}$ , ενώ οι  $L_{1b}$  και  $L_{2b}$  πρέπει να έχουν τιμή περισσότερο από 1000 φορές μεγαλύτερη από τις  $L_{1a}$  και  $L_{2a}$  και θα έχουν τιμή 50 mH.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 23 - 24 βλέπουμε μια πιο ομαλή μεταβολή της τάσης και του ρεύματος στο βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα συγκρινόμενο με το απλό ισοδύναμο κύκλωμα. Οι χρόνοι για την πρώτη και δεύτερη κορυφή του ρεύματος εξαρτώνται από το πλάτος της τάσης ή από τα ρεύματα εκφόρτισης. Αυτές οι χρονικές καθυστερήσεις έχουν βρεθεί ότι μειώνονται αυξάνοντας τα επίπεδα τάσης ή ρεύματος.

## 7.5 Γενικές παρατηρήσεις – σχόλια

Στο άρθρο τους [18] οι μελετητές παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μόνο για περιεκτικότητα χώματος σε νερό 3%, που φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 25.



Σχήμα 25. Κοινό διάγραμμα τάσης  $V$  και ρεύματος  $I_a$  - χρόνου [18]

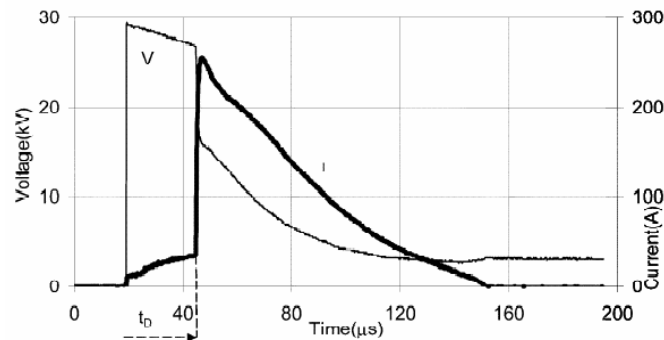
Όπως παρατηρούμε, τα δικά μας διαγράμματα που προέκυψαν από την προσομοίωση (Σχήματα 20 - 21) έχουν την ίδια ακριβώς μορφή με αυτά των μελετητών (Σχήμα 25), καθώς επίσης και αντίστοιχες μονάδες στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.

Ερευνώντας τα χαρακτηριστικά του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους και μετρώοντας την τιμή της μετά-ιονισμού αντίστασης, η τάση φόρτισης της κρουστικής γεννήτριας αυξήθηκε με μικρά βήματα. Μετά από ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, πλήρης διάσπαση μεταξύ του ενεργού ηλεκτροδίου και του δοχείου χώματος συμβαίνει διαμέσου του δοκιμίου. Αυτό παρατηρείται στα αποτελέσματα για την τάση και το ρεύμα, στα οποία, σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $t_D$  κοντά στη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, μία απότομη μεγάλη αύξηση στο ρεύμα συνοδεύεται από μία πτώση στην τάση, υποδηλώνοντας τη στιγμή της διάσπασης. Με άλλα λόγια, η γραφική παράσταση του ρεύματος εμφανίζει μία δεύτερη κορυφή, ενώ η τάση εξακολουθεί να μειώνεται ομαλά. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στα δικά μας αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση (Σχήματα 20 - 21). Αντιστοίχως, οι μελετητές [18] παραθέτουν το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 26), στο οποίο φαίνονται αυτά που μόλις αναφέραμε, όταν συμβαίνει η διάσπαση, καθώς και ο χρόνος  $t_D$ .

Προσεκτικότερη εξέταση της γραφικής παράστασης του ρεύματος αποκαλύπτει μία αρχική κορυφή, που αντιστοιχεί στην  $R_1$ , που ακολουθείται από μία δεύτερη αύξηση στη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, που αντιστοιχεί στην  $R_2$ , και είναι σε αυτήν τη δεύτερη κορυφή του ρεύματος που συμβαίνει η διάσπαση. Είναι πλέον αποδεκτό ότι η δεύτερη κορυφή του ρεύματος προκαλείται από τον ιονισμό του εδάφους. Όπως φαίνεται, αυτή η δεύτερη κορυφή συμβαίνει μετά από κάποια χρονική καθυστέρηση. Ο χρόνος για τη διάσπαση  $t_D$  μπορεί να μετρηθεί κι έχει βρεθεί ότι εξαρτάται από τις τάσεις και την αγω-



γιμότητα του χώματος. Αυτό είναι παρόμοιο με το αποτέλεσμα στο οποίο κατέληξαν οι Cabrera et al [20], που βρήκαν ότι ο χρόνος  $t_D$  αυξάνεται με την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και μειώνεται με την τάση διάσπασης.



Σχήμα 26. Διάγραμμα τάσης  $V$  και ρεύματος  $I_a$  - χρόνου όταν συμβαίνει η διάσπαση [18]

Επιπρόσθετα, πρέπει να αναφέρουμε ότι ο χρονισμός των διακοπών και συγκεκριμένα του BRK3 έχει πραγματοποιηθεί κατά τέτοιον τρόπο, ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα κυκλωματικά μοντέλα να συμπίπτουν με τα πειραματικά αποτελέσματα [18]-[19].

Τελειώνοντας θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στην ανάλυση και στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του ηλεκτροδίου, όταν λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους, δε μοντελοποιείται η φάση του απιονισμού του φαινομένου. Στην περιοχή απιονισμού η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή ιονισμού και η ειδική αντίσταση αρχίζει να ανακτά την αρχική τιμή της. Στην ανάλυση που παρουσιάστηκε παραπάνω αυτή η φάση του φαινομένου θεωρείται αμελητέα και δε λαμβάνεται υπόψη.

Συνοψίζοντας πρέπει να αναφέρουμε ότι ένα σύστημα με ηλεκτρόδιο γείωσης χρησιμοποιήθηκε για να ερευνηθεί τη μη γραμμική συμπεριφορά του φαινομένου του ιονισμού για διάφορες περιεκτικότητες του χώματος σε νερό. Όταν υγρό χώμα υπόκειται σε γρήγορα κρουστικά ρεύματα, η αντίστασή του μειώνεται, καθώς αυξάνουν τα πλάτη του ρεύματος. Αυτό οφείλεται σε δύο ξεχωριστές φάσεις αγωγιμότητας, όταν το πλάτος του ρεύματος αυξάνεται. Πρώτον, θερμικές επιδράσεις εξαιτίας της ροής του ρεύματος μειώνουν την αντίσταση? δεύτερον, πάνω από το κατώφλι ιονισμού η αντίσταση μειώνεται επιπλέον εξαιτίας των εκτεταμένων ζωνών ιονισμού. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων

που προέκυψαν από την προσομοίωση αποκάλυψε και μία δεύτερη κορυφή στη γραφική παράσταση του ρεύματος, όταν λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους. Οι δύο αυτές κορυφές του ρεύματος αποτέλεσαν τη βάση για την εισαγωγή δύο νέων παραμέτρων των χαρακτηριστικών του εδάφους κάτω από υψηλής έντασης γρήγορες κρουστικές συνθήκες. Αυτές είναι οι προ-ιονισμού και μετά-ιονισμού αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  αντίστοιχα, στις οποίες έχουμε αναφερθεί αναλυτικά παραπάνω.

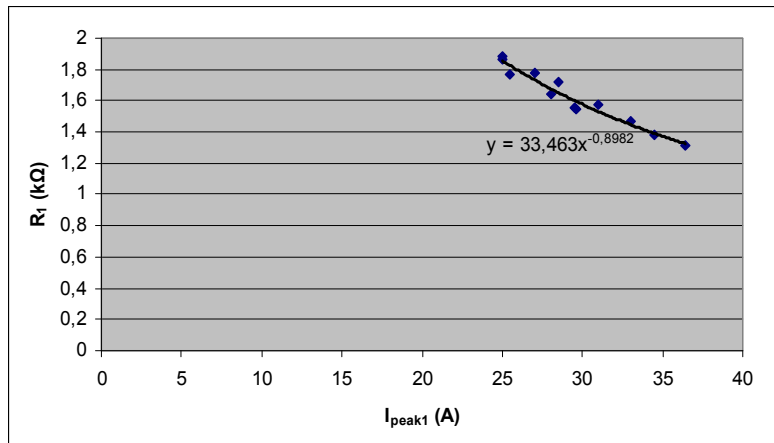
## 8. Πειραματικά Δεδομένα – Κυκλωματική Προσομοίωση

Στην παρούσα εργασία κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ελήφθησαν παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος για δείγμα χώματος A, με υγρασία 5% και θετική πολικότητα. Από κάθε παλμογράφημα καταγράφηκαν οι τιμές για τις δύο κορυφές του ρεύματος και οι αντίστοιχες τιμές της τάσης. Έτσι, υπολογίστηκαν οι μαθηματικές εκφράσεις για τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  από τις σχέσεις (9)-(10). Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι τιμές για τα μεγέθη  $V_{peak1}$ ,  $I_{peak1}$ ,  $V_{peak2}$ ,  $I_{peak2}$ ,  $R_1$  και  $R_2$ , οι οποίες προσδιορίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα.

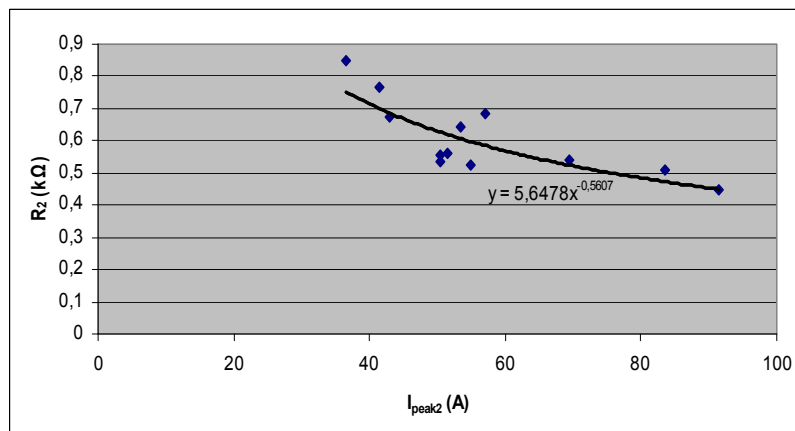
Πίνακας 1. Τιμές για τα μεγέθη  $V_{peak1}$ ,  $I_{peak1}$ ,  $V_{peak2}$ ,  $I_{peak2}$ ,  $R_1$  και  $R_2$  από τα πειραματικά δεδομένα

$V_{peak1}$ (kV)	$I_{peak1}$ (A)	$V_{peak2}$ (kV)	$I_{peak2}$ (A)	$R_1$ (kΩ)	$R_2$ (kΩ)
47	25	31,9	41,5	1,88	0,76
46,6	25	26,9	50,5	1,86	0,53
48	27	34,5	53,5	1,77	0,64
46	28	28,8	55	1,64	0,52
45,9	29,6	39,1	57	1,55	0,68
46	29,5	27,9	50,4	1,55	0,55
49,1	28,5	29	43	1,72	0,67
48	36,4	41	91,5	1,31	0,44
48,7	31	28,85	51,5	1,57	0,56
45	25,5	30,9	36,5	1,76	0,84
48,4	33	37,5	69,5	1,46	0,53
47,6	34,5	42,4	83,5	1,37	0,51

Στη συνέχεια, στα Σχήματα 27 - 28 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  συναρτήσει των κορυφών του ρεύματος  $I_{peak1}$  και  $I_{peak2}$ . Όπως φαίνεται, οι τιμές των αντιστάσεων αυτών που προέκυψαν από τα πειράματα μειώνονται με την αύξηση του πλάτους του ρεύματος.



Σχήμα 27. Αντίσταση προ-ιονισμού  $R_1$  συναρτήσει του  $I_{peak1}$  υπολογιζόμενη από τα πειραματικά δεδομένα



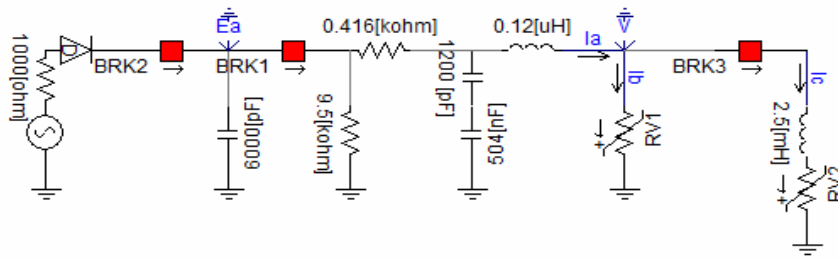
Σχήμα 28. Αντίσταση μετά-ιονισμού  $R_2$  συναρτήσει του  $I_{peak2}$  υπολογιζόμενη από τα πειραματικά δεδομένα

$$\text{Συνεπώς } R_1 = 33,463 * I^{-0,8982} \tag{19}$$

$$\text{και } R_2 = 5,6478 * I^{-0,5607} \tag{20}$$

### 8.1 Κυκλωματικό μοντέλο

Στο πρόγραμμα PSCAD σχεδιάστηκε το κύκλωμα της πειραματικής διάταξης του Σχήματος 14, με τιμές των στοιχείων που φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 29.



Σχήμα 29. Το κύκλωμα στο πρόγραμμα PSCAD

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 29, έχουν προστεθεί δύο επαγωγικά στοιχεία για την προσομοίωση του κυκλώματος.

Ο υπολογισμός της τιμής για το επαγωγικό στοιχείο  $L_{rod}$  έγινε με βάση τον τύπο (21) [21]:

$$L_{rod} = \frac{\mu_o * l}{2\pi} \ln(4l/a - 1) \quad (21)$$

όπου  $l = 14$  cm, το μήκος του ηλεκτροδίου

$a = 2.5$  mm η διατομή του ηλεκτροδίου

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές προκύπτει:  $L_{rod} = 0.12$   $\mu$ H

Η επιλογή της τιμής για το στοιχείο  $L$  έγινε με πρακτικό τρόπο. Συγκεκριμένα, κατόπιν δοκιμών επιλέχτηκε η τιμή 2.5 mH, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα πειραματικά.

Οι  $R_1$  και  $R_2$ , που έχουν προκύψει από τα πειραματικά αποτελέσματα, εκφράζονται από τις σχέσεις (19)-(20) και οι συντελεστές τους έχουν πολλαπλασιαστεί επί 1000, ώστε να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες σε  $\Omega$  τιμές.

Το κυκλωματικό μοντέλο αυτό προσομοιώθηκε δύο φορές. Συγκεκριμένα, η πρώτη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τάση πρωτεύοντος 55 V (τάση δευτερεύοντος 50 kV), ενώ η δεύτερη για τάση πρωτεύοντος 60.6 V (τάση δευτερεύοντος 55 kV).

Αναλυτικότερα, για την πρώτη περίπτωση θεωρήσαμε τα ακόλουθα: Τα μεγέθη που αφορούν στην AC γεννήτρια είναι RMS τιμή 50 kV και συχνότητα 50 Hz. Ο διακόπτης BRK1 κλείνει στα 15 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός) και ο διακόπτης BRK3 κλείνει στα 15.0036 ms (αρχική κατάσταση: ανοικτός).

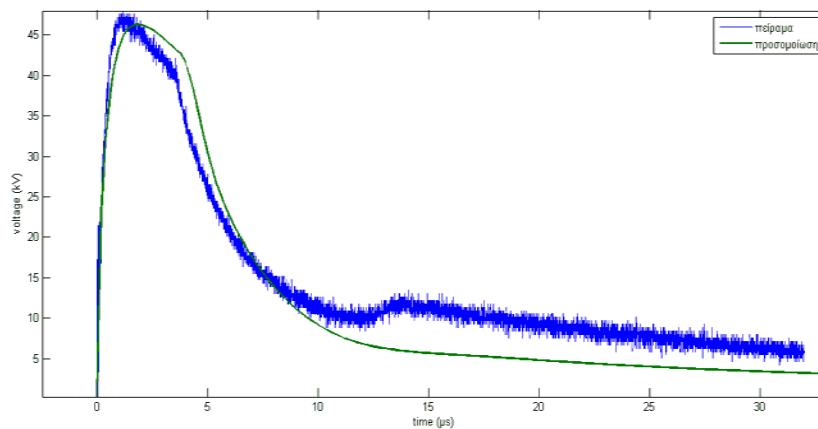
Έχουμε προσθέσει μία δίοδο κι ένα διακόπτη BRK2, ο οποίος ανοίγει στα 10 ms (αρχική κατάσταση: κλειστός).

Για τη δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκαν οι ίδιες τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω, διαφοροποιώντας την RMS τιμή της AC γεννήτριας, που τώρα προσδιορίστηκε ίση με 55 kV και τη χρονική στιγμή που κλείνει ο διακόπτης BRK3, που τέθηκε στα 15.0027 ms.

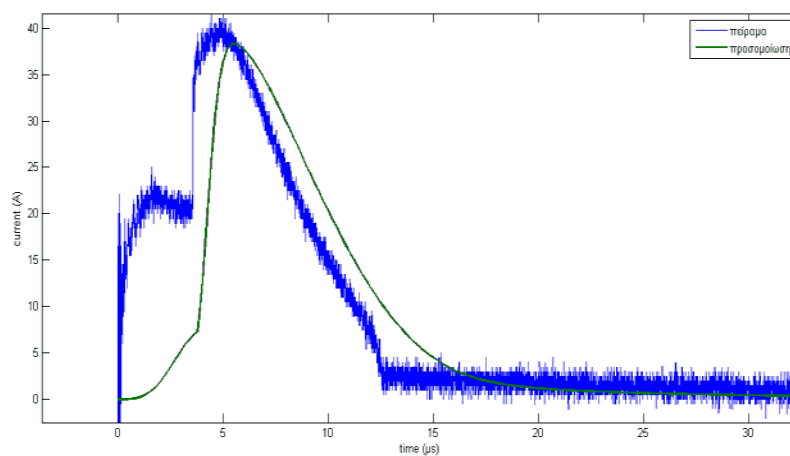
### 8.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης - παρατηρήσεις

Για καθεμιά από τις δύο παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στα μεγέθη  $V$  και  $I_a$ . Στα ίδια διαγράμματα (Σχήματα 30 - 33) απεικονίζονται και τα πειραματικά αποτελέσματα, ώστε να γίνει δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους.

Για την πρώτη περίπτωση (τάση φόρτισης 50 kV):

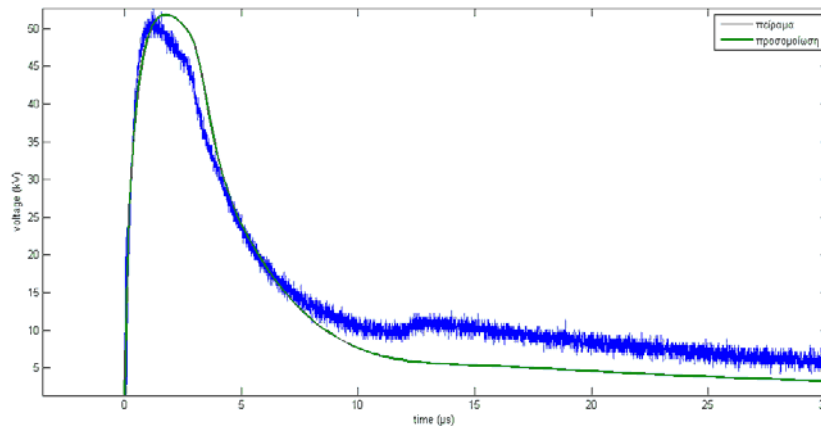


Σχήμα 30. Διάγραμμα τάσης  $V$  - χρόνου για τάση φόρτισης 50 kV

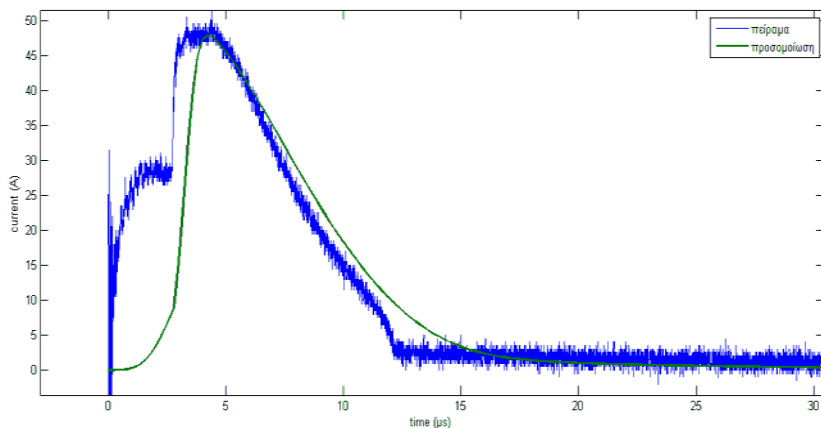


Σχήμα 31. Διάγραμμα ρεύματος  $I_a$  - χρόνου για τάση φόρτισης 50 kV

Για τη δεύτερη περίπτωση (τάση φόρτισης 55 kV):



Σχήμα 32. Διάγραμμα τάσης  $V$  - χρόνου για τάση φόρτισης 55 kV



Σχήμα 33. Διάγραμμα ρεύματος  $I_a$  - χρόνου για τάση φόρτισης 55 kV

Θα υπολογίσουμε το σχετική απόκλιση (%) μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης τόσο για την τιμή της κορυφής όσο και για την αντίστοιχη τιμή του χρόνου. Ο υπολογισμός γίνεται με τον τύπο (22) που ακολουθεί:

$$\pi(\%) = (\text{Τιμή προσομοίωσης} - \text{Τιμή μέτρησης}) / \text{Τιμή μέτρησης} \quad (22)$$

Για την πρώτη περίπτωση (τάση φόρτισης 50 kV):

Πίνακας 2. Σχετικές αποκλίσεις (%) για τα μεγέθη  $V_{\text{peak}}$ ,  $t$ ,  $I_{\text{peak2}}$  και  $t_2$  μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τάση φόρτισης 50kV

	$V_{\text{peak}}$	$t$	$I_{\text{peak2}}$	$t_2$
Σχετική απόκλιση $\pi$ (%)	-3,13%	50%	-7,23%	4,85%

Για τη δεύτερη περίπτωση (τάση φόρτισης 55 kV):

Πίνακας 3 Σχετικές αποκλίσεις (%) για τα μεγέθη  $V_{peak}$ ,  $t$ ,  $I_{peak2}$  και  $t_2$  μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης για τάση φόρτισης 55kV

	$V_{peak}$	$t$	$I_{peak2}$	$t_2$
Σχετική απόκλιση π (%)	-1,14%	44%	-6,08%	-3,41%

Στα διαγράμματα τάσης (Σχήμα 30, 32) παρατηρείται μια πολύ μικρή διαφοροποίηση της μέγιστης τιμής για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σχέση με τα πειραματικά, όπως φαίνεται και από τις τιμές του σφάλματος. Οι αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι τα στοιχεία της προσομοίωσης θεωρούνται ιδανικά. Αντίθετα, στην πειραματική διάταξη υπάρχουν πτώσεις τάσης πάνω στα στοιχεία, ο μετασχηματιστής δεν είναι ιδανικός και ο σπινθηριστής προσομοιώνεται ως διακόπτης, του οποίου ο χρόνος λειτουργίας έχει οριστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η προσομοίωση να προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα. Όσον αφορά στον χρόνο, στον οποίο οι μέγιστες τιμές συμβαίνουν, παρατηρούμε από τους παραπάνω πίνακες ότι η διαφοροποίηση είναι κάπως μεγαλύτερη. Τη στιγμή λειτουργίας του διακόπτη BRK3 η τάση μειώνεται απότομα, γεγονός που συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα. Θα πρέπει να σχολιάσουμε το γεγονός ότι ο χρόνος λειτουργίας του διακόπτη BRK3 ήταν διαφορετικός για τις δύο περιπτώσεις, πράγμα που αποτελεί αδυναμία της συγκεκριμένης μοντελοποίησης. Παρά το γεγονός αυτό, η ομοιότητα στη μορφή των γραφικών παραστάσεων έχει επιτευχθεί και μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.

Από τα διαγράμματα ρεύματος (Σχήματα 31, 33) παρατηρείται μία αρχική κορυφή, που αντιστοιχεί στην  $R_1$ , που ακολουθείται από μία δεύτερη αύξηση στη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, που αντιστοιχεί στην  $R_2$  τόσο στα πειραματικά δεδομένα όσο και στις προσομοιώσεις. Βέβαια, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στην τιμή της πρώτης κορυφής καθώς και στους αντίστοιχους χρόνους, γεγονός που υπογραμμίζει την αδυναμία της συγκεκριμένης προσέγγισης του φαινομένου. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι έχουν αμεληθεί παράσιτες αυτεπαγωγές και χωρητικότητες, αλλά και η χωρητικότητα του δοκιμίου, η οποία σύμφωνα με τους Nor et al [18]-[19] δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Ενδεχομένως, να απαιτείται διαφορετική προσομοίωση της κρουστικής γεννήτριας σε ότι αφορά στην ενέργεια που παράγει. Η διαφοροποίηση στην τιμή της δεύτερης κορυφής του ρεύματος, καθώς και στον χρόνο στον οποίο συμβαίνει, είναι πολύ μικρή.

Συνοψίζοντας πρέπει να αναφέρουμε ότι στα διαγράμματά μας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προσεγγίζουν εκείνα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία με σχετικά ικανοποιητικό τρόπο, καθώς η αντιστοιχία στη μορφή των γραφικών παραστάσεων είναι εμφανής.

## 9. Επόμενη μέρα

Πρόσθετη υπολογιστική μελέτη χρειάζεται σε συνδυασμό με νέες κυκλωματικές προσομοιώσεις, έτσι ώστε να προκύψουν ακριβέστερα αποτελέσματα για τις διάφορες περιεκτικότητες του χώματος σε νερό και να καταλήξουμε σε σαφή συμπεράσματα σχετικά με όλες τις παραμέτρους που ορίζουν πλήρως το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του μεγέθι. Έτσι, στο μέλλον θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και άλλες σειρές πειραμάτων με περισσότερα δείγματα χώματος και σε διάφορες καταστάσεις (υγρασίας, θερμοκρασίας κλπ.), καθώς επίσης και να γίνουν οι αντίστοιχες προσομοιώσεις και σε άλλα προγράμματα (PSpice, Simulink κλπ.). Φυσικά, η απόλυτη ταύτιση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, που αφορούν στο φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, θεωρείται αδύνατη, αφού πρόκειται για ένα κατ'εξοχήν πολυσύνθετο μεταβατικό φαινόμενο. Όμως η βελτίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στην παρούσα εργασία αποτελεί τη βάση για ενδεδειγμένη παρουσίαση και βαθύτερη κατανόηση των παραμέτρων και των παραγόντων που καθορίζουν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Επιπρόσθετα, η μοντελοποίηση της φάσης του απιονισμού του φαινομένου θα αποτελέσει την αρχή για δημιουργία πιο σύνθετων κυκλωματικών ισοδυνάμων με περισσότερα στοιχεία και κλάδους, που θα προσομοιώνουν με πιο αποτελεσματικό τρόπο το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους.

## Βιβλιογραφία

- 1 Φανή Ασημακοπούλου, "Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους", Ενδιάμεση Κρίση
- 2 J.H. Scott, "Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soils," Note 18,



- Electromagnetic Pulse Theoretical Notes, AFWL EMP 2-1, April, 1971.
- 3 J.W. Erler and D.P. Snowden, "High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4564- 4567.
  - 4 R.E. Leadon, T.M. Flanagan, T.M. Mallon, R. Denson, "Effect of Ambient Gas on Arc Initiation Characteristics in Soil," , IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4572- 4576.
  - 5 P.L. Bellaschi, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, " transaction of American Institute of Electrical Engineer, Vol. 60, March 1941, pp. 123-128.
  - 6 G.M. Petropoulos, "The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances," Journal IEE, Vol. 95, Part II, 1948, pp.59-70.
  - 7 P.L. Bellaschi, R.E. Armington, A.E Snowden, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, Part II," Transaction of American Institute of Electrical Engineer, Vol. 61, 1942, pp. 349-363.
  - 8 A.C. Liew, M. Darveniza, "Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths", Proc. IEE, Vol. 121, No 2, pp. 123-135, February 1974
  - 9 J. Wang, A.C.Liew, M. Darveniza, "Extension of Dynamic model of Impulse Behavior of concentrated Grounds at High Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20,no. 3, July 2005, pp.2160-2165.
  - 10 K.J. Nixon. "The lightning transient behavior of a driven rod earth electrode in multi-layer soil," Διδακτορική Διατριβή, Ιούλιος 2006
  - 11 S. Sekioka, M.I. Lorentzou, M.P. Philippakou, J.M. Prousalidis, "Current- Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, no. 1, January 2006, pp. 194-201.
  - 12 V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y. Liu, "Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization," Journal of Electrostatics, 60, 2004, pp.193-202.
  - 13 I.F. Gonos, F.V. Topalis and I. A. Stathopoulos, "Transient impedance of grounding rods," Proceedings of the 11th International Symposium on High Voltage Engineering

- (ISH '99), London, UK, 23rd -27th August 1999, pp.272-275.
- 14 Ι.Φ. Γκόνος, "Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων γείωσης," Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2002.
  - 15 H. M. Towne, "Impulse characteristics of driven grounds," Gen. Elect.Rev., Vol. 31, No. 11, November 1928, pp. 605-609.
  - 16 A.V. Korsuncev, "Application of the method of Similarity for the Calculation of Impulse Characteristics of Concentrated Electrodes", Elektrichestvo, NOS, 1958, pp 31-35.
  - 17 R. Kosztaluk, M. Loboda, and D. Mukhedkar," Experimental study of Transient Ground Impedances," IEEE transactions on Power Apparatus and Systems,Vol. Pas-100; No. 11, November 1981, pp. 4653-4660.
  - 18 N. M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, "Characterization of Ionization Phenomena in Soils under Fast Impulses," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 353-361.
  - 19 N.M. Nor, "Simulation of Earthing systems under High Impulse Conditions," IEEE Transactions on Power Delivery, January 2006, pp. 347-352.
  - 20 V.M. Cabrera, M.S. Lundquist, and V. Cooray, "On the physical properties of discharges in sand under lightning impulses," J. Electrostat., vol. 30, no. 40, pp. 17-28, May 1993.
  - 21 Juan A. Martinez – Velasco, "Power System Transients Parameter Determination".