



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη ιονισμού εδαφικών δειγμάτων σε διάταξη παράλληλων πλακών ( άμμος 75% , λεπτόκοκκο 25%)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανδρέας Θ. Κοντονικόλα**

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

**Επιβλέπουσα:** Φανή Η. Ασημακοπούλου  
Υποψηφία Διδάκτωρ

Αθήνα, Νοέμβριος 2011





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη ιονισμού εδαφικών δειγμάτων σε διάταξη παράλληλων πλακών ( άμμος 75% , λεπτόκοκκο 25%)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανδρέας Θ. Κοντονικόλα**

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2011.

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

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

.....  
Στέφανος Ν. Μανιάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....

Ανδρέας Θ. Κοντονικόλα

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

Copyright © Ανδρέας Θ. Κοντονικόλα

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, όταν υπόκεινται σε μεταβατικά φαινόμενα, διαφέρει από τη συμπεριφορά τους σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Έχει παρατηρηθεί ότι, όταν ένα σύστημα γείωσης διαρρέεται από κεραυνικό ρεύμα, η αγωγιμότητα του εδάφους μεταβάλλεται και εκδηλώνεται φαινόμενο ιονισμού του εδάφους. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της τιμής της κρίσιμης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε εδαφικό δείγμα, πάνω από την οποία εκδηλώνεται ο ιονισμός καθώς και οι τιμές της τάσης διάσπασης, του χρόνου διάσπασης και οι αβεβαιότητες τους.

Αρχικά γίνεται μια ανασκόπηση στην οποία εισάγονται έννοιες όπως η γείωση και ειδική αντίσταση, επίσης αναλύονται μηχανισμοί διάσπασης και μεθοδολογίες από διάφορους επιστήμονες, που προσπάθησαν να προσεγγίσουν το φαινόμενο του ιονισμού. Ακολούθως περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και ο τρόπος διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας. Ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων μαζί με τα συμπεράσματα, που έχουν εξαχθεί και στο τέλος παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα, που έχουν ληφθεί κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων.

## Λέξεις κλειδιά

Γείωση, ειδική αντίσταση, ηλεκτρική διάσπαση εδάφους, ιονισμός, τάση διάσπασης  $U_{50\%}$ , κρίσιμη ένταση ιονισμού  $E_c$ , αβεβαιότητα.



# ABSTRACT

---

The grounding systems behavior, when they are exposed to transitional phenomena, is different than the behavior in normal state function. It's been noticed that, when a grounding system subject to impulse lightning current, ground's conductance changes and ground ionization phenomenon appears. The purpose of this diploma thesis is to determine the value of electric field intensity initiating ionization in grounding samples, the impulse breakdown time and their uncertainties.

First a review is made with basic definitions of grounding and soil resistivity, also breakdown mechanisms and methodologies by different scientists trying to approach the ionization phenomenon are analyzed. Finally the experimental setup and the procedure obtaining the results is described followed by the graphs taken during the experiment.

## Keywords

Grounding, resistivity, ground electric breakdown, ionization, voltage breakdown U50%, ionization critical intensity  $E_c$ , uncertainty





# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Κοντονικόλα Ανδρέα για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

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

Στο **Κεφάλαιο 1** εισάγεται η έννοια της γείωσης, της ειδικής αντίστασης εδάφους καθώς και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Στην συνέχεια αναλύονται οι διάφοροι μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους αλλά και τα μοντέλα ιονισμού εδάφους. Τέλος, γίνεται ανασκόπηση πειραμάτων και μεθοδολογιών, που υιοθέτησαν οι ερευνητές στην προσπάθεια προσδιορισμού του επιπέδου τάσης που παρουσιάζεται ο ιονισμός.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται αναλυτικά η πειραματική διάταξη, τα χρησιμοποιηθέντα όργανα μετρήσεων και ο τρόπος της προετοιμασία των προς εξέταση εδαφικών δειγμάτων. Επίσης περιγράφονται οι μέθοδοι πραγματοποίησης δοκιμών εδαφομηχανικής και κοκκομετρικής ανάλυσης των δειγμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται ανάλυση της μεθόδου αυξομείωσης τάσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης  $U_{50\%}$  των εδαφικών δειγμάτων. Επίσης, εισάγονται βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής απαραίτητες για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και ορίζεται η έννοια της αβεβαιότητας .

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η διαδικασία επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων, τα αποτελέσματα και οι τιμές της κρίσιμη πεδιακή έντασης ιονισμού για κάθε εδαφικό δείγμα, και πραγματοποιείται προσδιορισμός της αβεβαιότητας για κρίσιμα μεγέθη σχετιζόμενα με τις δοκιμές.

Στο **Παράρτημα** επισυνάπτονται τα παλμογραφήματα που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για το ευχάριστο και ασφαλές εργασιακό περιβάλλον, που μου παρείχε, καθώς και για την ένδειξη ενδιαφέροντος στην πορεία της διπλωματικής εργασίας.

Την Κυρία Φανή. Η. Ασημακοπούλου, υποψηφία διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας με ουσιαστική και αμφίδρομη επικοινωνία μέσα από ένα φιλικό κλίμα συνεργασίας που δημιουργήθηκε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που πρόσφερε τη βοήθεια του σε όλα τα προβλήματα που μας παρουσιάστηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων αλλά και στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Τους κ. κ. Χρήστο Ηλία και Αριστείδη Γιάννακα, μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Το συνάδελφο κ. Γρηγόρη Λοΐζου για την βοήθεια στις πειραματικές μετρήσεις και άψογη συνεργασία του κατά τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Περίληψη.....	i
Πρόλογος.....	v
Περιεχόμενα.....	vii
<b>Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ρόλος του συστήματος γείωσης.....	1
1.2 Ειδική αντίσταση εδάφους.....	1
1.3 Μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους.....	3
1.4 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους.....	4
1.4.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων.....	4
1.4.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης.....	5
1.4.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας.....	9
1.5 Πειραματικός προσδιορισμός κρίσιμης έντασης ιονισμού και διάσπασης.....	13
1.6 Πειράματα σε πραγματικά συστήματα γείωσης.....	14
1.7 Πειράματα υπό κλίμακα.....	16
1.7.1 Κυλινδρική διάταξη.....	16
1.7.2 Ημισφαιρική διάταξη.....	19
1.7.3 Διάταξη παράλληλων πλακών.....	20
1.7.4 Διάταξη σφαίρα πλάκα.....	24
<b>Κεφάλαιο 2: Πειραματική διάταξη.....</b>	<b>25</b>
2.1 Εξοπλισμός δοκιμών ηλεκτρικής διάταξης.....	25
2.1.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων.....	25
2.1.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης.....	31
2.1.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας.....	32
2.2 Πειράματα υπό κλίμακα.....	33
2.2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση - Ξηρή μέθοδος.....	33
2.2.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση με αραιόμετρο.....	35
2.2.3 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης εδαφικών υλικών.....	37
<b>Κεφάλαιο 3: Τάση διάσπασης - Αβεβαιότητα.....</b>	<b>39</b>
3.1 Ηλεκτρική διάσπαση.....	39
3.1.1 Προσδιορισμός τάσης διάσπασης.....	39

3.1.2 Μέθοδος αυξομείωσης τάσης.....	39
3.2 Έννοια της αβεβαιότητας.....	41
3.2.1 Εισαγωγικά.....	41
3.2.2 Από το σφάλμα στην αβεβαιότητα.....	41
3.2.3 Κατηγοριοποίηση αβεβαιοτήτων (Τύπου A & Τύπου B).....	43
3.2.4 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A.....	44
3.2.5 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B.....	46
3.2.6 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας.....	47
3.2.7 Συνδυασμός αβεβαιοτήτων – Νόμος διάδοσης.....	47
<b>Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία των μετρήσεων.....</b>	<b>49</b>
4.1 Πληροφορίες για την επεξεργασία των μετρήσεων.....	49
4.1.1 Τάση διάσπασης.....	49
4.1.2 Δοκίμιο.....	49
4.2 Επεξεργασία μετρήσεων.....	50
4.2.1 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	51
4.2.2 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό αρνητική πολικότητα.....	54
4.2.3 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 5% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	57
4.2.4 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 10% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	60
4.2.5 Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	63
4.2.6 Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό αρνητική πολικότητα.....	66
4.2.7 Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 5% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	69
4.2.7 Συνοπτικά αποτελέσματα.....	72
4.3 Συμπεράσματα.....	73
4.3.1 Επίδραση πολικότητας.....	73
4.3.2 Επίδραση υγρασίας.....	74
4.3.3 Χρόνος διάσπασης – Τάσης διάσπασης.....	74
4.3.4 Σχόλια για τις αβεβαιότητες.....	76
<b>Παράρτημα: Παλμογραφήματα.....</b>	<b>77</b>
Π.1 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	77
Π.2 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό αρνητική πολικότητα.....	81
Π.3 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 5% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	84
Π.4 Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 10% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	87
Π.5 Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	90
Π.6 Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό αρνητική πολικότητα.....	93
Π.7 Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 5% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα.....	97
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>101</b>

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο ορίζονται βασικές έννοιες οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτερα σε επόμενα κεφάλαια. Δίνεται ορισμός του συστήματος γείωσης όπως και της ειδικής αντίστασης εδάφους, αναλύονται μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους και τα μοντέλα ιονισμού εδάφους. Τέλος, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σε πειράματα και μεθοδολογίες ερευνητών στην προσπάθεια προσέγγισης του επιπέδου τάσης που παρουσιάζεται ο ιονισμός.

### 1.1 Ρόλος του συστήματος γείωσης

Ένα σύστημα γείωσης έχει ως σκοπό την παροχή ενός δρόμου χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα σφαλμάτων ή κεραυνοπληξιών προς τη γη, την προστασία του ανθρώπου από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, τη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, την εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και τον περιορισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

Η αντίσταση γείωσης, η οποία μετριέται σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός πιο μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς το ρεύμα,  $R = V/I$ . 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 [1].

### 1.2 Ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση ( $\rho$ ) είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του, επομένως η ποικιλία εδαφών συνεπάγεται διαφορετικές τιμές ειδικών αντιστάσεων. Η ειδική αντίσταση του εδάφους ορίζεται ως η αντίσταση του υλικού του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ( $1 \times 1 \times 1m^3$ ), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου και έχει μονάδα μέτρησης τα ( $\Omega m$ ).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση είναι:

- Ο τύπος του εδάφους. Στον Πίνακα 1.1 δίνονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )
Επιφάνεια εδάφους, παχύ χώμα κτλ	1-50
Λάσπη, πηλός, χώμα	2-100
Άμμος και χαλίκι	50-1000
Επιφάνεια ασβεστόλιθου	100-10000
Σχιστόλιθος	5-100
Αμμόπετρα με χαλαζία και άμμο	20-2000
Γρανίτης, βασάλτης κτλ	1000
Διαλυόμενος γνευσίτης (ορυκτό)	50-500
Πλακόστρωτα κτλ	10-100

**Πίνακας 1.1** Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων χώματος [3].

- Το μέγεθος των κόκκων. Όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των κόκκων τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης. Επιπλέον, το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων μέσα στο έδαφος επηρεάζουν την κατακράτηση υγρασίας, επομένως και το  $\rho$ . Στην περίπτωση κόκκων μεγάλου μεγέθους η υγρασία κατακρατείται λόγω της επιφανειακής τάσης. Στην περίπτωση που το μέγεθος των κόκκων ποικίλει, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγάλων σε μέγεθος κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους κόκκους και έτσι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται.
- Η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Η αγωγιμότητα του νερού είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική και η αύξηση της ποσότητας υγρασίας στο έδαφος συνεπάγεται μείωση της ειδικής του αντίστασης.
- Τα διαλυμένα στο νερό άλατα. Μια μικρή ποσότητα διαλυμένων αλάτων στο νερό είναι ικανή να μειώσει σημαντικά την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε σχέση με την αυτήν που θα έχει αν το νερό είναι απιονισμένο. Προφανώς, διαφορετικά άλατα θα έχουν διαφορετικές επιδράσεις σε ίδιο εδαφικό δείγμα.
- Η θερμοκρασία και η πίεση. Μείωση της θερμοκρασίας του εδάφους, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής αντίστασης. Μείωση της τιμής της ειδικής αντίστασης παρατηρείται επίσης για μεγαλύτερο βαθμό συμπίεσης του εδάφους [2].
- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με το έδαφος και είναι της τάξης μερικών  $\text{kV/cm}$ . Αν ξεπεραστεί η κρίσιμη τιμή της πεδιακής έντασης δημιουργούνται τόξα που οδηγούν σε μείωση της ειδικής αντίστασης. Τα ηλεκτρικά τόξα εκδηλώνονται μόνο στην περιοχή που έχει γίνει υπέρβαση της κρίσιμης τιμής της πεδιακής έντασης, ενώ στον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης παραμένει αμετάβλητη [4].

### **1.3 Μηχανισμοί διάσπασης του εδάφους**

Το έδαφος, σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιόμορφα αγωγίμα σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα ή αέρας. Στο νερό και στα διαλυμένα σε αυτό άλατα οφείλεται κατά κύριο λόγο η αγωγιμότητα του εδάφους, ενώ το μέγεθος των διακένων μεταξύ των κόκκων του εδάφους επηρεάζει την αναπτυσσόμενη σε αυτά ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, εξαιτίας της επιβαλλόμενης τάσης. Παρόλο που οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί και η συμπεριφορά τους είναι πλήρως κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος) τότε, μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους.

Ο όρος ιονισμός χρησιμοποιείται για να περιγράψει περιορισμένου εύρους μερικές διασπάσεις, ενώ ο όρος διάσπαση για την πλήρη διάσπαση του διηλεκτρικού [5].

Ο ακριβής μηχανισμός διάσπασης του εδάφους δεν είναι γνωστός μέχρι σήμερα. Εντούτοις, πολλοί ερευνητές έχουν καταβάλει προσπάθειες για τη μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους σε μεταβατικά φαινόμενα και την περιγραφή των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα. Για την περιγραφή της διάσπασης του εδάφους έχουν προταθεί ο θερμικός μηχανισμός και ο ιονισμός του εδάφους.

Σύμφωνα με το θερμικό μηχανισμό, που προτάθηκε από τους Snowden και Erler [6] και [7], 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 διαρρέυσει 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 χρόνος για την έναρξη της διάσπασης εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για τη θέρμανση και εξάτμιση του νερού, που με τη σειρά του εξαρτάται από την αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του νερού, το μήκος των μονοπατιών, στα οποία έχει εκδηλωθεί διάσπαση και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους.

Ο ιονισμός του εδάφους προτάθηκε από τους Leadon et al. [8] 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.

Πειραματικά αποτελέσματα των Oettle [9], [10], Πετρόπουλος [11] και Liew και Darveniza [12] υποστηρίζουν το μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω του ιονισμού. Επιπρόσθετα, σημειώνεται, ότι ο θερμικός μηχανισμός βασίζεται σε απλουστευτικές θεωρήσεις. Σύμφωνα με τους Nor και Ramli [13] για να καταστεί δυνατή η διάκριση μεταξύ των δύο μηχανισμών είναι απαραίτητη η εκτίμηση της ενέργειας, που απορροφάται από το χώμα, για δεδομένη επιβαλλόμενη τάση και περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Στη μελέτη για ξηρά εδάφη, ο επικρατών μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους, παραδόξως

όμως, παρατηρήθηκαν και φαινόμενα που σχετίζονται με το θερμικό μηχανισμό διάσπασης.

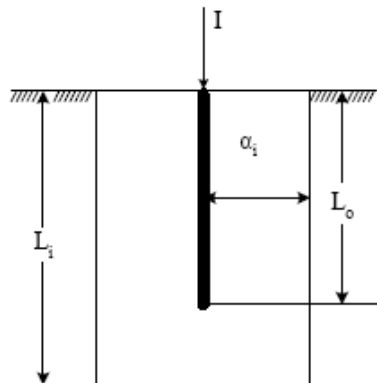
## 1.4 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους και ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες [5].

### 1.4.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων

Ο Bellaschi [14] και ο Πετρόπουλος [11] θεώρησαν ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου, μοντελοποίησαν δηλαδή το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων.

Σε άλλη εργασία τους, ο Bellaschi και οι συνεργάτες του [15] έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Στο *Σχήμα 1.1* παρουσιάζεται η μορφή της ζώνης ιονισμού, σύμφωνα με τους Bellaschi et al. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκενώσεων και, κατ' επέκταση, τη μείωση της αντίστασης.

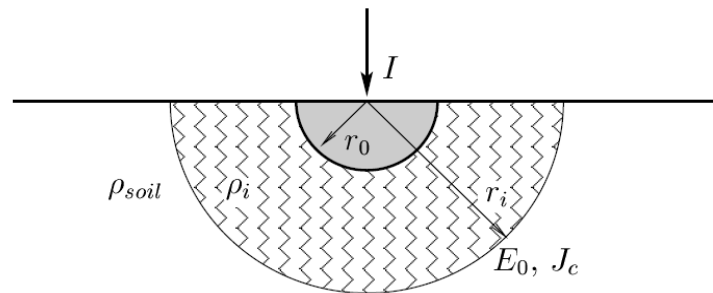


**Σχήμα 1.1** Μοντέλο Bellaschi [15].

Ο Γ. Μ. Πετρόπουλος σε άρθρο του [11] αναφέρει ότι, η αντίσταση των γειώσεων υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων παίρνει τιμές κατά πολύ μικρότερες από εκείνες που μετρώνται με μεθόδους διέλευσης ασθενών εναλλασσομένων ρευμάτων. Η αντίσταση των συνηθισμένων γειώσεων μειώνεται κατά το 1/5 περίπου υπό την επίδραση κρουστικών ρευμάτων της τάξης των 10kA. Σε περιπτώσεις όπου άλλα αγωγικά σώματα υπάρχουν κοντά στα ηλεκτρόδια γείωσης, τότε η αντίσταση γείωσης μειώνεται ακόμα περισσότερο. Στο χώρο όπου λαμβάνουν χώρα οι εκκενώσεις, η αγωγιμότητα ( $\sigma$ ) γίνεται πολύ μεγαλύτερη από ότι στο υπόλοιπο έδαφος, ώστε η πτώση τάσης μέσα σε αυτόν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Το ηλεκτρόδιο με τον περιβάλλοντα χώρο έχει τις ιδιότητες ενός ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων, το οποίο κατά συνέπεια εμφανίζει μειωμένη αντίσταση ως προς τη γη.



Στα πειράματα, που διεξήγαγε, χρησιμοποίησε ημισφαιρικό δοχείο από χαλκό γεμάτο με χώμα. Στο κέντρο του τοποθέτησε σφαιρικό ηλεκτρόδιο βυθισμένο το μισό στο χώμα. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκενώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης ένα συγκεκριμένο χώρο εκκενώσεων για κάθε τάση, διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο χώμα με μία ημισφαιρική επιφάνεια, η ακτίνα του οποίου εξαρτάται από την τιμή της τάσης. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται το μοντέλο των εκκενώσεων που πρότεινε ο Πετρόπουλος.



**Σχήμα 1.2** Ημισφαιρικό μοντέλο Πετρόπουλου [11].

Για παράδειγμα [17], θεωρούμε ότι εγχέεται παλμός ρεύματος  $I(t)$  στο ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο που βρίσκεται μέσα στο χώμα. Υποθέτουμε ότι σε χρόνο  $t$ , ο παλμός ρεύματος είναι τέτοιος ώστε η κρίσιμη πεδιακή ένταση ιονισμού φτάνει σε μια ακτινική απόσταση  $r_i$ , η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου αφού το εύρος του παλμού μεταβάλλεται με το χρόνο. Η αντίσταση του ηλεκτροδίου δίνεται από τη σχέση:

$$R_{hem}(t) = \frac{\rho_o}{2\pi r_i(t)} \quad (1.1)$$

με

$$r_i(t) = r_o \quad \text{αν} \quad \frac{I(t)\rho_o}{2\pi r_o^2} < E_c \quad (1.2)$$

$$r_i(t) = \sqrt{\frac{I(t)\rho_o}{2\pi E_c}} \quad \text{αν} \quad \frac{I(t)\rho_o}{2\pi r_o^2} > E_c \quad (1.3)$$

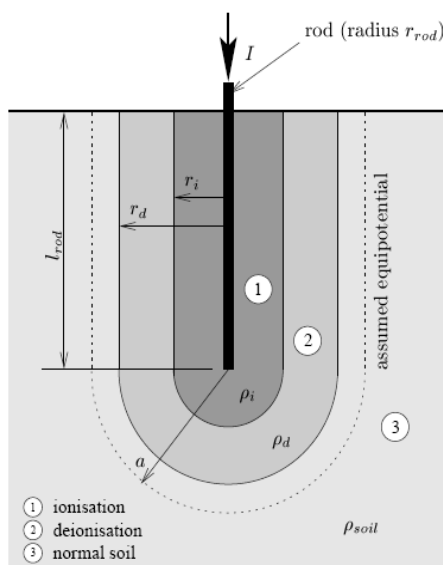
όπου  $\rho_o$ , ειδική αντίσταση του εδάφους σε  $\Omega m$   
 $r_o$ , ακτίνα του ημισφαιρικού ηλεκτροδίου σε  $m$   
 $E_c$ , κρίσιμη ένταση ιονισμού σε  $V/m$

#### 1.4.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

Σε αυτό το μοντέλο, η μείωση της αντίστασης του ηλεκτροδίου ερμηνεύεται ως μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\rho_o$ ) στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, εξαιτίας του φαινομένου του ιονισμού.

Το 1974 οι Liew και Darveniza [12], [17], [18] βελτίωσαν το προηγούμενο βασικό μοντέλο προτείνοντας ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς της ειδικής αντίστασης 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 των Liew και Darveniza (Σχήμα 1.3), το έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο, χωρίζεται σε τρεις περιοχές ανάλογα με την τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος που εγχέεται: την περιοχή ιονισμού (1), την περιοχή απιονισμού (2) και την περιοχή όπου δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού (3).



**Σχήμα 1.3** Μοντέλο Liew και Darveniza [12].

Όταν στο ηλεκτρόδιο επιβάλλεται κρουστικό ρεύμα, ο ιονισμός επεκτείνεται σε μια περιοχή με ακτίνα  $r_{cm}$  που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή που παίρνει το ρεύμα. Σε αυτή την περιοχή η πυκνότητα του ρεύματος ( $J$ ) είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ρεύματος ( $J_c$ ) και η ειδική αντίσταση μειώνεται σε σχέση με αυτή στη μόνιμη κατάσταση. Στην περιοχή έξω από την ακτίνα  $r_{cm}$  η ειδική αντίσταση παραμένει αμετάβλητη.

Με την έναρξη του ιονισμού, η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται εκθετικά όπως περιγράφεται από τον τύπο:

$$\rho = \rho_o \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \quad (1.4)$$

όπου  $\tau_1$ , χρονική σταθερά ιονισμού  
 $t$ , χρόνος από την έναρξη του ιονισμού

Η μείωση της τιμής της ειδικής αντίστασης συνεχίζεται για όσο διάστημα το ηλεκτρικό πεδίο (ή η πυκνότητα του ρεύματος) στο χώμα υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή ιονισμού. Όταν η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου (ή η πυκνότητα ρεύματος) γίνει μικρότερη από την κρίσιμη τιμή, η ειδική αντίσταση ανακάτη την κανονική τιμή της. Στο μοντέλο γίνεται η υπόθεση ότι η ανάκτηση, που εξαρτάται από το ρεύμα, είναι εκθετική.

Καθώς το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται διαμορφώνονται οι τρεις περιοχές που προαναφέρθηκαν:

- **Περιοχή 1.** Η πυκνότητα ρεύματος είναι ακόμα μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή και εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού. Η ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση (1.4).
- **Περιοχή 2.** Η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες της κρίσιμης και η ειδική αντίσταση επιστρέφει στην αρχική της τιμή με βάση τον τύπο

$$\rho = \rho_i + (\rho_o - \rho_i) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2}\right) \left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \text{ για } r < r_{cm} \text{ και } J > J_c \quad (1.5)$$

όπου  $\tau_2$ , χρονική σταθερά απιονισμού

$\rho_i$ , ειδική αντίσταση στο τέλος της φάσης ιονισμού

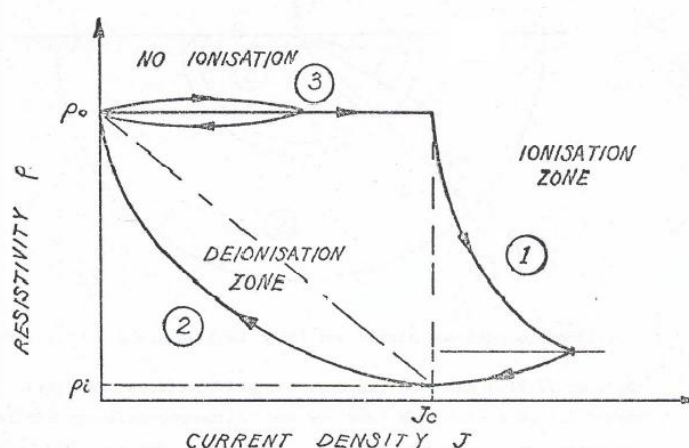
$J$ , πυκνότητα ρεύματος

$J_c$ , κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος ιονισμού

Κατά τη φάση απιονισμού, που περιγράφεται στην πιο πάνω εξίσωση, ο τελευταίος όρος του δεξιού μέλους δείχνει ότι, η διαδικασία εξαρτάται από το ρεύμα. Όσο μεγαλύτερο το εγχεόμενο ρεύμα, τόσο πιο αργή είναι η ανάκτηση. Η δυναμική συμπεριφορά της ειδικής αντίστασης όταν αυξάνεται και ακολούθως μειώνεται το εγχεόμενο ρεύμα φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζει υστέρηση αφού η ανάκτηση της ειδικής αντίστασης κατά το στάδιο του απιονισμού, δεν ακολουθεί την ίδια διαδρομή, όπως η μειούμενη ειδική αντίσταση κατά το στάδιο του ιονισμού.

- **Περιοχή 3.** Δεν έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού και η ειδική αντίσταση είναι σταθερή και ίση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους

$$\rho = \rho_o \text{ για } r > r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (1.6)$$



**Σχήμα 1.4** Δυναμική μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος. Τα βέλη δείχνουν τη χρονική εξέλιξη της [18].

Οι Almeida και Correia de Barros [19] ακολουθώντας την προσέγγιση της μεταβαλλόμενης ειδικής αντίστασης, τροποποίησαν το μοντέλο των Liew και Darveniza το οποίο θεωρούσε

τη διαδικασία ιονισμού ανεξάρτητη από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ήταν υψηλότερες της κρίσιμης τιμής και επομένως έδειχναν ότι η ειδική αντίσταση δε μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από την πεδιακή ένταση. Στο νέο μοντέλο η πεδιακή ένταση δεν ξεπερνά την κρίσιμη τιμή και κατά τον ιονισμό η περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο είναι ισοδυναμική.

Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία των Liew και Darveniza, η περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο διαιρείται σε μικρά κελύφη πάχους  $dr$  τα οποία ορίζονται από ισοδυναμικές επιφάνειες. Το χώμα θεωρείται ομογενές και ιστροπικό μέσο με σταθερή ειδική αντίσταση  $\rho_o$  ενόσω η πεδιακή ένταση παραμένει κάτω από την κρίσιμη τιμή  $E_c$ . Καθώς το ρεύμα στο ηλεκτρόδιο αυξάνεται, η πεδιακή ένταση ξεπερνά την κρίσιμη τιμή και επέρχεται ο ιονισμός του χώματος. Η ειδική αντίσταση  $\rho_k$  ενός στοιχειώδους κελύφους  $k$  μέσα στην περιοχή ιονισμού δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_k = \frac{E_c}{I} A_k \quad (1.7)$$

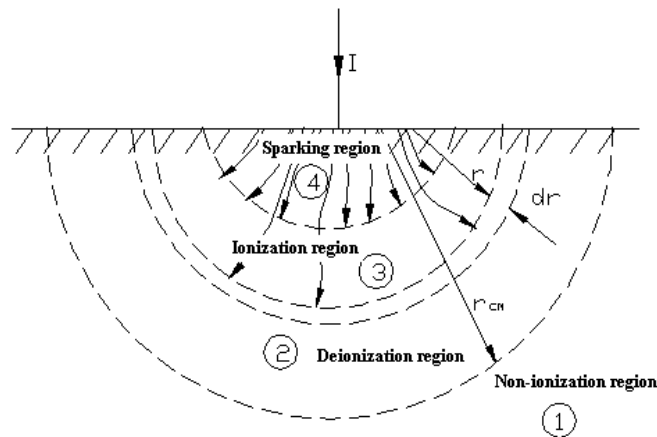
όπου  $A_k$ , η ισοδυναμική επιφάνεια του κελύφους  $k$ .

Καθώς το ρεύμα μειώνεται, στην περιοχή απιονισμού όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι πλέον κάτω από την κρίσιμη τιμή, η ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_k = \rho_{ki} + (\rho_o - \rho_k) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_1}\right) \left(1 - \frac{E_k}{E_c}\right)^2 \quad (1.8)$$

όπου  $\tau_1$  χρονική σταθερά απιονισμού,  $\rho_{ki}$  ειδική αντίσταση του κελύφους  $k$  και  $E_k$  το ηλεκτρικό πεδίο του κελύφους  $k$ .

Το 2004 οι Wang – Liew – Darveniza [18] εισήγαγε στο προηγούμενο μοντέλο των Liew και Darveniza μια επιπλέον περιοχή που ονομάστηκε περιοχή τόξων και σε αυτήν η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μηδενική (άπειρη αγωγιμότητα). Οι ισοδυναμικές επιφάνειες θεωρούνται και εδώ ημισφαιρικές και η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας τα στοιχειώδη ημισφαιρικά κελύφη πλάτους  $dr$ . Το μοντέλο των Wang – Liew – Darveniza φαίνεται στο Σχήμα 1.5.



**Σχήμα 1.5** Μοντέλο Wang – Liew – Darveniza.

Στις περιοχές 1,2 και 3 ισχύουν για την ειδική αντίσταση οι σχέσεις του μοντέλου των Liew και Darveniza (1.4), (1.5), (1.6). Για την περιοχή 4 όπου εκδηλώνονται ηλεκτρικά τόξα (συμβαίνουν διασπάσεις) ισχύει

$$\rho = 0 \text{ για } J \geq J_s \quad (1.9)$$

όπου

$$J_s = \alpha J_c \quad (1.10)$$

με  $\alpha \geq 1$ , δηλαδή η πυκνότητα ρεύματος στην περιοχή 4 είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή.

Ο Νίχον[20] πρότεινε μια απλοποίηση του μοντέλου των Liew και Darveniza εκτιμώντας ότι, η ειδική αντίσταση της κάθε μιας από τις τρεις περιοχές μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα ρεύματος στο εξωτερικό όριο της χωρίς να είναι έτσι αναγκαία η πρόσθεση της αντίστασης όλων των στοιχειωδών κελυφών της περιοχής για να προκύψει η συνολική.

### 1.4.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας

Οι Sekioka et al. [21] χρησιμοποίησαν την αρχή διατήρησης της ενέργειας για να μελετήσουν τη χρονική μεταβολή της αγωγιμότητας του εδάφους κατά τη διάρκεια του ιονισμού. Βασικές παράμετροι του μοντέλου είναι: η διάσταση του ηλεκτροδίου, το εγχεόμενο ρεύμα και η αποθηκευμένη, στη ζώνη ιονισμού, ενέργεια.

Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα γίνεται η υπόθεση ότι ο ιονισμός συμβαίνει όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ή η πυκνότητα ρεύματος υπερβούν μια κρίσιμη τιμή και λαμβάνει χώρα συμμετρικά γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου για την εκφόρτιση σε μια στοιχειώδη ακτίνα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dQ}{dt} = ui - P \quad (1.11)$$

όπου  $u$ , τάση εκφόρτισης κατά μήκος της στοιχειώδους ακτίνας

$i$ , ρεύμα εκφόρτισης

$Q$ , αποθηκευμένη ενέργεια σε  $J/m$

$P$ , απώλειες ισχύος σε  $W/m$

$t$ , ο χρόνος σε  $s$

Στο μοντέλο οι Sekioka et al. υποθέτουν ότι η διαδικασία ιονισμού του εδάφους είναι παρόμοια με το φαινόμενο τόξου που εμφανίζεται στους διακόπτες και ως εκ τούτου μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση του Mayr [22]

$$\sigma = K \exp\left(\frac{Q}{Q_0}\right) \quad (1.12)$$

όπου  $\sigma$ , αγωγιμότητα του τόξου σε  $S/m$

$K$ , σταθερά σε  $S/m$

$Q_0$ , σταθερά σε  $J/m$

Η απώλεια ισχύος οφείλεται στην απώλεια θερμότητας, και γι' αυτόν το λόγο θα πρέπει να θεωρηθεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν, ότι η θερμοκρασία στην περιοχή του ιονισμού μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το ηλεκτρόδιο, η απώλεια θερμότητας μπορεί να φθάνει και έξω από την περιοχή ιονισμού οδηγώντας σε απώλεια ισχύος. Η απώλεια ισχύος στο προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη προς την επιφάνεια κάθε τμήματος σύμφωνα με το μοντέλο του Cassie [23] για το τόξο και δίνεται από τη σχέση:

$$P = \lambda S \quad (1.13)$$

όπου  $\lambda$ , σταθερά σε  $W/m^3$ .

Η συνολική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R(i, t) = \int_{r_0}^{r_e} \frac{dr}{\sigma(r, t)} + \int_{r_e}^{\infty} \frac{dr}{\sigma(r, t)} \quad (1.14)$$

όπου  $r$ , απόσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης σε  $m$

$r_e$ , ακτίνα της ζώνης ιονισμού σε  $m$

$\sigma(r, t)$ , αγωγιμότητα του τμήματος μέχρι το  $r$

Για  $r > r_e$  δεν υφίσταται ιονισμός και η αγωγιμότητα είναι σταθερή. Εντός της περιοχής ιονισμού, η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \left[1 + \frac{1}{\sigma_0 Q_0} \int i^2 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt\right]^{-1} \quad (1.15)$$

όπου  $t$ , η χρονική στιγμή μετά τον ιονισμό του εδάφους σε ένα στοιχειώδες κέλυφος σε  $s$   
 $\tau = Q_0/P$ , χρονική σταθερά που εκφράζει την επαναφορά της ειδικής αντίστασης στην αρχική τιμή της σε  $s$

Πλεονέκτημα του μοντέλου είναι ότι δίνει φυσική σημασία στα μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως η εξάρτηση του ρεύματος και η επίδραση της υστέρησης του ηλεκτροδίου γείωσης, λόγω του ιονισμού και απιονισμού του εδάφους.

Για την εκτίμηση του ενεργειακού ισοζυγίου στο μοντέλο, θεωρείται ότι η ενέργεια διαχέεται ακτινικά. Στην πραγματικότητα το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας κατά την εκφόρτιση καταναλώνεται ως θερμότητα στο χώμα με το οποίο η εκφόρτιση είναι σε επαφή. Επομένως η διάχυση της ενέργειας (ή τουλάχιστον ένα μέρος της) θα είναι ανάλογη του όγκου του χώματος στο οποίο λαμβάνει χώρα ο ιονισμός. Επιπλέον, η εξίσωση του τόξου που χρησιμοποιείται στο μοντέλο ισχύει για πλήρως ανεπτυγμένο τόξο, ενώ στο έδαφος το μεγαλύτερο μέρος της διάχυσης θερμότητας και ενέργειας λαμβάνει χώρα κατά την έναρξη και την εγκαθίδρυση του τόξου. Αυτή η διάχυση ενέργειας δε λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο. Είναι πράγματι αμφίβολο εάν δημιουργούνται οι πραγματικές συνθήκες τόξου στο έδαφος, ειδικά όταν η διάρκεια του παλμού του ρεύματος είναι της

τάξης των εκατοντάδων μικροδευτερολέπτων. Είναι ενδιαφέρον ότι οι συγγραφείς δείχνουν ότι από το μοντέλο τους μπορούν να ανακτήσουν την εκθετική μείωση της προβλεπόμενης, από τους Liew και Darveniza, ειδικής αντίστασης κατά τη διάρκεια του ιονισμού.

Οι Cooray et al. [24] παρουσίασαν ένα φυσικό μοντέλο για την περιγραφή των μη γραμμικών χαρακτηριστικών των κατακόρυφων ηλεκτροδίων υποθέτοντας ότι η εκφόρτιση λαμβάνει χώρα μόνο στα κενά αέρα του χώματος. Λαμβάνεται υπ' όψιν η δημιουργία διαύλων εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση αυτών των διαύλων ως συνάρτηση του ρεύματος που τους διαρρέει διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν την παραγωγή θερμότητας και την απαγωγή της από αυτούς και την εξαρτημένη από τη θερμοκρασία αγωγιμότητα του αέρα.

Οι βασικές παραδοχές του μοντέλου είναι:

- Οι ισοδυναμικές επιφάνειες που περιβάλλουν το ηλεκτρόδιο μπορούν να παρασταθούν ως κύλινδροι με ημισφαιρική απόληξη. Υποτίθεται ότι η συμμετρία παραμένει και κατά τη διάρκεια του ιονισμού του αέρα μέσα στο χώμα.
- Η διαδικασία ιονισμού για στοιχειώδες κέλυφος θα αρχίσει όταν το ηλεκτρικό πεδίο ξεπεράσει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Δεδομένου ότι κάθε κέλυφος οριοθετείται από ισοδυναμικές επιφάνειες, ο ιονισμός πραγματοποιείται σε ολόκληρο το κέλυφος ταυτόχρονα.
- Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η διάσπαση στο χώμα δεν είναι γνωστός. Είναι πιθανόν η διαδικασία διάσπασης στο χώμα να αποτελείται από μία σειρά ηλεκτρικών εκκενώσεων που λαμβάνουν χώρα στα κενά αέρα ανάμεσα στους κόκκους του εδάφους.
- Ο όγκος του θερμού αέρα θεωρείται ότι είναι ένα ποσοστό του συνολικού όγκου του χώματος στο οποίο λαμβάνει χώρα ο ιονισμός. Η ροή του ρεύματος μέσω του θερμού όγκου αέρα οδηγεί στην έκλυση περισσότερης ενέργειας και συνεπώς την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας του αέρα. Επιπλέον γίνεται η υπόθεση ότι η έκλυση θερμότητας από το θερμό όγκο αέρα στο περιβάλλον χώμα είναι ανάλογη προς τον όγκο και τη θερμοκρασία του αέρα.

Για δεδομένη τιμή κορυφής του εγγεόμενου ρεύματος  $I_p$ , η κρίσιμη ακτίνα  $r_c$  πέρα από την οποία δεν πραγματοποιείται ιονισμός του χώματος υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$J_c = \frac{I_p}{2\pi r_c l + 2\pi r_c^2} \quad (1.16)$$

όπου  $J_c$ , κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος  
 $l$ , μήκος της ράβδου

Η αντίσταση των στοιχείων του όγκου που βρίσκονται πέρα από αυτήν την κρίσιμη ακτίνα δίνεται από τη σχέση:

$$dR_s = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi r l + 2\pi r^2)} \text{ για } r \geq r_c \quad (1.17)$$

όπου  $\sigma_s$ , η αγωγιμότητα του χώματος.

Για έναν στοιχειώδη όγκο, ο οποίος βρίσκεται εντός της κρίσιμης ακτίνας, ο ιονισμός του αέρα αρχίζει τη χρονική στιγμή  $t_0$  κατά την οποία η πυκνότητα του ρεύματος του στοιχειώδους όγκου ξεπερνά την κρίσιμη τιμή  $J_c$ . Για τιμές  $t \leq t_0$ , η αντίσταση του στοιχείου όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$dR(t < t_0) = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi rl + 2\pi r^2)} \text{ για } r \leq r_c \quad (1.18)$$

Όταν εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού τη χρονική στιγμή  $t = t_0$ , η θερμοκρασία ενός όγκου αέρα μεγέθους ίσου με  $F$ , που αποτελεί ποσοστό του στοιχειώδους όγκου  $(2\pi r l dr + 2\pi r^2 dr)$  αυξάνεται σε κάποια τιμή  $T_0$ . Κατά συνέπεια, η αντίσταση του στοιχείου για  $t = t_0$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$dR(t = t_0) = \frac{dr}{(\sigma_s + F\{T_0/T_a\}\sigma_a(T_0))(2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad (1.19)$$

όπου  $\sigma_a$ , αγωγιμότητα του αέρα, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας  
 $T_a$ , θερμοκρασία του όγκου του αέρα πριν από τον ιονισμό.

Η συνολική αντίσταση του ηλεκτροδίου συναρτήσει του χρόνου λαμβάνεται από τη σχέση:

$$R(t) = \int_{r_0}^{r_c} dR(t)dr + \int_{r_c}^{\infty} dR_s dr \quad (1.20)$$

Το 2009 οι Ala et al. [25] υιοθετώντας το προηγούμενο μοντέλο, ενσωματώνουν ένα αριθμητικό σύστημα FDTD (Finite Difference Time Domain) στην προσπάθεια να ξεπεραστεί η δυσκολία της εικασίας για το σχήμα και την έκταση της ζώνης ιονισμού. Το σύστημα γείωσης και το περιβάλλον χώμα «τεμαχίζεται» σε στοιχειώδεις κυψέλες τετραγωνικού όγκου. Η αγωγιμότητα του εδάφους θεωρείται χρονικά μεταβαλλόμενη. Μέσα σε κάθε στοιχειώδη κυψέλη του πλέγματος FDTD είναι δυνατό να διαχωριστούν τα υλικά που αποτελούν το χώμα από τα κενά αέρα. Για τα πρώτα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα θεωρείται σταθερή και διαμορφώνεται από την υγρασία η οποία καλύπτει τους κόκκους του χώματος κατά τη διαδικασία του ιονισμού, ενώ για τα κενά αέρα η αγωγιμότητα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Συνεπώς, το ρεύμα ρέοντας στο έδαφος συναντά δύο παράλληλες οδούς και η μέση αγωγιμότητα δίνεται σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ως ακολούθως

$$\sigma(T) = \{\sigma_s \Delta V_S + \sigma_A(T) \Delta V_A(T/T_a)\} / (\Delta V_S + \Delta V_A) \quad (1.21)$$

όπου  $\sigma_s$ , η αγωγιμότητα στη μόνιμη κατάσταση των συστατικών του εδάφους χωρίς τα κενά αέρα

$T$ , η θερμοκρασία του αέρα

$\sigma_A(T)$ , η αγωγιμότητα του αέρα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

$T_a$ , η θερμοκρασία του εδάφους πριν τον ιονισμό και η θερμοκρασία των περιβαλλόντων κυψελών ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )



### 1.5. Πειραματικός προσδιορισμός κρίσιμης τιμής της έντασης ιονισμού και διάσπασης

Τα φαινόμενα του ιονισμού και διάσπασης του εδάφους εισάγουν τις σημαντικές για την περιγραφή τους έννοιες, της κρίσιμης τιμής έντασης ιονισμού και της κρίσιμης τιμής έντασης διάσπασης. Επίσης, αντίστοιχα σημαντική είναι και η τιμή τάσης διάσπασης κάθε φαινομένου. Αυτό έχει προκαλέσει πολλούς ερευνητές και επιστήμονες, οι οποίοι στην προσπάθεια προσδιορισμού του επιπέδου τάσης στο οποίο παρατηρείται το φαινόμενο του ιονισμού, ακολούθησαν διαφορετικές μεθοδολογίες και πειραματικές διατάξεις καταλήγοντας σε διαφορετικές προσεγγίσεις.

### 1.6. Πειράματα σε πραγματικά συστήματα γείωσης

Ο H.M.Towne [16] πραγματοποίησε τις μετρήσεις του σε χαλίκι, ποσοστό του οποίου ήταν τεχνητό. Η αντίσταση γείωσης  $R_0$  του ηλεκτροδίου σε χαμηλή ένταση ρεύματος, ήταν γνωστή και έτσι μπορούσε να επιλεγεί και η κατάλληλη ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho_0$ . Στην περίπτωση του ηλεκτροδίου οι παραπάνω αντιστάσεις προκύπτουν από τις ακόλουθες σχέσεις

$$R_0 = \frac{\rho_0}{2\pi L} \left[ \ln \left( \frac{4L}{r_0} \right) - 1 \right] \quad (1.22)$$

$$\rho_0 = 2\pi\alpha_0 R_0 \quad (1.23)$$

Για τιμές ειδικής αντίστασης της άμμου 130 – 686  $\Omega\text{m}$ , προέκυψε πεδιακή ένταση με εύρος 29-104 kV/m.

Ο W.K. Dick [26] για τον προσδιορισμό των τιμών έντασης ενάλλαξε το ρεύμα υψηλής έντασης και μικρής διάρκειας με ρεύμα χαμηλής έντασης και μεγάλης διάρκειας. Πραγματοποίησε πειράματα σε εδάφη των οποίων η ειδική αντίσταση λάμβανε τιμές 12-25  $\Omega\text{m}$ , χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια (διαμέτρου 5/8 inches και μήκους 8 ft) από διάφορα υλικά και υπολόγισε την πεδιακή ένταση 13-221 kV/m.

Ο Geri [27] υπολόγισε την κρίσιμη ένταση με τρεις μεθόδους, μετά από πειράματα που διεξήγαγε με χρήση κατακόρυφου ηλεκτροδίου τοποθετημένου σε ομογενές έδαφος. Στην πρώτη μέθοδο μετρήθηκε η αντίσταση μονίμου καταστάσεως ( $R$ ) και υπολογίστηκε η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους ( $\rho$ ). Υπολογίζεται η ακτίνα ιονισμού από τη σχέση:

$$r_c = \frac{L}{e^{(2R_i\pi\frac{L}{\rho})} - 1} \quad (1.24)$$

όπου  $L$ , το μήκος του ηλεκτροδίου  
 $R_i$ , η μεταβατική αντίσταση γείωσης  
 $\rho$ , η ειδική αντίσταση του εδάφους

Τότε η κρίσιμη ένταση προκύπτει από τον τύπο:

$$E_c = \rho \frac{I}{2\pi r_c L + 2\pi r_c^2} \quad (1.25)$$

όπου  $I$  η μέγιστη τιμή ρεύματος  
 $r_c$  η ακτίνα ιονισμού

Στη δεύτερη μέθοδο χρησιμοποιείται για την ακτίνα ιονισμού ο τύπος:

$$r_c = \frac{L}{e \left( \frac{\rho \ln \left( \frac{L+r_g}{r_g} \right) + 2\pi R_i L}{\rho_g} \right) - 1} \quad (1.26)$$

όπου  $r_g$  η ακτίνα ηλεκτροδίου.

Η παραπάνω σχέση διορθώνει την (1.24) που δε λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση της μέτρησης που εισάγει η εγγύτητα του ηλεκτροδίου γείωσης.

Η τρίτη μέθοδος υπολογισμού αφορά περισσότερο κατανεμημένα συστήματα γείωσης αλλά ο ερευνητής τη χρησιμοποιεί και για την απλή διάταξη ενός ηλεκτροδίου. Η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι η ιονισμένη περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας κύλινδρος που το περιβάλλει. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της  $E_c$  είναι οι ακόλουθοι

$$\rho = \frac{R}{\frac{1}{2\pi L} \left\{ \ln \left[ \frac{L}{r_e} + \sqrt{1 + \left( \frac{L}{r_e} \right)^2} \right] + \frac{r_e}{L} - \sqrt{1 + \left( \frac{r_e}{L} \right)^2} + \ln(2) \right\}} \quad (1.27)$$

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ \ln \left[ \frac{L}{r_e} + \sqrt{1 + \left( \frac{L}{r_c} \right)^2} \right] + \frac{r_i}{L} - \sqrt{1 + \left( \frac{r_c}{L} \right)^2} + \ln(2) \right\} \quad (1.28)$$

$$E_c = \rho \frac{I}{2\pi r_c L} \quad (1.29)$$

Ο Υ. Asaoka [28], θέλοντας να παρατηρήσει τη συμπεριφορά της αντίστασης εδάφους των ηλεκτροδίων όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική εκκένωση στο έδαφος, με ράβδο μήκους 1,5m και διαμέτρου 10mm, διεξήγαγε πειράματα σε άμμο, χαλίκι και δύο είδη λάσπης με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η ειδική αντίσταση του εδάφους εκτιμήθηκε με χρήση των τύπων:

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left( 1 + \frac{L}{r_0} \right) \quad (1.30)$$

$$\rho = \frac{2\pi L R_0}{\ln \left( 1 + \frac{L}{r_0} \right)} \quad (1.31)$$

όπου  $R_0$  η αντίσταση του εδάφους  
 $\rho$  η αγωγιμότητα του εδάφους  
 $r_0$  η ακτίνα του ηλεκτροδίου  
 $L$  το μήκος του ηλεκτροδίου

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η κρίσιμη πεδιακή ένταση από τη σχέση:

$$E_c = \rho \frac{I_c}{2\pi r_0(L + r_0)} \quad (1.32)$$

Μετά την πειραματική διαδικασία προκύπτουν οι παρακάτω τιμές για την κρίσιμη πεδιακή ένταση, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.

	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	(kV/m)
Άμμος	487	1040
Λάσπη	228	1330
Χαλίκι	2056	1430
Λάσπη	365	1240

**Πίνακας 1.2** Πειραματικά αποτελέσματα για  $\rho$  και  $E_c$  από Υ.Ασαoka.

## 1.7. Πειράματα υπό κλίμακα

### 1.7.1. Κυλινδρική διάταξη

Ο Norinder [29] για τον προσδιορισμό της κρίσιμης πεδιακής έντασης χρησιμοποίησε κυλινδρικό μοντέλο γείωσης με διάμετρο 45cm, κυλινδρικό ηλεκτρόδιο διαμέτρου 2,7cm στον άξονα του δοχείου και μήκος κυλίνδρου 38cm. Ο Norinder προσδιόρισε τη συμπεριφορά σε δείγμα με φυτικό χώμα και σε κόκκινο πηλό. Στα πειράματα με το φυτικό χώμα, υπολόγισε την πεδιακή ένταση 327 kV/m, ενώ στη δεύτερη περίπτωση με τον κόκκινο πηλό η πεδιακή ένταση προέκυψε 360 kV/m.

Οι Loboda και Rochanke [30], επιβάλλοντας κρουστικό ρεύμα σε τρία διαφορετικά δείγματα χώματος με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, υπολόγισαν την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με τη βοήθεια των τύπων.

$$R = \frac{u}{I_m} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_c}{r_f} \quad (1.33)$$

$$E_c = \frac{I_m \rho}{2\pi l r_f} \quad (1.34)$$

όπου  $I_m$  η μέγιστη τιμή του ρεύματος  
 $\rho$  η ειδική αντίσταση του εδάφους  
 $l$  είναι το μήκος του ηλεκτροδίου  
 $r_f$  είναι η φανταστική ακτίνα της περιοχής ιονισμού  
 $r_c$  είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου

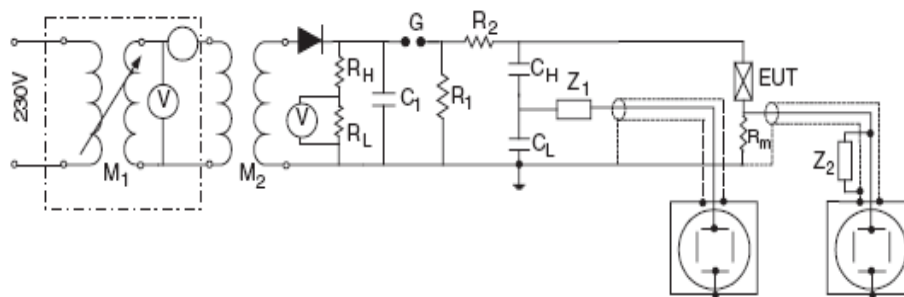
Ακολούθως όμως, οι Loboda και Scuka [31], πρότειναν μια εναλλακτική μεθοδολογία για τον υπολογισμό της πεδιακής έντασης, καθώς παρατήρησαν ότι η παραπάνω μέθοδος εισάγει σφάλμα, διότι εντός της ζώνης ιονισμού η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν είναι μηδενική αλλά έχει μικρότερη τιμή από αυτή της μονίμου καταστάσεως. Η δεύτερη αυτή μέθοδος λαμβάνει υπ' όψιν της τη χρονική υστέρηση μεταξύ της μέγιστης τιμής της κυματομορφής του ρεύματος και της μέγιστης τιμής της κυματομορφής της τάσης ( $\Delta t = t_{cl} - t_{cu}$ ). Για την υπολογιζόμενη από τα παλμογραφήματα χρονική διαφορά μεταξύ των δύο μεγίστων, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ρεύματος και συνεπώς της πυκνότητας του ρεύματος, που εγγέεται από το ηλεκτρόδιο στο χώμα. Στη συνέχεια με την εφαρμογή του νόμου του Amperere υπολογίζεται η τιμή της  $E_c$ .

Οι ερευνητές εφήρμοσαν τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους και διαπίστωσαν ότι οι τιμές της  $E_c$ , που προέκυπταν από την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου ήταν 30-70% υψηλότερες εν συγκρίσει με τις υπολογιζόμενες τιμές της  $E_c$  βάσει της πρώτης μεθόδου των Loboda και Rochanke. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της  $E_c$ , όπως υπολογίστηκαν και από τις δύο μεθόδους.

	Ειδική αντίσταση $\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	Πεδιακή ένταση $E_c$ [kV/cm]	
		1 <sup>η</sup> μέθοδος	2 <sup>η</sup> μέθοδος
Άμμος	800	2,5-8,3	6,8
	2150	2,1-9,6	9,0
Πηλός	50	1,9-7,9	7,1
	70	1,1-7,4	5,6
Οργανικό χώμα	40	4,5-11,7	8,3
	200	2,0-7,7	8,2
Towne	130-686	1,6-5,2	-
Bellaschi	93-100	1,2-4,2	
Riabkova	120-580	6,0-7,2	

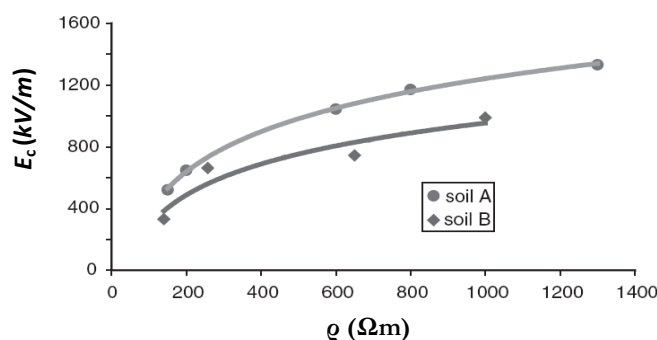
**Πίνακας 1.3** Πειραματικά αποτελέσματα για  $\rho$  και  $E_c$  σε κυλινδρική διάταξη από Loboda-Rochanke και Loboda - Scuka.

Ο Gonos [32],[33] χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη του Σχήματος 1.6, επέβαλε σε δείγματα χώματος σε κυλινδρική διάταξη κρουστική τάση έτσι ώστε να προσδιορίσει την  $E_c$ . Το πείραμα έγινε σε δείγματα χώματος με διαφορετικά επίπεδα υγρασίας έτσι ώστε να μεταβάλλεται και η ειδική αντίσταση.



**Σχήμα 1.6** Πειραματική διάταξη Gonos.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7, οι τιμές της  $E_c$  προέκυψαν μεταξύ 350-1300 kV/m. Επίσης, προέκυψε ότι η  $E_c$  είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του δείγματος. Παρατηρώντας τις τιμές της κρίσιμης έντασης σε στεγνό και υγρό χώμα, προτάθηκε η τιμή 200 kV/m για την κρίσιμη ένταση ιονισμού.



**Σχήμα 1.7** Μεταβολή της κρίσιμης έντασης συναρτήσει της ειδικής αντίστασης.

Ο J.L.C. Lima [34] διεξήγαγε πειράματα σε διάταξη κυλινδρικής διάταξης για την εκτίμηση της  $E_c$ , με τέσσερις διαφορετικούς τύπους χώματος. Για κάθε τύπο χώματος διεξήγαγε τη δοκιμή μεταβάλλοντας την περιεκτικότητα του χώματος σε υγρασία, το χρόνο ανόδου και το πλάτος της τάσης. Ο υπολογισμός της κρίσιμης έντασης του χώματος γίνεται με τον τύπο

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (1.35)$$

όπου  $r = r_i \left(1 - \frac{z_i}{z_c}\right) \cdot r_i \left(\frac{z_i}{z_c}\right)$

$Z_i$  υπολογίζεται από τις μετρούμενες τιμές της τάσης και του ρεύματος

και  $Z_0 = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{r_e}{r_i}\right)$

όπου  $r_e$  η εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου

$r_i$  η ακτίνα του ηλεκτροδίου

$L$  το μήκος του ηλεκτροδίου

Οι τιμές της ειδικής αντίστασης και της κρίσιμης πεδιακής έντασης για τα τέσσερα είδη χώματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Πεδιακή ένταση (kV/m)	
		1 $\mu\text{s}$	3 $\mu\text{s}$
Χώμα 1	250	547	339
	350	674	478
	600	882	820
Χώμα 2	80	400	350
	240	490	450
	600	450	
	1090	790	590

**Πίνακας 1.4** Πειραματικά αποτελέσματα για  $\rho$  και  $E_c$  από J.L.C. Lima.

### 1.7.2. Ημισφαιρική διάταξη

Ο Πετρόπουλος [11] για τον υπολογισμό των κρίσιμων τιμών βασίστηκε στη μη γραμμικότητα της καμπύλης I-V αλλά και στην παρατήρηση ότι η εκδήλωση φαινομένων ιονισμού και διάσπασης προκαλεί μείωση της μεταβατικής τιμής της αντίστασης. Χάραξε για διάφορα επίπεδα τάσης την καμπύλη της αντίστασης συναρτήσει της τάσης και ακολούθως συνένωσε την ελάχιστη τιμή αντίστασης σε κάθε καμπύλη. Έτσι, ως κρίσιμη τάση καθορίζεται το σημείο στο οποίο τέμνονται η καμπύλη με την καμπύλη αντίστασης μονίμου καταστάσεως. Η τιμή της ειδικής αντίστασης υπολογίστηκε 290 $\Omega\text{m}$  ενώ η πεδιακή ένταση για θετική και αρνητική πολικότητα, 800kV/m και 860kV/m αντίστοιχα.

Ο Armstrong [35] ασχολήθηκε επίσης με ημισφαιρική διάταξη και προσδιόρισε τις τιμές σε δείγματα χώματος από άμμο, άργιλο και μείγμα αργίλου και άμμου. Η διάταξη είχε εσωτερική διάμετρο 60cm και διάμετρο ηλεκτροδίου 5cm. Για το δείγμα από άμμο προέκυψαν τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ 245-495 $\Omega\text{m}$  και κρίσιμης πεδιακής έντασης 396-466kV/m. Για το δείγμα αργίλου αντίστοιχα ειδική αντίσταση 80-140 $\Omega\text{m}$  και πεδιακή ένταση 432-476kV/m. Τέλος, για το μείγμα αργίλου και άμμου ειδική αντίσταση 52-180 $\Omega\text{m}$  και πεδιακή ένταση 442-522kV/m.

Η Oettle [10] παρατήρησε, ότι η επιβολή της κρουστικής τάσης προκαλεί μείωση της σύνθετης αντίστασης του συγκεκριμένου χώματος. Διαπίστωσε μάλιστα, ότι το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα όταν η τιμή της έντασης στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου λάβει τιμές μεταξύ 7kV/cm και 9kV/cm (ανάλογα με τον τύπο χώματος). Υιοθέτησε για το λόγο αυτό την τιμή των 8kV/cm για την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού.

Οι Liu et al [36], για να μελετήσει το φαινόμενο του ιονισμού πραγματοποίησε πειράματα χρησιμοποιώντας ένα ημισφαιρικό δοχείο το οποίο γέμισε με εδαφικά δείγματα. Ένα ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε στη μέση της διάταξης ώστε να επιβληθεί η κρουστική τάση στο συγκεκριμένο δείγμα χώματος. Βασική υπόθεση για τον προσδιορισμό της τιμής της  $E_c$  είναι ότι η ζώνη ιονισμού κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο εντός μίας ακτίνας  $r$ , πέραν της οποίας δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού. Έτσι το εδαφικό δείγμα «χωρίζεται» σε δύο ζώνες: μία εντός της οποίας εκδηλώνεται ο

ιονισμός και η τιμή της ειδικής αντίστασης λαμβάνει τιμή μικρότερη ( $\rho_{res}$ ) από την τιμή μονίμου καταστάσεως ( $\rho$ ), και μια δεύτερη ζώνη στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί ο ιονισμός και η τιμή της ειδικής αντίστασης παραμένει σταθερή ( $\rho$ ). Υπολογίστηκε ότι η  $\rho_{res}$  κυμαίνεται μεταξύ 3-8,3% της αρχικής τιμής της, η δε ακτίνα της ζώνης ιονισμού δίνεται από τη σχέση:

$$r = \sqrt{\frac{\rho I}{2\pi E_c}} \quad (1.36)$$

όπου  $\rho$  η τιμή μονίμου καταστάσεως της ειδικής αντίστασης

$I$  το εγχεόμενο ρεύμα

$E_c$  η κρίσιμη τιμή της πεδιακής έντασης

Οι Nor et al. [37],[38] πρότειναν ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης να γίνει μελετώντας τους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της. Διεξήγαγαν πειράματα σε δείγματα χώματος των οποίων η ειδική αντίσταση κυμαινόταν από μερικά  $\Omega\text{m}$  έως πολλά  $\text{k}\Omega\text{m}$ , εφαρμόζοντας θετική και αρνητική πολικότητα. Με ημισφαιρική διάταξη εξωτερικής διαμέτρου 47,5cm, διάμετρο ηλεκτροδίου 6,25cm πέτυχαν ανομοιογενές πεδίο και μεταβάλλοντας την υγρασία μελέτησαν την συμβολή της ειδικής αντίστασης στην διαμόρφωση της  $E_c$ . Από τη σχέση:

$$E(r) = \frac{V}{r_1^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (1.37)$$

όπου  $r_1$  είναι η ακτίνα του εσωτερικού σφαιρικού ηλεκτροδίου

$r_2$  είναι η ακτίνα του ημισφαιρικού δοχείου

$r$  είναι η ακτίνα της ιονισμένης περιοχής

υπολόγισαν την κρίσιμη ένταση στα 5,5kV/cm για κρίσιμη τάση 15kV. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων μετέβαλαν και άλλες παραμέτρους και έκαναν και κάποιες άλλες παρατηρήσεις. Παρατήρησαν επίσης, ότι στις περιπτώσεις στις οποίες το δείγμα είχε ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο από 10%, δεν εκδηλώνονταν φαινόμενα ιονισμού, διότι ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας καταναλώνεται για τη θέρμανση και εξάτμιση του νερού. Επίσης, παρατήρησαν ότι η τιμή της  $E_c$  δεν εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του δείγματος, εφόσον το δείγμα έχει την ίδια περιεκτικότητα σε υγρασία. Τέλος, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των Espel et al [39], διαπίστωσαν πως η τιμή της  $E_c$  για θετική πολικότητα είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή για αρνητική πολικότητα, λόγω του ιονισμού του αέρα που βρίσκεται μεταξύ των διακένων των κόκκων.

### 1.7.3. Διάταξη παραλλήλων πλακών

Οι Flanagan et al. [40] χρησιμοποίησαν παράλληλες πλάκες διαμέτρου 5 και 10 cm σε απόσταση 0.5 cm. Για χώμα με υγρασία 3% κατά βάρος (4,5% κατά όγκο), προέκυψε κρίσιμη πεδιακή ένταση διάσπασης 4050 kV/m ενώ για ξηρό χώμα 1200 kV/m.

Η Oettle [9] εκτός από πειράματα σε ημισφαιρικό δοχείο, πραγματοποίησε επίσης και πειράματα με παράλληλες πλάκες, με σκοπό να προσδιορίσει μια καμπύλη που θα προέβλεπε τη σύνθετη αντίσταση. Χρησιμοποίησε πλάκες διαμέτρου 20cm σε απόσταση 2.5-3.5cm και μελέτησε τέσσερα διαφορετικά δείγματα χώματος καταλήγοντας στα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5.

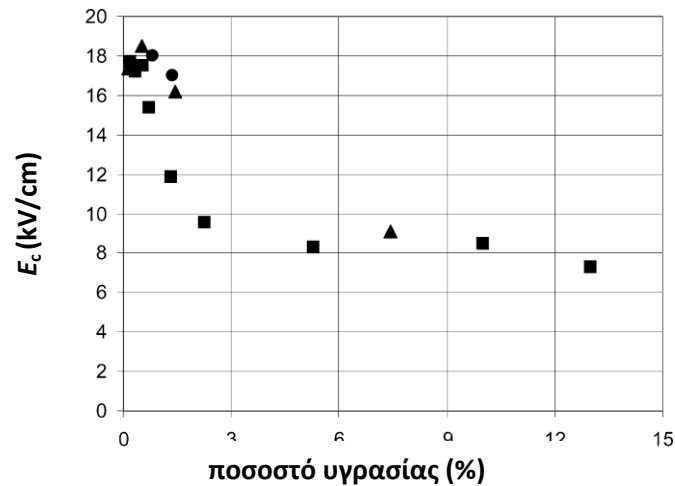
	$\rho$ ( $\Omega m$ )	$E_c$ (kV/m)
Άμμος	180000	1700
	19200	1850
	8000	1620
	3500	1600
	2000	1500
	960	1650
	900	900
	680	1080
	610	1280
	470	1000
	380	750
Κόκκινη άργιλος	340000	1800
	500	900
	330	600
	200	1130
	70	800
Μαύρη άργιλος	3100	1300
	800	1180
	170	800
	50	710
	65	700
Μίγμα διαφόρων χωμάτων	525	1280
	180	830
	50	850

**Πίνακας 1.5** Πειραματικά αποτελέσματα για  $\rho$  και  $E_c$  από J.L.C. Lima.

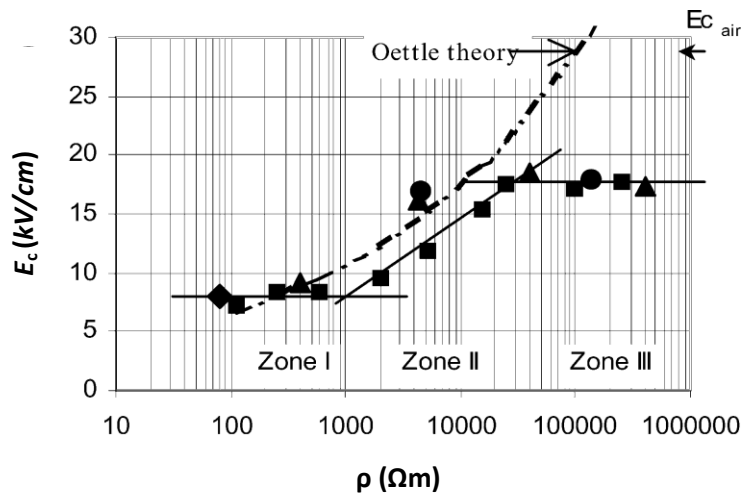
Οι Espel et al. [39] προσπάθησαν στην εργασία τους να μελετήσουν πώς επηρεάζεται η τιμή της κρίσιμης πεδιακής έντασης  $E_c$  από την ειδική αντίσταση του εδάφους αλλά και την πολικότητα της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης, εκτελώντας πειράματα σε ομογενές πεδίο με τη βοήθεια ενός διακένου παράλληλων πλακών. Διαπίστωσαν ότι η πεδιακή ένταση εξαρτάται από την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, ενώ αντίθετα η πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης δεν επηρεάζει καθόλου την τιμή της  $E_c$ .

Στα Σχήματα 1.8, 1.9 παρουσιάζεται η μεταβολή της  $E_c$  συναρτήσει της ειδικής αντίστασης και της περιεκτικότητας του χώματος σε υγρασία.





**Σχήμα 1.8** Μεταβολή της κρίσιμης έντασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του χώματος σε υγρασία.



**Σχήμα 1.9** Μεταβολή της κρίσιμης έντασης συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του χώματος.

Οι ερευνητές κατέληξαν ότι η  $E_c$  μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της ειδικής αντίστασης της μορφής  $E_c = f(\ln \rho)$  η οποία μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές:

- Περιοχή I, όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μικρότερη από  $1000 \Omega m$  και στην οποία η  $E_c$  είναι  $8 \text{ kV/cm}$ , ανεξαρτήτως ποσοστού υγρασίας.
- Περιοχή II, όπου η ειδική αντίσταση κυμαίνεται μεταξύ  $1000$  και  $25000 \Omega m$ . Σε αυτήν την περιοχή η  $E_c$  μεταβάλλεται γραμμικά με το λογάριθμο της ειδικής αντίστασης και παίρνει τιμές από  $8 \text{ kV/cm}$  έως  $17 \text{ kV/cm}$ .
- Περιοχή III, στην οποία η τιμή της ειδικής αντίστασης είναι μεγαλύτερη από  $25000 \Omega m$  και η  $E_c$  έχει σταθερή τιμή και ίση με  $17 \text{ kV/cm}$ .

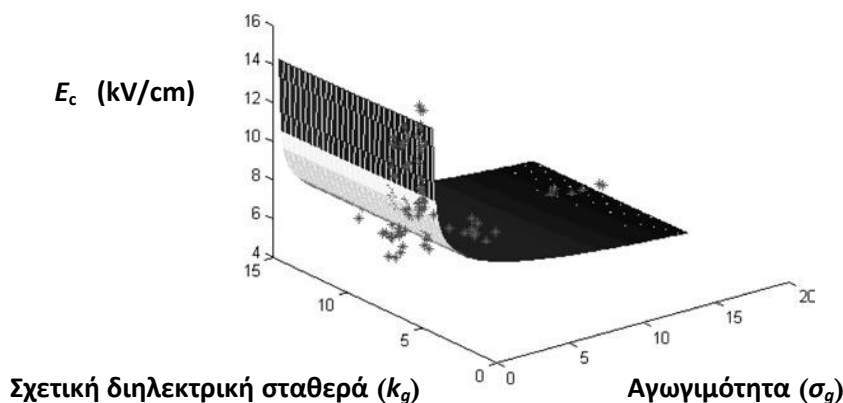
Ο Manna [41] θεωρώντας ότι η υιοθέτηση μίας αντιπροσωπευτικής τιμής για την  $E_c$  είναι λανθασμένη πρότεινε, βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων, μία εξίσωση για την  $E_c$  συναρτήσει της ειδικής αντίστασης και της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους. Για την επίτευξη αυτού του στόχου διεξήγαγε πλήθος πειραμάτων χρησιμοποιώντας δείγματα χώματος στα οποία μετέβαλε την ειδική αντίσταση μεταβάλλοντας την περιεκτικότητα σε

υγρασία. Αφού μέτρησε τις δύο αυτές παραμέτρους με τη βοήθεια κατάλληλων πειραματικών διατάξεων, επέβαλε στα δείγματα-δοκίμια κρουστικές τάσεις των μορφών 0,1/50, 1,2/50, 5/50μs και κατέγραψε την τάση διάσπασης, πραγματοποίησε ανάλυση συσχέτισης (ANOVA) και διαπίστωσε ότι η μορφή της επιβαλλόμενης τάσης δεν επηρεάζει την τιμή της  $E_c$ . Μετά την εφαρμογή ενός πολυμεταβλητού παλινδρομικού μοντέλου πρότεινε την ακόλουθη εξίσωση για την εκτίμηση της  $E_c$ :

$$E_c = 8,6083 \cdot k_g^{-0,0103} \cdot \sigma_g^{-0,1526} \quad (1.38)$$

όπου  $k_g$  η σχετική διηλεκτρική σταθερά (αδιάστατη παράμετρος)  
 $\sigma_g$  ειδική αντίσταση σε mho/m και  $E_c$  σε kV/cm

Στο Σχήμα 1.10 απεικονίζεται γραφικά η συνάρτηση μαζί με τα πειραματικά δεδομένα από τα οποία προέκυψε.



**Σχήμα 1.10** Μεταβολή της κρίσιμης έντασης συναρτήσει της ειδικής αγωγιμότητας και της διηλεκτρικής σταθεράς.

Οι Nor et Al. [42], προκειμένου να ερευνηθεί και η επίδραση του ομογενούς πεδίου, με διάταξη παραλλήλων πλακών, πρότειναν να γίνει ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης μέσα από δοκιμές διάσπασης των δειγμάτων. Με την καταγραφή λίγων δοκιμών και όπως περιγράφει το πρότυπο IEC 60-1 [43], μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί η τάση διάσπασης  $U_{50\%}$  μέσω του τύπου

$$E_c = \frac{U_{50\%}}{h} \quad (1.39)$$

όπου  $U_{50\%}$ , η τάση διάσπασης  
 $h$ , η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε δείγμα άμμου έδειξαν ότι η  $E_c$  κυμαίνεται μεταξύ 1820-3600 kV/cm και η ειδική αντίσταση αντίστοιχα 20-1000 Ωm.

Ο J.L.C. Lima [34] διεξήγαγε αντίστοιχα με χρήση διάταξης παράλληλων πλακών. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.6.

	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Πεδιακή ένταση (kV/m)	
		1 $\mu\text{s}$	3 $\mu\text{s}$
Χώμα 1	600	930	900
	350	600	630
	250	550	610
Χώμα 2	1090	950	600
	600	580	570
	240	520	530
	80	420	500
Χώμα 3	10000	530	550
	7000	500	500
	2000	370	370
Χώμα 4	10000	1420	1440
	5000	1200	1160
	3000	1000	900

**Πίνακας 1.6** Πειραματικά αποτελέσματα για  $\rho$  και  $E_c$  από J.L.C. Lima.

#### 1.7.4. Διάταξη σφαίρα πλάκα

Οι Leadon et al. [44] πραγματοποίησαν πειράματα σε διάταξη σφαίρας πλάκας με δύο διαφορετικές διαστάσεις. Στην πρώτη περίπτωση η διάμετρος της σφαίρας ήταν 2,5 cm και της πλάκας 46 cm, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αντίστοιχα 15 και 46 cm. Μεταβάλλοντας την υγρασία στο εδαφικό δείγμα προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Υγρασία (%)	Περίπτωση 1		Περίπτωση 2	
	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$E_c$ (kV/m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	$E_c$ (kV/m)
3,0	100	76	100	97
1,25	1087	116	1087	140
0.32	25000	350	25000	470

**Πίνακας 1.7** Πειραματικά αποτελέσματα για  $\rho$  και  $E_c$  σε διάταξη σφαίρα πλάκα από J.L.C. Lima.



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της πειραματικής διάταξης και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και της προετοιμασίας των εδαφικών δειγμάτων για τη διεξαγωγή των δοκιμών της ηλεκτρικής τους διάσπασης στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Για τα δείγματα εδάφους των δοκιμών ηλεκτρικής διάσπασης πραγματοποιήθηκαν επίσης, δοκιμές εδαφομηχανικής στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών και παρατίθενται τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσής.

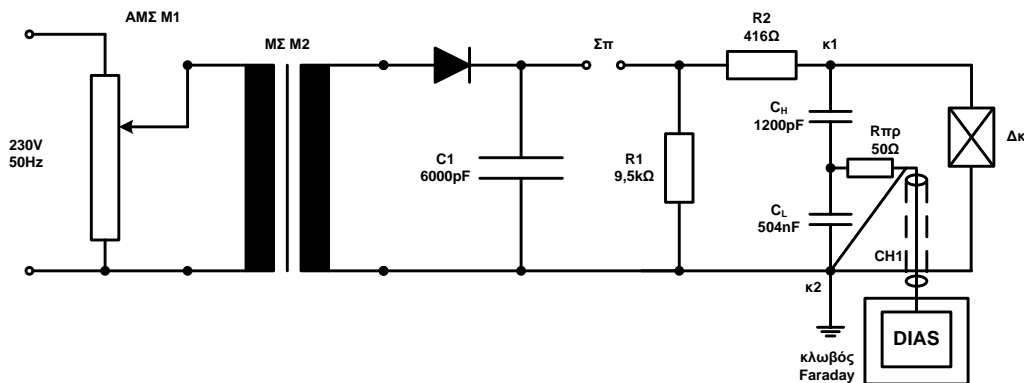
### 2.1 Εξοπλισμός δοκιμών ηλεκτρικής διάσπασης

Για τη διεξαγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός

- λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας Messwandler-Bau GmbH Bamberg
- τράπεζα χειρισμών MWB StAG 616
- σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator (3kW)
- ψηφιακό μετρητικό σύστημα HAEFELY DIAS 733
- ομοαξονικά καλώδια ECOFLEX - 10 Low Loss 50Ω
- κλωβός Faraday SIEMENS
- digital power meter WT210 Yokogawa
- υγρόμετρο – θερμόμετρο TESTO 625
- βαρόμετρο TESTO 511

#### 2.1.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.



**Σχήμα 2.1** Πειραματική διάταξη για τη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους.

**ι. Λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας**

Η λυόμενη κρουστική γεννήτρια της Messwandler-Bau GmbH Bamberg [1], μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή των στοιχείων της σαν γεννήτρια παραγωγής εναλλασσόμενης, συνεχούς και κρουστικής τάσης με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιείται για την παραγωγή κρουστικών τάσεων 1,2/50 μs.

	Εναλλασσόμενη τάση χωρίς φορτίο	Συνεχής τάση χωρίς φορτίο	Κρουστική τάση χωρίς φορτίο
Μονοβάθμια	100kV/5kVA	140kV/20mA	140kV/245J
Διβάθμια	200kV/5kVA	280kV/15mA	280kV/490J
Τριβάθμια	300kV/5kVA	420kV/10mA	420kV/735J

**Πίνακας 2.1** Χαρακτηριστικά της λυόμενης κρουστικής γεννήτριας της Messwandler-Bau GmbH Bamberg.

Η λυόμενη γεννήτρια είναι μια συσκευή εύκολα συναρμολογήσιμη, αποτελείται από στοιχεία που περιέχουν μονωτικό λάδι ερμητικά κλεισμένο σε αυτά και έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια μορφή. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν κατάλληλα αναγνωριστικά σύμβολα που διευκολύνουν στη λειτουργία της γεννήτριας από το χειριστή. Το εύρος της θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια είναι από -10°C έως και +40°C.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος η γεννήτρια διαμορφώνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, σε μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια, που παράγει κρουστική τάση θετικής και αρνητικής πολικότητας. Κάθε φορά που είναι επιθυμητή η παραγωγή κρουστικής τάσης αντίθετης πολικότητας ο χειριστής αλλάζει τη φορά των διόδων. Η τάση του δικτύου πόλεως (230V) φθάνει στο πρωτεύον του αυτομετασχηματιστή M<sub>1</sub>, μέσω του οποίου ρυθμίζεται η τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή M<sub>2</sub> με σχέση μετασχηματισμού 220V/200kV, μεταθέτοντας τη λήψη του δευτερεύοντος του M<sub>1</sub>.

Στη συνέχεια, η υψηλή εναλλασσόμενη τάση ανορθώνεται μέσω του ανορθωτικού στοιχείου, το οποίο περιέχει αντίσταση προστασίας, και μετατρέπεται σε συνεχή τάση U<sub>-</sub>,

η οποία φορτίζει τον πυκνωτή  $C_1$ . Μετά τη φόρτιση του πυκνωτή  $C_1$  ο σπινθηριστής Σπ, τίθεται σε κοινή τάση με τον πυκνωτή. Όπως είναι προφανές, το διάκενο του σπινθηριστή πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην προκαλείται διάσπαση προτού ο πυκνωτής  $C_1$  αποκτήσει την επιθυμητή τάση στα άκρα του. Η κρουστική τάση εμφανίζεται μεταξύ των άκρων  $K_1$  και  $K_2$ .



**Σχήμα 2.2** Λυόμενη μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια.

Μόλις επέλθει η διάσπαση του σπινθηριστή αρχίζει το στάδιο της εκφόρτισης της γεννήτριας. Την ώρα που ξεκινάει η διάσπαση του σπινθηριστή, ο πυκνωτής φορτίου  $C_H$  είναι εντελώς αφόρτιστος και γι' αυτό αρχικά δεν εμφανίζει σημαντική αντίδραση στη διέλευση του ρεύματος φορτίσεως που περνά μέσα του, δηλαδή αρχικά συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα. Για το λόγο αυτό, αρχικά αγνοείται η αντίδραση της  $R_1$ , αφού το ρεύμα επιλέγει να διέλθει από τον κλάδο με την μικρότερη αντίσταση.

Το πώς θα μεταβληθεί η τάση φόρτισης της γεννήτριας εξαρτάται από τον λόγο  $C_1/C_H$ . Βασική επιδίωξη είναι ο πυκνωτής κρούσης  $C_1$  να έχει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από τον πυκνωτή φορτίου  $C_H$ , ώστε ένα μικρό μόνο μέρος του φορτίου του πυκνωτή  $C_1$  να είναι σε θέση να φορτίσει τον  $C_H$ . Με άλλα λόγια επιτυγχάνεται με δεδομένη τάση φόρτισης, η παραγόμενη κρουστική τάση να είναι υψηλή και όσο το δυνατό πλησιέστερα στην τάση του  $C_1$ .

Σημειώνεται, ότι η παραγόμενη κρουστική τάση δε μπορεί να φτάσει το πλάτος της ανορθωμένης τάσης  $U_-$  που χρησιμοποιείται στη φόρτιση της γεννήτριας. Το μέγεθος που καθορίζει πόσο κοντά στην τιμή  $U_-$  μπορεί να φτάσει η κρουστική τάση καλείται συντελεστής χρησιμοποίησης και ορίζεται

$$\eta = \frac{U_{k,max}}{U_-} \quad (2.1)$$

Δηλαδή ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης,  $U_{k,max}$  προς τη μέγιστη τιμή της ανορθωμένης τάσης με την οποία φορτίζεται η γεννήτρια,  $U_-$ . Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής χρησιμοποίησης τόσο καλύτερα αξιοποιείται η γεννήτρια.

Μεγάλη σημασία έχει ο τρόπος με τον οποίο γειώνεται η γεννήτρια. Η γείωση αυτή πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στο δοκίμιο  $\Delta_k$  και στα στοιχεία  $R_1$  και  $C_1$ . Χρησιμοποιείται ειδικό ηλεκτρόδιο γείωσης, το οποίο δε συνδέεται με τη γείωση του δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος. Η ξεχωριστή αυτή προσγείωση καλείται κρουστική γη και συνδέεται με το δίκτυο Ε.Ρ. μέσω αντίστασης προστασίας (της τάξης των ΜΩ) και κατάλληλης ονομαστικής τάσης. Ο λόγος για τον οποίο γίνονται τα παραπάνω είναι ότι αν η γεννήτρια γειωνόταν πάνω στη γείωση του δικτύου, τότε λόγω των παράσιτων χωρητικοτήτων της γεννήτριας θα δημιουργούνταν βρόχοι μικρής αντίστασης στους οποίους θα επάγονταν υψηλές τάσεις μεγάλης συχνότητας, οι οποίες θα υπερτίθεντο στην κρουστική τάση και θα την παραμόρφωναν σημαντικά.

## ii. Τράπεζα χειρισμών MWB StAG 616

Οι χειρισμοί της όλης διάταξης, καθώς και η παρακολούθηση της λειτουργίας, είναι δυνατοί από την τράπεζα ελέγχου και χειρισμών, *Σχήμα 2.3*. Η τράπεζα περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- μεταγωγικό διακόπτη δύο θέσεων
- κλειδί
- κομβία για να τίθεται υπό τάση και εκτός τάσης η γεννήτρια
- κομβία μέσω των οποίων ρυθμίζεται η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή  $M_1$
- αμπερόμετρο, βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης στο δευτερεύον του  $M_1$  και βολτόμετρο για τη μέτρηση της υψηλής συνεχούς τάσης υπό την οποία φορτίζεται ο πυκνωτής κρούσης  $C_1$
- διακοπή ταχείας θέσεως εκτός τάσης σε περίπτωση κινδύνου και ηλεκτρονόμος υπερεντάσεως
- κομβία για τη μεταβολή του διακένου μεταξύ των σφαιρών του σπινθηριστή από 0-80mm



*Σχήμα 2.3 Τράπεζα χειρισμών.*



### iii. Σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator (3kW)

Ο χρησιμοποιούμενος σταθεροποιητής 3kW, εξασφαλίζει ότι για τη μεταβολή της τάσης του δικτύου εντός των ορίων  $230V \pm 10\%V$ , η τάση στην έξοδό του θα έχει μικρή διακύμανση  $230V \pm 0,5\%V$  (μεταξύ 228,9V και 231,1V).



**Σχήμα 2.4** Σταθεροποιητής τάσης.

### iv. Ψηφιακό μετρητικό σύστημα HAEFELY DIAS 733

Το HAEFELY DIAS 733 [2] είναι ένα ψηφιακό σύστημα καταγραφής κρουστικών τάσεων και ρευμάτων. Διαθέτει 4 κανάλια εισόδου, οθόνη διαστάσεως 17 ιντσών ανάλυσης  $1024 \times 768$  και διαθέτει οδηγό δισκέτας (3,5") για την αποθήκευση των μετρήσεων.

Διαιρέτης τάσης εισόδου	1:200
Τάσεις εισόδου	100Vpp...1950Vpp
Προστασία υπέρτασης	2kV
Αντίσταση εισόδου	2 MΩ // 20pF
Εύρος ζώνης	> 30MHz
Κάθετη ανάλυση	10 bit
Ταχύτητα δειγματοληψίας	117kS/s...30MS/s, 60MS/s, 120MS/s
Θερμοκρασία λειτουργίας	10...40°C
Χρόνος προθέρμανσης	35min
Ακρίβεια κορυφής κρουστικών	$\pm 1\%$
Ακρίβεια χρονικών παραμέτρων	$\pm 2\%$

**Πίνακας 2.2** Χαρακτηριστικά του HAEFELY DIAS 733

Η αβεβαιότητα των μετρήσεων για τη μέγιστη τιμή της τάσης είναι 0,5% για πλήρεις κρουστικές τάσεις και 0,6% για αποκομμένες κρουστικές τάσεις, ενώ η αβεβαιότητα του

χρόνου είναι 1,0%. Η πραγματική τιμή αντιστοιχεί στη μετρούμενη με πιθανότητα περίπου 95%.



**Σχήμα 2.5** Μετρητικό σύστημα HAEFELY DIAS 733.

#### ν. Ομοαξονικά καλώδια ECOFLEX - 10 Low Loss 50Ω

Η σύνδεση της πειραματικής διάταξης με το μετρητικό σύστημα DIAS 733 γίνεται με ομοαξονικά καλώδια με χαρακτηριστικά [3], που φαίνονται στον Πίνακα 2.4. Ανάμεσα στο χωρητικό καταμεριστή και στο ομοαξονικό καλώδιο που είναι συνδεδεμένο στο σύστημα HAEFELY DIAS 733 παρεμβάλλεται αντίσταση προσαρμογής 50Ω όση και η αντίσταση του καλωδίου.

Εσωτερικός αγωγός	Πλεγμένος χαλκός 7x1,0mm
Διάμετρος εσωτερικού αγωγού	2,85mm
Διηλεκτρικό	Χαμηλής απώλειας μείγματος PE
Διάμετρος διηλεκτρικού	7,25mm
Εξωτερικός αγωγός 1	Χάλκινο έλασμα με PE επικάλυψη
Θωράκιση	100%
Εξωτερικός αγωγός 2	Ανάμιξη χαλκού 72%
Περίβλημα	Μαύρο PVC υν-αντίστασης
Εξωτερική διάμετρος	10,2mm
Σύνθετη αντίσταση	50Ω
Χωρητικότητα	78pF/m
$F_{max}$	6GHz
DC-αντίσταση κεντρικού αγωγού	3,3Ω/km
DC-αντίσταση εξωτερικού αγωγού	8,4Ω/km
Εξασθένιση 1GHz/100m	14,2dB
Εξασθένιση 1GHz/100f	4,33dB

**Πίνακας 2.3** Χαρακτηριστικά ομοαξονικών καλωδίων

**vi. Digital power meter WT210 Yokogawa**

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, η μέτρηση της τάσης στο πρωτεύον του μετασχηματιστή  $M_2$  γίνεται μέσω του digital power meter αντί του αναλογικού βολτομέτρου που βρίσκεται στην τράπεζα χειρισμών.



**Σχήμα 2.6** WT210.

**vii. Θερμόμετρο – υγρόμετρο TESTO 625**

Χρησιμοποιείται για την καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασία και θερμοκρασία) κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών.



**Σχήμα 2.7** Θερμόμετρο – υγρόμετρο.

**ix. Βαρόμετρο TESTO 511**

Χρησιμοποιείται για την καταγραφή της πίεσης στο περιβάλλον των δοκιμών.

**2.1.2 Προετοιμασία εδαφικών δειγμάτων**

Οι δοκιμές αφορούν σε δύο δείγματα χώματος, τα οποία είναι της ίδια σύστασης. Το δείγμα χώματος Β' (Σχήμα 2.8) και το δείγμα χώματος Δ', το οποίο δεν έχει καθαριστεί και κοσκινιστεί. Οι δοκιμές γίνονται για δείγματα με υγρασία 0%, 5% και 10%, όπου

επιδιώκεται η ομοιόμορφη κατανομή του νερού σε όλο το χώμα. Προηγουμένως, τα δείγματα τοποθετούνται σε φούρνο στους 105°C για τουλάχιστον δύο ημέρες. Για την επίτευξη των επιθυμητών ποσοστών υγρασίας κατά βάρος προστίθεται κατάλληλη ποσότητα απιονισμένου νερού στο ξηρό χώμα.



**Σχήμα 2.8** Δείγμα χώματος Β.

### **2.1.3 Δοκίμιο**

Το υπό εξέταση δείγμα τοποθετείται εντός κυλίνδρου από PVC, *Σχήμα 2.9*, (με διαστάσεις που δίνονται στον *Πίνακα 2.5*) ανάμεσα σε δύο χάλκινα ηλεκτρόδια σχήματος κυκλικής πλάκας. Τα ηλεκτρόδια είναι παράλληλα ώστε να επιτυγχάνεται ομογενές ηλεκτρικό πεδίο και η απόσταση μεταξύ τους 7cm και για τα δύο δείγματα. Το δείγμα πιέζεται με ένα βάρος 10kg για να υπάρχει κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή του, ενώ κατά τη διάρκεια των δοκιμών τοποθετείται ένα μικρό βάρος πάνω από το άνω ηλεκτρόδιο για την καλύτερη επαφή του με το χώμα.



**Σχήμα 2.9** Δοκίμιο.

Διάμετρος εξωτερική $D_{εξ}$	20,4cm
Διάμετρος εσωτερική $D_{εσ}$	19,2cm

**Πίνακας 2.4** Διαστάσεις πλαστικού κυλίνδρου

## **2.2 Δοκιμές κοκκομετρικής ανάλυσης εδαφικών δειγμάτων**

Το έδαφος είναι ένα μη-συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους, τα κενά μεταξύ των οποίων (πόροι) περιέχουν υγρά (συνήθως νερό) ή/και αέρια (συνήθως αέρα). Τα χονδρόκοκκα εδάφη, που καλούνται και μη-συνεκτικά λόγω της μη-συνοχής μεταξύ των κόκκων τους, προέρχονται κυρίως από τη μηχανική αποσάθρωση των βράχων ενώ τα λεπτόκοκκα, που καλούνται και συνεκτικά επειδή παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των κόκκων τους, προέρχονται από τη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Με βάση τον τρόπο μεταφοράς και τελικής απόθεσης των προϊόντων της αποσάθρωσης, τα εδάφη διακρίνονται σε αυτόχθονα και ιζηματογενή. Τα αυτόχθονα εδάφη προέρχονται από την επιτόπου απόθεση των προϊόντων αποσάθρωσης, χωρίς να μεσολαβήσει μεταφορά τους μακριά από την περιοχή της αποσάθρωσης. Αντίθετα, τα ιζηματογενή εδάφη προέρχονται από τη μεταφορά των προϊόντων αποσάθρωσης, με τα νερά των ποταμών ή σε ορισμένες περιπτώσεις με τον αέρα, μακριά από την αρχική τους θέση. Αυτά αποτελούν το σύνολο σχεδόν των εδαφικών σχηματισμών και διακρίνονται σε χονδρόκοκκα (χαλίκες και άμμοι) και λεπτόκοκκα (ιλιές και άργιλοι). Εδάφη με κόκκους μεγαλύτερους από 2 mm ανήκουν στην κατηγορία των χαλίκων, οι άμμοι έχουν κόκκους με διαστάσεις από 2mm έως 0.06 mm (η διάσταση αυτή είναι περίπου ίση με το μικρότερο μέγεθος κόκκου που είναι ορατός δια γυμνού οφθαλμού), οι ιλιές έχουν κόκκους από 0.06 mm έως 0.002 mm και, τέλος, οι άργιλοι έχουν κόκκους με μέγεθος μικρότερο από 0.002 mm.

Οι κόκκοι των άμμων και των χαλίκων είναι γενικά σφαιροειδείς, με την έννοια ότι η μέγιστη και η ελάχιστη διάσταση του κόκκου δεν διαφέρουν σημαντικά: ακόμη και στην περίπτωση πολύ πεπλατυσμένων κόκκων, ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση δεν υπερβαίνει συνήθως το πέντε (5). Οι κόκκοι των λεπτόκοκκων εδαφών είναι πολύ πεπλατυσμένοι και έχουν τη μορφή πλακιδίων (αργιλικά πλακίδια) με μικρό πάχος που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μούριό τους. Αντίθετα, στις άλλες δύο διαστάσεις ο κρύσταλλος των αργιλικών πλακιδίων αναπτύσσεται κανονικά με τη διάταξη μεγάλου αριθμού μορίων. Λόγω των ιδιαίτερα μικρών διαστάσεων και της πλακοειδούς μορφής των αργιλικών ορυκτών, η επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων είναι ηλεκτρικά φορτισμένη, οι άνω και κάτω (μεγάλες) επιφάνειες φέρουν αρνητικά φορτία, και η περιφέρεια (το πάχος) φέρει ίσα και αντίθετα θετικά φορτία.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών είναι η σχετική πυκνότητα και η κοκκομετρική διαβάθμιση, ενώ τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων εδαφών είναι το ποσοστό υγρασίας και τα όρια Atterberg [5].

### **2.2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση – ξηρή μέθοδος**

Εξοπλισμός

- ζυγός ευαισθησίας 0,1% του βάρους του δείγματος

- κόσκινα Νο 4, 8, 10, 40, 200 τετραγωνικών οπών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Πρότυπων Προδιαγραφών για κόσκινα δοκιμών [4]
- κλίβανος

Η κατάταξη των εδαφών με βάση το μέγεθος των κόκκων από τους Βρετανικούς Κανονισμούς (British Standards) δίνεται στον Πίνακα 2.6

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	Μέγεθος κόκκων (mm)	
		Από	Έως
Χάλικες	Χονδρόκοκκοι	60	20
	Μεσόκοκκοι	20	6
	Λεπτόκοκκοι	6	2
Άμμοι	Χονδρόκοκκες	2	0,6
	Μεσόκοκκες	0,6	0,2
	Λεπτόκοκκες	0,2	0,06
Ιλεις	Χονδρόκοκκες	0,06	0,02
	Μεσόκοκκες	0,02	0,006
	Λεπτόκοκκες	0,006	0,002
Άργιλοι	-	<0,002	-

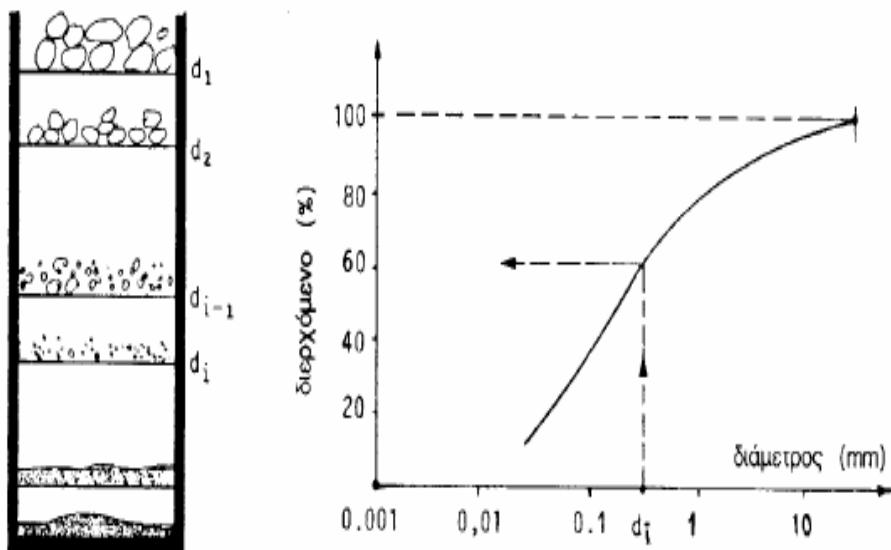
**Πίνακας 2.5** Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών σύμφωνα με τους Βρετανικούς Κανονισμούς.

Ο προσδιορισμός της κατανομής των μεγεθών κόκκων των εδαφικών υλικών (κοκκομετρική διαβάθμιση) γίνεται για μεν τους χάλικες και τις άμμους με τη λεγόμενη "κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα", για δε τις ιλεις και αργίλους με την "κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο του αραιομέτρου".

Η ανάλυση με κόσκινα γίνεται με τη μηχανική δόνηση δείγματος του εδαφικού υλικού διαμέσου σειράς κοσκίνων με βαθμιαία μικρότερη διάσταση οπής και τη μέτρηση του βάρους του υλικού που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο (Σχήμα 9). Ο κωδικός και η διάσταση της οπής των κοσκίνων φαίνονται στον Πίνακα 2.6

Αριθμός κόσκινου (No)	Διάσταση οπής (mm)
4	4,75
8	2,36
10	2
40	0,425
200	0,075

**Πίνακας 2.6** Μεγέθη των κοσκίνων.



**Σχήμα 2.10** Κοκκομέτρηση εδαφών με κόσκινα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόσκινο No 200 αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στο συμβατικό όριο μεταξύ άμμων και ιλύων (0.06 mm).



**Σχήμα 2.11** Συσκευή δόνησης με κόσκινα.

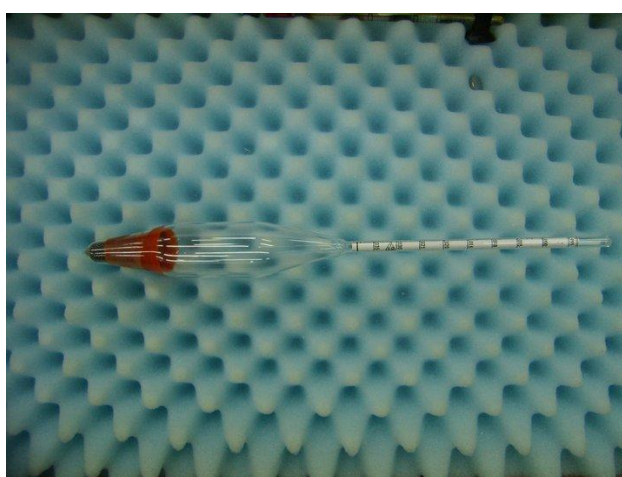
## 2.2.2 Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο

Εξοπλισμός

- ζυγός ακριβείας 0,1g
- συσκευή αναδέυσεως
- αραιόμετρο
- κόσκινο No 10
- θερμόμετρο ακριβείας 0,5%
- γυάλινοι ογκομετρικοί κύλινδροι των 1000ml

Η κατασκευή και χρήση κοσκίνων για την κοκκομέτρηση εδαφών με μεγέθη κόκκων μικρότερα από το No 200 δεν είναι πρακτική. Κατά συνέπεια, ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών (ιλύων και αργίλων) γίνεται με τη μέθοδο του αραιομέτρου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο νόμο του Stokes για την κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας, σύμφωνα με τον οποίο η οριακή ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από τη διάμετρο και την πυκνότητα του υλικού των σφαιρών, την πυκνότητα του ρευστού και το ιξώδες του. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου του αραιομέτρου μετράται η πυκνότητα του μίγματος νερού και εδάφους σε διάφορους χρόνους και προσδιορίζεται η ταχύτητα καταβύθισης των κόκκων του εδαφικού υλικού, από την οποία προκύπτει η κατανομή του μεγέθους των κόκκων.

Το δείγμα [6] που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή με αραιόμετρο περιλαμβάνει όλο το υλικό που συγκρατείται στο κόσκινο No 10 και αντιπροσωπευτική ποσότητα, περίπου 100g, από το κλάσμα του εδαφικού υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No 10. Για κλάσμα πολύ αμμώδες προστίθεται μεγαλύτερη ποσότητα από το διερχόμενο από το κόσκινο No 10. Μέρος του κλάσματος του εδαφικού δείγματος που διέρχεται από το κόσκινο No 10, περίπου 50g τοποθετείται σε ποτήρι των 250ml και καλύπτεται με 125ml από το έτοιμο διάλυμα του παράγοντα διασποράς, ο οποίος στην περίπτωση μας είναι το εξαμεταφωσφορικό νάτριο ( $\text{NaPO}_3$ ) 6. Το διάλυμα περιέχει 45,7g άλατος ανά λίτρο έτοιμου διαλύματος. Μετά την προσθήκη του παράγοντα διασποράς το μίγμα αναδεύεται για 1min ώστε να επιτευχθεί διασπορά και μεταφέρεται στο γυάλινο ογκομετρικό κύλινδρο όπου προστίθεται απεσταγμένο νερό, ίδιας θερμοκρασίας με αυτή του υδατόλουτρου, μέχρι τελικού όγκου 1000ml. Ο ογκομετρικός κύλινδρος τοποθετείται μέσα στο υδατόλουτρο σταθερής θερμοκρασίας. Όταν το εδαφικό αιώρημα αποκτήσει τη θερμοκρασία του υδατόλουτρου, ο κύλινδρος εξάγεται και το περιεχόμενό του αναταράσσεται για 1min. Σημειώνεται ο χρόνος περάτωσης της ανατάραξης του κυλίνδρου και οι ενδείξεις του αραιομέτρου λαμβάνονται κατά τα χρονικά διαστήματα, από την έναρξη της κατακάθισης, που αναφέρονται στην εφημερίδα της κυβερνήσεως [6].



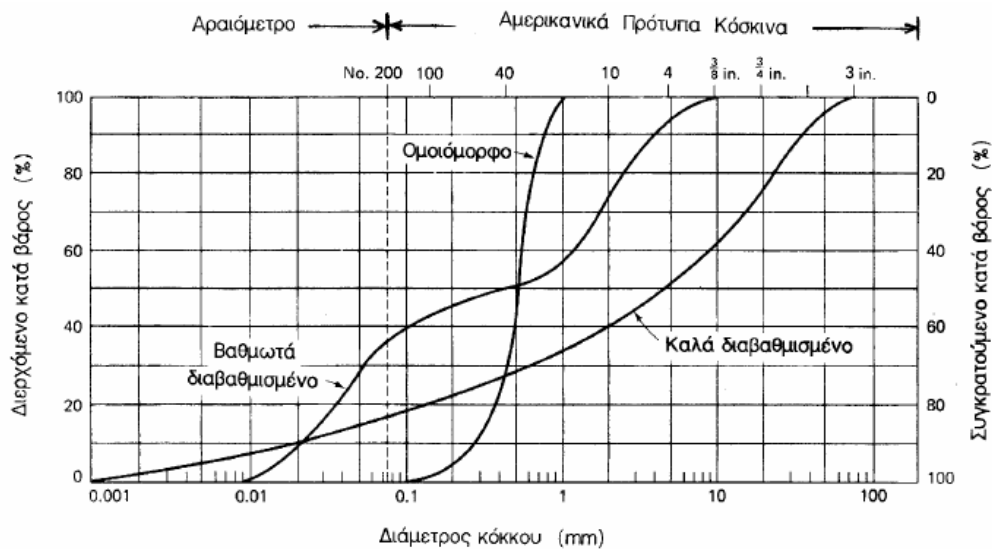
**Σχήμα 2.12** Αραιόμετρο.





**Σχήμα 2.13** Δοχείο υδατόλουτρου, ογκομετρικός κύλινδρος και θερμόμετρο ακριβείας.

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων ενός εδαφικού υλικού [5], όπως προκύπτει από την κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα και το αραιόμετρο, παρουσιάζεται συνήθως σε ένα διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης ως προς το μέγεθος του κόκκου (σε λογαριθμική κλίμακα). Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 2.14, στο οποίο παρουσιάζονται και τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες ενός εδάφους με ομοιόμορφους κόκκους και ενός καλά διαβαθμισμένου (δηλαδή με ποικιλία κόκκων).



**Σχήμα 2.14** Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών.

### 2.2.3 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης εδαφικών υλικών

Η σύσταση των εδαφικών δειγμάτων, όπως προέκυψε από την κοκκομετρική ανάλυση παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.7. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζονται οι αθροιστικές κοκκομετρικές καμπύλες κάθε δείγματος.



**Σχήμα 2.15** Αθροιστική κοκκομετρική καμπύλη.

	ΧΑΛΙΚΕΣ (%)	ΑΜΜΟΣ (%)	ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ (%)	
Δείγμα Β'	0	75	25	
			ΙΛΥΣ (%)	ΑΡΓΙΛΟΣ (%)
			14	11

**Πίνακας 2.7** Κοκκομετρική ανάλυση συγκρατούμενο (%).

## ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ - ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ

Για τον υπολογισμό της τάσης διάσπασης απαιτείται επεξεργασία και στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Για τον προσδιορισμό της τάσης θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο αυξομείωσης τάσης, η οποία περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο και ακολούθως παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες για τον υπολογισμό του σφάλματος και της αβεβαιότητας κάθε τιμής.

### 3.1. Ηλεκτρική Διάσπαση

Ηλεκτρική διάσπαση είναι το φαινόμενο που παρατηρείται σε ένα διηλεκτρικό όταν εφαρμόσουμε τάση τουλάχιστον ίση με την τάση διάσπασής του. Η τιμή της τάσης διάσπασης καθορίζεται από τον μηχανισμό της ηλεκτρικής διάσπασης και απαιτείται μια σειρά δοκιμών για τον αξιόπιστο προσδιορισμό της.

#### 3.1.1. Προσδιορισμός τάσης διάσπασης

Προκειμένου να προσδιοριστεί η τάση διάσπασης με ακρίβεια πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων δοκιμών. Σύμφωνα με την I.E.C. 60060-1 ed3 2010 [1] προτείνονται οι εξής μέθοδοι προσδιορισμού της τάσης διάσπασης:

- Μέθοδος των επιπέδων τάσης (Multiple level test)
- Μέθοδος αυξομείωσης τάσης (Up and down tests)
- Μέθοδος διαδοχικών διασπάσεων (Successive discharge tests)

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αυξομείωσης τάσης η οποία και αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

#### 3.1.2. Μέθοδος αυξομείωσης τάσης

Η μέθοδος αυξομείωσης της τάσης (up and down) αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό της τάσης  $U_{50\%}$ , χρησιμοποιώντας σχετικά μικρό αριθμό μετρήσεων.

Στην μέθοδο up-and-down, αρχικά εφαρμόζεται στο δοκίμιο μια τάση, με τιμή όσο το δυνατό πιο κοντά στη αναμενόμενη  $U_{50\%}$ . Εάν γίνει διάσπαση η επόμενη δοκιμή γίνεται κατά ένα βήμα τάσης χαμηλότερα, αν όχι, κατά ένα βήμα ψηλότερα. Στα αποτελέσματα των μετρήσεων ιδιαίτερη σημασία έχουν τα παρακάτω μεγέθη:

- **Βήμα μεταβολής της επιβαλλόμενης τάσης ( $\Delta U$ )** είναι η απόλυτη διαφορά μεταξύ των επιπέδων τάσης που εφαρμόζουμε στο δοκίμιο. Προστίθεται ή αφαιρείται στην κάθε προηγούμενη τάση κρούσης, ανάλογα με το αν είχαμε αντοχή ή διάσπαση αντίστοιχα. Διατηρείται σταθερή σε όλη τη σειρά μετρήσεων.
- **Πρώτη σημαντική κρούση ( $U_0$ )** θεωρείται η πρώτη κρούση της οποίας το επίπεδο τάσης εμφανίζεται για δεύτερη φορά στη σειρά μετρήσεων. Οι κρούσεις πριν από την πρώτη σημαντική κρούση δεν λαμβάνονται υπόψη. Όλες οι υπόλοιπες θεωρούνται σημαντικές κρούσεις του δοκιμίου.
- **Αριθμός αντοχών ( $M$ )** είναι το πλήθος των αντοχών που παρατηρήθηκαν κατά τις σημαντικές κρούσεις. Το πλήθος των αντοχών σε κάθε επίπεδο επιβαλλόμενης τάσης  $U_i$ , συμβολίζεται με  $m_i$ .
- **Αριθμός διασπάσεων ( $N$ )** είναι το πλήθος των διασπάσεων του δοκιμίου που παρατηρήθηκαν στο σύνολο των κρούσεων. Το πλήθος των διασπάσεων για κάθε επίπεδο επιβαλλόμενης τάσης  $U_i$ , συμβολίζεται με  $n_i$ .

Η εκτίμηση της μέσης τιμής διάσπασης, της τυπικής απόκλισης και της πεδιακής έντασης εκφράζονται με τις παρακάτω σχέσεις [2]:

	$N \leq M$	$N > M$
Μέση τιμή τάσης διάσπασης	$U_{50} = U_0 + d \left( \frac{A_1}{N} - \frac{1}{2} \right)$	$U_{50} = U_0 + d \left( \frac{A_0}{M} + \frac{1}{2} \right)$
Τυπική απόκλιση τάσης διάσπασης	$\sigma = 1.62 \cdot d \left( \frac{NB_1 - A_1^2}{N^2} + 0.029 \right)$	$\sigma = 1.62 \cdot d \left( \frac{MB_0 - A_0^2}{M^2} + 0.029 \right)$
Κρίσιμη πεδιακή ένταση	$E_c = \frac{U_{50}}{h}$ $h$ : απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων	

**Πίνακας 3.1.** : Σχέσεις υπολογισμού  $U_{50}$ ,  $\sigma$ ,  $E_c$ .

Όπου οι συντελεστές  $A_1$ ,  $A_0$ ,  $B_1$ ,  $B_0$  δίνονται από τους τύπους:

$$\begin{aligned}
 (\alpha) \quad A_1 &= \sum_i i \cdot n_i & , & \quad (\beta) \quad A_0 = \sum_i i \cdot m_i \\
 (\gamma) \quad B_1 &= \sum_i i^2 \cdot n_i & , & \quad (\delta) \quad B_0 = \sum_i i^2 \cdot m_i
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

## 3.2. Η έννοια της αβεβαιότητας

### 3.2.1 Εισαγωγικά

Η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα μιας μέτρησης αποτελούσε στο παρελθόν περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη και λιγότερο μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης τρόπων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίησης της ποιότητας αυτής. Τις τελευταίες όμως δεκαετίες έγινε επιτακτική η ανάγκη για έναν κοινά αποδεκτό και έγκυρο **τρόπο «μέτρησης» της ποιότητας μέτρησης**, αφού έχει μεγάλη σημασία τα όργανα όχι μόνο να μετράνε σωστά, αλλά και να είναι γνωστό το πόσο σωστά μετράνε. Το ζητούμενο λοιπόν είναι η αποδοχή ενός ενιαίου μηχανισμού αποτίμησης της ποιότητας μέτρησης, δηλαδή της **αβεβαιότητας (uncertainty)** [3].

Κάθε μέτρηση, ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκειται σε σφάλματα και επομένως το αποτέλεσμα μιας μέτρησης εμπεριέχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Με τον όρο αβεβαιότητα προσδιορίζεται το εύρος τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης τιμής από το όργανο ( $\pm$ ) μέσα στο οποίο βρίσκεται η «αληθινή» ή «πραγματική» τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Είναι φανερό ότι βασικό πρόβλημα της μετρολογίας είναι η εύρεση της «αληθινής» τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Παλαιότερα, η χρήση του όρου ακρίβεια προσδιόριζε τη μέγιστη απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την «αληθινή», ως εάν η «αληθινή» τιμή να ήταν απολύτως γνωστή. Εάν αυτό ήταν αληθές, τα προβλήματα της μετρολογίας θα είχαν επιλυθεί. Αντί για αυτό προσπαθούμε να προσεγγίσουμε το «σύννεφο» που περιβάλλει την «αληθινή» τιμή με όρους στατιστικής [3].

Επομένως, σήμερα είναι κοινά αποδεκτό ότι μια ποσοτική δήλωση σχετική με οποιοδήποτε μέγεθος δεν μπορεί να είναι πλήρης εάν δεν περιλαμβάνει, εκτός από το αποτέλεσμα της μέτρησης, μια αναφορά στην αβεβαιότητα που συνοδεύει το αποτέλεσμα αυτό. Το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στις πληροφορίες ποσοτικού προσδιορισμού ενός μεγέθους υπακούει σε μια διπλή αναγκαιότητα: αφενός επισημαίνεται στο χρήστη της μέτρησης η πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων, εφιστώντας την προσοχή του στον πεπερασμένο χαρακτήρα της γνώσης μας για μια συγκεκριμένη ποσότητα, αφετέρου δίνεται μια ποσοτική εκτίμηση του διαστήματος μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, καθώς και της πιθανότητας να βρίσκεται η αληθής αυτή τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος αυτού [3], [5].

### 3.2.2 Από το σφάλμα στην αβεβαιότητα

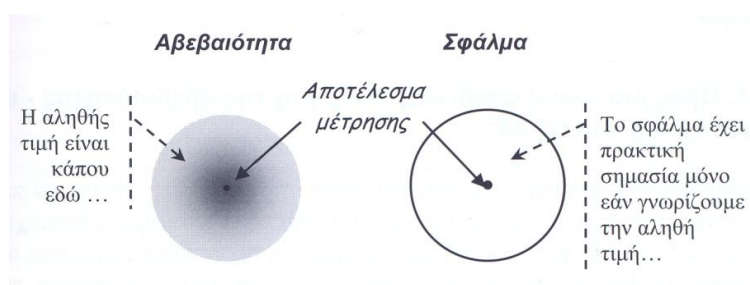
Ως **σφάλμα** ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και **μιας** αληθούς τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη λέξη αληθής χρησιμοποιείται το αόριστο άρθρο «μια» και όχι το οριστικό «η» για να τονιστεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερες από μία τιμές συμβατές με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους και ότι δεν μπορούμε να ξέρουμε ποια είναι η αληθής τιμή. Δηλαδή το σφάλμα είναι εξ ορισμού μια μη προσδιορίσιμη αφηρημένη έννοια, που

**αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την αληθή αλλά άγνωστη τιμή ενός μεγέθους [3].**

Τα σφάλματα διακρίνονται σε συστηματικά και τυχαία. Τα **συστηματικά σφάλματα** οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση ή χρήση των οργάνων, στην παράβλεψη ορισμένων φαινομένων, στον μη απόλυτο έλεγχο των συνθηκών του πειράματος, στον παρατηρητή ή σε άλλα εξωτερικά αίτια. Η αιτία των συστηματικών σφαλμάτων είναι γνωστή, όχι όμως και η τιμή τους, ενώ υπακούνε σε φυσικούς νόμους. Τα **τυχαία σφάλματα** οφείλονται στην έλλειψη ευαίσθητης απόκρισης του οργάνου ή του παρατηρητή, σε φαινόμενα όπου το ίδιο το σύστημα χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις, σε εξωτερικό «θόρυβο» ή σε στατιστικές διαδικασίες. Τα τυχαία σφάλματα έχουν άγνωστη αιτία και τιμή, δεν υπακούνε σε φυσικούς νόμους, ενώ μελετώνται στη θεωρία σφαλμάτων [6], [7].

Με τον όρο σφάλμα, λοιπόν, δεν εννοούμε την απόκλιση της μέτρησης από τη θεωρητικά αποδεκτή τιμή. Η έννοια του σφάλματος αναφέρεται στην αβεβαιότητα των μετρήσεων την οποία δεν μπορούμε να διορθώσουμε. Ακόμα και αν επαναλάβουμε τις μετρήσεις δεν μπορεί να εξαλειφθεί, μπορεί όμως να οδηγήσει σε μια κατανομή των μετρούμενων μεγεθών που μπορούν να αναλυθούν στατιστικά. Πρέπει επομένως το σφάλμα να διαφοροποιείται προσεκτικά από την αβεβαιότητα, η οποία αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Τελικά το σφάλμα δεν έχει ιδιαίτερα πρακτική χρησιμότητα, αφού εκφράζει τη διαφορά της αληθούς τιμής, που δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε, από μια μέτρηση, για την αξιοπιστία της οποίας δε διαθέτουμε καμία ένδειξη. **Το σφάλμα αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών [3], [4].**

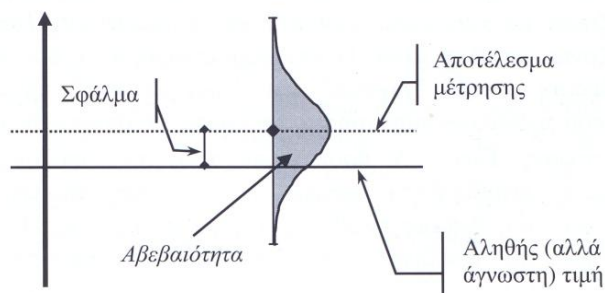
Σε αντιδιαστολή με τον αφηρημένο χαρακτήρα του σφάλματος, η αβεβαιότητα ορίζεται πρακτικά –σύμφωνα με τον Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)- ως παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος.



**Σχήμα 3.1** Η αβεβαιότητα, συγκρινόμενη με το σφάλμα, δίνει μια θολή αλλά ρεαλιστική εικόνα για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Σχηματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η τοποθέτηση του σφάλματος στο επίκεντρο της προσοχής έχει τις ρίζες της σε μια ντετερμινιστική προσέγγιση, ενώ η αβεβαιότητα συνδέεται με μια στοχαστική προσέγγιση [8].

Η πληροφορία, επομένως, που διαθέτουμε για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης αφορά όχι μόνο στην εκτιμώμενη καλύτερη προσέγγιση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά

και στη διασπορά των πιθανών τιμών που το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να έχει, με επίγνωση της αδυναμίας να εντοπιστεί η μία και μοναδική αληθής τιμή [3].



**Σχήμα 3.2** Σφάλμα και αβεβαιότητα [8].

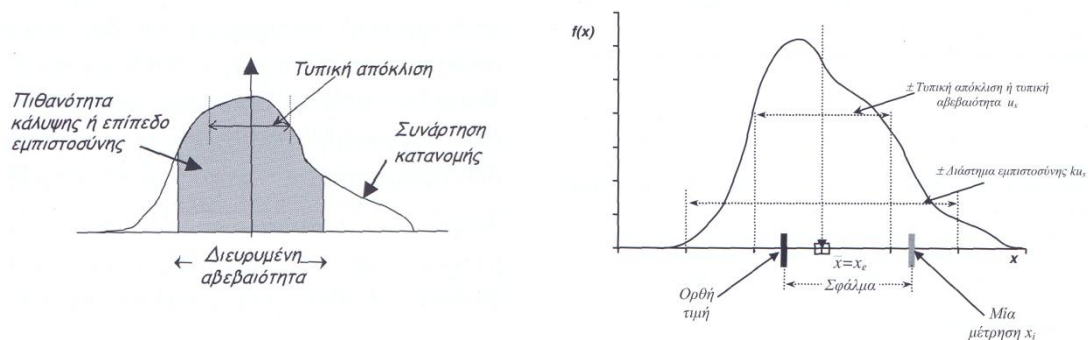
Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ένα αποτέλεσμα μέτρησης μπορεί τελικά να εμπεριέχει μικρό (αλλά άγνωστο) σφάλμα και να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα, όπως και αντίστροφα, μπορεί να χαρακτηρίζεται από μικρή αβεβαιότητα αλλά, στην πραγματικότητα, το σφάλμα να είναι μεγάλο. Αυτό που απαιτείται είναι η διατύπωση ενός διαστήματος  $\Delta X = (x_a, x_b)$  μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή με μια λιγότερο ή περισσότερο σημαντική πιθανότητα  $p$ , αποκαλούμενη **πιθανότητα κάλυψης** (coverage probability) ή **επίπεδο εμπιστοσύνης** (confidence level). Για τις συνήθεις κατανομές πιθανοτήτων η επιλογή ενός διαστήματος  $\Delta X$  εκατέρωθεν της αναμενόμενης τιμής  $x_e$ , οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα εμπιστοσύνης. Εάν επιζητείται μεγαλύτερη πιθανότητα κάλυψης, είναι αναγκαία η αύξηση του διαστήματος, πολλαπλασιάζοντας αντίστοιχα την τυπική αβεβαιότητα με ένα **συντελεστή κάλυψης  $k$** , η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος της κατανομής  $f(x)$  και από το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης. Το γινόμενο  $U_x = k u_x$  ονομάζεται διευρυμένη αβεβαιότητα και το τελικό αποτέλεσμα διατυπώνεται ως  $x_e \pm U_x$  [1].

Πέρα, λοιπόν, από την πιθανότερη τιμή, απαιτείται η γνώση της τυπικής απόκλισης  $\sigma_x$  των πιθανών τιμών, αλλά και πληροφορίες για το είδος της κατανομής  $f(x)$ , έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η τυπική αβεβαιότητα  $u_x = \sigma_x$  και το διάστημα,  $(x_e + U_x, x_e - U_x)$  μέσα στο οποίο περιέχεται η ορθή αλλά άγνωστη τιμή για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης, το οποίο ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή κάλυψης  $k$ , που εξαρτάται με τη σειρά του από την επιθυμητή πιθανότητα εμπιστοσύνης [4].

### 3.2.3 Κατηγοριοποίηση αβεβαιοτήτων (Τύπου A & Τύπου B)

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν περιορίζεται σε καμία περίπτωση στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αφού πρόκειται για μία στοχαστική μεταβλητή και η αποδιδόμενη τιμή χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί είτε ως τυπική απόκλιση της συνάρτησης κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα, και αποκαλείται τότε **«τυπική αβεβαιότητα»**, είτε ως διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή, με μια ορισμένη στάθμη σιγουριάς ή εμπιστοσύνης, και αποκαλείται **«διευρυμένη αβεβαιότητα»**.

Πρέπει να τονισθεί ότι, η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την ποιότητα μίας μέτρησης και πιο συγκεκριμένα το αποτέλεσμά της. Δεν αφορά άμεσα τα παρατηρούμενα μεγέθη, τα οποία είναι δεδομένα και ανεξάρτητα από τη δυνατότητα του παρατηρητή να τα προσεγγίσει. Η αβεβαιότητα αφορά πάντα μια συγκεκριμένη τιμή, όπως αυτή εκτιμήθηκε κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, σύμφωνα με συγκεκριμένη διαδικασία, και χαρακτηρίζει τη γνώση που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Είναι επομένως δυνατόν, κάποιος άλλος να δώσει μια άλλη εκτίμηση τόσο για την τιμή του ίδιου μεγέθους όσο και για την αβεβαιότητα που συνοδεύει την τιμή αυτή.



**Σχήμα 3.3** Κατανομή πιθανοτήτων των πιθανών τιμών μιας μεταβλητής.

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: οι αβεβαιότητες **τύπου A**, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους, και οι αβεβαιότητες **τύπου B**, που υπολογίζονται με άλλα μέσα. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν αντιστοιχεί στη διάκριση μεταξύ «τυχαίων» και «συστηματικών» αβεβαιοτήτων [3], [4], [5].

Οι συνιστώσες **τύπου A** προκύπτουν από τη μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος, ενώ είναι συχνά απαραίτητη και η γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance).

Οι συνιστώσες **τύπου B**, παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Η τυπική αυτή αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση της αντίστοιχης μεταβλητότητας, η ύπαρξη της οποίας υφίσταται ως υπόθεση.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα προκύπτει από το συνδυασμό όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενων με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων.

### 3.2.4 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A

Η **αβεβαιότητα τύπου A (random uncertainty)**, σύμφωνα με τους κανονισμούς [6], χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα  $x$  μιας μέτρησης προκύπτει από τις τιμές  $x_i$ , με  $i = 1, 2, \dots, n$  των  $n$  ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας μη μεταβαλλόμενης ποσότητας  $X$ , κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας, χρησιμοποιώντας



όργανα μέτρησης χαρακτηριζόμενα από αμελητέα απόκλιση στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η μέτρηση.

Οι αβεβαιότητες τύπου A υπολογίζονται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και για λόγους πρακτικούς όσο και στατιστικούς προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις [3]:

- **$U_r$  για μικρό αριθμό μετρήσεων (π.χ. 10)**

Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$U_r = \frac{t \cdot s_r}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

όπου  $t$  : συντελεστής Student (Student's factor) για το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level)

$s_r$  : τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων που δίνεται από τη σχέση:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (3.3)$$

όπου  $n$  το πλήθος των μετρήσεων,  $x_i$  οι μετρηθείσες τιμές και  $x_m$  η μέση τιμή των μετρήσεων.

$n \backslash P\%$	68,3	90	95	99,7
2	1,84	6,31	12,7	-
3	1,32	2,92	4,30	-
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
$\infty$	1,00	1,65	1,96	3,00

**Πίνακας 3.2:** Τιμές συντελεστή  $t$  Student.

- $U_r$  για μεγάλο αριθμό μετρήσεων  $n \gg 10$

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (που είναι και αυτό που ζητείται συνήθως) και για ένα δείγμα με περισσότερες από 10 μετρήσεις  $n \gg 10$ , ο συντελεστής Student  $t$  μπορεί να αντικατασταθεί από το συντελεστή κάλυψης  $k$ . Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα της μέσης τιμής είναι :

$$U_r = \frac{k \cdot s_r}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

- **Χρησιμοποίηση προϋπάρχουσας γνώσης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας**

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν υφίσταται προηγούμενη πληροφορία για τη συμπεριφορά του οργάνου ή της μεθόδου μέτρησης. Η πληροφορία αυτή αφορά μια ήδη γνωστή τυπική απόκλιση  $s_r$ , η οποία υπολογίστηκε από μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων παρόμοιου μεγέθους, σε παρόμοιες συνθήκες μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή αντί να χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση του μικρού τρέχοντος δείγματος μετρήσεων, χρησιμοποιείται η παλαιότερα υπολογισμένη  $s_r$  και η αβεβαιότητα λαμβάνεται ίση με :

$$U_r = \frac{k \cdot s_r}{\sqrt{n_2}} \quad (3.5)$$

### 3.2.5 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B

**Αβεβαιότητα τύπου B (systematic uncertainty)** έχουμε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα υπολογίζεται αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους, έτσι ώστε να οικοδομηθεί μια εικόνα για την πιθανή κατανομή των τιμών του μεγέθους. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατόν να προέρχονται από :

- πιστοποιητικά διακρίβωσης
- δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις
- εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση
- χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης
- υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου [3]

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου B είναι [5]:

$$U_s = k \cdot s_s = k \cdot \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (3.6)$$

όπου  $s_{sa}$  η τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής και  $s_{sg}$  η τυπική απόκλιση στην περίπτωση κανονικής κατανομής.

Όταν η διαθέσιμη πληροφορία αφορά μόνο στα όρια  $\pm a$  ανάμεσα στα οποία κυμαίνεται το αναμενόμενο σφάλμα, χωρίς να υπάρχουν ειδικότερες ενδείξεις για την κατανομή ανάμεσα στα όρια αυτά, τότε η υποτιθέμενη κατανομή είναι ομοιόμορφη (ορθογώνια) και η τυπική

απόκλιση είναι ίση με :  $s_{sa} = \frac{a}{\sqrt{3}}$ . Στην περίπτωση που έχουμε  $n$  ανεξάρτητες κατανομές η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$s_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}} \quad (3.7)$$

Όταν η αβεβαιότητα δίνεται μαζί με ένα επίπεδο εμπιστοσύνης, τότε πρέπει να υποθεθεί ότι έχουμε κανονική κατανομή. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι της τάξης του 95% , η

τιμή του συντελεστή  $k$  είναι 2 και η τυπική απόκλιση είναι :  $s_{sg} = \frac{U_{95}}{2}$ . Έτσι η εξίσωση γίνεται :

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_{95}}{2}\right)^2} \quad (3.8)$$

Η γενική μορφή της εξίσωσης γίνεται:

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_m}{k_m}\right)^2} \quad (3.9)$$

όπου  $U_1$  έως  $U_m$  είναι οι αβεβαιότητες (calibration contribution) με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

$k_1$  έως  $k_m$  οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης [9].

### 3.2.6 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας

Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \quad (3.10)$$

### 3.2.7 Συνδυασμός αβεβαιοτήτων – Νόμος διάδοσης αβεβαιοτήτων [3]

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους  $Y$  πραγματοποιείται έμμεσα, δηλαδή στη βάση απευθείας μετρήσεων μιας σειράς πρωτογενών μεγεθών  $X_i$ ,  $i=1,2,\dots,N$ . Η μετρούμενη κάθε φορά τιμή  $y_i$  του  $Y$  προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών  $x_1, x_2, \dots, x_N$  των πρωτογενών μεγεθών μέσω μιας συνάρτησης  $Y=M(X_1, X_2, \dots, X_N)$  η οποία αντιπροσωπεύει το φυσικό μοντέλο συσχέτισης των μετρούμενων στην πράξη με το προς μέτρηση μέγεθος.

Ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων (law of error propagation) προκύπτει από την ανάπτυξη σε 1<sup>ης</sup> τάξης σειρά Taylor της συνάρτησης  $M(Y)$  γύρω από το σημείο της μέτρησης

$y_e = M(x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{Ne})$ . Η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα (standard combined uncertainty) γύρω από την τιμή μέτρησης δίνεται από την παρακάτω σχέση, γνωστή και ως νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων : [3]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial M}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial M}{\partial x_i} \frac{\partial M}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.11)$$

όπου  $u_{x_i}$  είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους  $x_i$  και  $u(x_i, x_j)$  είναι η συσχετιστικότητα μεταξύ  $x_i$  και  $x_j$ .

Συνήθως στις δοκιμές τα μεγέθη  $x_1, x_2, \dots, x_N$  θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και η παραπάνω σχέση γράφεται [3]:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial M}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \quad (3.12)$$

## ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά αναφορά σε σημαντικές λεπτομέρειες της πειραματικής διαδικασίας που λαμβάνονται υπόψη στην επεξεργασία και αναφέρονται οι αβεβαιότητες που θα προσδιοριστούν. Ακολούθως, παρουσιάζεται η επεξεργασία των μετρήσεων με την μέθοδο αυξομείωσης τάσης και υπολογίζονται οι τιμές της κρίσιμης πεδιακής έντασης μαζί με τις αβεβαιότητες, όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3.

### 4.1. Πληροφορίες για επεξεργασία των μετρήσεων

#### 4.1.1. Τάση Διάσπασης

- ❖ Στην πειραματικές μετρήσεις που διενεργήσαμε, επιλέξαμε το βήμα μεταβολής της τάσης σε 2,2 Volt στο πρωτεύον τύλιγμα.
- ❖ Πραγματοποιήσαμε 25 σημαντικές κρούσεις για κάθε σειρά δοκιμών, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των μετρήσεων.
- ❖ Στην επεξεργασία που ακολουθεί, οι τιμές στα επίπεδα την τάσης αντιστοιχούν στην τάση στα άκρα του δοκιμίου. Τα επίπεδα προέκυψαν ως η μέση τιμή όλων των μετρήσεων σε κάθε επίπεδο τάσης.
- ❖ Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων σε όλες τις δοκιμές ήταν  $h = 7\text{cm}$ , έτσι ώστε να έχουμε ομοιογενές πεδίο.

#### 4.4.2. Αβεβαιότητα

- ❖ Για μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα επιλέξαμε να εξετάσουμε την αβεβαιότητα των μετρήσεων. Προκύπτουν λοιπόν οι παρακάτω αβεβαιότητες:
  - **Αβεβαιότητα τάσης διάσπασης 50% ( $U_{50\%}$ ):** Η αβεβαιότητα της τάσης διάσπασης 50% που περιλαμβάνει όλες τις μετρήσεις κάθε σειρά.
  - **Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης ( $U_{break}$ ):** Η αβεβαιότητα της τάσης ξεχωριστά για κάθε επίπεδο τάσης που εφαρμόστηκε σε μια σειρά μετρήσεων.
  - **Αβεβαιότητα κρίσιμης πεδιακής έντασης ( $U_E$ ):** Η αβεβαιότητα της κρίσιμης πεδιακής έντασης. Υπολογίζεται από τη σχέση

$$U_E = \frac{U_{50\%}}{h} \sqrt{\frac{U_{50\%}^2}{U_{50\%}^2} + \frac{U_h^2}{h^2}} \quad (4.1)$$

όπου  $U_{50\%}$ , μέση τιμή της τάσης διάσπασης σε kV  
 $h$ , διάκενο μεταξύ των πλακών σε cm  
 $U_{50\%}$ , αβεβαιότητα μέσης τιμής της τάσης διάσπασης σε kV  
 $U_h$ , αβεβαιότητα διακένου μεταξύ των πλακών ίσο με 0,2cm

- **Αβεβαιότητα χρόνου  $t_{break}$  ανά επίπεδο τάσης:** Αντίστοιχα με το  $U_{break}$ , η αβεβαιότητα του χρόνου διάσπασης ( $t_{break}$ ) είναι για τις κρούσεις για τις οποίες παρατηρήθηκε διάσπαση και προκύπτει μια τιμή αβεβαιότητας για κάθε σύνολο διασπάσεων σε κάθε επίπεδο τάσης.
- ❖ Η συστηματική αβεβαιότητα (τύπου B) προκύπτει από το πιστοποιητικό του συστήματος DiAS και ισούται με  $U_s=0,6\%$  για τις μετρήσεις της τάσης και με  $U_s=1\%$  για τις μετρήσεις του χρόνου. Οπότε και η Ολική Αβεβαιότητα υπολογίζεται από τη σχέση 3.10.

## 4.2. Επεξεργασία Μετρήσεων

Για την επεξεργασία της τάσης διάσπασης δημιουργούμε ένα πίνακα, ο οποίος συμπληρώνεται από όλα τα επίπεδα τάσης και τις κρούσεις οι οποίες εφαρμόστηκαν σε κάθε δείγμα εδάφους. Με βάση τη μέθοδο αυξομείωσης τάσης όπως αυτή αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2.2. για κάθε διάσπαση σημειώνουμε Χ στον πίνακα και αντίστοιχα Ο όταν παρουσιάζεται αντοχή. Από τον πίνακα προκύπτει ο αριθμός αντοχών και διασπάσεων και οι τιμές  $A_0, A_1, B_0, B_1$ . Με βάση αυτές τις τιμές και τις σχέσεις του Πίνακα 3.1, Υπολογίζουμε την μέση τιμή τάσης διάσπασης, την τυπική απόκλιση και την κρίσιμη πεδιακή ένταση.

#### 4.2.1. Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα

i	U <sub>i</sub> (kV)	Αριθμός χρήσιμων κρουστικών τάσεων = 25															m <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>								
4	70,3																x		x		x		x		0	4
3	67,8																o		o		o		o		5	0
2	65,3		x						x		x				x		o								1	4
1	62,8	o		x		x		o		o		x		o		o									5	3
0	60,3				o		o							o											3	0

Αριθμός διασπάσεων	: N=11	A <sub>0</sub> = 22
Αριθμός αντοχών	: M=14	A <sub>1</sub> = 27
Βήμα μεταβολής τάσης	: ΔU = 2,5 kV	B <sub>0</sub> = 54
Πρώτη σημαντική κρούση	: U <sub>0</sub> = 62,8 kV	B <sub>1</sub> = 83

Ο αριθμός των διασπάσεων (N) είναι μικρότερος από τον αριθμό των αντοχών (M) άρα προκύπτουν οι παρακάτω τιμές:

#### Μέση τιμή τάσης διάσπασης:

$$U_{50\%} = 67,69 \text{ kV}$$

#### Τυπική απόκλιση τάσης διάσπασης:

$$\sigma = 6,28 \text{ kV}$$

#### Ολική Αβεβαιότητα :

$$U_{U_{50\%}} = 3,443\%$$

#### Κρίσιμη πεδιακή ένταση:

$$E_c = 9,67 \text{ kV/cm}$$

#### Αβεβαιότητα κρίσιμης πεδιακής έντασης:

$$U_E = 0,47 \text{ kV/cm}$$

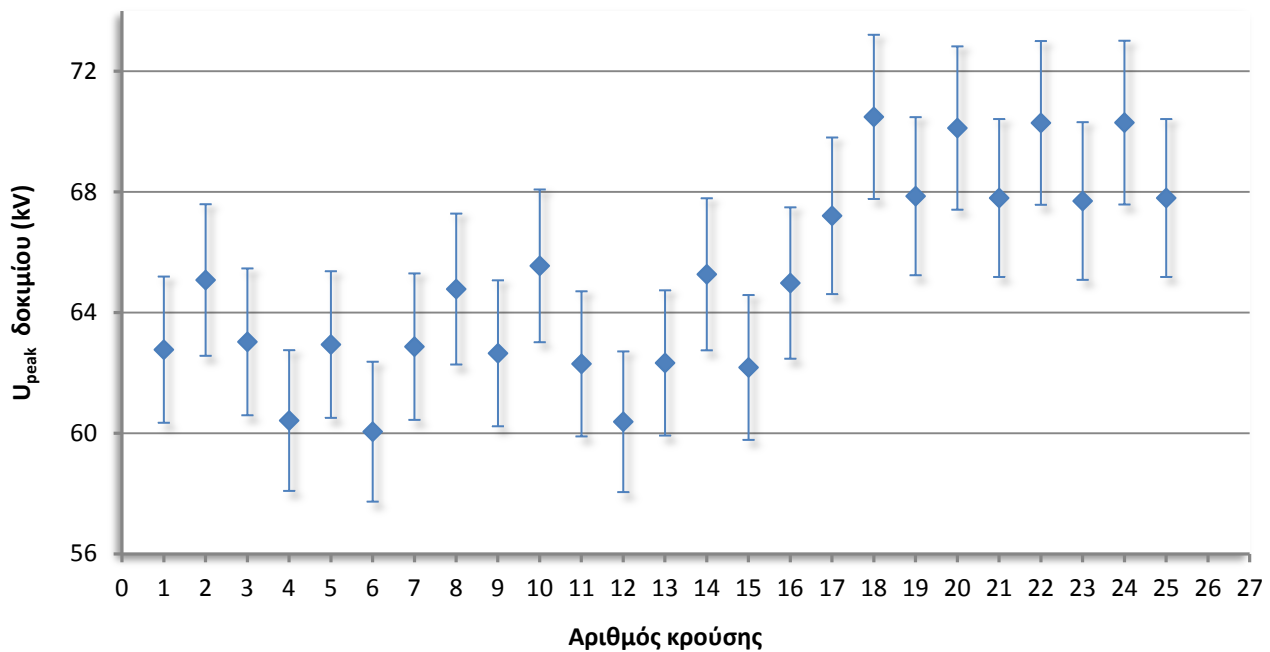
**Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης ( $U_{break}$ ) ανά επίπεδο τάσης:**

	$U_i = 70,3$ (kV)		$U_i = 65,3$ (kV)		$U_i = 62,8$ (kV)	
	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)
	69,8	2,62	64,80	1,87		
	69,8	2,27	63,50	3,67	61,60	3,60
	67,9	4,24	63,60	4,18	61,50	3,40
	66,8	5,43	64,50	2,85	61,90	2,48
$U_\mu$	68,58	3,64	64,10	3,14	61,67	3,16
t Student	3,18	3,18	3,18	3,18	4,30	4,30
$S_r$	1,484	1,47	0,648	1,01	0,208	0,60
$U_r$	2,361	2,34	1,031	1,61	0,517	1,48
$U_r\%$	3,443	64,25	1,609	51,13	0,839	46,96
<b>U</b>	<b>3,50</b>	<b>64,25</b>	<b>1,72</b>	<b>51,14</b>	<b>1,03</b>	<b>46,97</b>

*Πίνακας 4.1 Υπολογισμός αβεβαιότητας για το δοκίμιο Β' 0% υγρασία, θετική πολικότητα.*

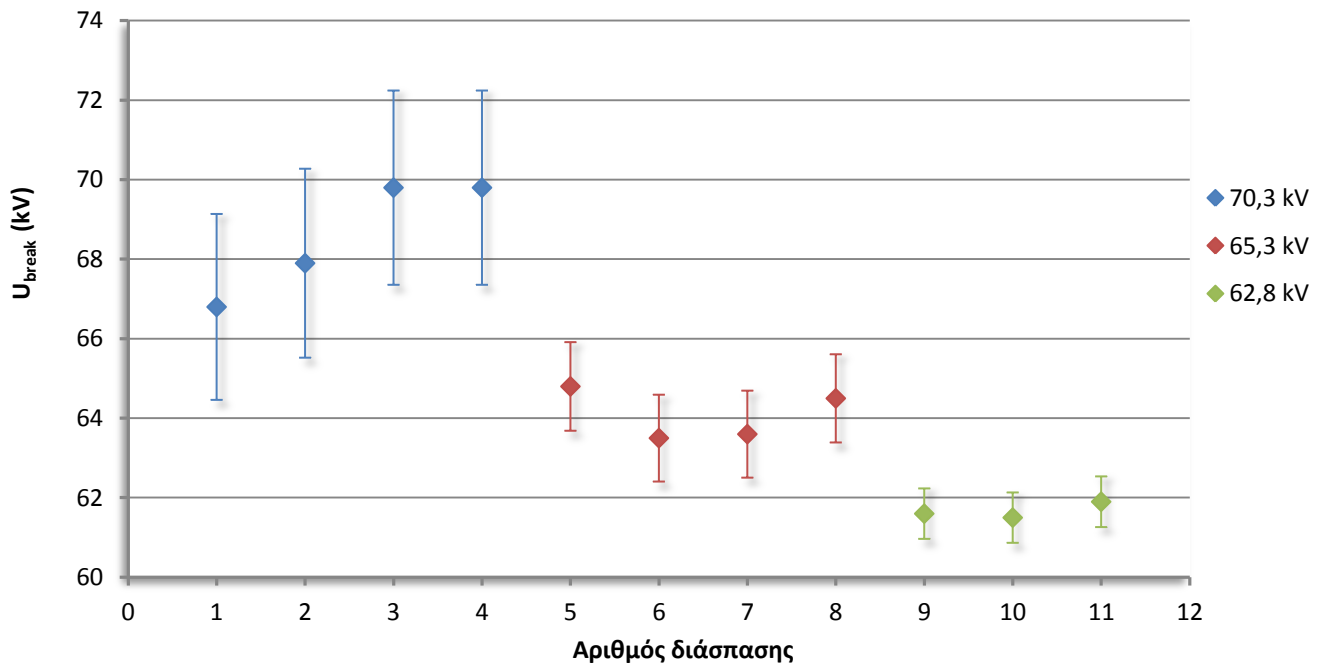


## Ολική αβεβαιότητα



Γράφημα 4.1: Αβεβαιότητα τάσης δοκιμίου Β' 0% υγρασία, θετική πολικότητα.

## Αβεβαιότητα ανά επίπεδο τάσης



Γράφημα 4.2 Αβεβαιότητα τάσης τη στιγμή της διάσπασης ανά επίπεδο τάσης, για το δοκίμιο Β' 0% υγρασία, θετική πολικότητα.

#### 4.2.2. Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% σε υγρασία αρνητική πολικότητα

i	U <sub>i</sub> (kV)	Αριθμός χρήσιμων κρουστικών τάσεων = 25															m <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>														
6	75,3																x									0	1					
5	72,9																o	x		x						o	2	2				
4	70,5																x	o									o	3	2			
3	68,1																x	x										o	3	3		
2	65,7																												o	4	1	
1	63,3	x																											o	2	1	
0	60,9																													o	1	0

Αριθμός διασπάσεων : N=10

A<sub>0</sub> = 41

Αριθμός αντοχών : M=15

A<sub>1</sub> = 36

Βήμα μεταβολής τάσης : ΔU = 2,5 kV

B<sub>0</sub> = 143

Πρώτη σημαντική κρούση : U<sub>0</sub> = 63,3 kV

B<sub>1</sub> = 150

Ο αριθμός των διασπάσεων (N) είναι μικρότερος από τον αριθμό των αντοχών (M) άρα προκύπτουν οι παρακάτω τιμές:

##### Μέση τιμή τάσης διάσπασης:

$$U_{50\%} = 70,74 \text{ kV}$$

##### Τυπική απόκλιση τάσης διάσπασης:

$$\sigma = 8,04 \text{ kV}$$

##### Συνολική Αβεβαιότητα της U<sub>50%</sub>:

$$U_{U_{50\%}} = 4,721 \%$$

##### Κρίσιμη πεδιακή ένταση:

$$E_c = 10,11 \text{ kV/cm}$$

##### Αβεβαιότητα κρίσιμης πεδιακής έντασης:

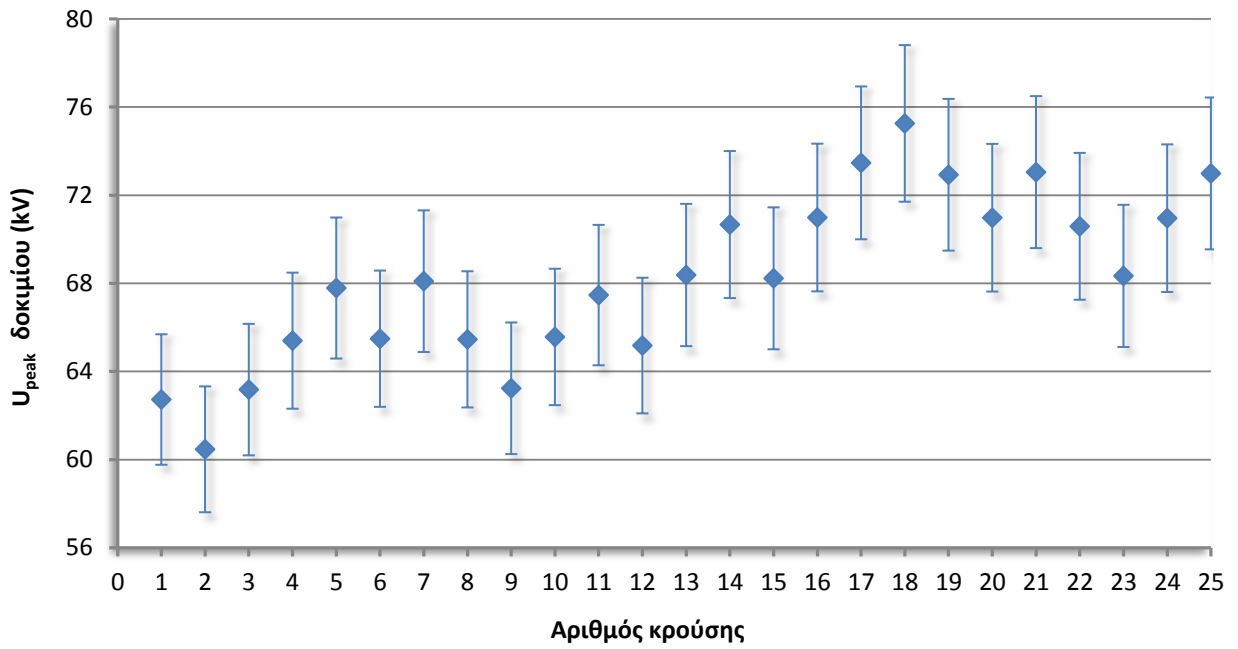
$$U_E = 0,558 \text{ kV/cm}$$

**Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης( $U_{break}$ ) ανά επίπεδο τάσης:**

	$U_i = 72,9$ (kV)		$U_i = 70,5$ (kV)		$U_i = 68,1$ (kV)	
	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)
	71,50 72,50	3,70 2,85	70,00 70,20	2,45 2,21	67,70 67,50 65,40	1,77 2,83 4,03
$U_\mu$	72,00	3,28	70,10	2,33	66,87	2,88
t Student	12,71	12,71	12,71	12,71	4,30	4,30
$S_r$	0,71	0,60	0,14	0,17	1,27	1,13
$U_r$	6,36	5,41	1,27	1,53	3,17	2,81
$U_r\%$	8,83	164,93	1,81	65,46	4,73	97,65
<b>U</b>	<b>8,85</b>	<b>164,93</b>	<b>1,91</b>	<b>65,47</b>	<b>4,77</b>	<b>97,66</b>

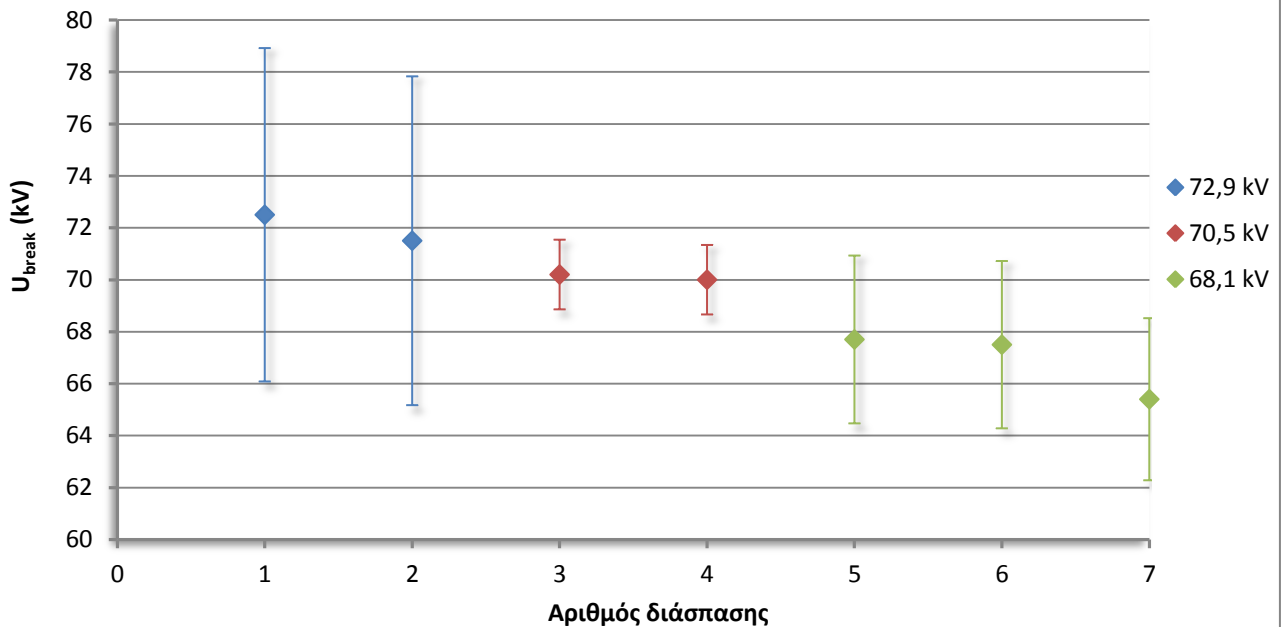
**Πίνακας 4.2:** Υπολογισμός αβεβαιότητας για το δοκίμιο B' 0% υγρασία, αρνητική πολικότητα.

## Ολική αβεβαιότητα



Γράφημα 4.3 Αβεβαιότητα τάσης δοκιμίου Β' 0% υγρασία, αρνητική πολικότητα.

## Αβεβαιότητα ανά επίπεδο τάσης



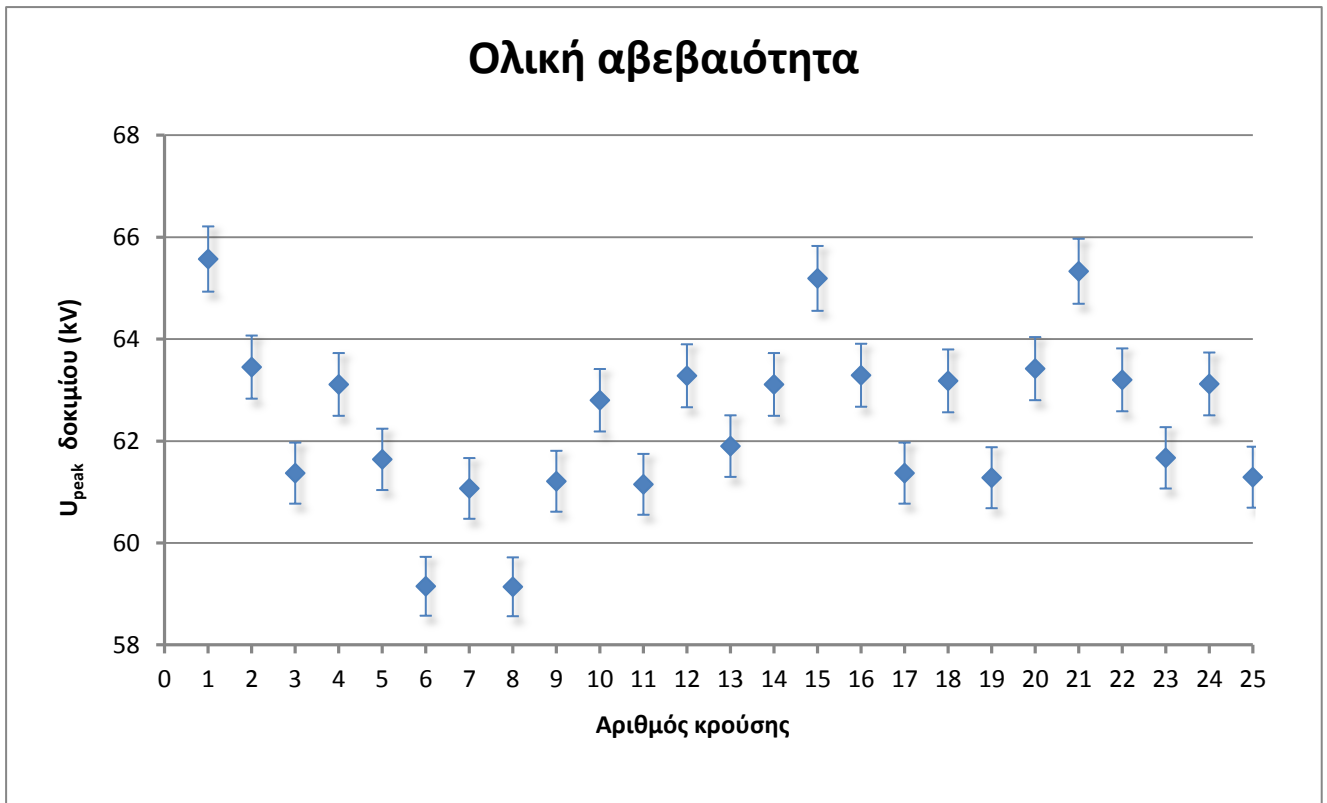
Γράφημα 4.4 Αβεβαιότητα τάσης τη στιγμή της διάσπασης ανά επίπεδο τάσης, για το δοκίμιο Β' 0% υγρασία, αρνητική πολικότητα.



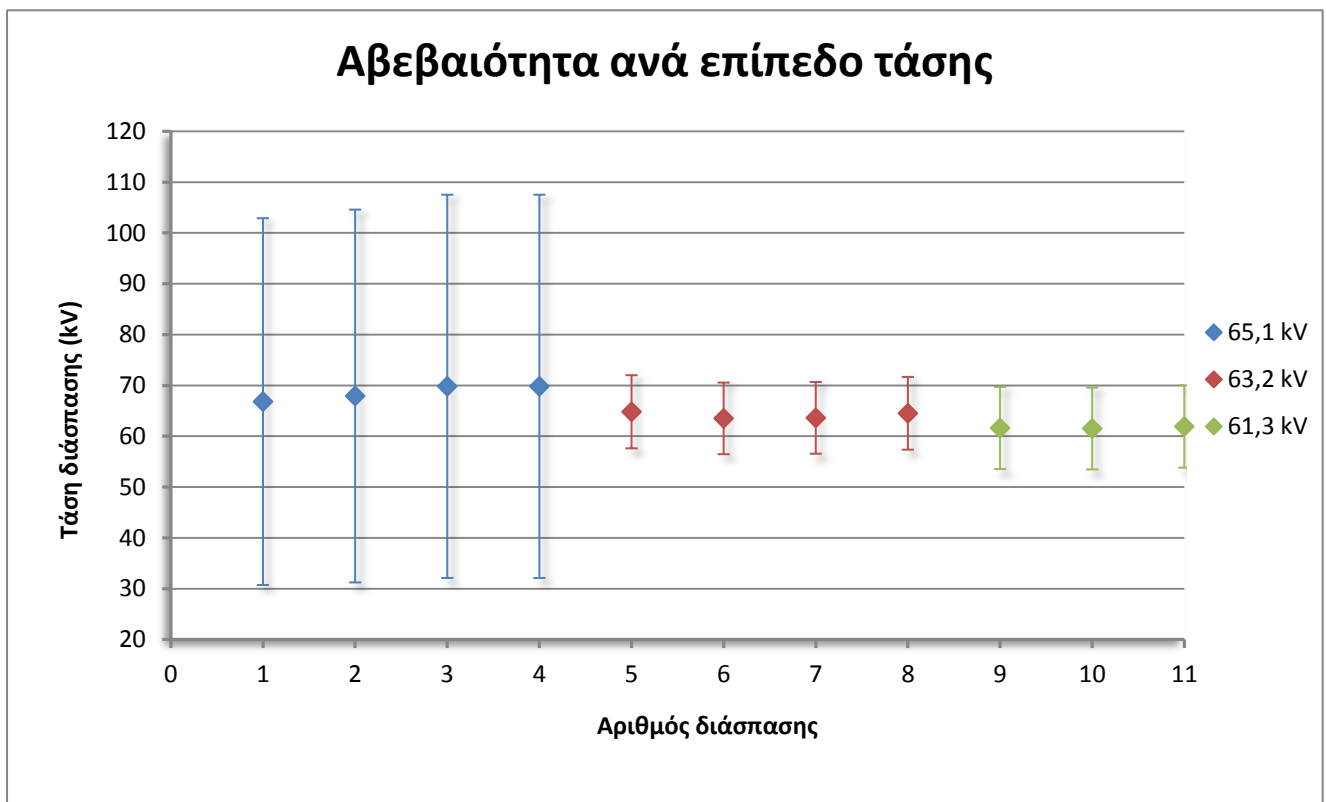
**Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης ( $U_{break}$ ) ανά επίπεδο τάσης:**

	$U_i = 65,1$ (kV)		$U_i = 63,2$ (kV)		$U_i = 61,3$ (kV)	
	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)
	60,10 55,20	3,02 5,23	58,70 46,80 54,50 48,10 38,20 48,10 57,50 53,00	3,13 8,26 4,68 7,71 1,38 7,68 3,58 5,24	51,00 47,00 45,90	5,77 7,63 8,22
$U_\mu$	57,65	4,13	50,61	5,21	47,97	7,21
t Student	12,71	12,71	2,37	2,37	4,30	4,30
$S_r$	3,46	1,53	6,71	2,50	2,68	1,28
$U_r$	31,14	13,71	5,61	3,80	6,67	1,90
$U_r\%$	54,01	332,29	11,08	72,90	13,90	26,34
<b>U</b>	<b>54,02</b>	<b>332,29</b>	<b>11,10</b>	<b>72,91</b>	<b>13,91</b>	<b>26,36</b>

**Πίνακας 4.3:** Υπολογισμός αβεβαιότητας για το δοκίμιο Β' 5% υγρασία, θετική πολικότητα.



**Γράφημα 4.5** Αβεβαιότητα τάσης δοκιμίου Β 5% υγρασία.



**Γράφημα 4.6** Αβεβαιότητα τάσης τη στιγμή της διάσπασης ανά επίπεδο τάσης, για το δοκίμιο Β 5% υγρασία.



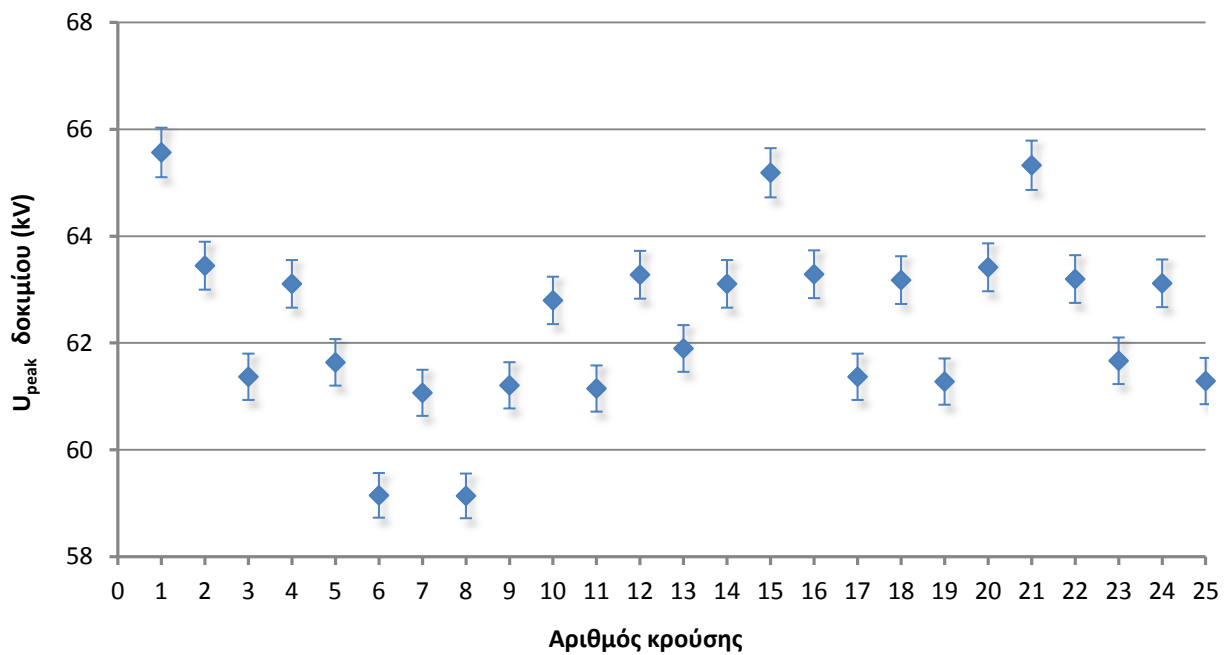


**Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης ( $U_{break}$ ) ανά επίπεδο τάσης:**

	$U_i = 43$ (kV)		$U_i = 42,1$ (kV)		$U_i = 41,2$ (kV)	
	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)
	26,20 28,50 31,90	3,15 2,63 2,13	23,70 20,20 29,90 14,20 28,10 25,70	3,50 4,43 2,34 6,27 2,61 3,19	23,50 23,70 20,00	3,51 3,51 4,35
$U_\mu$	28,87	2,50	23,63	3,72	22,40	3,79
t Student	4,30	4,30	2,571	2,571	4,30	4,30
$S_r$	2,87	0,51	5,73	1,45	2,08	0,48
$U_r$	7,12	1,27	6,02	1,52	5,17	1,20
$U_r\%$	24,68	48,06	25,46	40,80	23,08	31,79
<b>U</b>	<b>24,69</b>	<b>48,07</b>	<b>25,46</b>	<b>40,81</b>	<b>23,09</b>	<b>31,81</b>

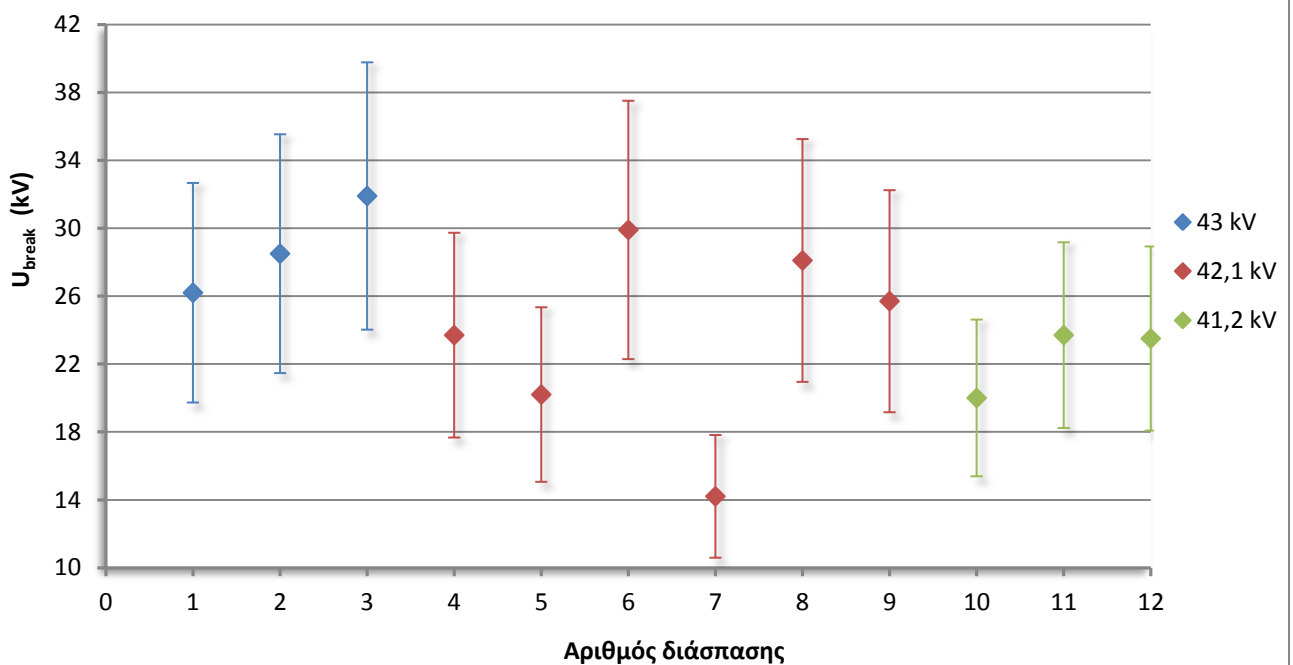
**Πίνακας 4.4:** Υπολογισμός αβεβαιότητας για το δοκίμιο Β' 10% υγρασία, θετική πολικότητα.

## Ολική αβεβαιότητα



Γράφημα 4.7 Αβεβαιότητα τάσης δοκιμίου Β' 10% υγρασία.

## Αβεβαιότητα ανά επίπεδο τάσης



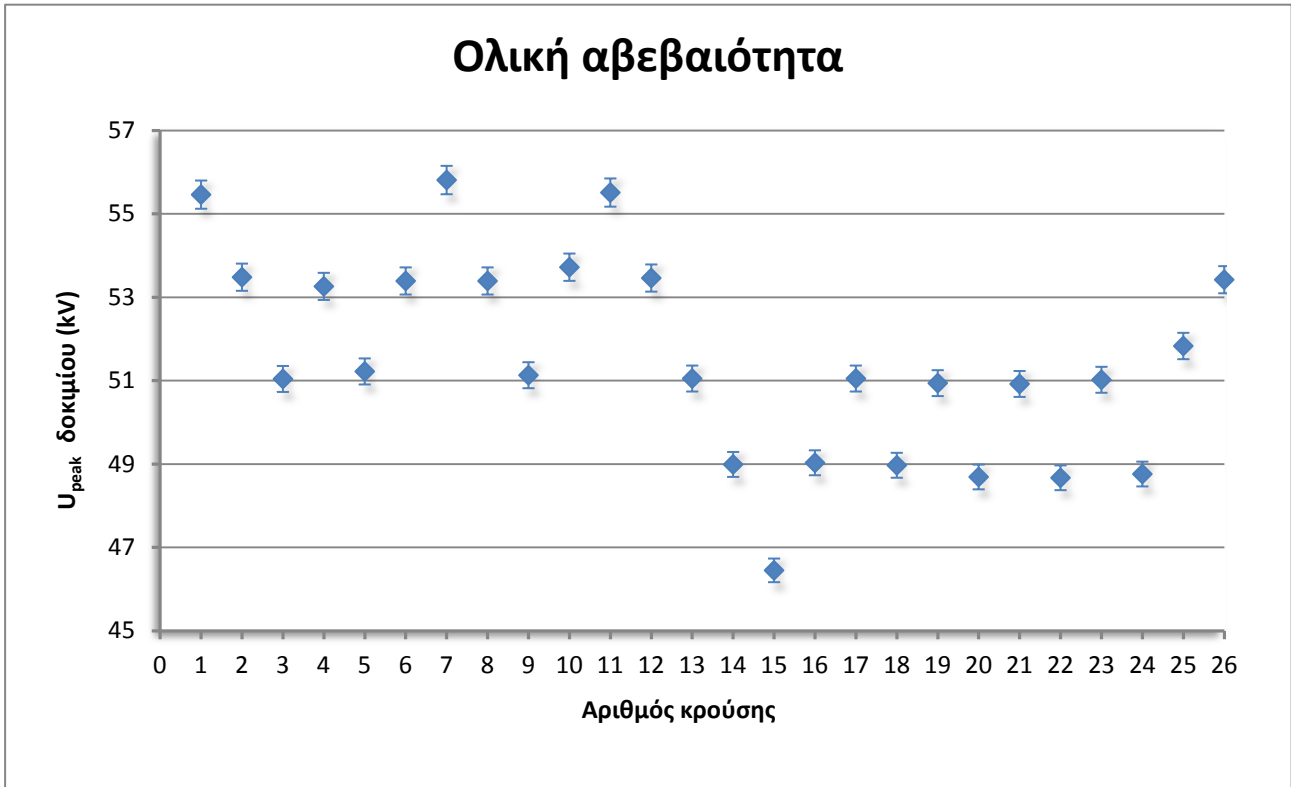
Γράφημα 4.8\_Αβεβαιότητα τάσης τη στιγμή της διάσπασης ανά επίπεδο τάσης, για το δοκίμιο Β' 10% υγρασία.



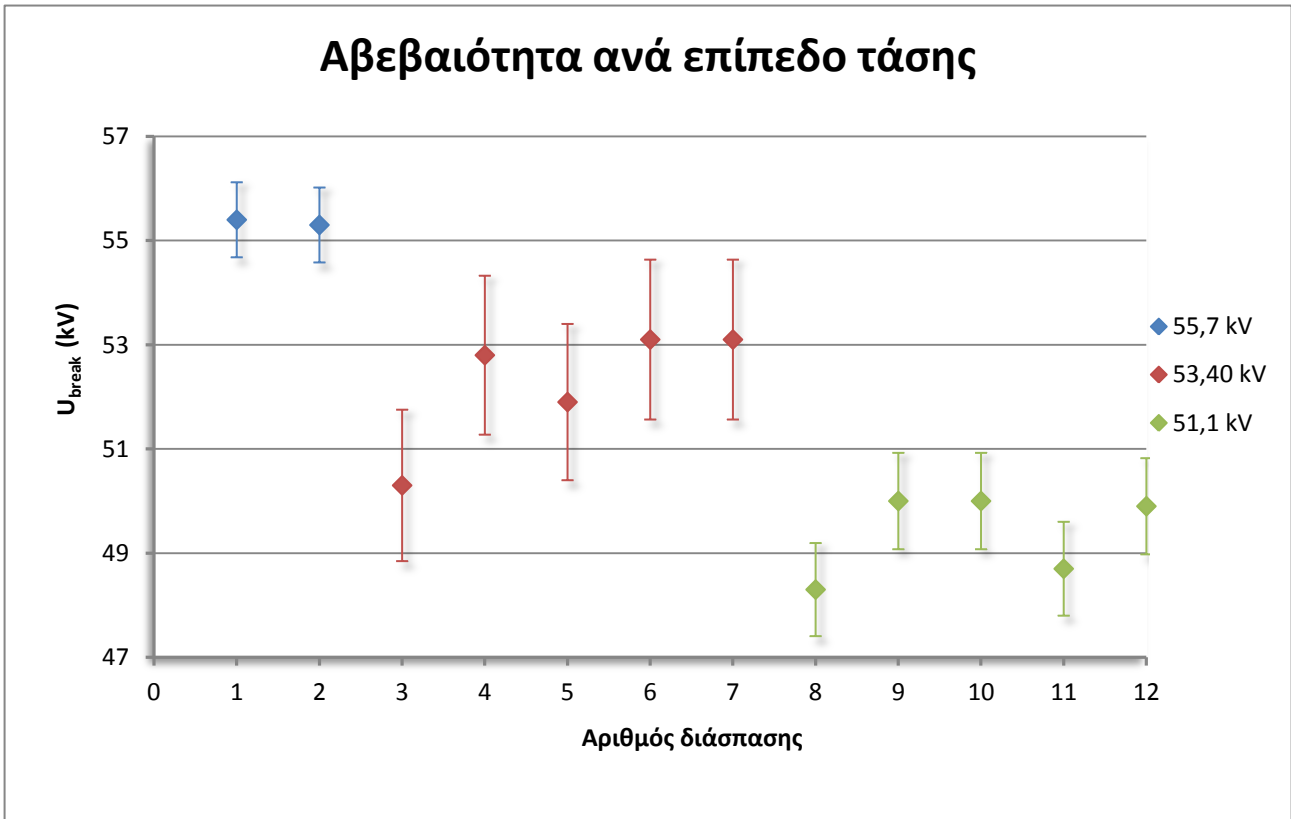
**Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης ( $U_{break}$ ) ανά επίπεδο τάσης:**

	$U_i = 55,7$ (kV)		$U_i = 53,4$ (kV)		$U_i = 51,1$ (kV)	
	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)
	55,40 55,30	2,46 1,84	50,30 52,80 51,90 53,10 53,10	5,21 2,11 3,58 1,93 1,95	48,30 50,00 50,00 48,70 48,90	5,04 3,35 3,02 4,25 3,03
$U_\mu$	55,35	2,15	52,24	3,21	49,38	3,74
t Student	12,71	12,71	2,78	2,78	2,78	2,78
$S_r$	0,07	0,44	1,19	1,46	0,70	0,88
$U_r$	0,64	3,94	1,48	1,82	0,86	1,10
$U_r\%$	1,15	183,26	2,83	56,64	1,75	29,35
<b>U</b>	<b>1,30</b>	<b>183,26</b>	<b>2,89</b>	<b>56,65</b>	<b>1,85</b>	<b>29,37</b>

**Πίνακας 4.5:** Υπολογισμός αβεβαιότητας για το δοκίμιο Δ' 0% υγρασία, θετική πολικότητα.



**Γράφημα 4.9** Αβεβαιότητα τάσης δοκιμίου Δ' 0% υγρασία, θετική πολικότητα.



**Γράφημα 4.10** Αβεβαιότητα τάσης τη στιγμή της διάσπασης ανά επίπεδο τάσης, για το δοκίμιο 0% υγρασία, θετική πολικότητα.

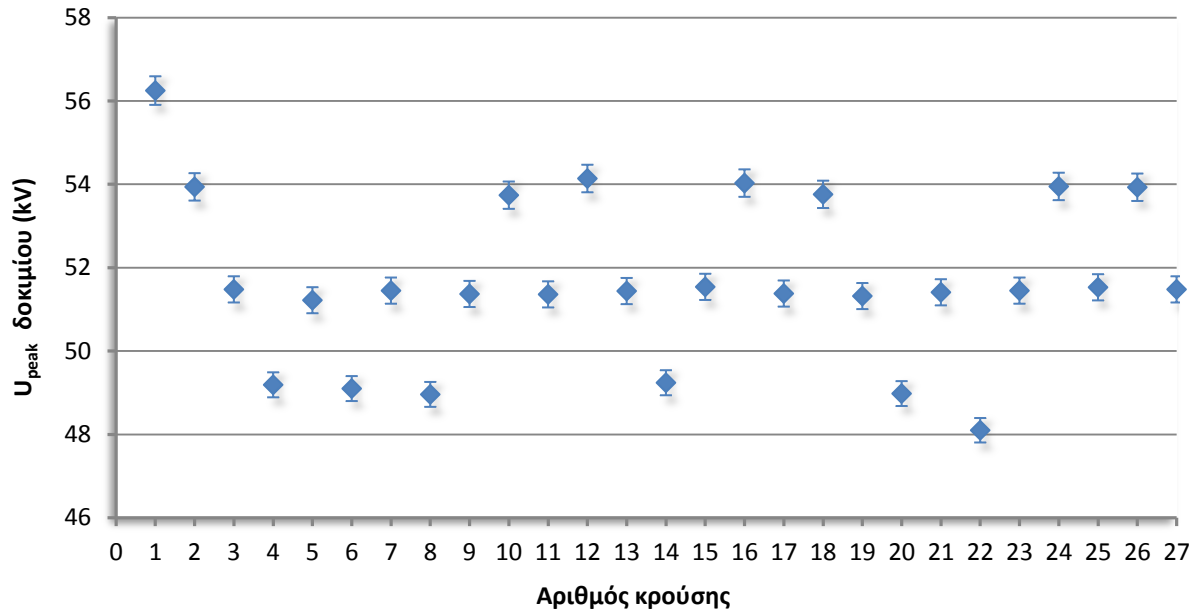


**Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης( $U_{break}$ ) ανά επίπεδο τάσης:**

	$U_i = 54$ (kV)		$U_i = 51,5$ (kV)	
	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)
	52,70	3,05	49,20	4,54
	52,30	4,01	50,30	3,85
	45,00	1,13	50,40	2,84
	47,00	8,76	48,70	5,11
	52,30	3,37	49,00	4,94
	52,50	3,67	50,90	3,64
$U_\mu$	50,30	4,00	49,75	4,15
t Student	2,57	2,57	2,57	2,57
$S_r$	1,40	2,54	0,35	0,87
$U_r$	1,47	2,67	0,37	0,91
$U_r\%$	2,92	66,72	0,73	21,93
<b>U</b>	<b>2,98</b>	<b>66,73</b>	<b>0,95</b>	<b>21,95</b>

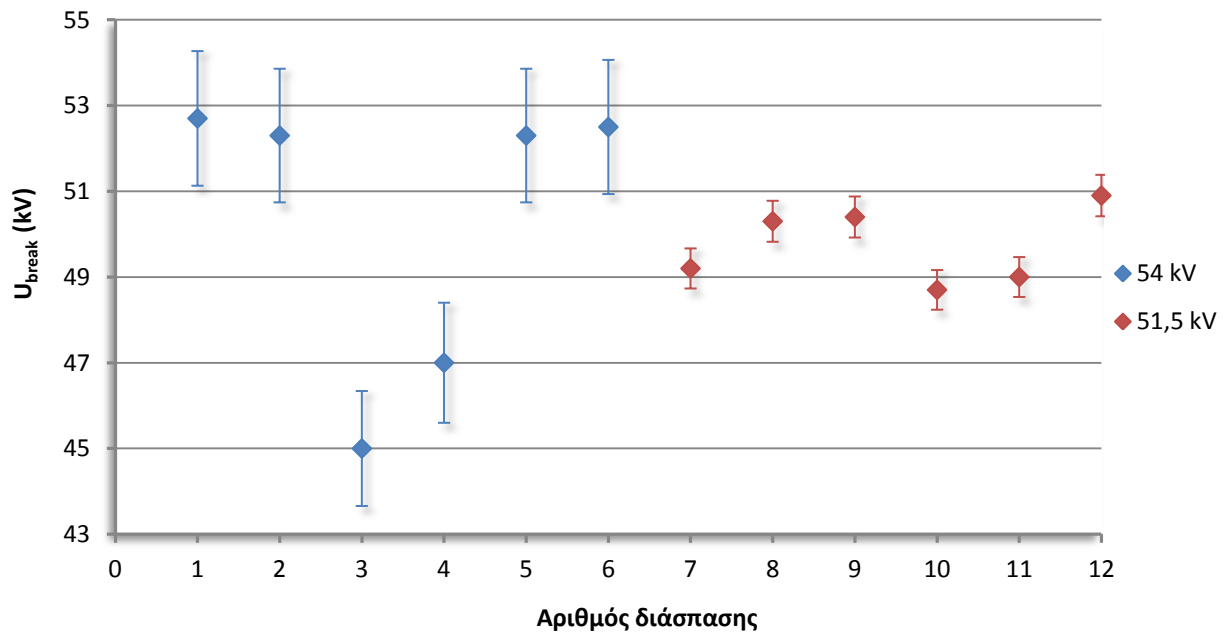
**Πίνακας 4.6:** Υπολογισμός αβεβαιότητας για το δοκίμιο Δ' 0% υγρασία, αρνητική πολικότητα.

## Ολική αβεβαιότητα



Γράφημα 4.11 Αβεβαιότητα τάσης δοκιμίου Δ' 0% υγρασία, αρνητική πολικότητα.

## Αβεβαιότητα ανά επίπεδο τάσης



Γράφημα 4.12 Αβεβαιότητα τάσης τη στιγμή της διάσπασης ανά επίπεδο τάσης, για το δοκίμιο Δ' 0% υγρασία, αρνητική πολικότητα.

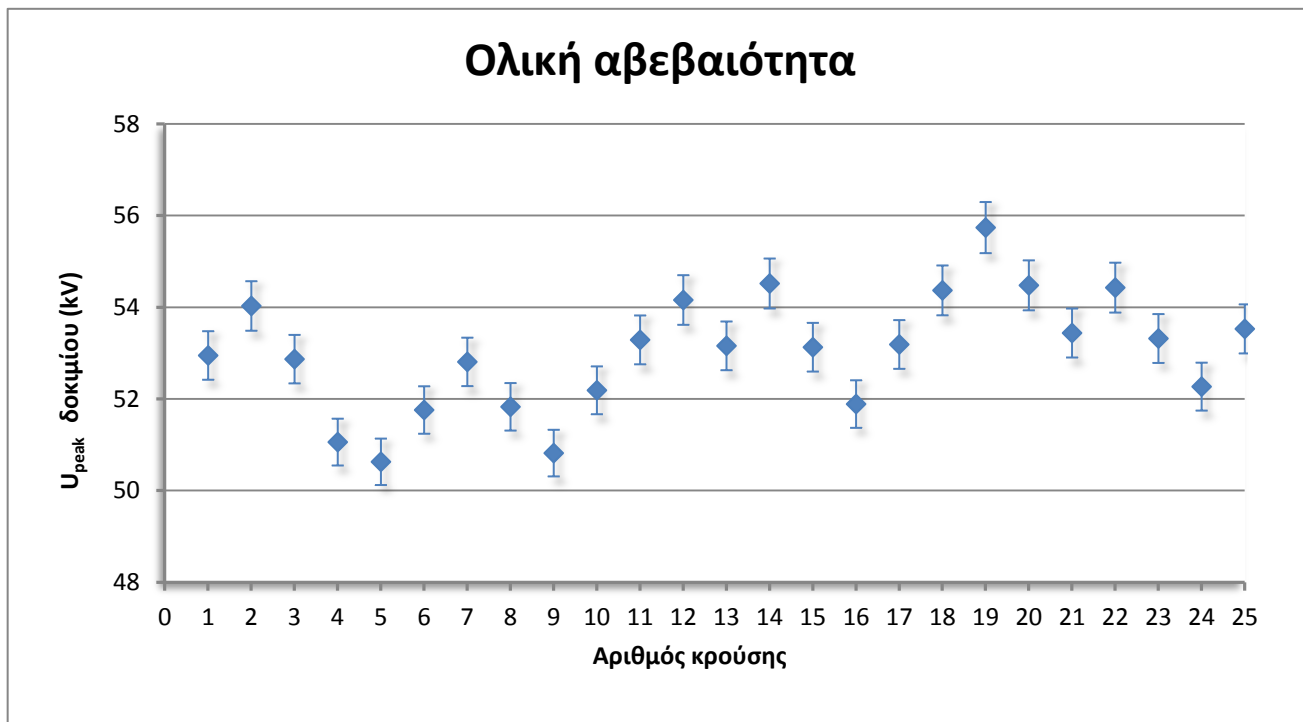




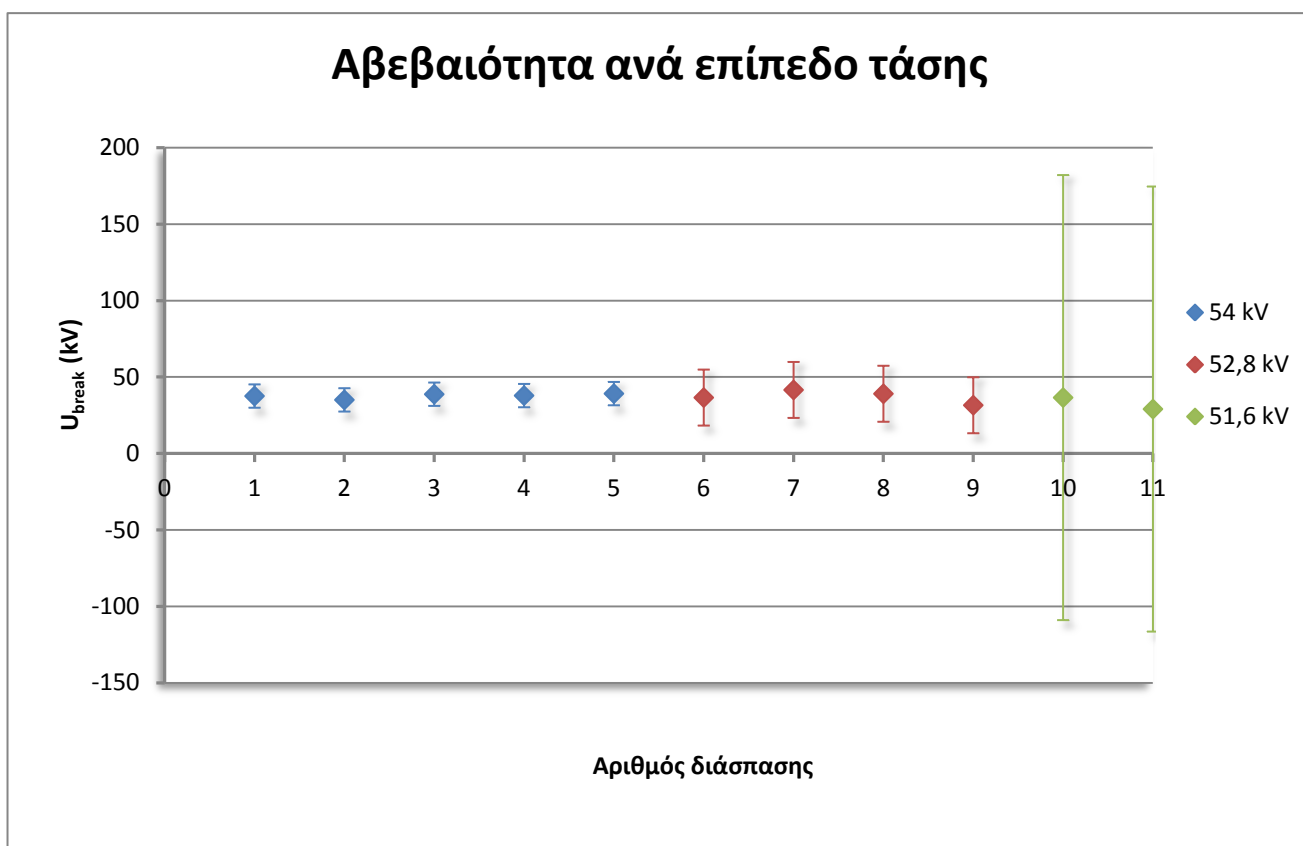
**Αβεβαιότητα στιγμιαίας τάσης διάσπασης( $U_{break}$ ) ανά επίπεδο τάσης:**

	$U_i = 54$ (kV)		$U_i = 52,8$ (kV)		$U_i = 51,6$ (kV)	
	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)	$U_{break}$ (kV)	$t_{break}$ ( $\mu$ s)
	37,50	3,52	36,50	3,64		
	35,00	4,08	41,50	2,58	36,50	3,65
	38,70	3,45	39,00	3,11	29,00	5,90
	37,80	3,41	31,50	5,04		
	39,10	3,17				
$U_\mu$	36,25	3,80	37,13	3,59	32,75	4,78
t Student	2,78	2,78	3,18	3,18	12,71	12,71
$S_r$	2,22	0,33	4,27	1,06	5,30	3,82
$U_r$	2,76	0,41	6,79	1,68	16,14	34,25
$U_r\%$	7,60	10,79	18,30	46,84	11,45	719,46
<b>U</b>	<b>7,63</b>	<b>10,84</b>	<b>18,31</b>	<b>46,85</b>	<b>11,47</b>	<b>719,46</b>

**Πίνακας 4.7:** Υπολογισμός αβεβαιότητας για το δοκίμιο Δ' 5% υγρασία, θετική πολικότητα.



Γράφημα 4.13 Αβεβαιότητα τάσης δοκιμίου Δ' 5% υγρασία.



Γράφημα 4.14 Αβεβαιότητα τάσης τη στιγμή της διάσπασης ανά επίπεδο τάσης Δ' 5% υγρασία.

#### 4.2.8. Συνοπτικά αποτελέσματα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της επεξεργασίας για κάθε δοκίμιο σε όλα τα επίπεδα υγρασίας.

	<b>Δοκίμιο Β'</b>	<b>Δοκίμιο Δ'</b>
<b>0% (+)</b>	$U_{50\%} = 67,69 \text{ kV}$ $U_{U_{50\%}} = 3,44 \%$ $\sigma = 6,28 \text{ kV}$ $E_c = 9,67 \text{ kV/cm}$ $U_E = 0,47 \text{ kV/cm}$	$U_{50\%} = 58,19 \text{ kV}$ $U_{U_{50\%}} = 1,15 \%$ $\sigma = 2,88 \text{ kV}$ $E_c = 8,31 \text{ kV/cm}$ $U_E = 0,29 \text{ kV/cm}$
<b>0% (-)</b>	$U_{50\%} = 70,74 \text{ kV}$ $U_{U_{50\%}} = 4,72 \%$ $\sigma = 8,04 \text{ kV}$ $E_c = 10,11 \text{ kV/cm}$ $U_E = 0,55 \text{ kV/cm}$	$U_{50\%} = 54 \text{ kV}$ $U_{U_{50\%}} = 0,73 \%$ $\sigma = 1,13 \text{ kV}$ $E_c = 7,71 \text{ kV/cm}$ $U_E = 0,23 \text{ kV/cm}$
<b>5%</b>	$U_{50\%} = 66,05 \text{ kV}$ $U_{U_{50\%}} = 0,976 \%$ $\sigma = 1,21 \text{ kV}$ $E_c = 9,44 \text{ kV/cm}$ $U_E = 0,28 \text{ kV/cm}$	$U_{50\%} = 55,10 \text{ kV}$ $U_{U_{50\%}} = 0,81 \%$ $\sigma = 1,50 \text{ kV}$ $E_c = 7,87 \text{ kV/cm}$ $U_E = 0,25 \text{ kV/cm}$
<b>10%</b>	$U_{50\%} = 43,60 \text{ kV}$ $U_{U_{50\%}} = 0,82 \%$ $\sigma = 1,22 \text{ kV}$ $E_c = 6,23 \text{ kV/cm}$ $U_E = 0,196 \text{ kV/cm}$	*

**Πίνακας 4.8** Συνοπτικά αποτελέσματα για τα δύο εδαφικά δείγματα, με διαφορετικές περιεκτικότητες σε υγρασία.

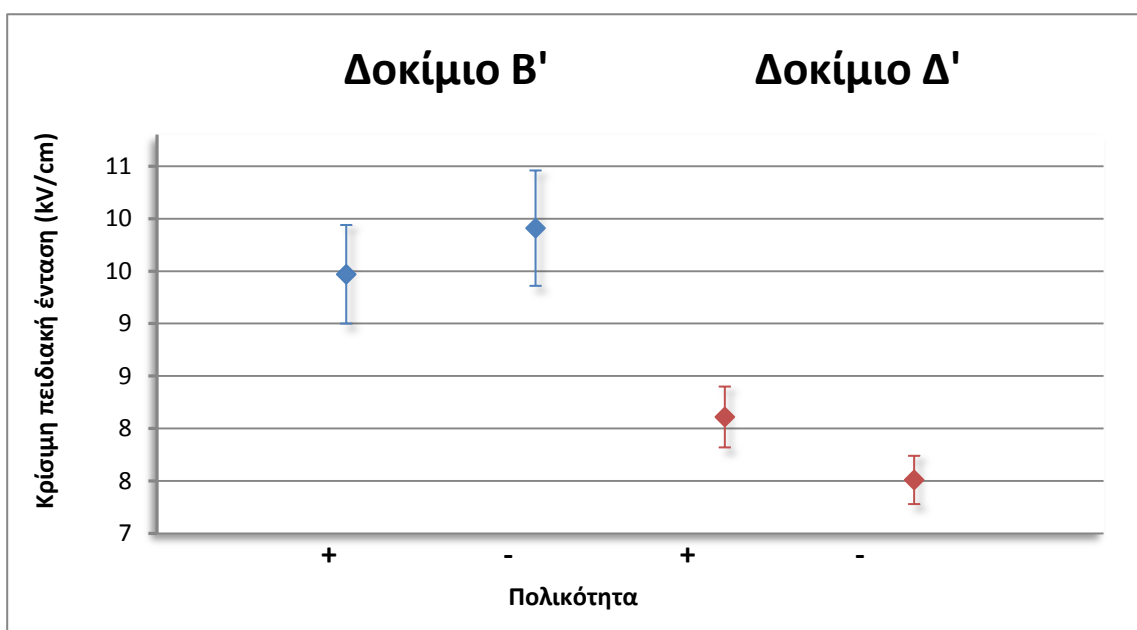
\* Για το δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 10% σε υγρασία δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Η τάση που απαιτείται για τη διάσπαση του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να παραχθεί από τη γεννήτρια.

### 4.3. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της επεξεργασίας θα προσπαθήσουμε να εξάγουμε μερικά γενικά συμπεράσματα, για το πώς επηρεάζεται η τιμή της κρίσιμης πεδιακής έντασης από εξωτερικούς παράγοντες όπως η πολικότητα και η υγρασία του εδάφους. Επίσης θα παρατηρήσουμε και θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα και τις αβεβαιότητες του χρόνου και της τάσης διάσπασης.

#### 4.3.1 Επίδραση πολικότητας

Θέλοντας να παρατηρήσουμε την επίδραση της πολικότητας στην κρίσιμη πεδιακή ένταση, πραγματοποιήσαμε σε κάθε εδαφικό δείγμα για επίπεδο υγρασίας 0%, δυο σειρές μετρήσεων μια υπό θετική και μια υπό αρνητική πολικότητα. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση διάταξης παραλλήλων πλακών, αναμένεται οι τιμές της τάσης  $U_{50\%}$  και κατά συνέπεια του πεδίου υπό θετική και αρνητική πολικότητα να είναι ίσες. Το πεδίο είναι ομοιογενές οπότε είναι αναμενόμενο να μη παρατηρηθεί το φαινόμενο πολικότητας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φαίνονται στο παρακάτω γράφημα.

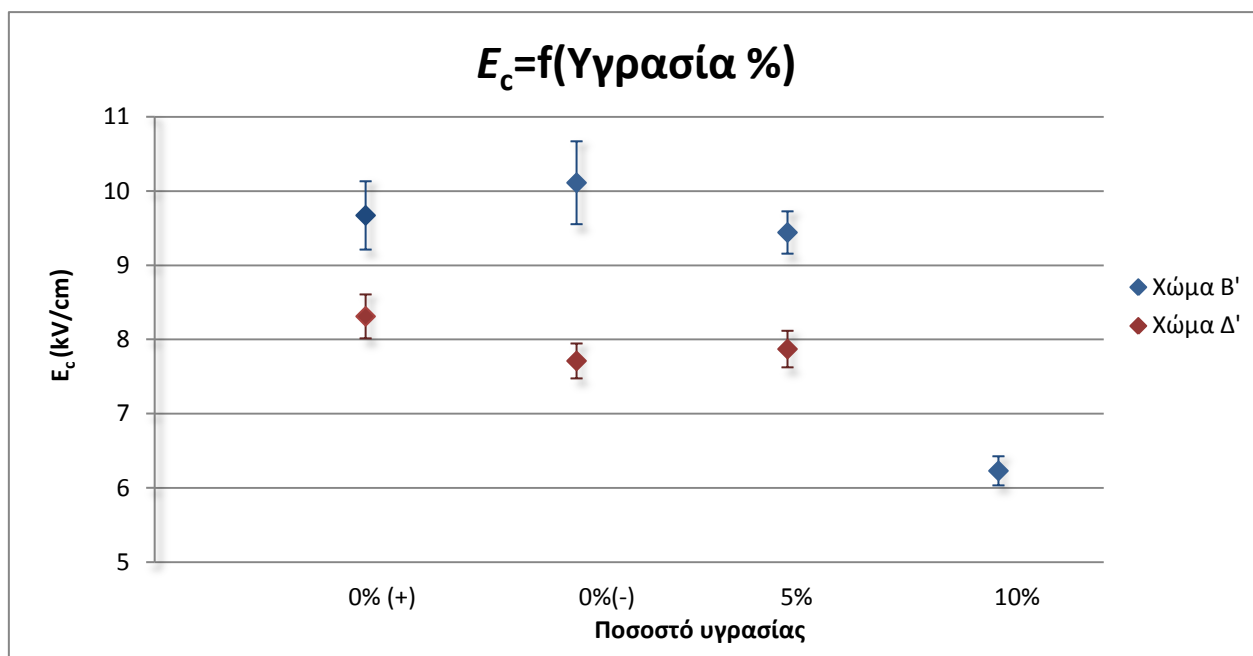


**Γράφημα 4.15** Τάση διάσπασης για αρνητική και θετική πολικότητα σε κάθε εδαφικό δείγμα.

- Στο δοκίμιο Β' παρατηρούμε ότι οι τιμές της κρίσιμης πεδιακής έντασης είναι παραπλήσιες και λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα διαπιστώνεται ότι τα διαστήματα των τιμών επικαλύπτονται.
- Στο δοκίμιο Δ' , οι τιμές της κρίσιμης πεδιακής έντασης είναι αντίστοιχα παραπλήσιες, αλλά με πολύ μικρότερη αβεβαιότητα.
- Οι μικρές αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται στις συνεχείς κρούσεις στις οποίες υποβλήθηκε το δοκίμιο. Η αντικατάσταση του δοκιμίου δεν αποτελεί αποδοτική λύση οπότε κατά τη διάρκεια μιας σειράς μετρήσεων προκαλείται καταπόνηση του δοκιμίου και την αλλοίωση της σύνθεσης του με αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης η ύπαρξη του ακροδέκτη σύνδεσης αγωγού γείωσης διαταράσσει τη συμμετρία της διάταξης με αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των ανωτέρω μεγεθών.

### 4.3.2 Επίδραση υγρασίας

Με την αλλαγή του ποσοστού υγρασίας αναμένεται μεταβολή και στην τιμή της κρίσιμης πεδιακής έντασης. Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την μεταβολή της έντασης συναρτήσει του ποσοστού υγρασίας.

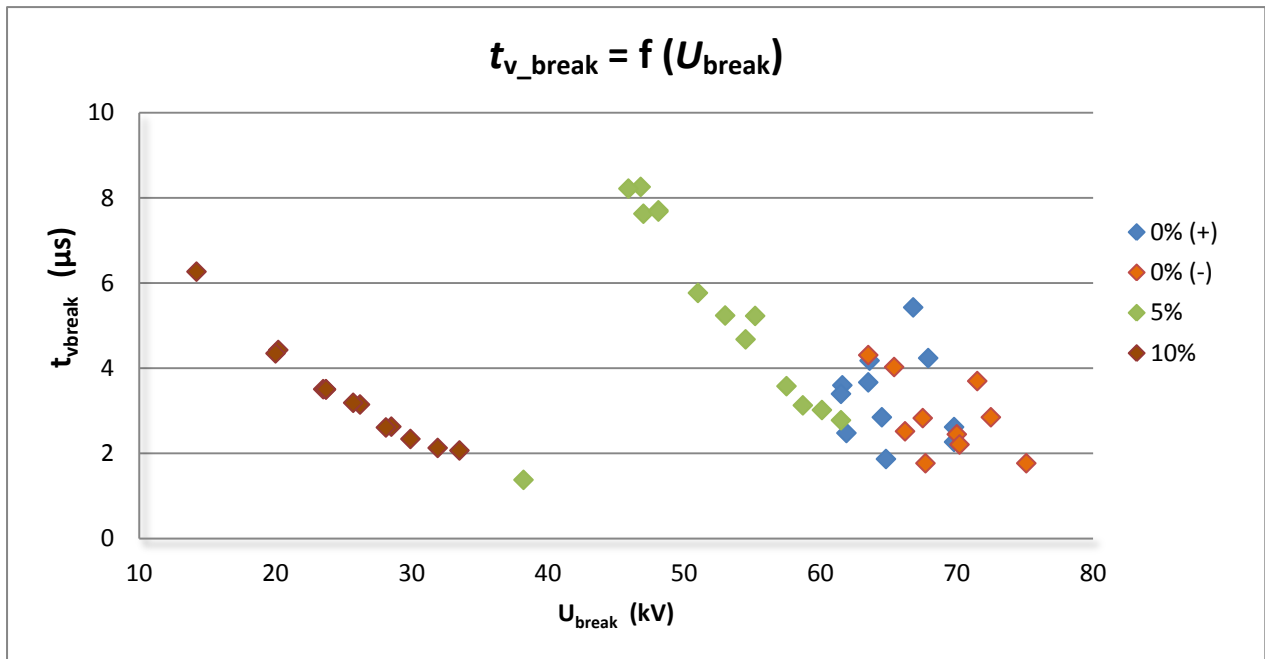


**Γράφημα 4.16** Κρίσιμη πεδιακή ένταση και αβεβαιότητα για κάθε επίπεδο ποσοστού υγρασίας των δυο εδαφικών δειγμάτων.

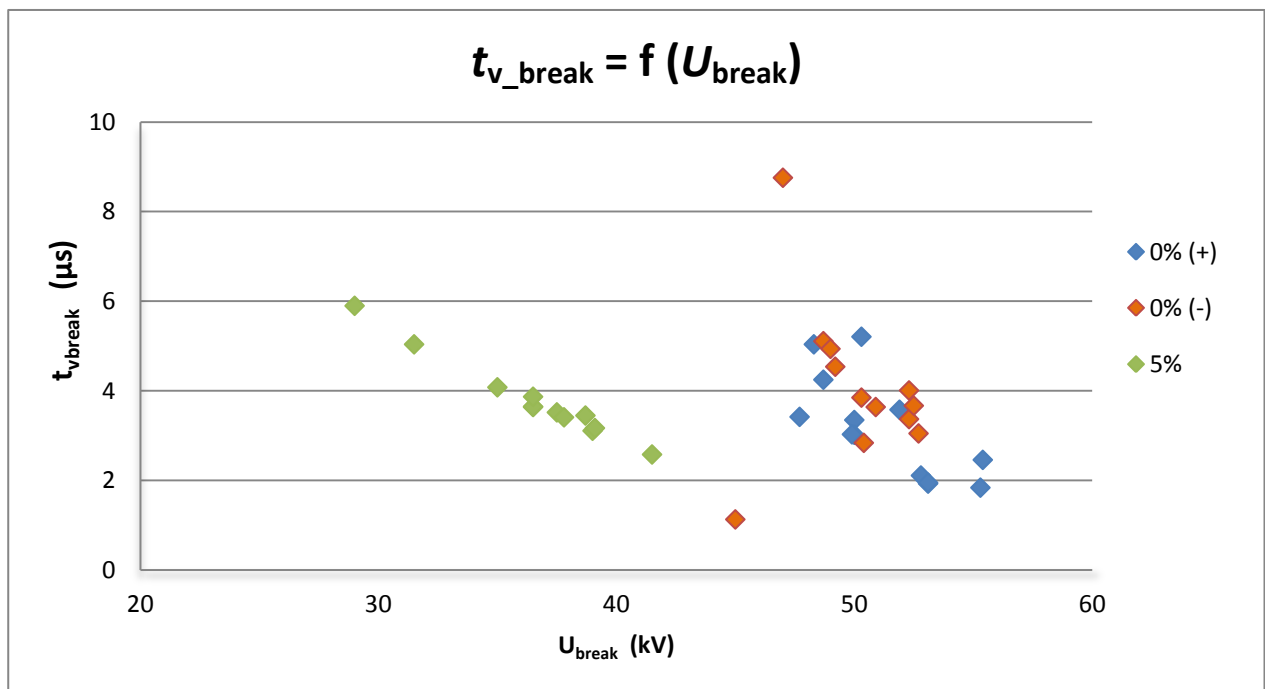
Ένα πρώτο συμπέρασμα από το γράφημα είναι ότι η κρίσιμη πεδιακή ένταση τείνει να μειωθεί με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας κάτι που οφείλεται στην αύξηση της αγωγιμότητας. Η γενίκευση αυτή όμως δεν είναι απόλυτη, κάτι που φαίνεται έστω και ελάχιστα στο χώμα Δ' για ποσοστό υγρασίας 5%. Έχει παρατηρηθεί από τη Nor [1] αλλά και από τους Lima – Vesacro [2] ότι χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για την εξάτμιση του νερού εντός των διακένων του δείγματος, άρα και η πεδιακή ένταση θα αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας. Συνεπώς, ένα γενικό συμπέρασμα για την επίδραση της υγρασίας πρέπει να γίνεται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη και άλλους παράγοντες όπως η σύσταση του εδάφους.

### 4.3.2. Χρόνος διάσπασης – Τάση διάσπασης

Ο χρόνος διάσπασης συναρτήσει της τάσης διάσπασης είναι ακόμα ένα γράφημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον και μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες γραφικές για τα δοκίμια Β' και Δ', σε όλα τα επίπεδα υγρασίας για κάθε δοκίμιο.



Γράφημα 4.17 Χρόνος διάσπασης συναρτήσει της τάσης διάσπασης για το δοκίμιο Β'.



Γράφημα 4.18 Χρόνος διάσπασης συναρτήσει της τάσης διάσπασης για το δοκίμιο Δ'.

Όπως θα αναμενόταν, όσο η τάση διάσπασης αυξάνεται, τόσο πιο γρήγορα θα διασπαστεί το δοκίμιο. Αυτή η αντιστρόφως ανάλογη σχέση φαίνεται καθαρά και στα δυο δοκίμια αλλά μόνο όταν στο έδαφος υπάρχει υγρασία. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η λάσπη που δημιουργείται με την προσθήκη νερού, δημιουργεί ένα ομοιόμορφα κατανομημένο μίγμα, στο οποίο η αντίστροφη αναλογία χρόνου τάσης ισχύει σχεδόν γραμμικά. Αντίθετα, το ξηρό έδαφος με περισσότερα και ασταθή διάκενα μεταξύ των κόκκων διασπάτε μη γραμμικά λόγω της σύστασης του.

### 4.3.3. Σχόλια για τις αβεβαιότητες

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.8 με τα συνοπτικά αποτελέσματα, αλλά και τους αναλυτικούς Πίνακες 4.1 – 4.7 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η τάση διάσπασης  $U_{50\%}$  παρουσιάζει επαναληψιμότητα καθώς οι τιμές αβεβαιότητας είναι μικρότερες από 5%, με μεγαλύτερη τιμή 4,72% για το Δοκίμιο Β', σε ξηρό έδαφος υπό αρνητική πολικότητα.
- Οι αβεβαιότητες για τα διάφορα επίπεδα τάσης, τόσο για τη χρονική στιγμή της διάσπασης  $t_{break}$  όσο και για τη τάση τη στιγμή της διάσπασης  $U_{break}$  παρουσιάζουν πολύ ψηλές τιμές. Πιο συγκεκριμένα για το Δοκίμιο Δ', με περιεκτικότητα 5% σε υγρασία υπό θετική πολικότητα εμφανίζεται αβεβαιότητα χρόνου τη στιγμή της διάσπασης 719%. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται κυρίως στη φύση του φαινομένου που παρουσιάζει έντονη στοχαστικότητα. Επίσης ο συντελεστής t student είναι πολύ μεγάλος για μικρό πλήθος μετρήσεων όπως τη συγκεκριμένη περίπτωση.

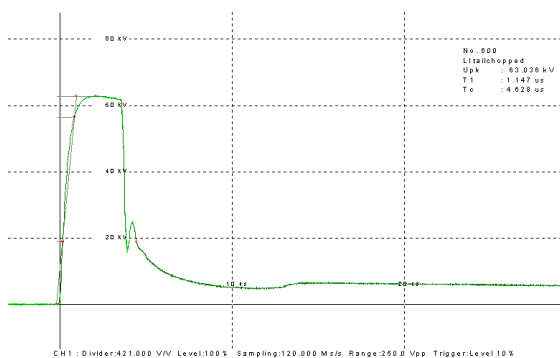
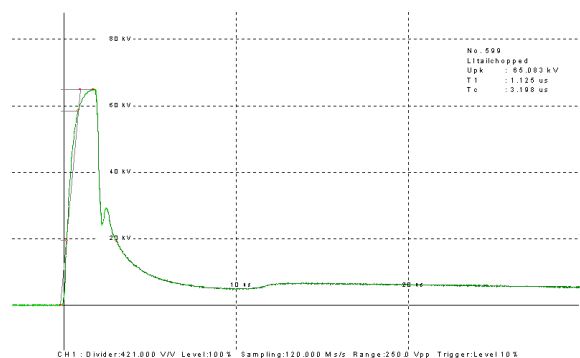
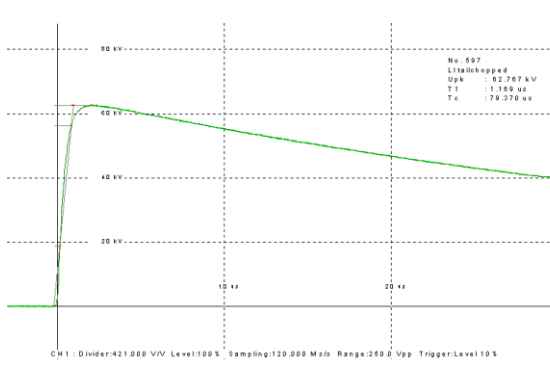
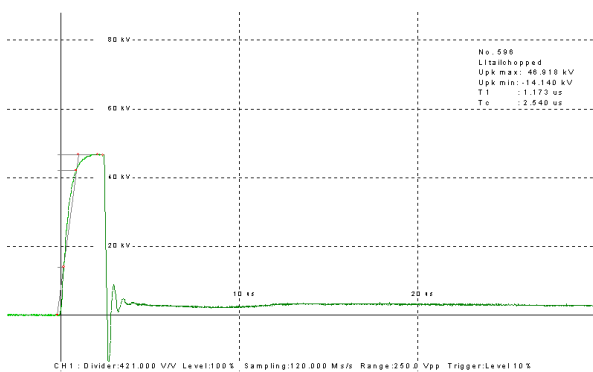
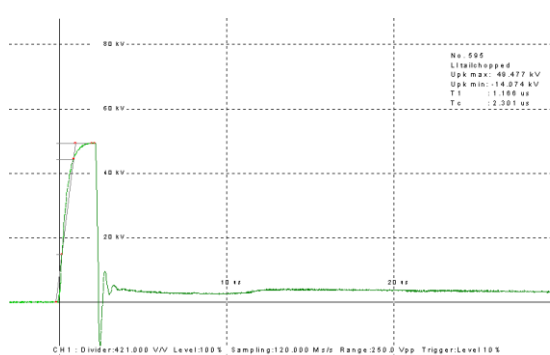
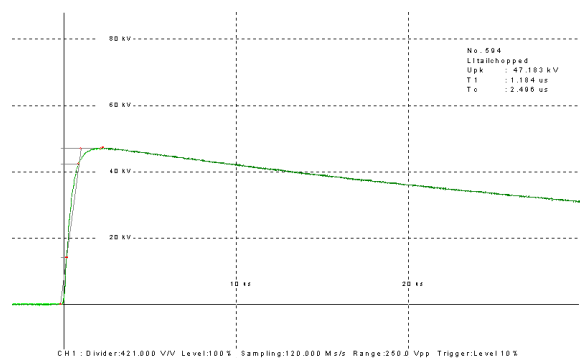
Ακόμα και αν υπεισέρχονται πολλά σφάλματα στην ίδια την αβεβαιότητα, ο προσδιορισμός της θεωρείται αναγκαίος για να εξασφαλίσουμε την αξιοπιστία των μετρήσεων.

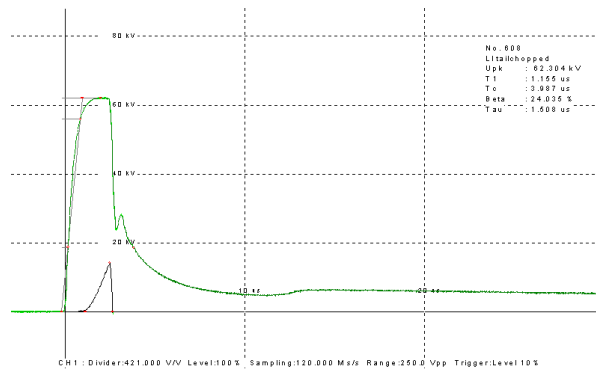
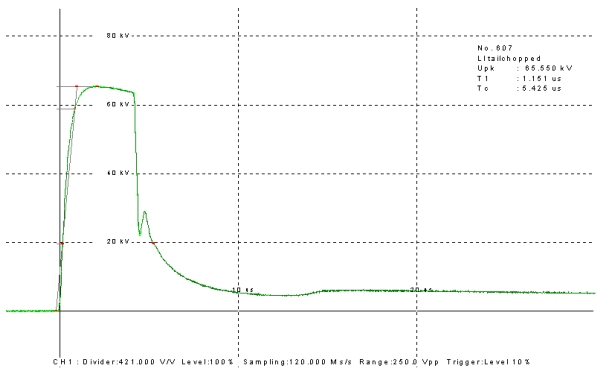
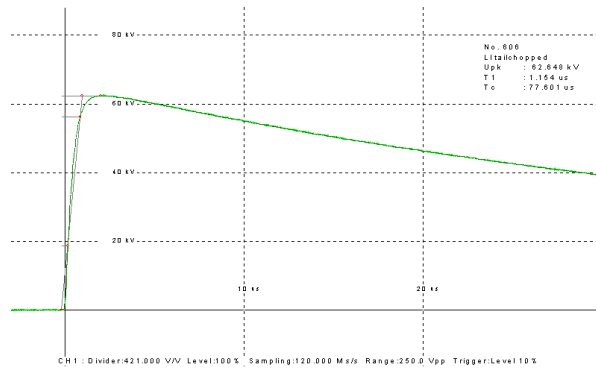
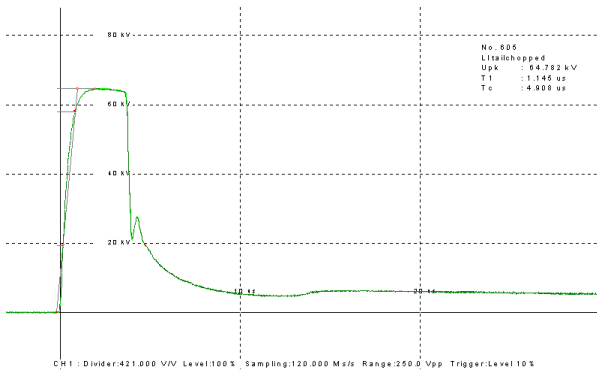
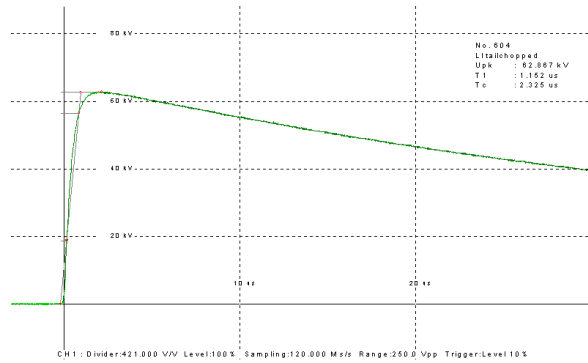
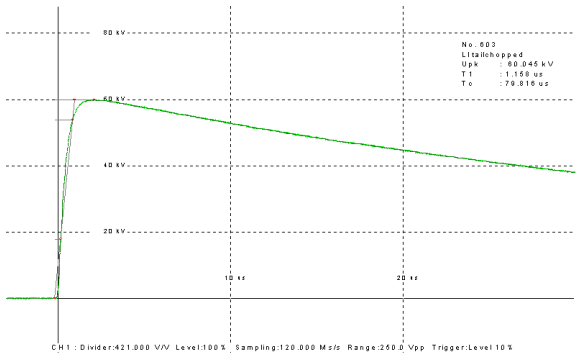
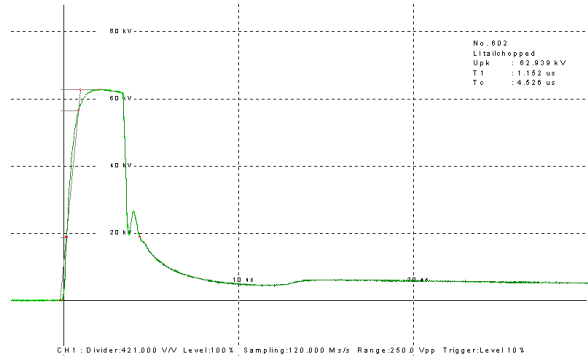
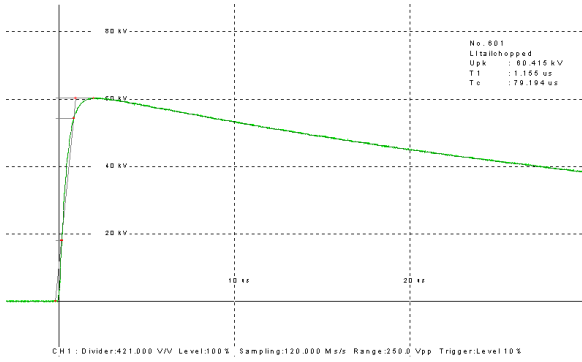


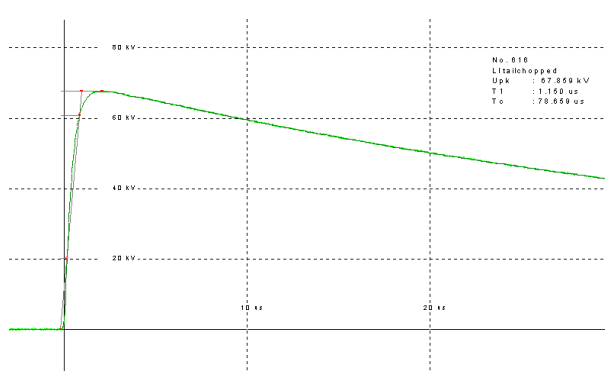
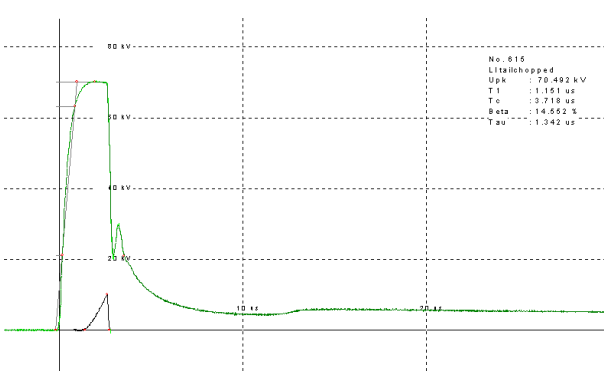
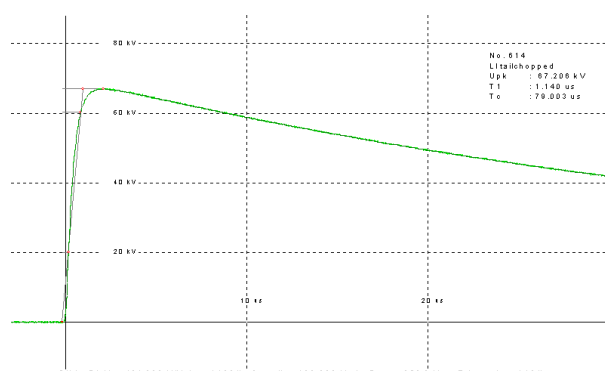
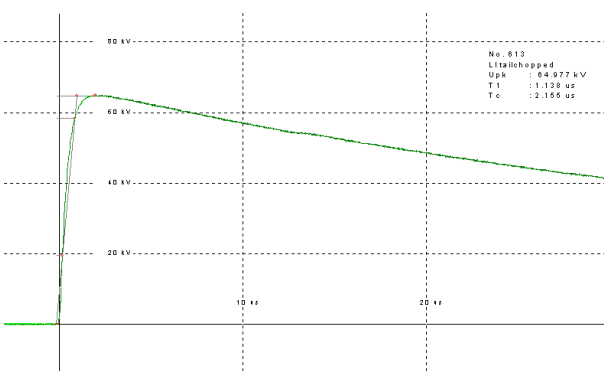
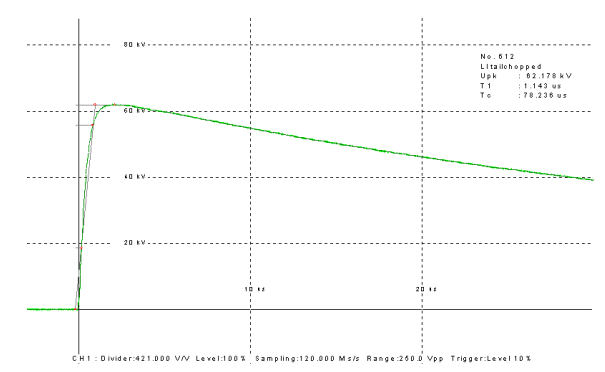
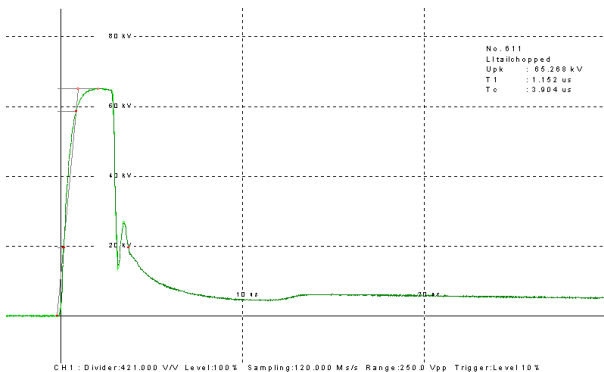
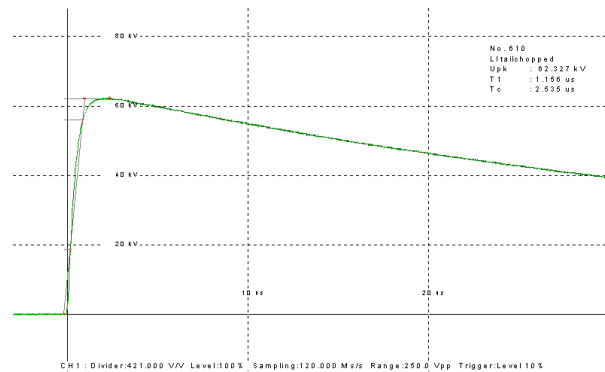
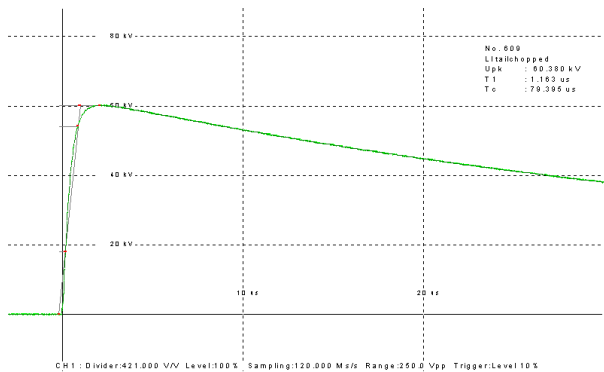


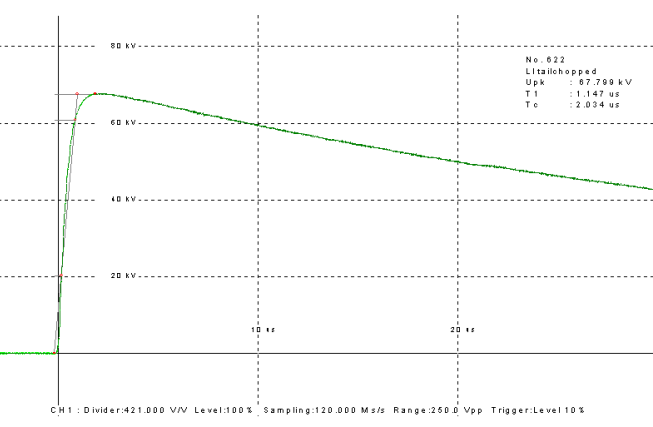
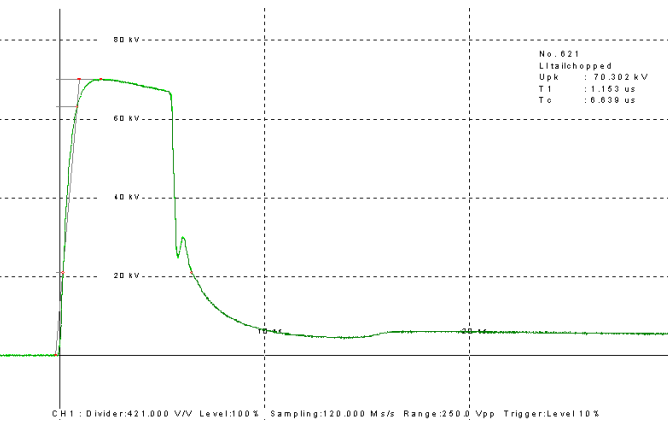
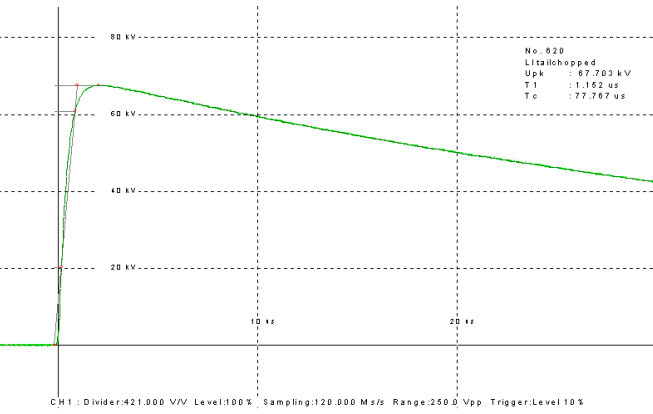
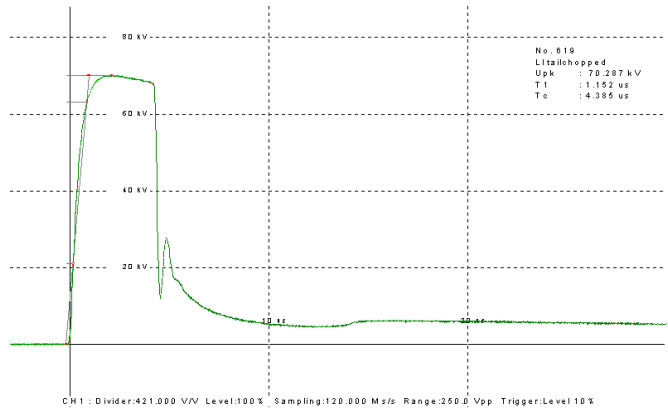
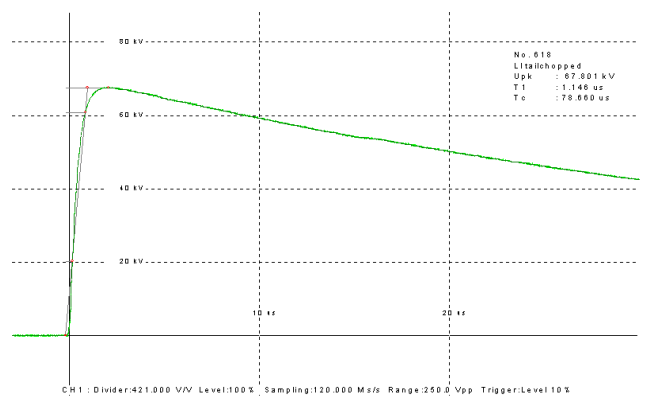
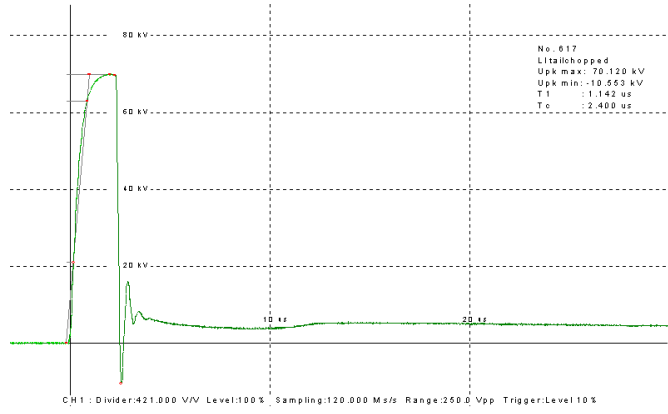
## ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

### Π.1. Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% υγρασία και θετική πολικότητα

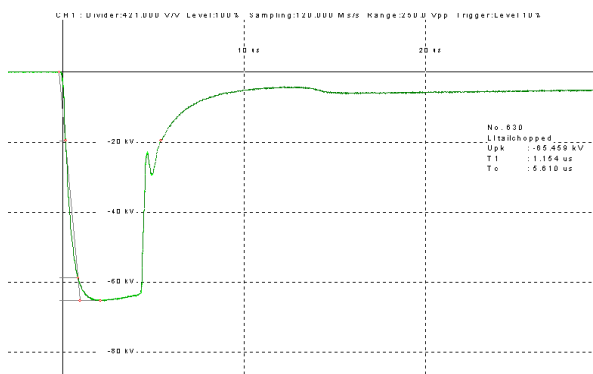
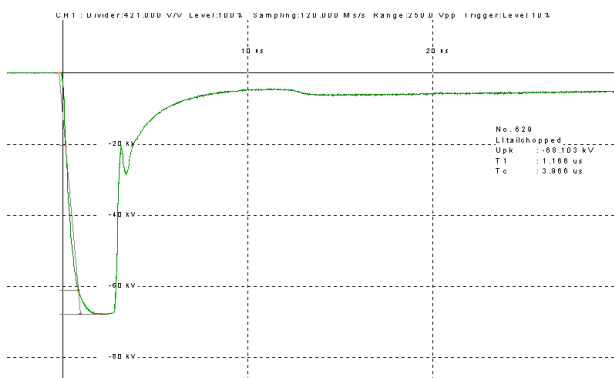
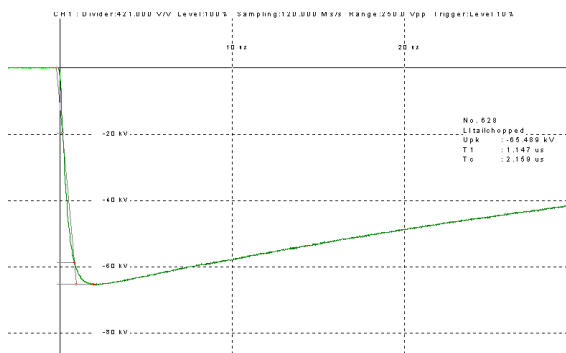
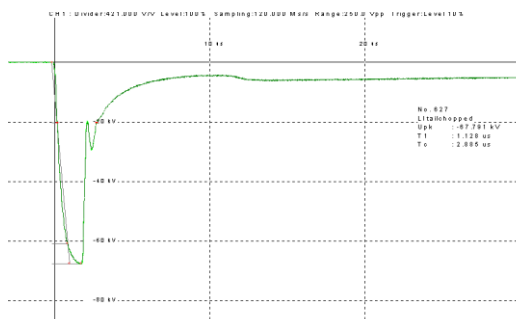
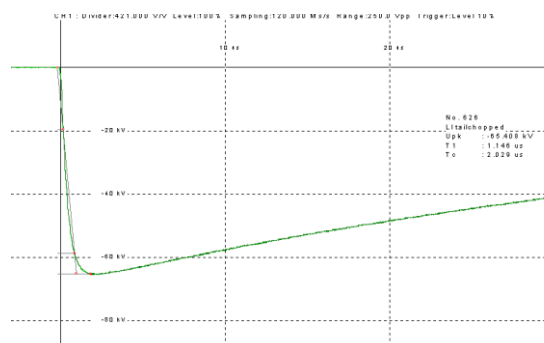
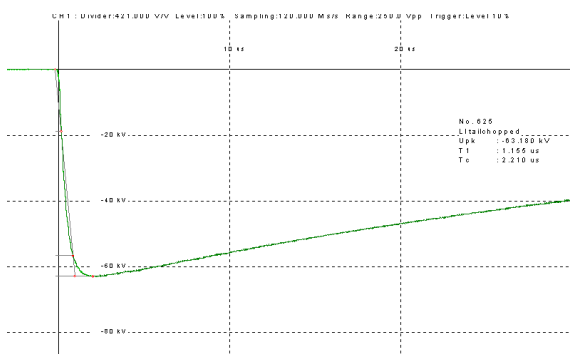
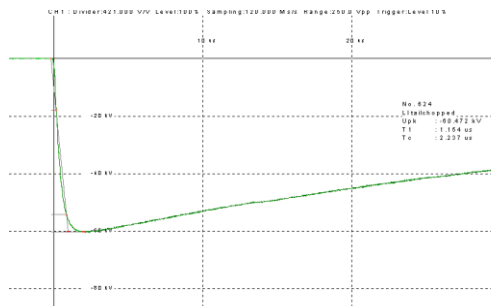
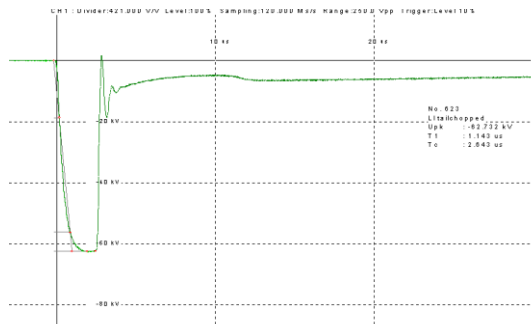


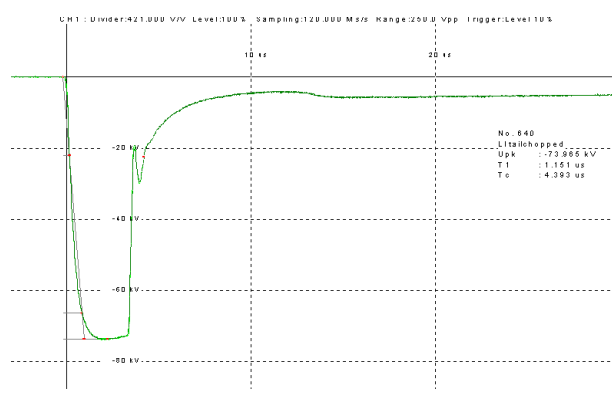
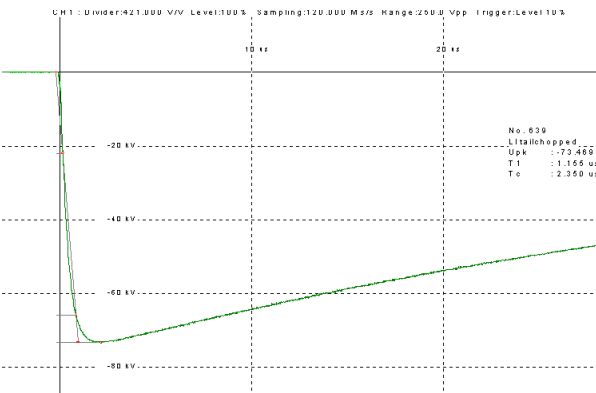
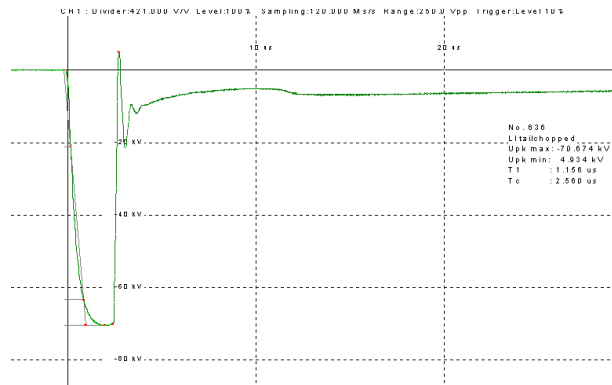
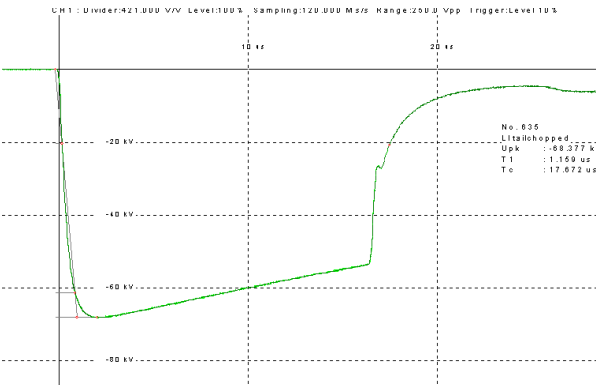
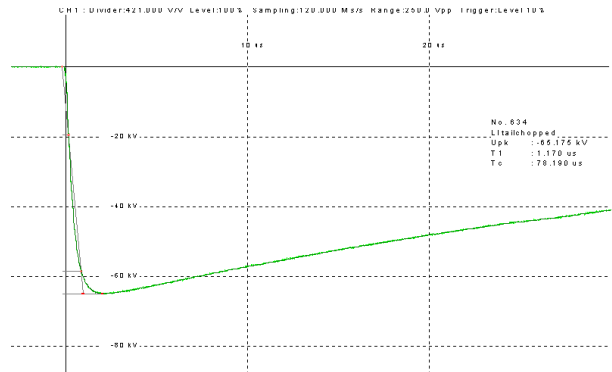
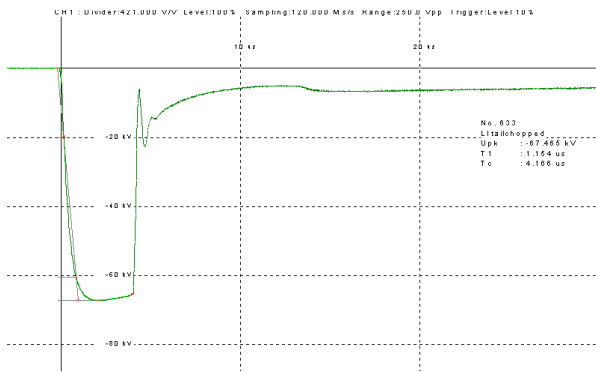
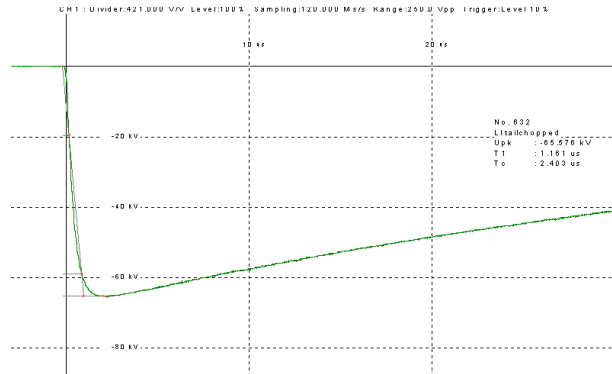
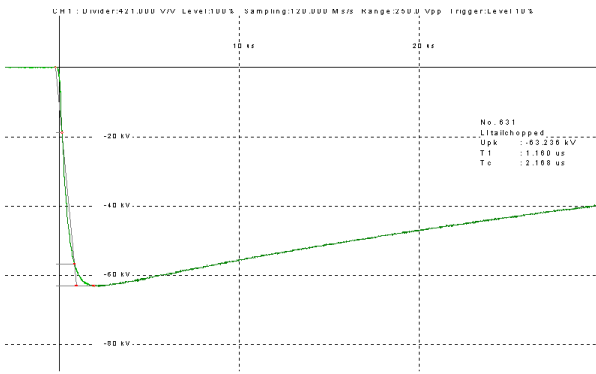


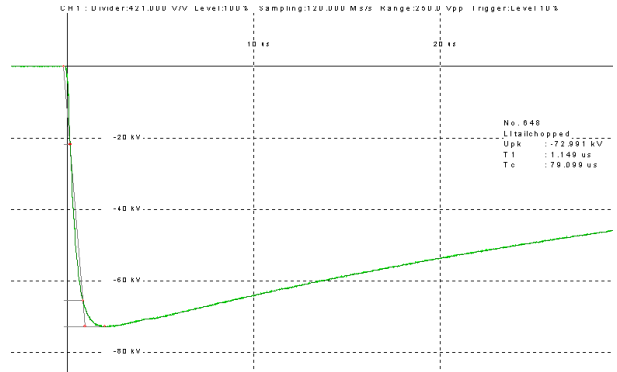
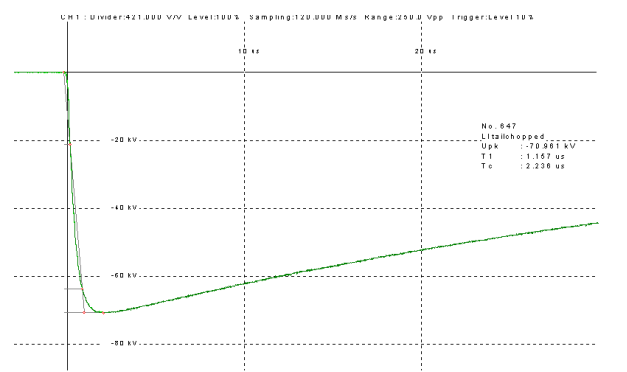
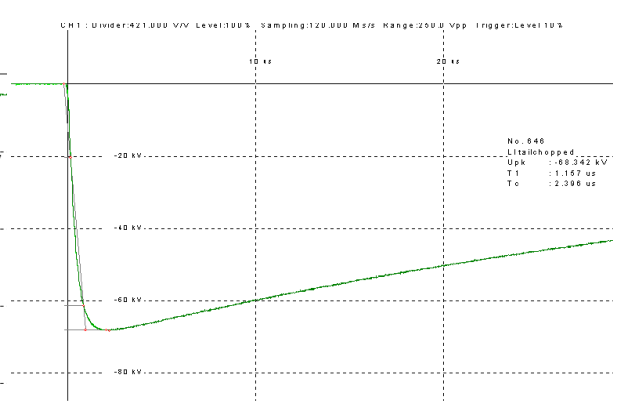
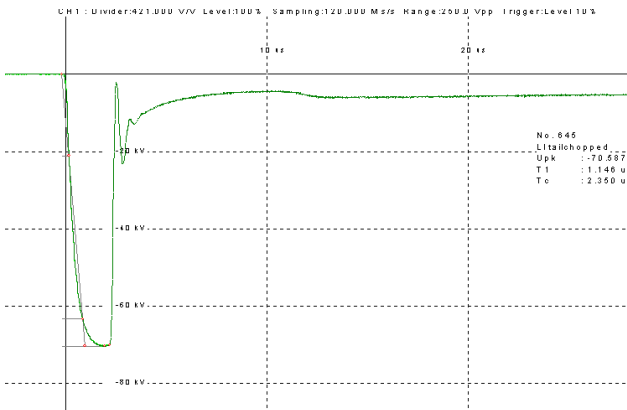
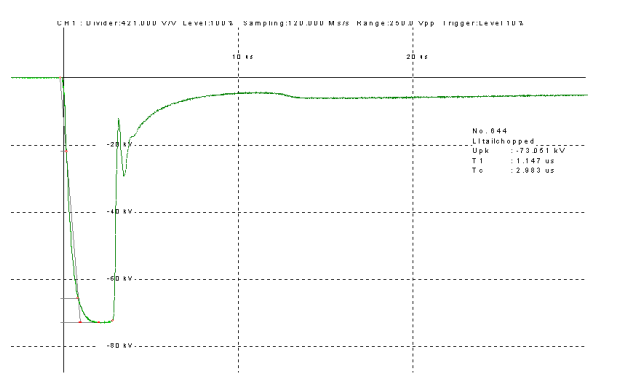
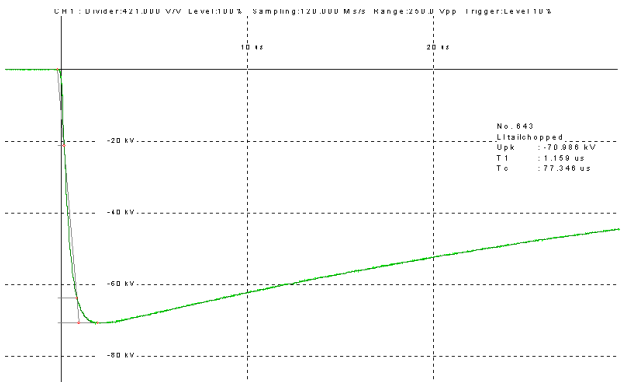
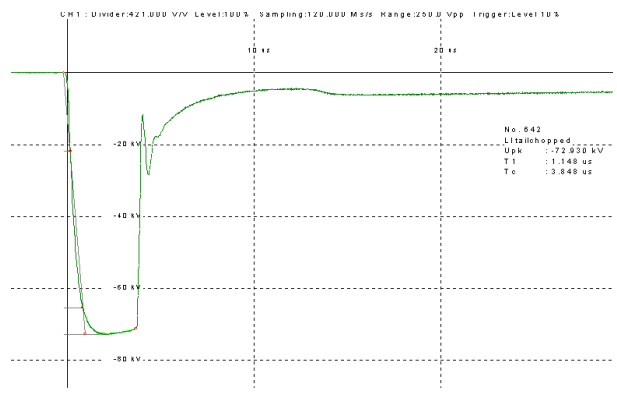
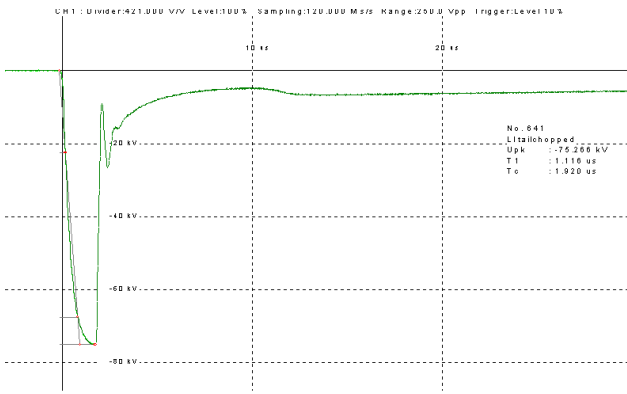




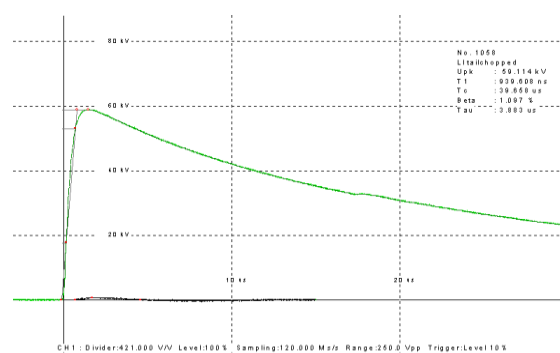
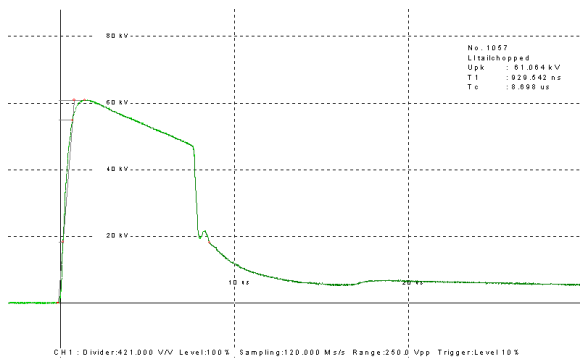
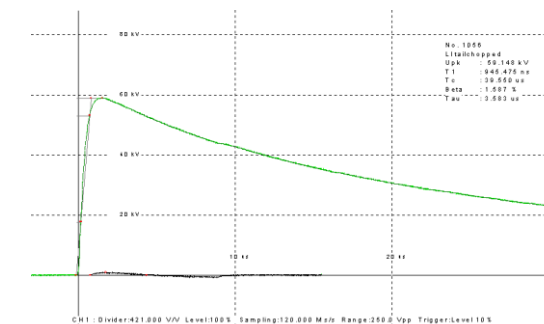
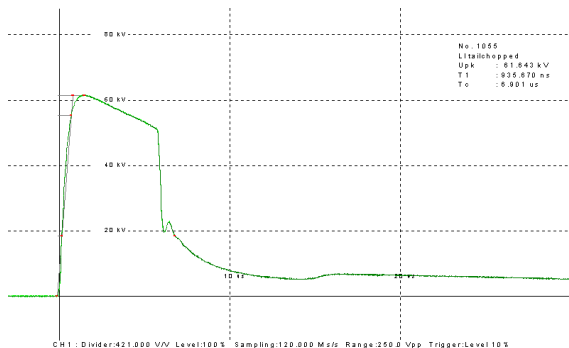
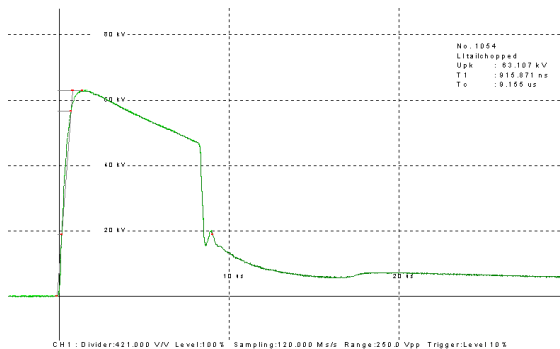
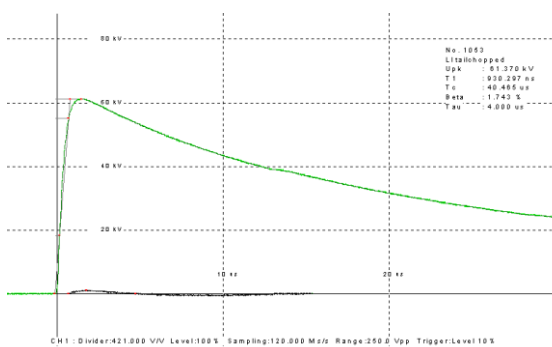
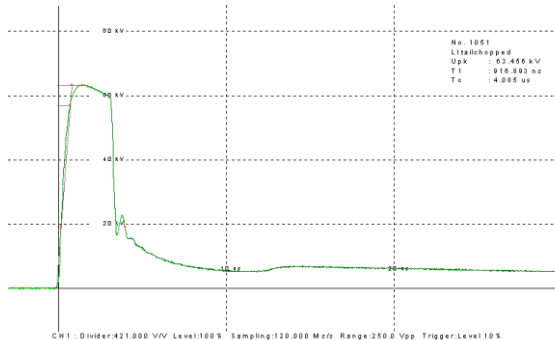
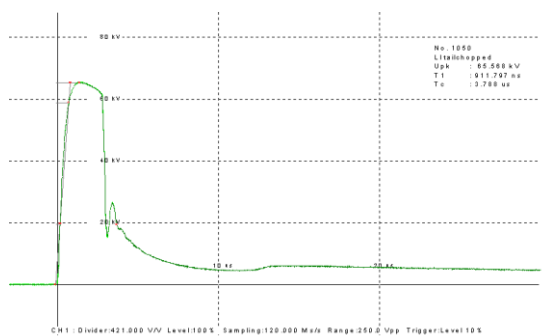
## Π.2. Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 0% υγρασία και αρνητική πολικότητα



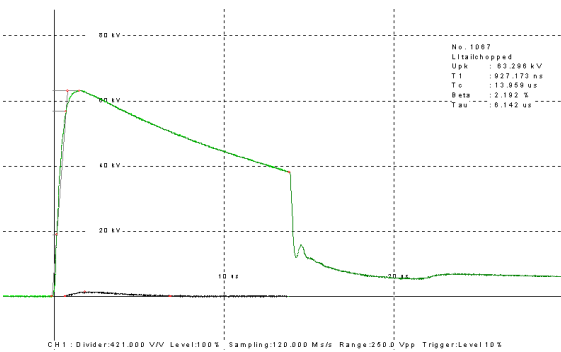
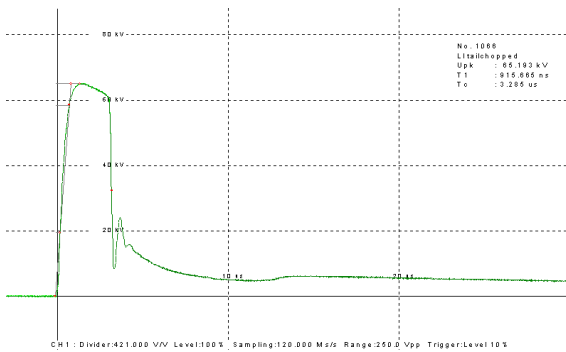
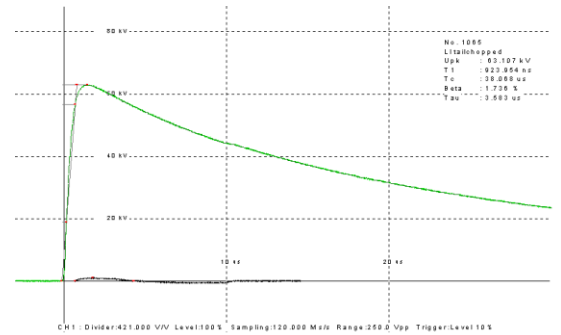
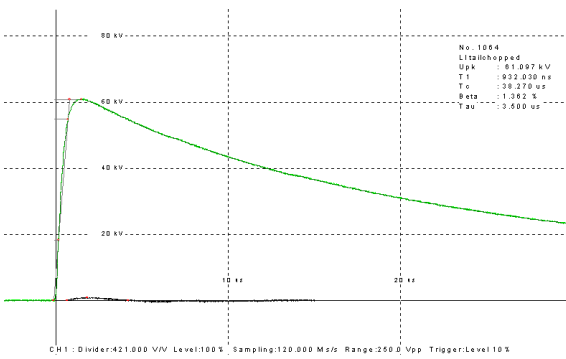
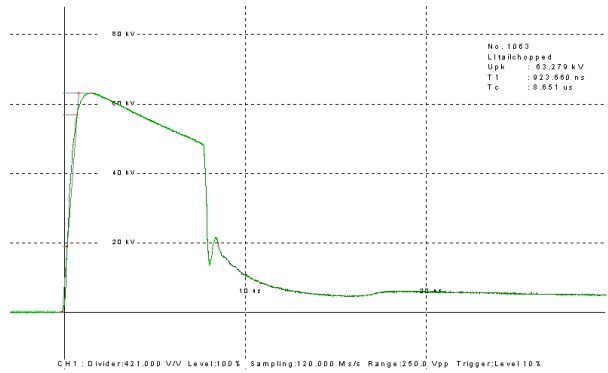
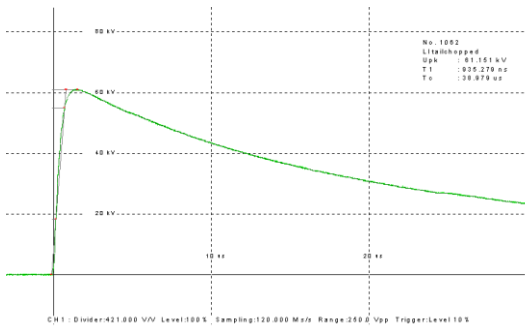
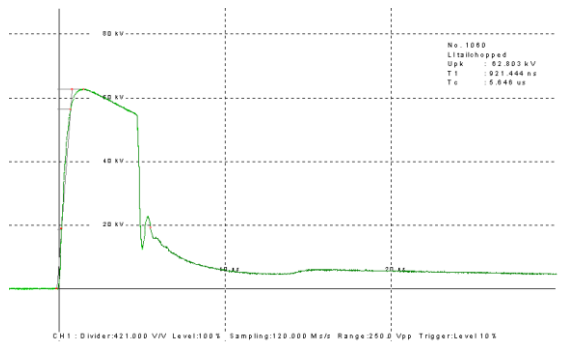
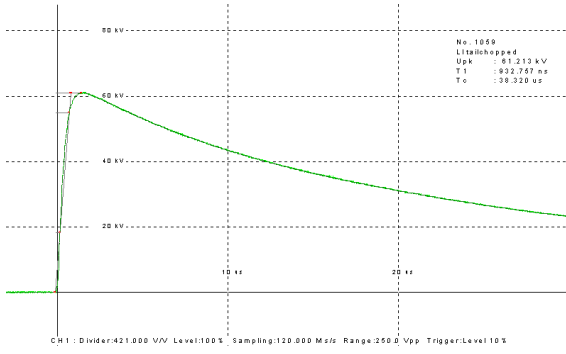


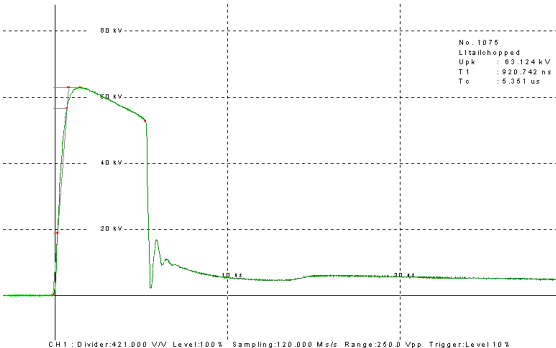
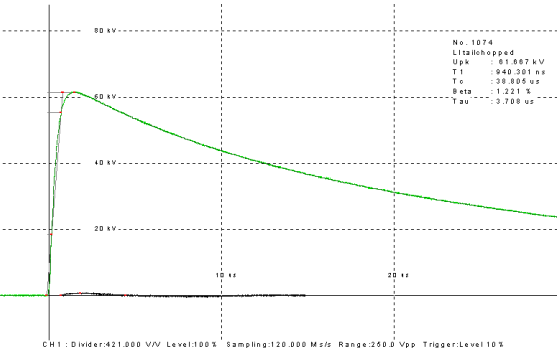
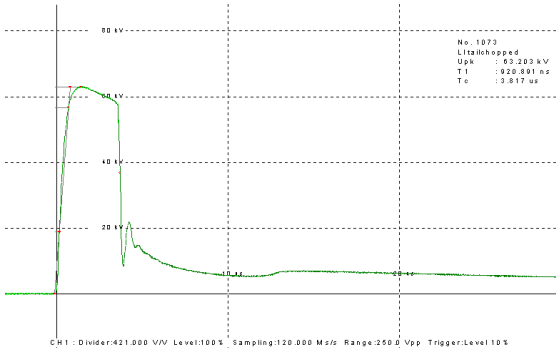
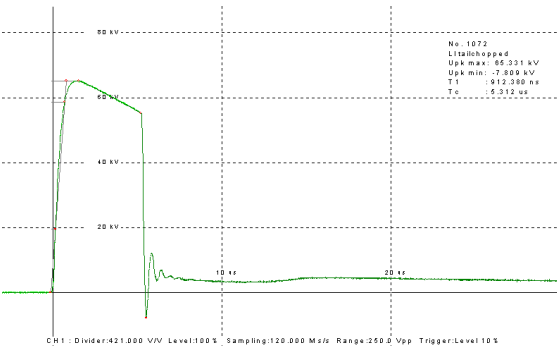
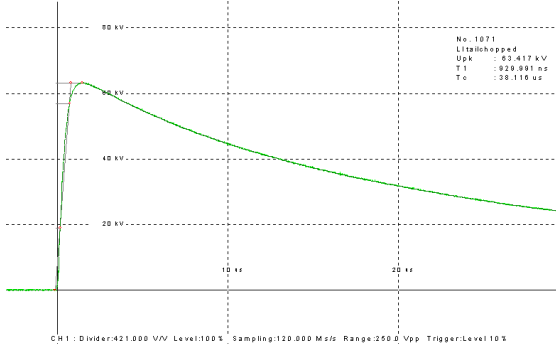
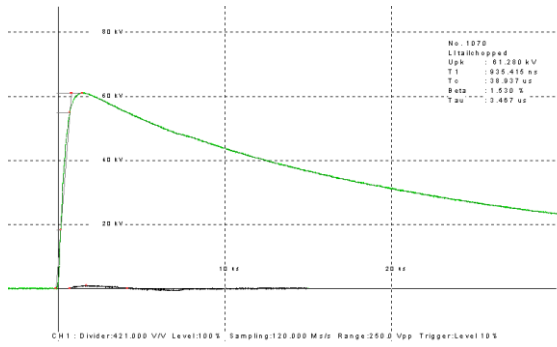
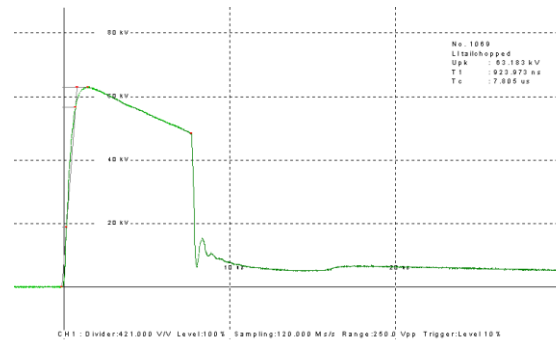
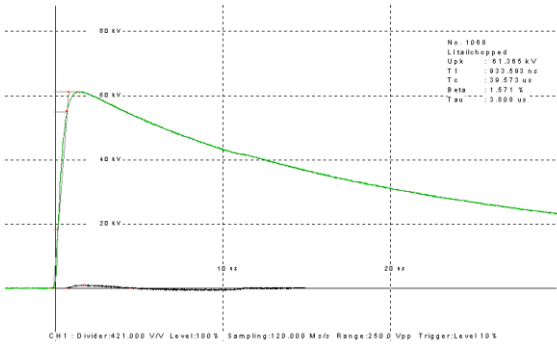


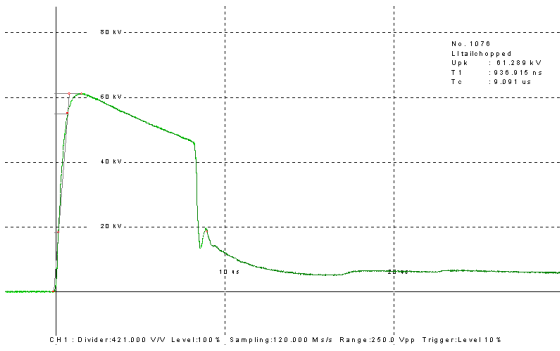
### Π.3. Δοκίμιο Β' με περιεκτικότητα 5% υγρασία και θετική πολικότητα



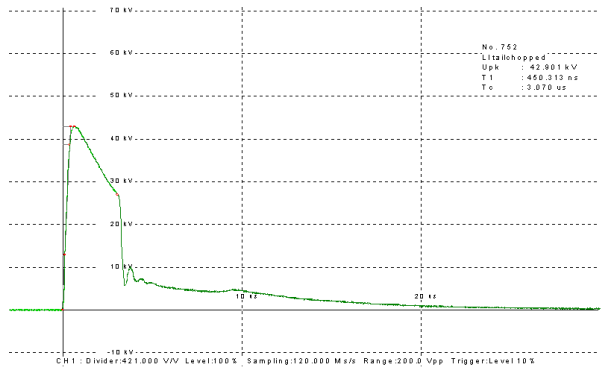
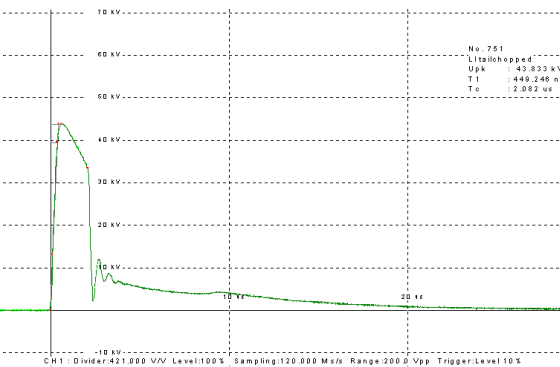
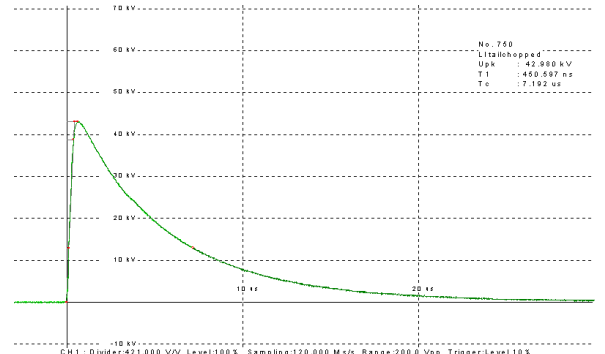
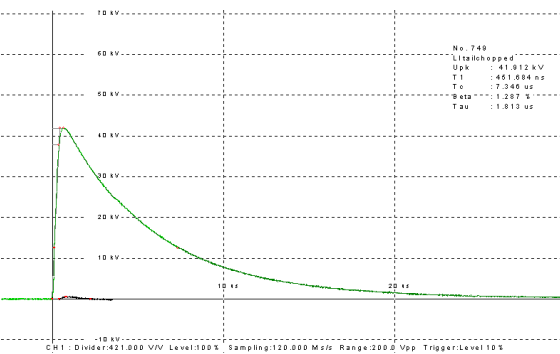
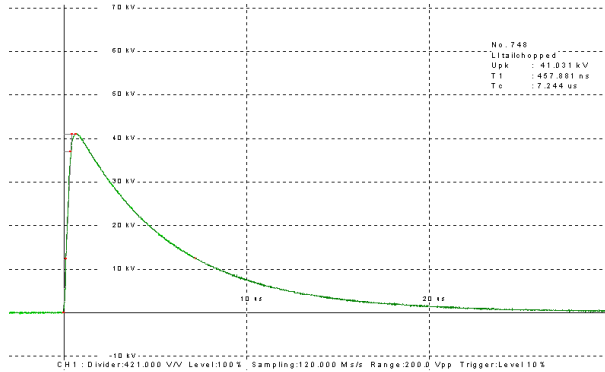
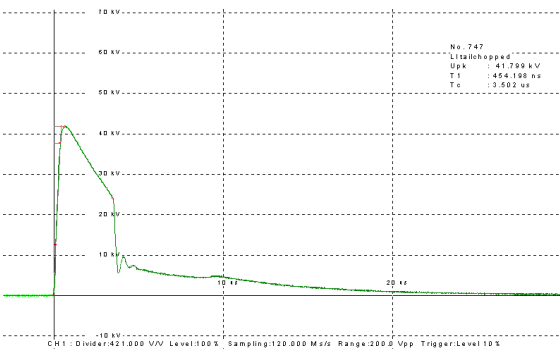


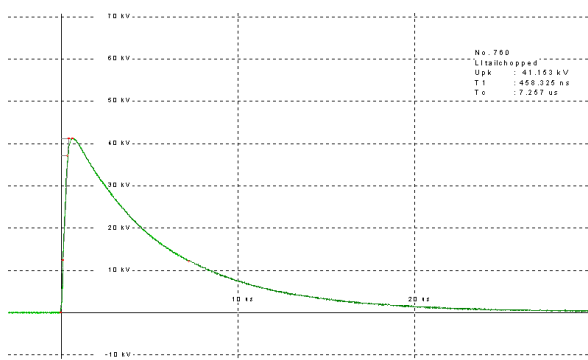
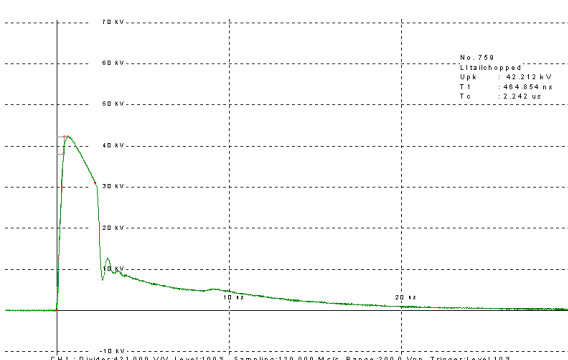
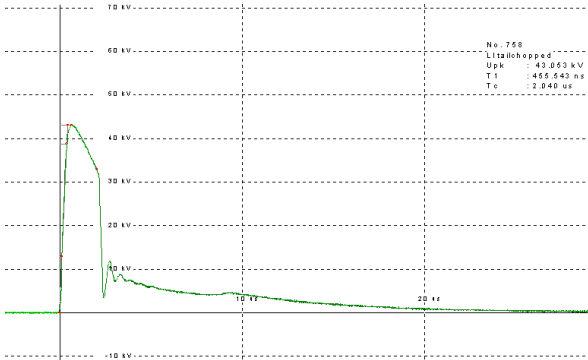
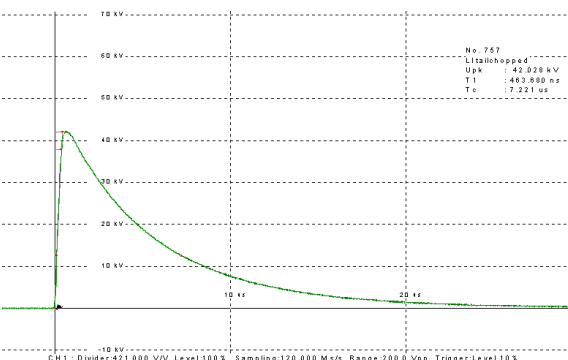
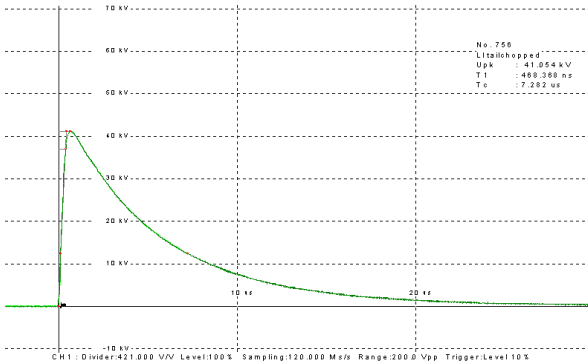
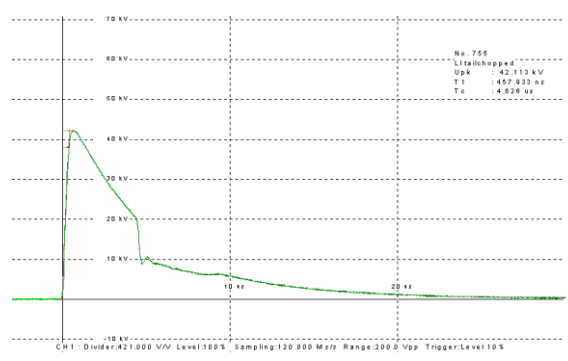
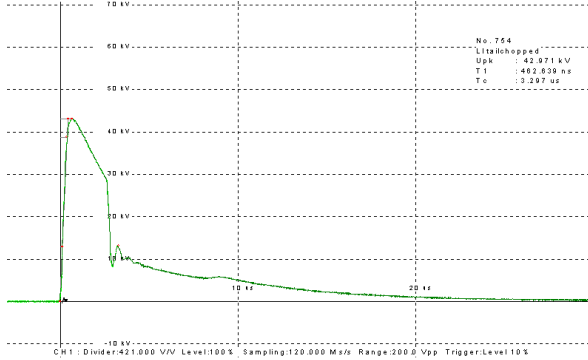
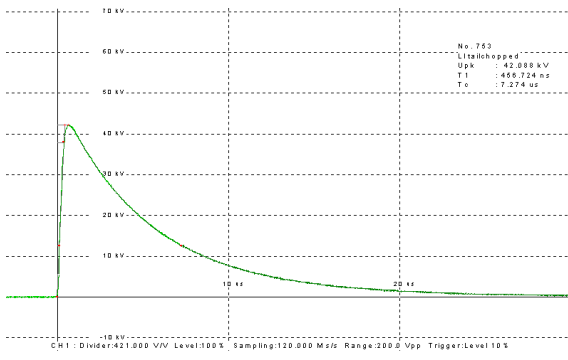


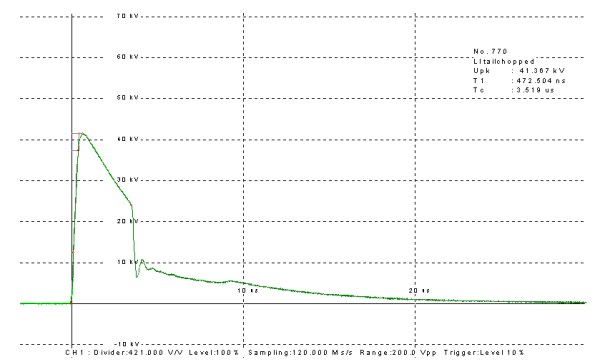
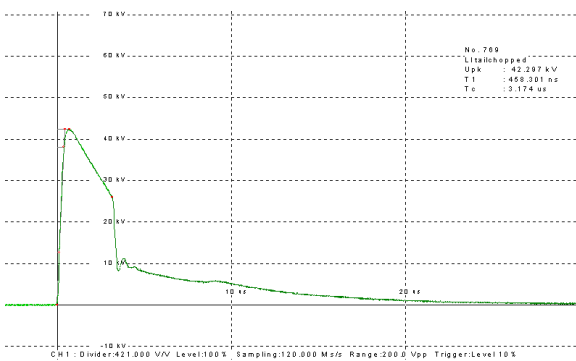
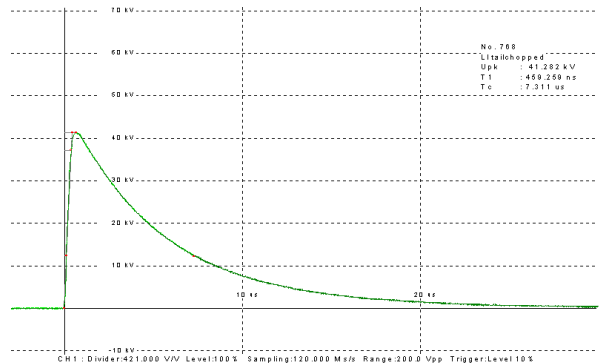
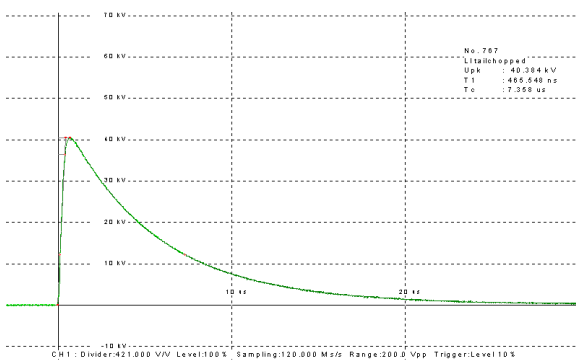
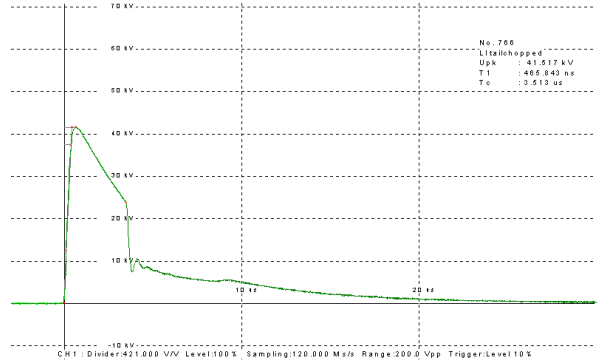
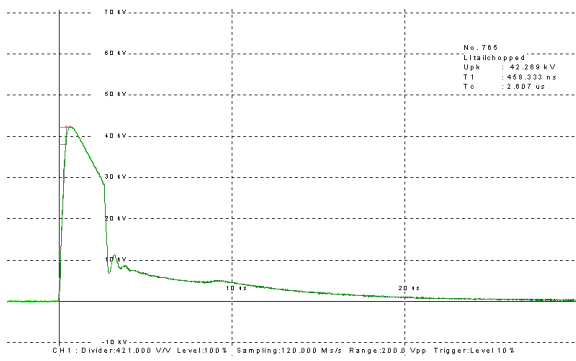
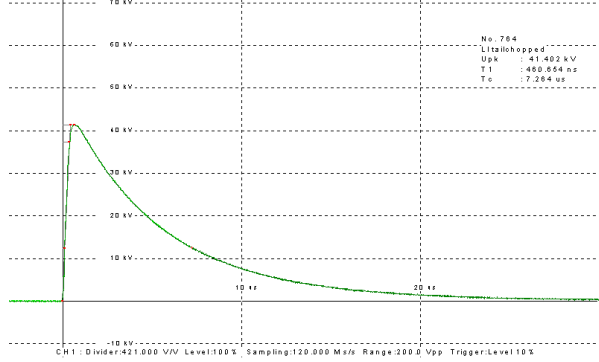
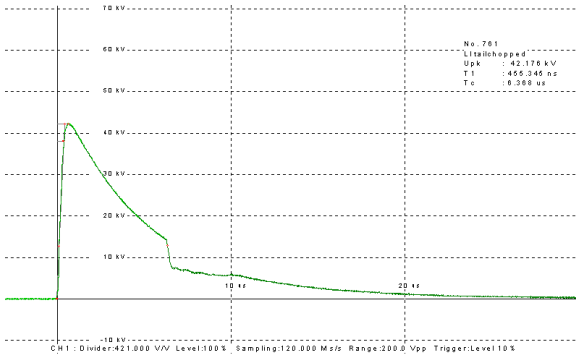


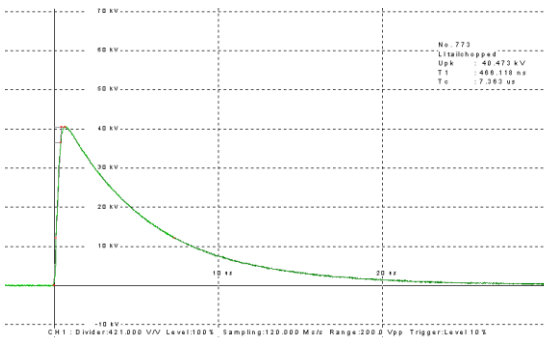
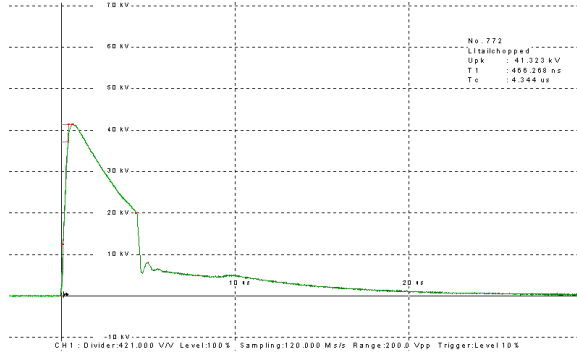
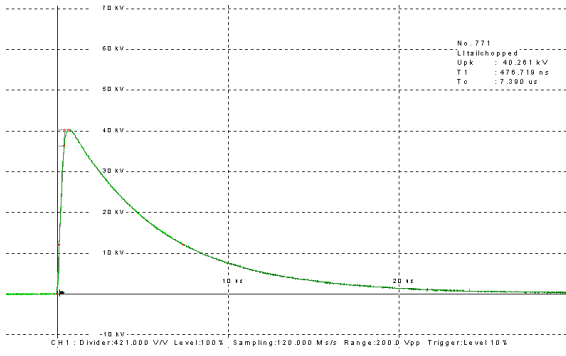


### Π.4. Δοκίμο Β' με περιεκτικότητα 10% υγρασία και θετική πολικότητα

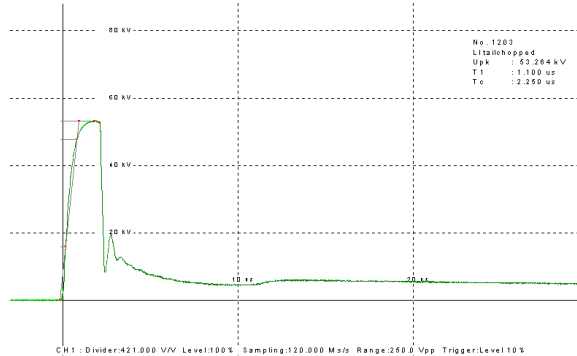
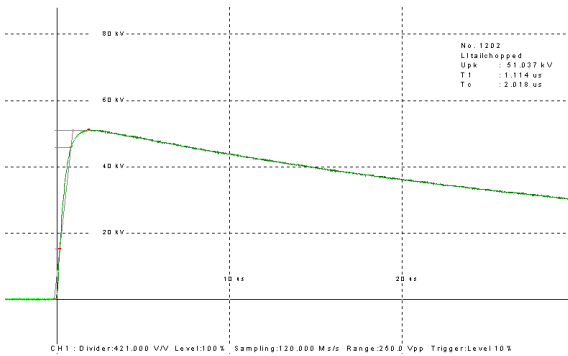
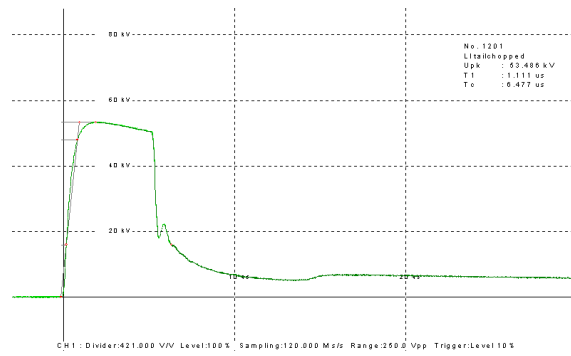
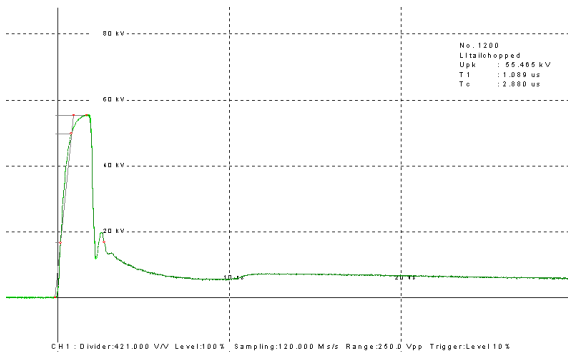


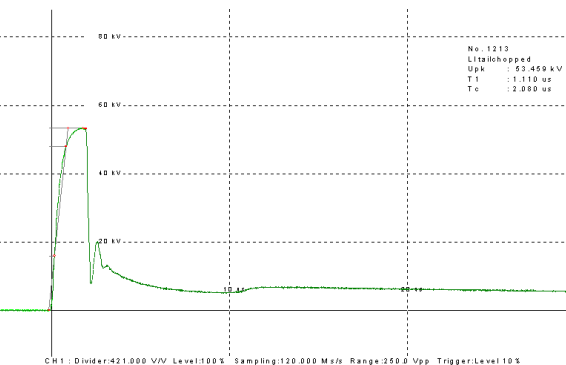
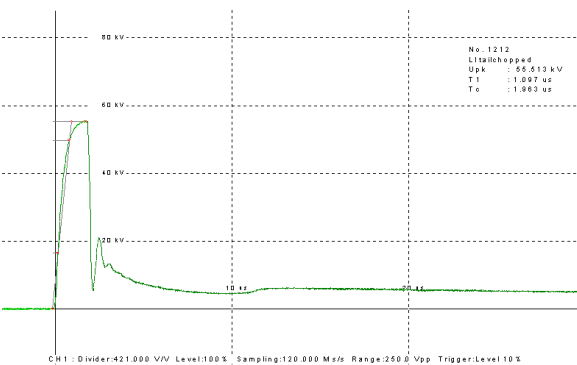
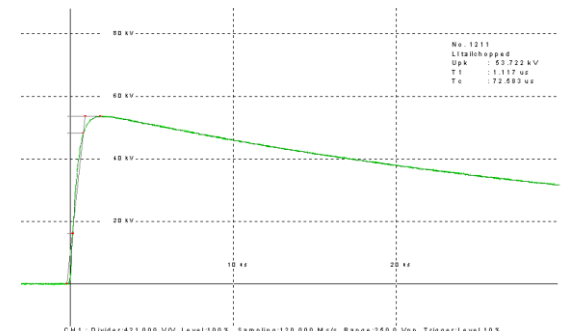
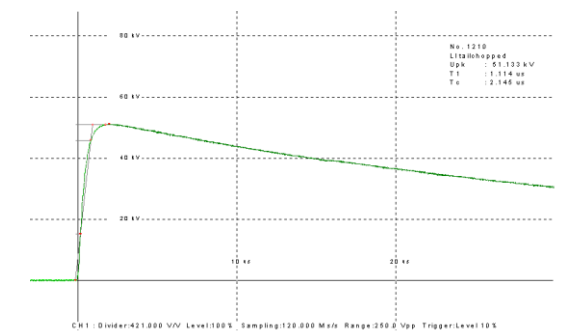
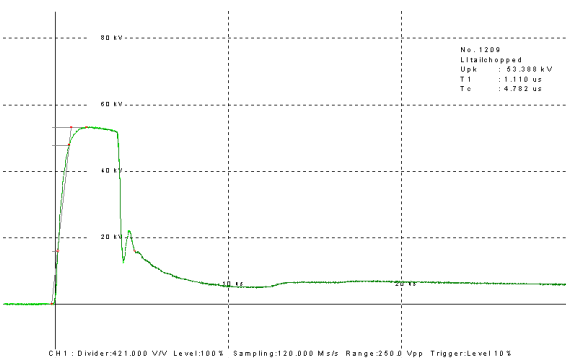
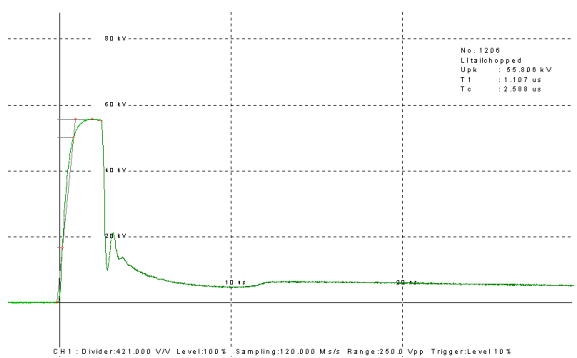
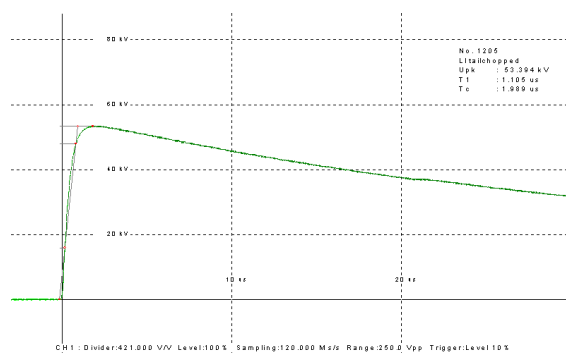
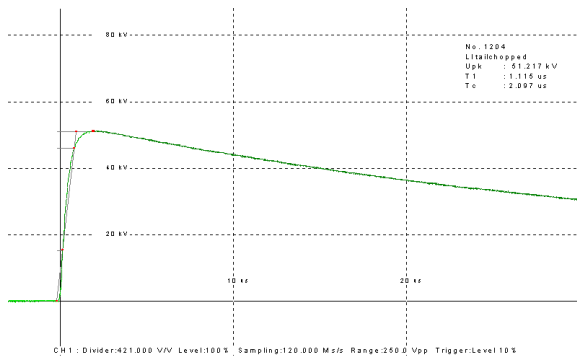


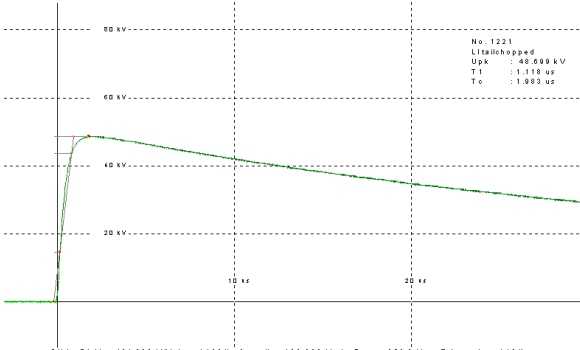
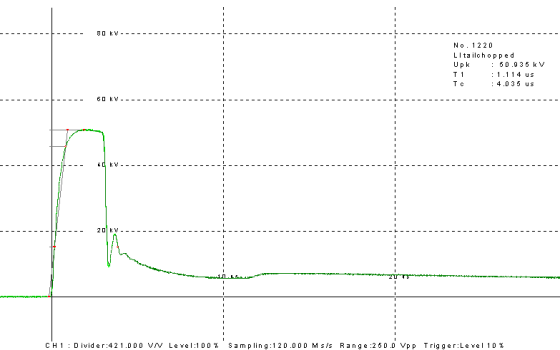
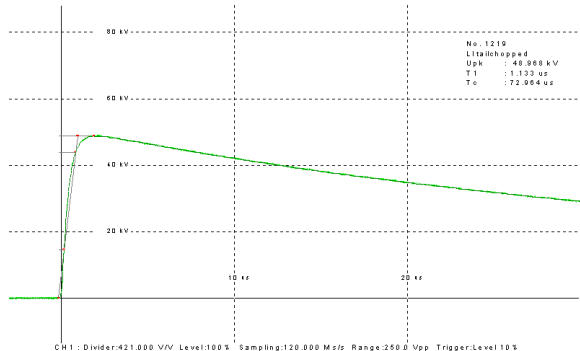
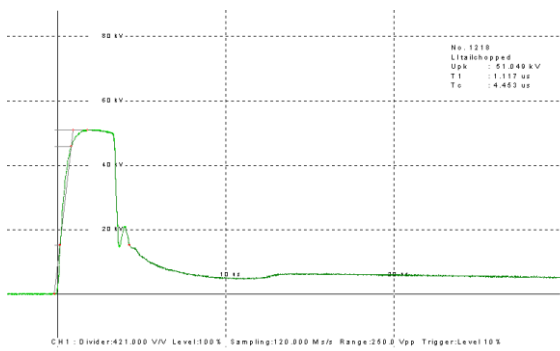
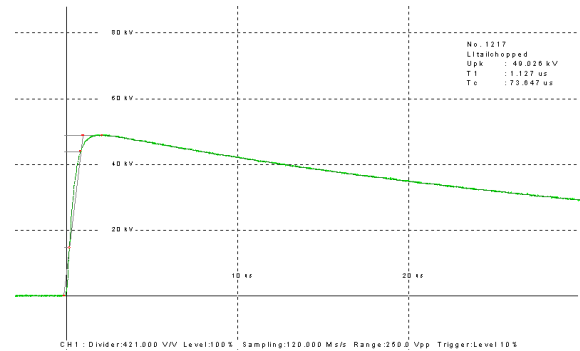
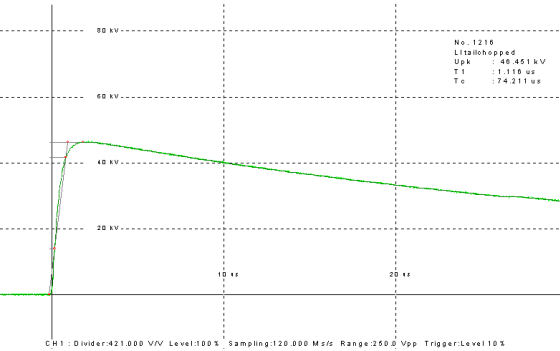
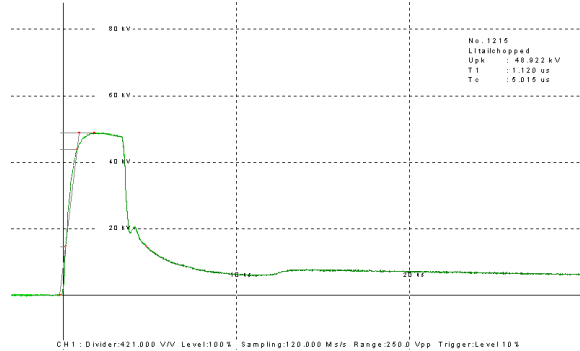
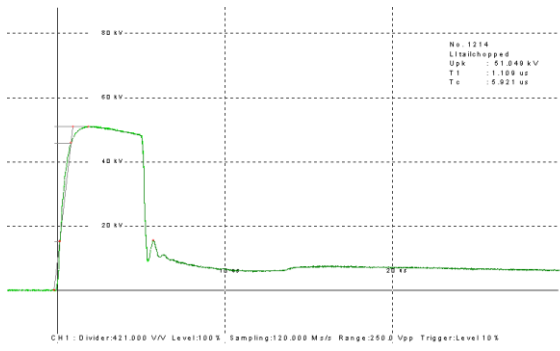




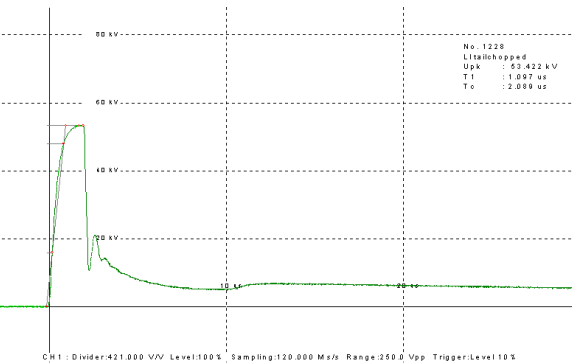
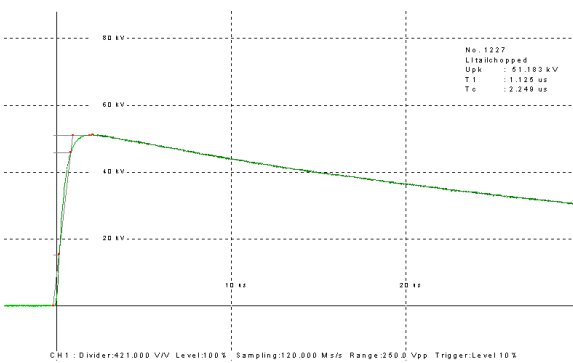
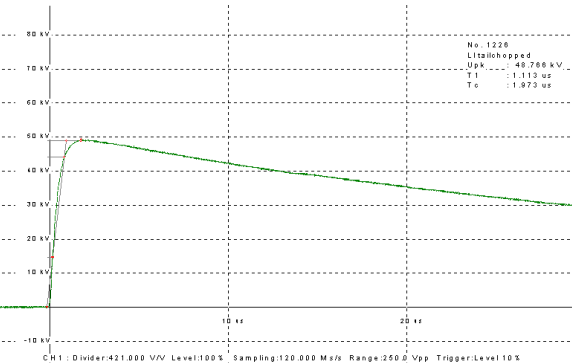
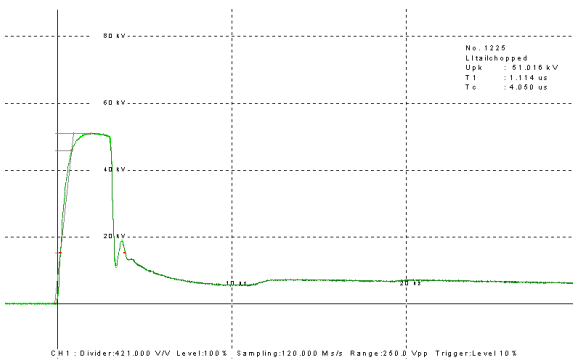
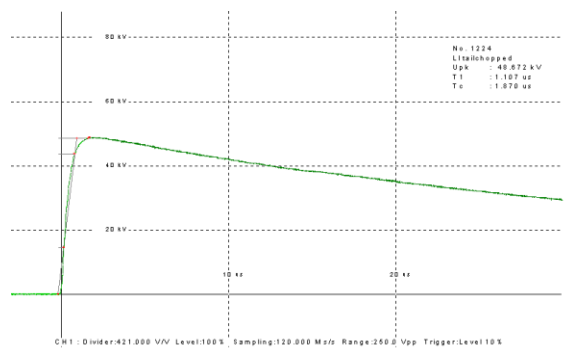
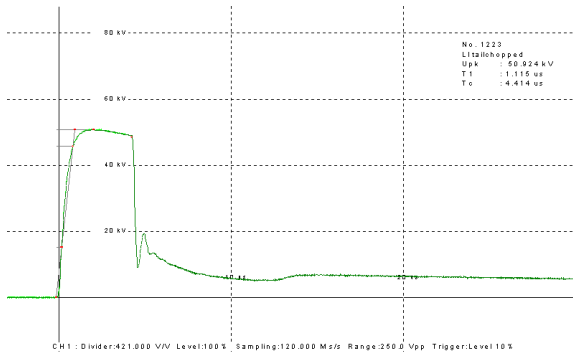
#### Π.4. Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 0% υγρασία και θετική πολικότητα



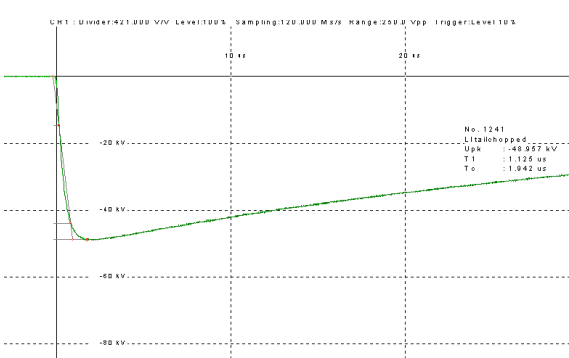
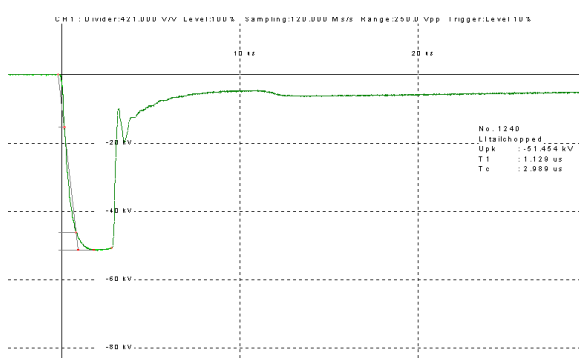
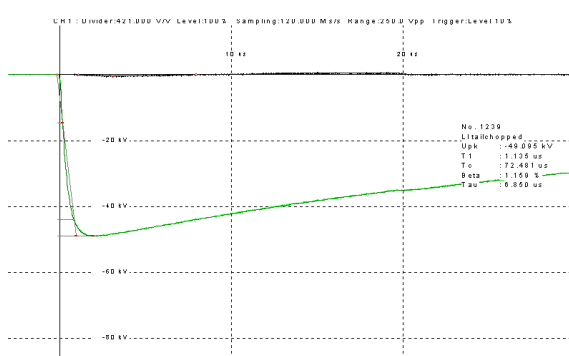
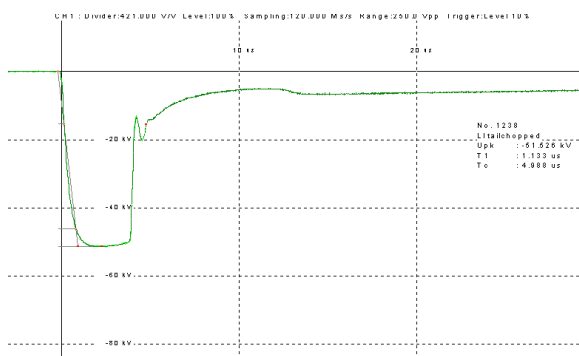
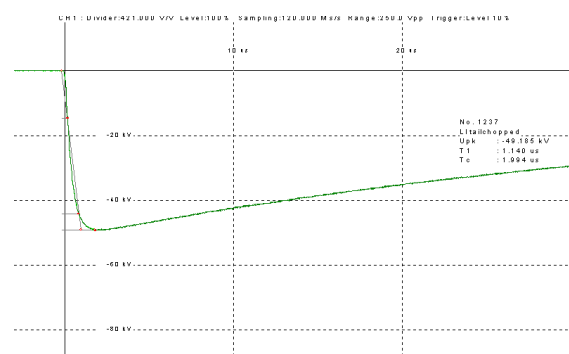
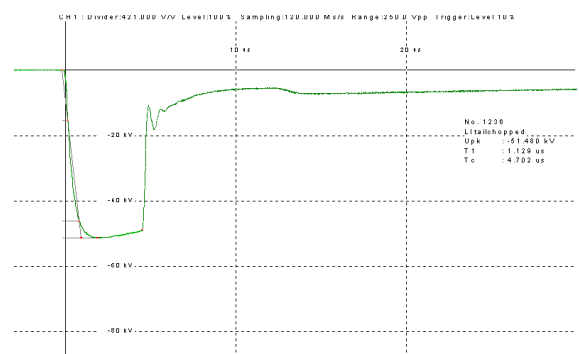
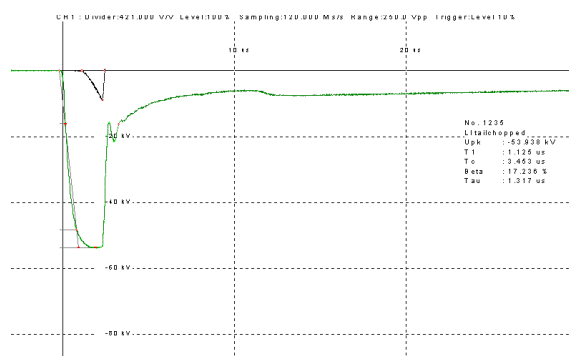
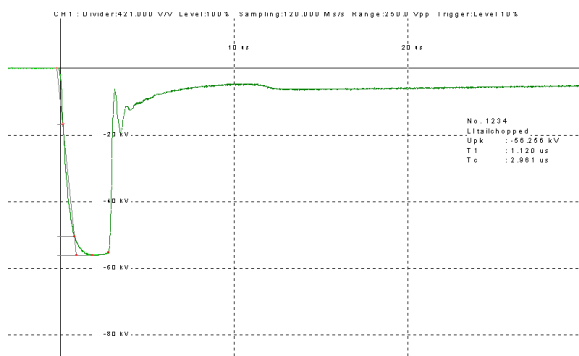


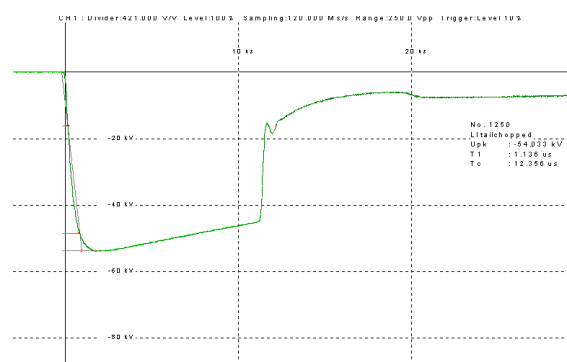
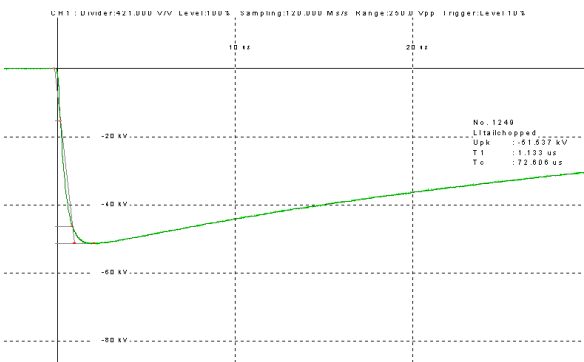
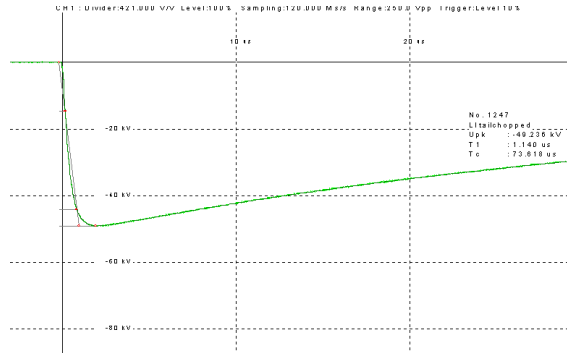
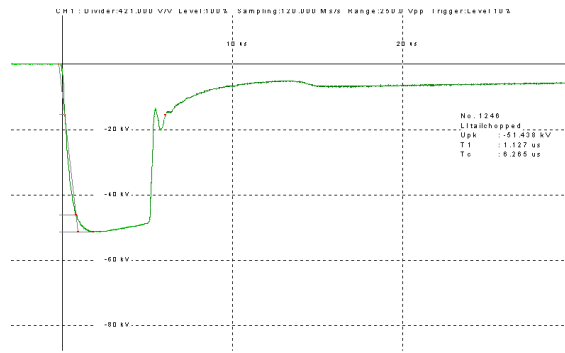
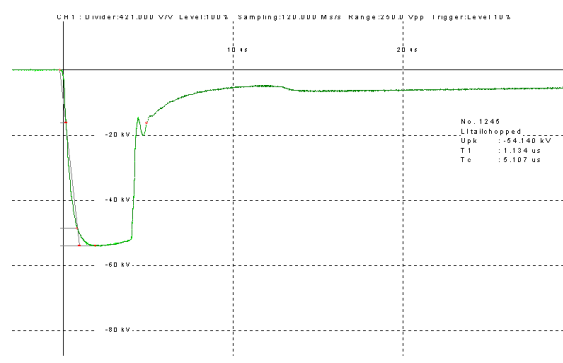
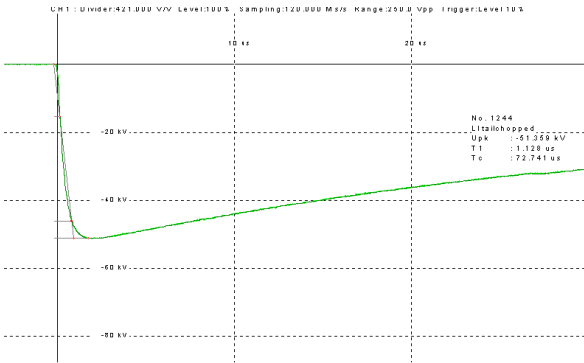
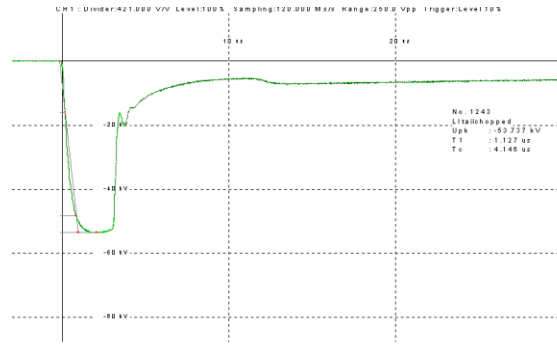
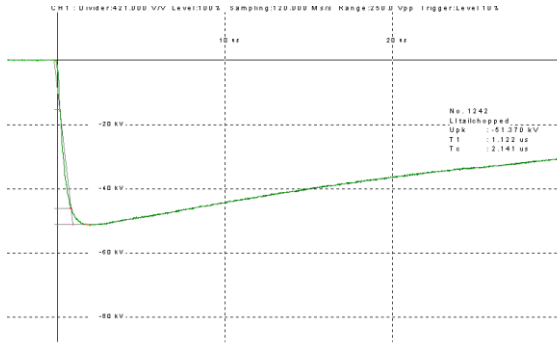


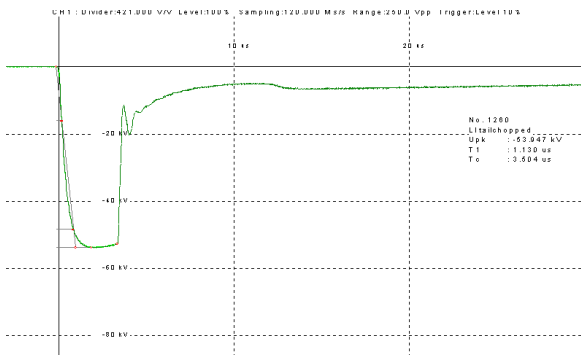
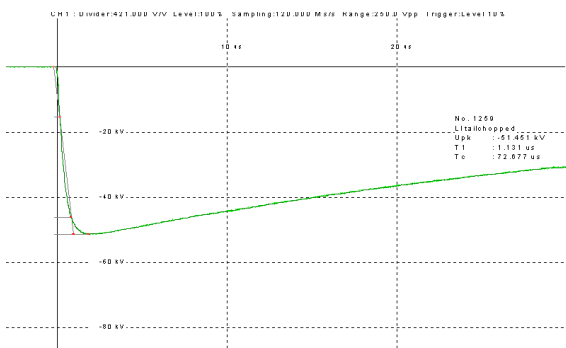
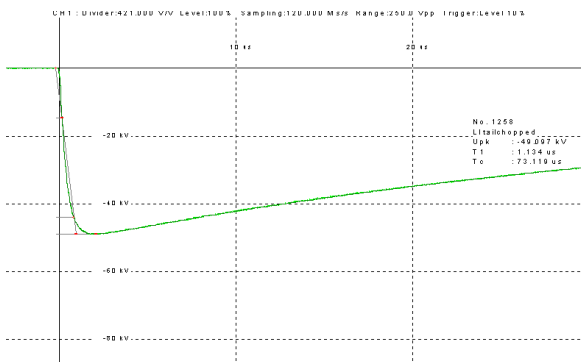
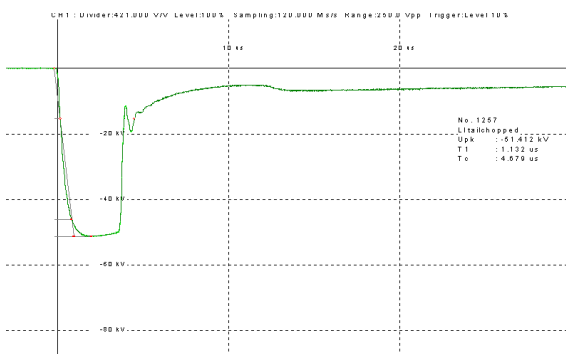
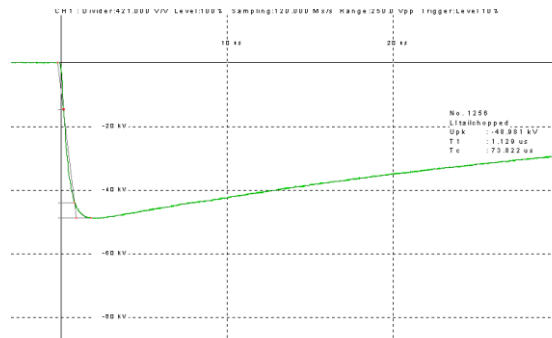
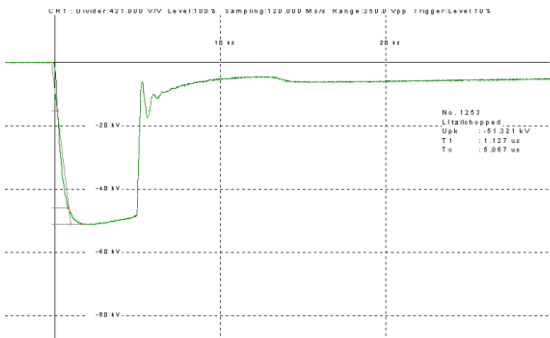
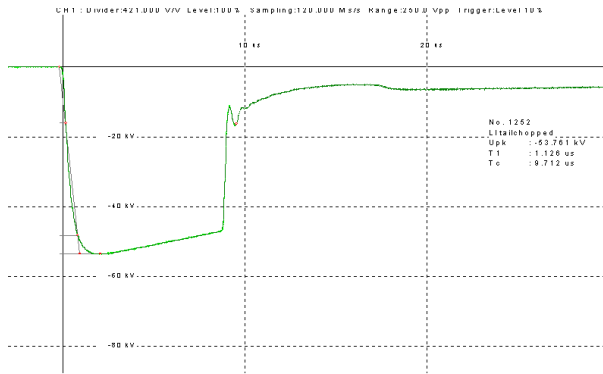
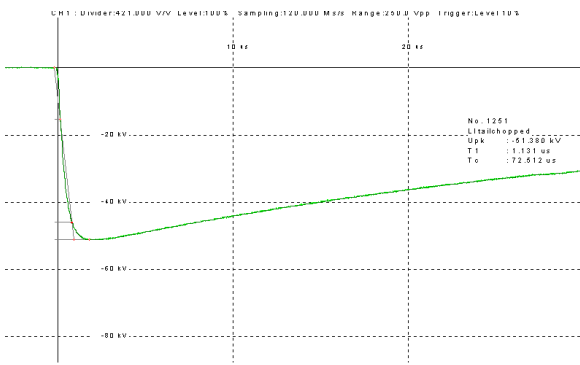


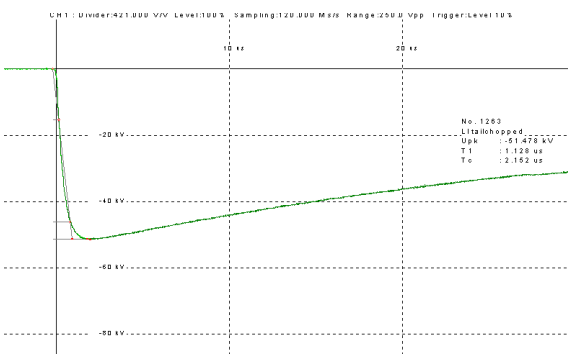
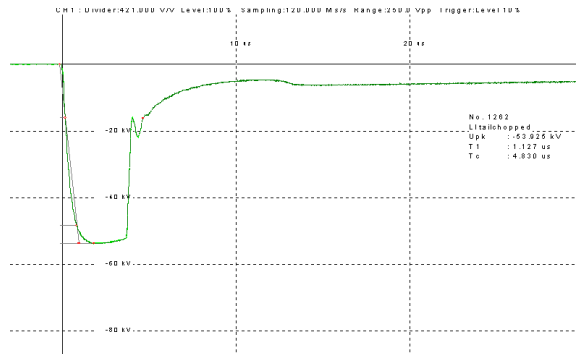
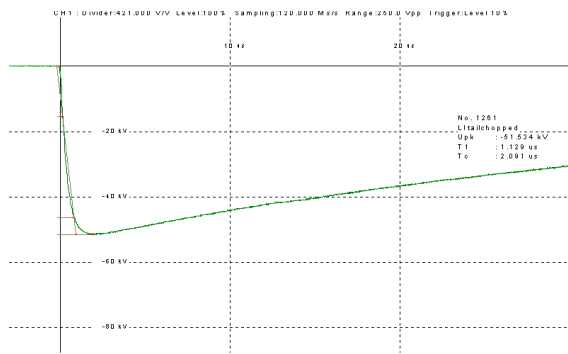


## Π.5. Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 0% υγρασία και αρνητική πολικότητα

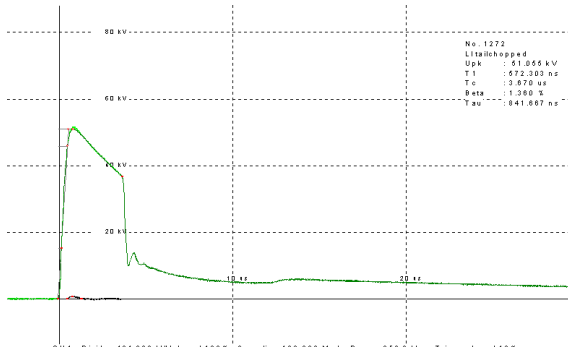
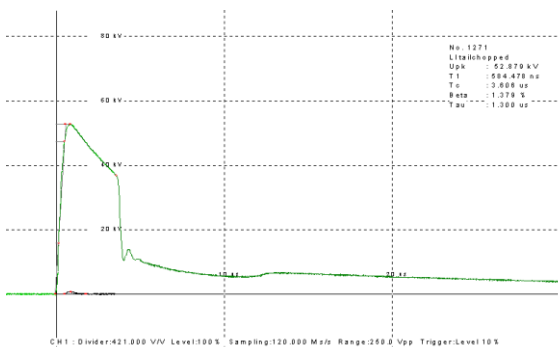
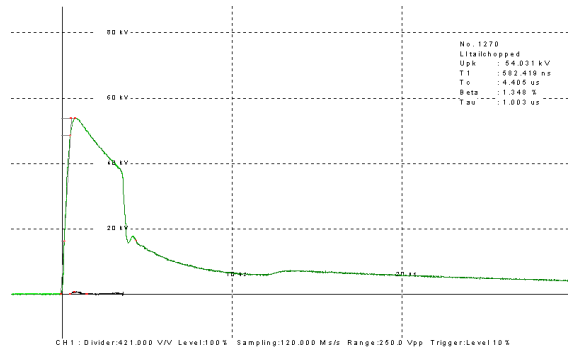
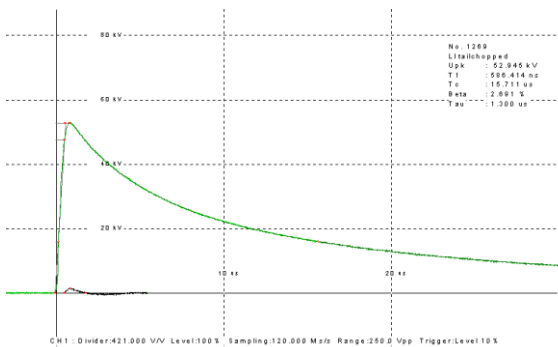


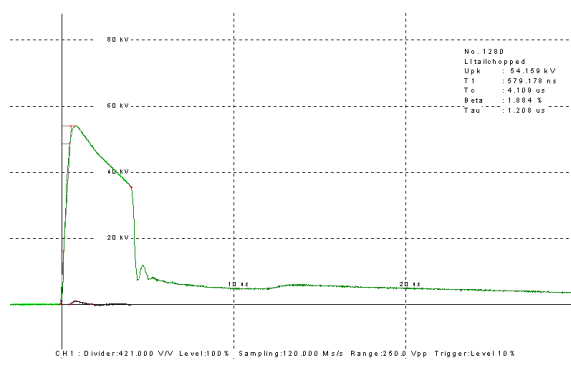
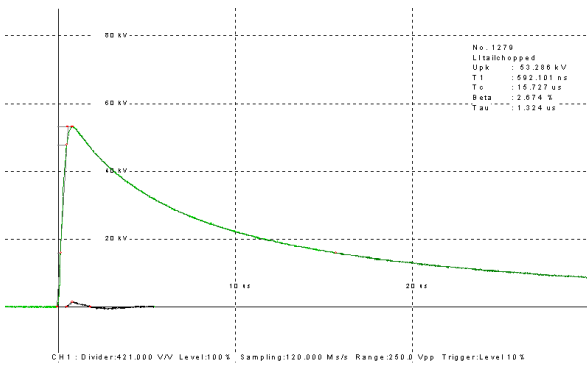
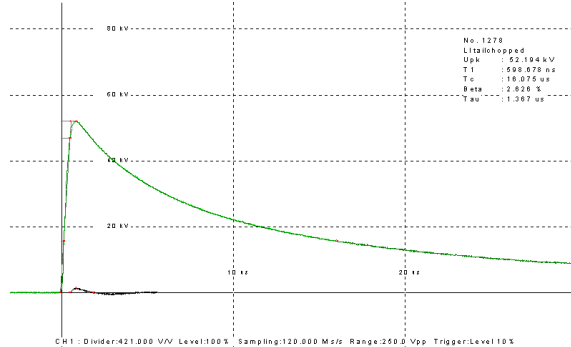
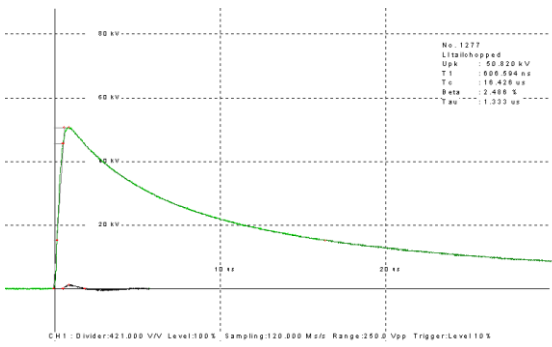
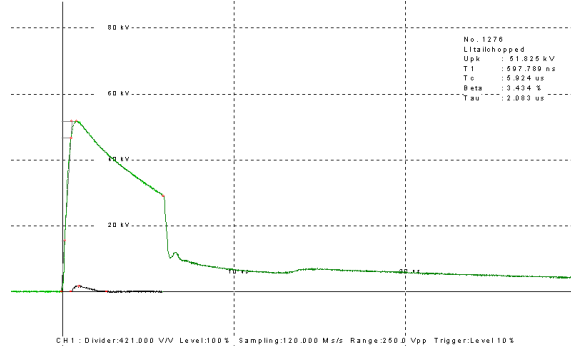
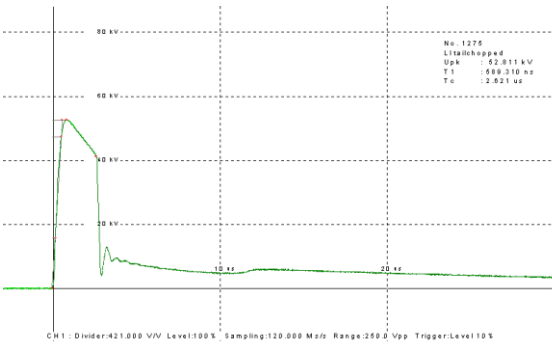
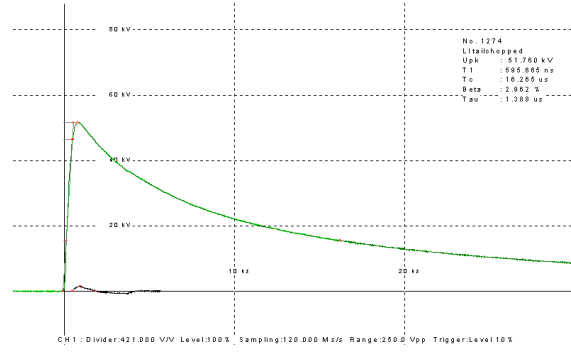
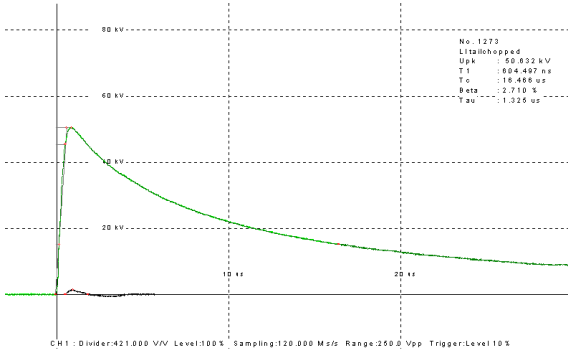


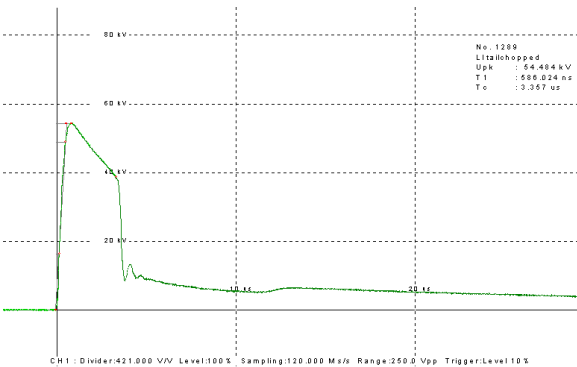
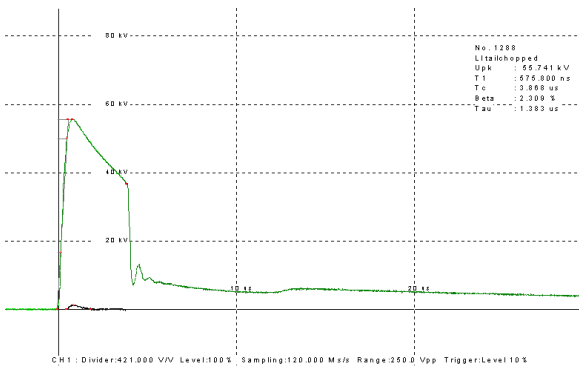
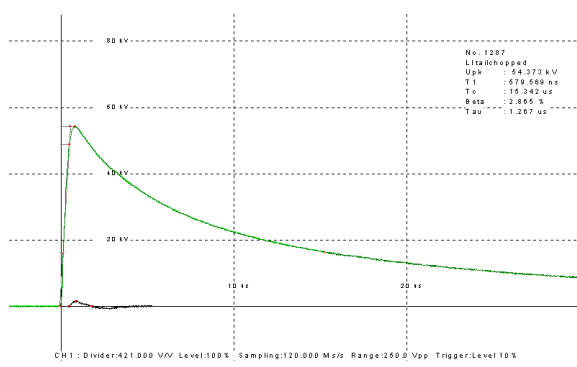
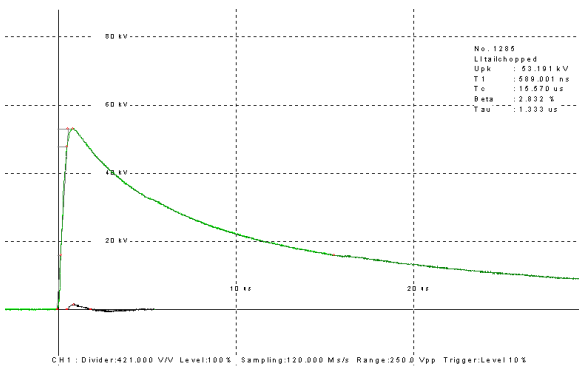
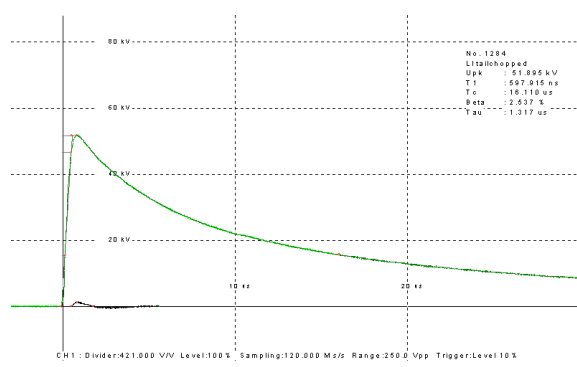
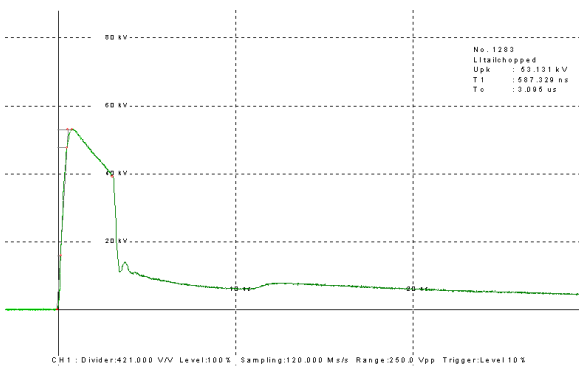
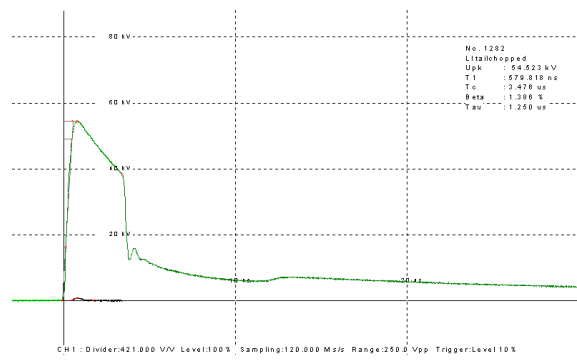
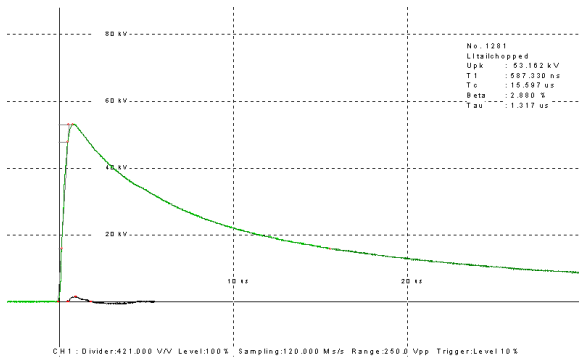


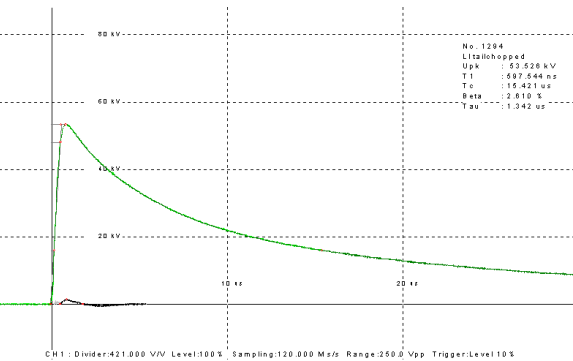
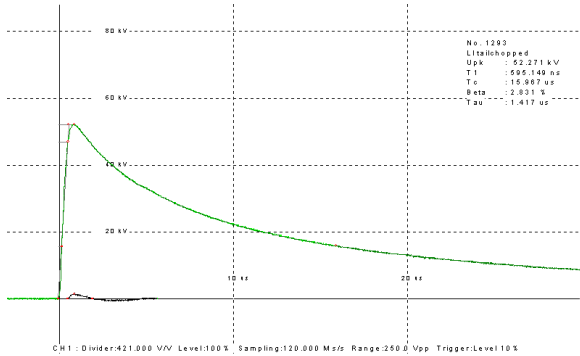
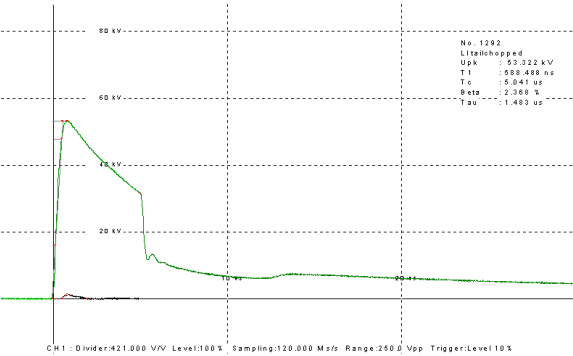
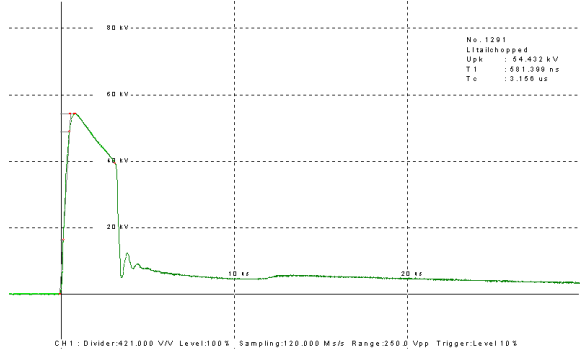
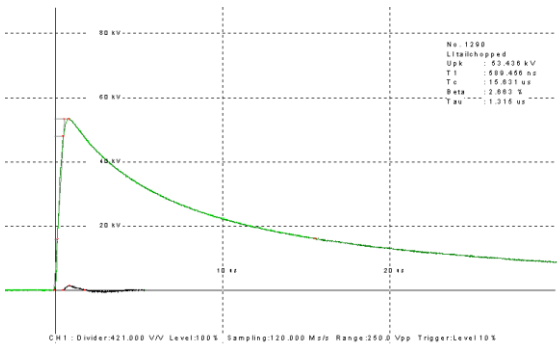


### Π.6. Δοκίμιο Δ' με περιεκτικότητα 5% υγρασία και θετική πολικότητα











# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

## Κεφάλαιο 1

- [1] Κ. Βουρνάς – Γ. Κονταζής, «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Αθήνα, 1997.
- [2] G.F Tagg, «Earth Resistances», George Newnes Limited, London, 1964.
- [3] Megger, «Getting Down To Earth», A practical guide to earth resistance testing.
- [4] ANSI/IEEE Std 80-1986, «IEEE guide for safety in AC substation grounding», 1986.
- [5] Φ. Η. Ασημακοπούλου, “Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Νοέμβριος 2011
- [6] 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.
- [7] D.P. Snowden and J.W. Erler, «Initiation of Electrical Breakdown of Soil by Water Vaporization», IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4568-4571.
- [8] 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.
- [9] E.E. Oettle, «The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil», Transactions on the South African IEE, December 1983, pp.63-70.
- [10] E.E. Oettle, «A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp.2020-2029.
- [11] G.M. Petropoulos, «The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances», Journal IEE, Vol. 95, Part II, 1948, pp.59-70.
- [12] A.C. Liew, M. Darveniza, «Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths», Proc. IEE, Vol. 121, No 2, pp. 123-135, February 1974.
- [13] N.M. Nor, A. Ramli, «Electrical Properties of Dry Soil under High Impulse Currents», Journal of Electrostatics, Vol. 67, 2007, pp. 500-505.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] A.M. Mousa, «The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. , July 1994, pp.1669-1677.
- [17] V. Cooray, «Lightning Protection», The Institution of Engineering and Technology, London 2010.
- [18] Wang, «Lightning Response of Transmission Lines and Impulse Behaviour of Concentrated Grounds», Thesis for Degree of Master of Engineering, Department of Electrical & Computer Engineering, National University of Singapore, 2004.
- [19] M.E. Almeida and M.T. Correia de Barros, «Accurate modeling of rod driven tower footing», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- [20] K.J. Nixon, «The Lightning Transient Behavior of a Driven Rod Earth Electrode in Multilayer Soil», Thesis for Degree of Doctor of Philosophy, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2006.
- [21] 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.
- [22] O. Mayr, «Beitrage zur Theorie des statschen und des dynamischen Lichtbogens», Arch. für Elektrotechnik, Vol. 37, pp. 588–608, 1943.
- [23] A. M. Cassie, «Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory», CIGRE, Paris, France, Report No. 102, 1939.
- [24] 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.
- [25] G. Ala, M.L.D. Silvestre and F. Viola, «Soil Ionization Due to High Impulse Transient Currents Leaked by Earth Electrodes», Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 14, 2009, pp1-21.
- [26] W.K. Dick and H.R. Holiday, “Impulse and alternating current tests on grounding electrodes in soil environment,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-97, no. 1, pp. 102-108, Jan 1978.
- [27] A. Geri, “Behavior of grounding systems excited by high Impulse Currents: the model and its validation,” IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.3, July 1999, pp.1008-1017.
- [28] Y.Asaoka, H. Motoyama, and H.Mathubara, “Development of calculation model for grounding resistance of rod electrode exposed to large lightning impulse current”, 28<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection.

- [29] H. Norinder and R. Nordell: "Influence de la nature de la terre et de la disposition des electrodes sur la resistance des prises de terre aux courants d'impulsion," GIGRE 1939, 3, Parr. 302.
- [30] M. Loboda and Z. Pochanke, "Experimental Study of Electric Properties of Soil with Impulse Current Injections", 18th ICLP, 1985, Munich, pp. 191-197.
- [31] M. Loboda, V. Scuka, "On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes in soil," 23rd International Conference on Lightning Protection (ICLP) sept. 1996, Firenze (Italy), pp. 539-544.
- [32] Ι.Φ. Γκόνοϋ, "Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων γείωσης," Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2002.
- [33] F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "Soil ionization under lightning impulse voltages," IEE Proceedings Science Measurement and Technology, Vol. 151, No. 5, September 2004, pp. 343-346
- [34] J.L.C. Lima "Avaliacao experimental sobre o efeito de ionizacao do solo devido a injecao de correntes impulsivas", Μεταπτυχιακή Εργασία, Αύγουστος 2008.
- [35] H.R. Armstrong, "Grounding electrode characteristics from model tests," AIEE Trans., vol.72, no. 2, pp. 1301-1306, Jan. 1953.
- [36] Y. Liu, N. Theethayi, R.M. Gonzalez, R. Thottappillil, "The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results", in Proc. 2003 IEEE Int. Symp. on EMC, Boston, USA, pp. 794-799.
- [37] N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, "Factors Affecting Soil Characteristics Under Fast Transients," International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA.
- [38] N. M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths, "Determination of Threshold Electric Field  $E_c$  of Soil Under High Impulse Currents," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005, pp. 2108-2113.
- [39] P. Espel, R.R. Diaz, A. Bonamy, J.N. Silva, "Electrical Parameters Associated with Discharges in Resistive Soils," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 119, no.3, July 2004, pp. 1174-1182.
- [40] T.M. Flanagan, C.E. Mallon, R. Denson, "Electrical breakdown characteristics of soil." IEEE Trans. Nucl. Sci, vol. NS-28, no. 6, pp. 4432-4439, Dec. 1981.
- [41] T.K. Manna and P. Chowdhuri, "Generalized equation of soil critical electric field  $E_c$  based on the impulse tests and measured soil electrical parameters", Vol. 1, No. 5, September. 2007, pp. 811-817.
- [42] N.M. Nor, and A.Ramli, "Effects of moisture content, impulse polarity and earth electrode's dimension on dry and wet sand under high voltage conditions," Europ. Trans. Electric. Power, vol. 18, no. 5, pp.461-475, Jun. 2007.
- [43] IEC 60060-1 ed3.0: High Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, 2010.

- [44] 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.4568-4571.

## **Κεφάλαιο 2**

- [1] Αντιγόνη Λοΐζου, «Ηλεκτρική διάσπαση δειγμάτων χώματος», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2010.
- [2] Digital Impulse Analyzing System DIAS 733, Haefely Test AG, User Manual.
- [3] [www.ssb.de](http://www.ssb.de)
- [4] A.A.S.H.T.O. M-92
- [5] Μ. Καββαδάς, «Στοιχεία Εδαφομηχανικής», Ε.Μ.Π, Αθήνα 2006
- [6] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Δεύτερο, Αριθμός Φύλλου 955, «Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής Ε 105-86», Αθήνα 31 Δεκεμβρίου 1986.

## **Κεφάλαιο 3**

- [1] IEC 60060-1 ed3.0: High Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements, 2010.
- [2] W. Hauschild and W.Mosch, «Statistical Techniques for High Voltage Engineering», IEE Power Series 13, Peter Peregrinus Ltd, London.
- [3] Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων
- [4] Α. Λευκόπουλου, «Αβεβαιότητα μετρήσεων»
- [5] IEC 60-2, 1994, Amendment 1 High Voltage Test Techniques, Part 2 : Measuring Systems
- [6] Νικόλαος Ι. Θεοδώρου, «Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τεύχος Ι : Κλασσικές μετρήσεις», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2000
- [7] <http://physlab.phys.uoa.gr>
- [8] Χρήστος Χριστοδούλου, «Ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης-Διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιότητας», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Μάρτιος 2006.
- [9] Taub/Shilling, «Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

## **Κεφάλαιο 4**

- [1] Jose Luis Cerqueira Lima, Silverio Visacro, «Avaliaco experimental sobre o efeito de ionizacao do solo devido a injecao de correntes impulsivas»dissertacao de mestrado, 2008
- [2] N.Mohamad Nor, «Ionization gradient of low resistivity soils and liquids», 17<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006