



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

**Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αθηνά Γ. Βαλαμβάνου

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

**Επιβλέπουσα :** Φανή Η. Ασημακοπούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2009



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

147

## Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθηνά Γ. Βαλαμβάνου

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Ιουλίου 2009.

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

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

.....  
Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2009

.....  
Αθηνά Γ. Βαλαμβάνου

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

Copyright © Αθηνά Γ. Βαλαμβάνου

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.

# Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους και ο προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού  $E_C$  που απαιτείται για την έναρξη του φαινομένου. Για το λόγο αυτό εισάγονται και αναλύονται έννοιες όπως η γείωση και τα είδη της, καθώς και η ειδική αντίσταση. Παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία περιγράφεται το φαινόμενο του ιονισμού και τα μοντέλα που το περιγράφουν. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και ο τρόπος διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα που ελήφθησαν από τη διεξαγωγή των δοκιμών και τέλος, από την επεξεργασία των μετρήσεων εξάγονται συμπεράσματα.

## Λέξεις κλειδιά

Γείωση, ειδική αντίσταση, ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους, θερμικός μηχανισμός, ιονισμός του εδάφους, τάση διάσπασης  $U_{50\%}$ , κρίσιμη ένταση ιονισμού  $E_C$ .

# Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Βαλαμβάνου Αθηνάς για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Σκοπός της είναι ο προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου πέραν του οποίου παρατηρείται ο ιονισμός. Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας εφαρμόστηκε κρουστική τάση σε δοκίμιο όπου έφερε στο εσωτερικό του κυλινδρικό ηλεκτρόδιο.

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

Στο **Κεφάλαιο 1** της παρούσας εργασίας εισάγεται η έννοια της γείωσης και ορίζονται κάποια συναφή μεγέθη, τα οποία κρίθηκαν απαραίτητα για την καλύτερη κατανόηση της. Εν συνέχεια, αναφέρονται τα είδη της γείωσης και τέλος, η ειδική αντίσταση με τους παράγοντες, που την επηρεάζουν καθώς και τις μεθόδους υπολογισμού της.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρατίθεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, από ήδη υπάρχουσες δημοσιευμένες εργασίες, που αφορούν τους μηχανισμούς διάσπασης του εδάφους καθώς και τα μοντέλα προσδιορισμού του ιονισμού.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφονται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και τα όργανα που την αποτελούν. Επίσης περιγράφεται ο τρόπος της προετοιμασία των προς μέτρηση υλικών, όπως και διαδικασία των μετρήσεων.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα, που ελήφθησαν κατά τις δοκιμές για τάση διάσπασης  $U_{50\%}$ .

Στο **Κεφάλαιο 5** υπολογίζεται η κρίσιμη ένταση ιονισμού και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ύστερα από την επεξεργασία με το πρόγραμμα matlab καταγράφονται σε πίνακες, εκ των οποίων συνάγονται συμπεράσματα.

Στο **Παράρτημα** παρατίθεται το σύνολο των παλμογραφήματα, που καταγράφηκαν κατά την προσπάθεια προσδιορισμού της τάσης διάσπασης 50% για τα διάφορα δοκίμια.

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

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την αμέριστη συμπαράστασή του, το ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον, που μου παρείχε, καθώς και την ένδειξη ειλικρινούς κατανόησης σε ορισμένες δύσκολες προσωπικές στιγμές.

Την Κυρία Φανή. Η. Ασημακοπούλου, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράστασή της, για την ουσιαστική βοήθεια που πρόθυμα και ακούραστα μου παρείχε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας, καθώς και για το φιλικό και ευχάριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που πρόθυμα προσέφερε τη βοήθεια του και τις γνώσεις του πάνω σε θέματα προγραμματισμού, που αφορούσαν τη διπλωματική μου και κυρίως πάνω σε θέματα του προγράμματος Matlab.

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

Τέλος, δε θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Πρόλογος.....	ii
Περιεχόμενα .....	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή .....	1
1.1 Ο ρόλος της γείωσης .....	1
1.2 Βασικοί ορισμοί .....	1
1.3 Είδη γείωσης.....	4
1.4 Ειδική αντίσταση εδάφους.....	5
1.5 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης.....	10
1.5.1 Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (ηλεκτροδίων) .....	12
1.5.1.1 Διάταξη Wenner .....	12
1.5.1.2 Διάταξη Schlumberger - Palmer.....	13
1.5.1.3 Σύστημα κεντρικού ηλεκτροδίου .....	14
1.5.1.4 Εναλλακτικές διατάξεις ηλεκτροδίων.....	15
1.5.1.5 Μέθοδος Lee.....	16
1.5.1.6 Η μέθοδος διπόλου-διπόλου .....	17
1.5.1.7 Η τετραγωνική διάταξη .....	17
1.5.2 Διάταξη με χρήση τριών ηλεκτροδίων.....	18
Βιβλιογραφία .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους - Ιονισμός.....	20
2.1 Μηχανισμοί Διάσπασης.....	20
2.2 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους.....	21
2.2.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων .....	21
2.2.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης .....	24

2.2.3 Μοντέλο Διατήρησης Ενέργειας .....	31
Βιβλιογραφία .....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πειραματική διάταξη .....	41
3.1 Εισαγωγή.....	41
3.2 Εξοπλισμός.....	41
3.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης .....	41
3.3.1 Λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας.....	42
3.3.2 Τράπεζα χειρισμών .....	44
3.3.3 Μηχανισμός μεταβολής αποστάσεως σφαιρών .....	45
3.3.4 Σταθεροποιητής τάσης.....	46
3.3.5 Διαφορικός καταμεριστής .....	46
3.3.6 Αμπεροσιμπίδα.....	47
3.3.7 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052.....	47
3.3.8 Ομοαξονικά καλώδια.....	48
3.3.9 Θερμόμετρο-υγρόμετρο .....	49
3.4 Μετρήσεις.....	49
3.4.1 Προετοιμασία χώματος.....	49
3.4.2 Δοκίμια .....	49
3.4.3 Διαδικασία μέτρησης.....	50
Βιβλιογραφία .....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παλμογραφήματα .....	52
4.1 Παλμογραφήματα.....	52
4.1.1 Παλμογραφήματα με θετική πολικότητα και 0% ποσοστό υγρασίας του χώματος.....	52
4.1.2 Παλμογραφήματα με αρνητική πολικότητα και 0% ποσοστό υγρασίας του χώματος....	54
4.1.3 Παλμογραφήματα με αρνητική πολικότητα και 5% ποσοστό υγρασίας του χώματος....	56
4.1.4 Παλμογραφήματα με θετική πολικότητα και 5% ποσοστό υγρασίας του χώματος.....	58



4.1.5 Παλμογραφήματα με θετική πολικότητα και 10% ποσοστό υγρασίας του χώματος.....	59
4.1.6 Παλμογραφήματα με αρνητική πολικότητα και 10% ποσοστό υγρασίας του χώματος..	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα-Συμπεράσματα .....</b>	<b>64</b>
5.1 Υπολογισμός κρίσιμης έντασης ιονισμού $E_C$ .....	64
5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	66
5.3 Συμπεράσματα .....	71
Βιβλιογραφία .....	74
Παράρτημα.....	75
Π.1 Παλμογραφήματα.....	75

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει σύντομη αναφορά στο ρόλο που επιτελεί ένα σύστημα γείωσης και θα δοθούν κάποιοι χρήσιμοι ορισμοί. Ακολούθως, θα γίνει εκτενής αναφορά στην ειδική αντίσταση του εδάφους, θα δοθούν ο ορισμός της, θα αναλυθούν οι παράμετροι από τις οποίες επηρεάζεται η τιμή της ενώ, τέλος, θα αναφερθούν οι τρόποι με τους οποίους γίνεται η μέτρηση της ειδικής αντίστασης.

### 1.1 Ο ρόλος της γείωσης

Αδιαμφισβήτητο είναι το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Ωστόσο η ροή του ρεύματος στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας παράλληλα την αξιοπιστία του συστήματος και σε όλες τις περιπτώσεις την ελάχιστη πτώση δυναμικού [1]. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει τις πιθανότητες ανάπτυξης βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς. Συνεπώς, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα:

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

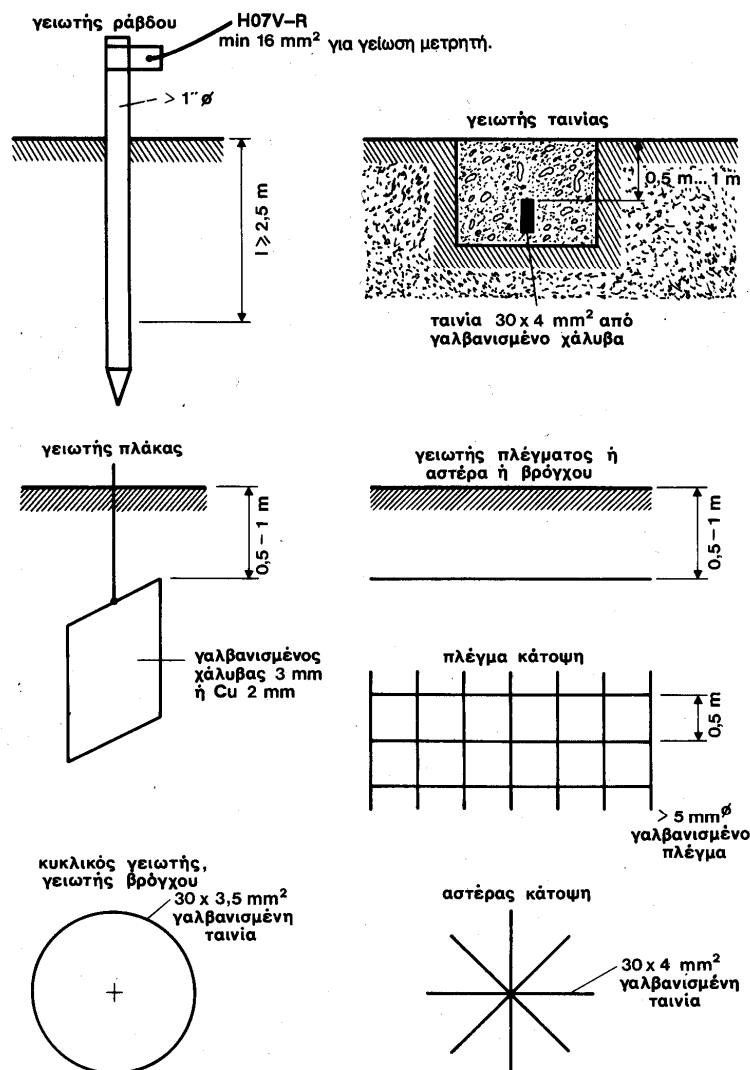
### 1.2 Βασικοί Ορισμοί

**Γείωση** είναι η αγωγήμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγωγίμο σώμα τέτοιου μεγέθους, που θεωρείται γη. Σκοπός της γείωσης είναι ο καθορισμός και η διατήρηση του δυναμικού της γης ή του αγωγίμου σώματος στους αγωγούς που συνδέονται με αυτά [2].

**Βηματική τάση** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω ανοικτού βηματισμού [2].

**Τάση επαφής** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ ενός γειωμένου μεταλλικού ικρίωματος και ενός σημείου της επιφάνειας της γης σε οριζόντια απόσταση 1m [2].

**Ηλεκτρόδιο γείωσης ή γειωτής** είναι ένας αγωγός θαμμένος στη γη ο οποίος διαχέει το ρεύμα στη γη. Στο **Σχήμα 1.1** παρουσιάζονται διάφοροι τύποι γειωτών, που χρησιμοποιούνται [2].



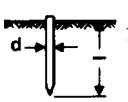
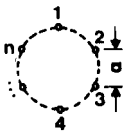
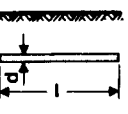
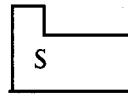
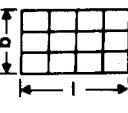
**Σχήμα 1.1** Γειωτές [4].

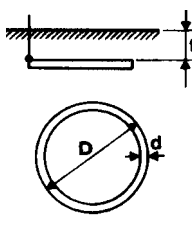
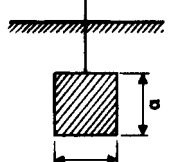
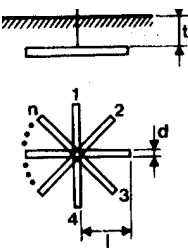
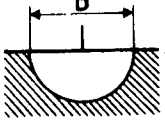
**Αντίσταση γείωσης** είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός πιο μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την εκφόρτιση ρεύματος,

δηλαδή  $R = \frac{V}{I}$ . Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι για το λόγο αυτό μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου[3]. Η αντίσταση γείωσης, την οποία μετράμε σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους, και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Για το λόγο αυτό το υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης είναι κατά κανόνα χαλκός, επικασιτερωμένος, για την αποφυγή οξειδωσης. Η αντίσταση γείωσης  $R_g$  είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως  $R_\delta$ .

Στον παρακάτω **Πίνακα 1.1** δίνονται μερικοί τύποι γειωτών και οι τύποι βάσει των οποίων υπολογίζεται η αντίσταση γείωσής τους [4].

**Πίνακας 1.1** Τύποι αντίστασης ηλεκτροδίων γειωτών.

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}$	$R_A \cong \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασσάλων $\alpha \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{a}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1.2$ $R_{A1}$ = αντίσταση ενός πασσάλου	$\kappa = (1 \dots 1.5)$ [για $n = 10 : \kappa \approx 1.25$ ]
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$	$R_A \approx \frac{2\rho}{l}$
	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$		$R_4 = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$
	Πλέγμα σε βάθος 0,5 -1,0 m $D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2d} + \frac{\rho}{lg}$ $l \cdot g$ = συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$

	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{2l}{d} \cdot \left( 1 + \frac{t}{\ln \frac{2D}{d}} \right)$	$R = \frac{2\rho}{\pi D} *$
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m <sup>2</sup> ]		$R = \frac{\rho}{4.5\alpha} **$
	n=2 n=3 n=4 n=5	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{l^2}{0.27td} \right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{l^2}{0.25td} \right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{l^2}{0.22td} \right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{l^2}{0.09td} \right)$	
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D} ***$	
<p>* Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος <math>D = 0,33U</math>  <math>D = 0,33U</math>, <math>U =</math> μήκος αγωγού</p> <p>** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνα θέτουμε: <math>\alpha = \sqrt{S}</math>, όπου <math>S =</math> επιφάνεια</p> <p>*** Για ένα γειωτή όγκου <math>V</math> ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με <math>D = 1,57\sqrt[3]{V}</math> [4]</p>			

### 1.3 Είδη γείωσης

Οι γειώσεις ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους διακρίνονται στα παρακάτω τρία είδη [4]:

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

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

Η περίπτωση της ανοικτής γείωσης, δηλαδή όταν στη γραμμή της γείωσης έχει παρεμβληθεί σπινθηριστής ή ασφάλεια διάσπασης, δεν συμπεριλαμβάνεται στις γειώσεις λειτουργίας.

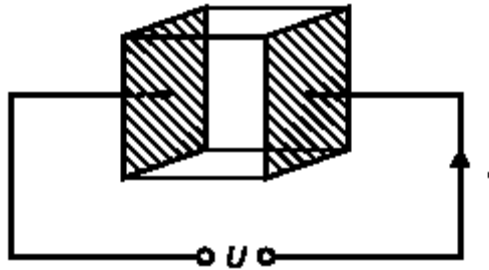
**Γείωση προστασίας:** Καλείται η γείωση κάθε αγώγιμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγώγιμα μέρη μιας εγκατάστασης ή κατασκευής τα οποία δεν συμμετέχουν στη λειτουργία της (πχ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδυνών και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ.) και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά.

**Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας:** Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον περιβάλλοντα χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων, των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοικτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα προς τη γη.[4].

#### **1.4 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 τη αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και, συνεπώς, ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων, ή αγωγιμοτήτων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του,  $\rho$ , η οποία μετράται συνήθως σε  $\Omega\text{m}$ . Η ειδική αντίσταση του εδάφους θα μπορούσε να καθοριστεί από την ποσότητα του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, καθώς και από την ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Με άλλα λόγια η αγωγιμότητα δια μέσω του εδάφους γίνεται αγωγιμότητα μέσω του νερού που κατακρατείται στο έδαφος και έτσι η αγωγιμότητα είναι ηλεκτρολυτική. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γείωσης και μη γραμμική.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους ορίζεται ως η αντίσταση του υλικού του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ( $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ ), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.2**.



*Σχήμα 1.2* Ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση είναι οι εξής [5]:

**i. Ο τύπος του εδάφους**

Ο τύπος του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Δυστυχώς δεν έχουν ορισθεί καθαρά οι τύποι του εδάφους, για παράδειγμα, με τη λέξη άργιλος μπορεί να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Ένας αριθμός ερευνητών έχει μετρήσει κατά καιρούς την ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους, είτε παίρνοντας δείγματα και μετρώντας τα σε ειδικές συσκευές, είτε μετρώντας την ειδική αντίσταση *in situ*. Στον ακόλουθο **Πίνακα 1.2** παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

*Πίνακας 1.2* Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους [6].

Έδαφος	Ειδική αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )
Επιφάνεια εδάφους, παχύ χώμα κ.τ.λ.	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, κ.τ.λ.	1000
Διαλυόμενος γνευσίτης (ορυκτό)	50-500
Πλακόστρωτα κ.τ.λ.	10-100

**ii. Επίδραση μεγέθους κόκκων**

Το μέγεθος των κόκκων αλλά και η παρουσία κόκκων διαφορετικών μεγεθών διαδραματίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης τους εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης. Επίσης, το μέγεθος των κόκκων αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία. 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.

### iii. Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

Δεδομένου ότι η αγωγιμότητα του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, συνάγεται ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων αλάτων θα παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Η ακριβής περιεκτικότητα σε νερό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και είναι μεταβλητή ποσότητα. Μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Σπάνια το έδαφος είναι πολύ ξηρό, παρόλα αυτά είναι πιθανό η άμμος της ερήμου να είναι η πιο κοντινή προσέγγιση σε αυτό. Από την άλλη, δεν εμφανίζονται συχνά εδάφη με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη του 40%. Στον **Πίνακα 1.3** καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία.

**Πίνακας 1.3** Επίδραση της περιεκτικότητας της υγρασίας στην ειδική αντίσταση [6].

Περιεκτικότητα σε υγρασία Επί τις εκατό κατά βάρος	Ειδική αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )	
	Top soil	Sandy loam
0.0	$1.000 \times 10^4$	$1.000 \times 10^4$
2.5	2500	1500
5.0	1650	430
10.0	530	220
15.0	210	130
20.0	120	100
30.0	100	80

### iv. Επίδραση των διαλυμένων αλάτων στο νερό

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, όπως είδαμε παραπάνω, επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Το νερό, όμως, περιέχει και διαλυμένα σε αυτό άλατα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης. Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση σε σχέση με την τιμή που αυτή έχει όταν το νερό, που έχει προστεθεί στο χώμα, είναι απιονισμένο. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι διαφορετικά άλατα έχουν διαφορετικές επιδράσεις και πιθανώς αυτή είναι η εξήγηση γιατί η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών από διαφορετικές περιοχές παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), θειικός χαλκός ( $\text{CuSO}_4$ ) ή θειικό μαγνήσιο ( $\text{MgSO}_4$ ) είναι ένας πρακτικός τρόπος



μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στον **Πίνακα 1.4** παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα.

**Πίνακας 1.4** Επίδραση της περιεκτικότητας των αλάτων στην ειδική αντίσταση [6].

Προστιθέμενα άλατα Επί τις εκατό δια βάρος υγρασίας	Ειδική αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )
0,0	107
0,1	18
1,0	4,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1

#### v. Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης

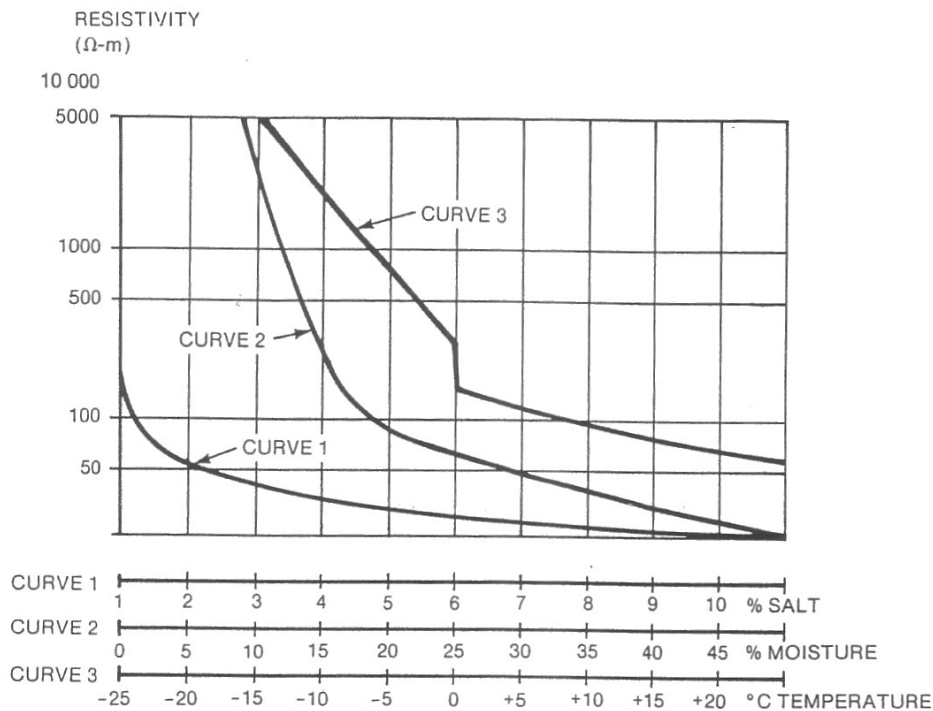
Εφόσον η ειδική αντίσταση του εδάφους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία του νερού και είναι γνωστό ότι η ειδική αντίσταση του νερού έχει μεγάλο θερμοκρασιακό συντελεστή, είναι αναμενόμενο ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί καθώς η θερμοκρασία θα μειώνεται. Σε περίπτωση μάλιστα, που η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους  $0^{\circ}\text{C}$  τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί πάρα πολύ. Στον **Πίνακα 1.5** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

**Πίνακας 1.5** Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση [6].

Θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ειδική αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )
20	72
10	99
0 (νερό)	138
0 (πάγος)	300
-5	790
-15	3300

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

Στο **Σχήμα 1.3** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 1.3** Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα (CURVE 1), της υγρασίας (CURVE 2) και της θερμοκρασίας (CURVE 3) [7].

**vi. Επίδραση της έντασης του πεδίου (voltage gradient)**

Η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζεται από την ένταση εκτός εάν η τελευταία υπερβεί μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με το είδος του εδάφους, αλλά συνήθως είναι της τάξης μερικών kV/cm. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, θα δημιουργηθούν τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, τα οποία οδηγούν σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα τόξα θα εκδηλώνονται σε εκείνη την περιοχή όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θα ξεπερνά την κρίσιμη τιμή. Σε όλο τον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη **Error! Reference source not found.**

**vii. Επίδραση της μορφής της τάσης**

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της τιμής της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0,3/30μs, η μεταβατική αντίσταση θεμελιακού γειωτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 3Ω και 26Ω. Η αύξηση της τιμής της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο της τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση.

## 1.5 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι απαραίτητη η ροή ρεύματος μέσω αυτού. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο τοποθετώντας ηλεκτρόδια μέσα στη γη, τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύμα. Συγκεκριμένα, ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται στο υπέδαφος από το θετικό ηλεκτρόδιο Α και εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο Β (ηλεκτρόδια ρεύματος), με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί ηλεκτρικό πεδίο εξαρτώμενο από τη δομή του υπεδάφους. Με τη βοήθεια δύο άλλων ηλεκτροδίων Μ, Ν (ηλεκτρόδια δυναμικού) μετράται η διαφορά δυναμικού  $\Delta V$ .

Αναλυτικότερα η τάση σε οποιοδήποτε σημείο υπολογίζεται βάσει του τύπου:

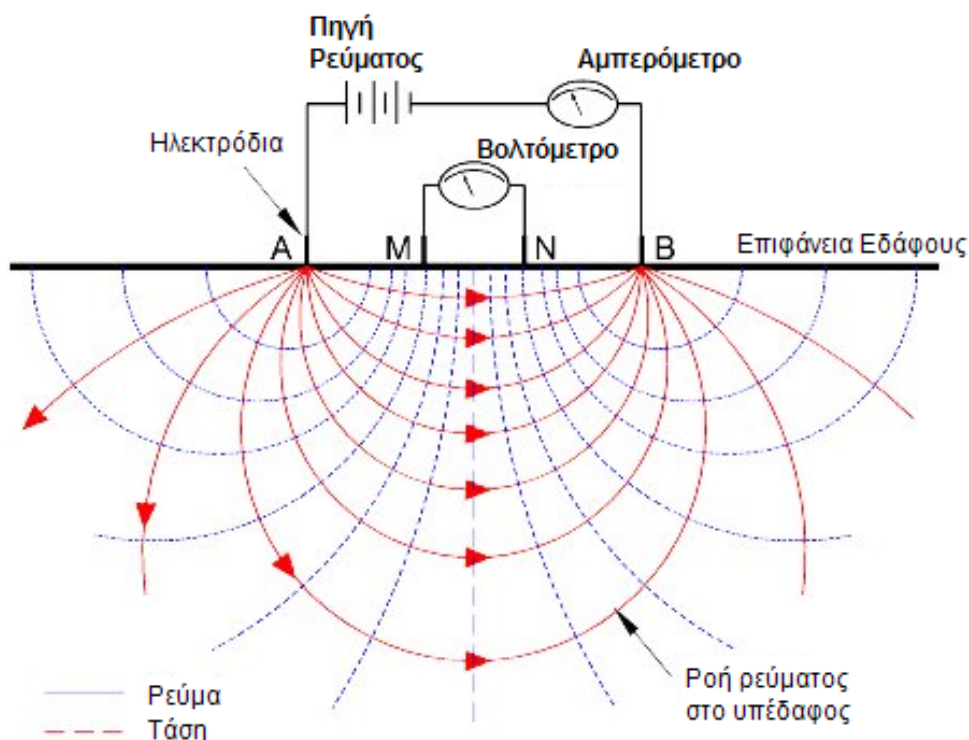
$$U = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (1.1)$$

Όπου  $r_A$  και  $r_B$  είναι η απόσταση του σημείου από τα Α και Β. Τότε δυναμικό  $V_{MN}$  δίδεται από τον ακόλουθο τύπο:

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

όπου  $U_M$  and  $U_N$  είναι το δυναμικό στα σημεία Μ και Ν. ΑΜ, ΒΜ, ΑΝ, ΒΝ είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων Α και Μ, Β και Μ, Α και Ν, Β και Ν, αντίστοιχα.

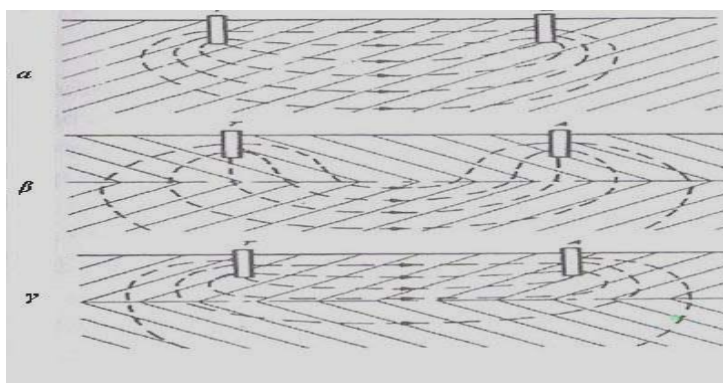
Η αρχή της μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.4**.



**Σχήμα 1.4** Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης.

Από τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού υπολογίζουμε τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η οποία εξαρτάται όχι μόνο από την ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αλλά και από τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Από την επεξεργασία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προκύπτει η κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, δηλαδή η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.

Σε θέσεις όπου υπάρχει περίπτωση η ειδική αντίσταση του εδάφους να μεταβάλλεται με το βάθος, οι μετρήσεις πιθανόν να μην είναι επαρκείς σε μόνο μία κατεύθυνση της γραμμής αλλά να απαιτηθεί να γίνουν και σε διαφορετικές κατευθύνσεις ή να απαιτηθεί μεταβολή των αποστάσεων των ηλεκτροδίων ράβδων από το σημείο Μ προκειμένου να εξερευνηθεί η μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε οριζόντια επίπεδα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε το επιλεγόμενο σημείο Μ να βρίσκεται όσο το δυνατόν μακρύτερα από θαμμένα αντικείμενα, κυρίως μεταλλικά. Στο **Σχήμα 1.5** απεικονίζεται η επίδραση των στρωμάτων που παρουσιάζει το έδαφος στη ροή του ρεύματος.



**Σχήμα 1.5** Επίδραση των στρωμάτων που παρουσιάζει το έδαφος στη ροή του ρεύματος κατά την μέτρηση α) ομοιογενούς αντίστασης, β) πολύ χαμηλής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα, γ) πολύ υψηλής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα.

Στα [2], [5], [8]-[13] αναλύονται διάφορες μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι κυριότερες είναι:

(α) η μέθοδος των 4 σημείων (Four point method)

(β) η μέθοδος των 3 σημείων (Three point method ή variation of Depth Method) και

(γ) η μέθοδος των 2 σημείων (Two Point Method).

Κατά καιρούς οι ερευνητές πρότειναν διαφορετικούς τρόπους διάταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων και έτσι προέκυψαν οι εξής τεχνικές μέτρησης της ειδικής αντίστασης:

i. Μέθοδος Wenner

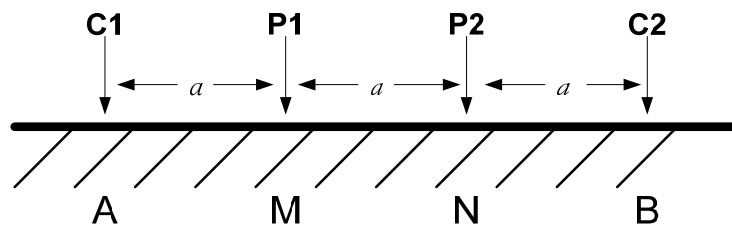
- ii. Μέθοδος Schlumberger - Palmer
- iii. Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου
- iv. Μέθοδος Lee
- v. Μέθοδος διπόλου-διπόλου
- vi. Τετραγωνική διάταξη

Ακολουθώς αναλύονται οι βασικές μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης.

### 1.5.1 Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (ηλεκτροδίων)

#### 1.5.1.1 Διάταξη Wenner

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται τέσσερα μικρού μήκους ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντια απόσταση  $a$  μεταξύ τους και σε βάθος  $b$  (όχι μεγαλύτερο από  $0,1a$ ) όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.6**. Η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια C1 (A) και (C2) B, ενώ η τάση μετράται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια (P1) M και (P2) N.



**Σχήμα 1.6** Διάταξη Wenner.

Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους  $\rho$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (1.3) [5]:

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

όπου το  $n$  εξαρτάται από το λόγο  $b/a$  και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.

Στην περίπτωση που  $a \ll b$  τότε:

$$\rho = 4\pi aR \quad (1.4)$$

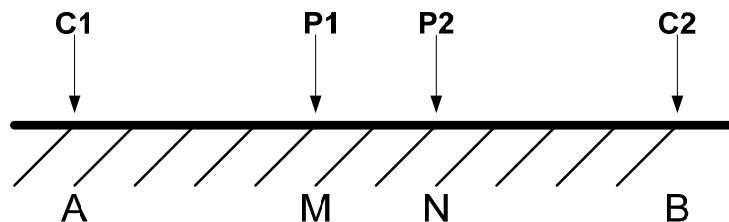
Ενώ αν  $b \ll a$  τότε η εξίσωση (1.3) απλοποιείται στην:

$$\rho = 2\pi aR \quad (1.5)$$

η οποία δίνει την φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους σε βάθος  $a$ . Έτσι σε περίπτωση, που θέλουμε να μελετήσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους αρκεί να μεταβληθούν οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού διατηρούμενης της συμμετρίας τους ως προς το κέντρο της διάταξης.

### 1.5.1.2 Διάταξη Schlumberger - Palmer

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, ωστόσο αρκετοί επιστήμονες διατύπωσαν την άποψη ότι εάν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τάσης αυξηθεί, η τιμή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης θα αυξηθεί κάνοντας τη μέτρηση ευκολότερη. Μια προτεινόμενη διάταξη παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.7**.



**Σχήμα 1.7** Διάταξη Schlumberger.

Σε αυτήν την διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού είναι τοποθετημένα συνευθειακά και συμμετρικά ως προς το μέσο της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού (κέντρο διάταξης) αλλά η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού P1(M) και P2(N) είναι πολύ μικρότερη της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος C1(A) C2(B)[2]. Μία εμπειρική συνθήκη στην διάταξη Schlumberger είναι ότι η απόσταση MN πρέπει να παραμένει μμικρότερη του 40% της απόστασης AB/2.

Ορίζουμε  $a=MN/2$  και  $b=AB/2$ . Το δυναμικό στο σημείο M ορίζεται ως:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{b-a} - \frac{1}{b+a} \right] \quad (1.6)$$

Λόγω της συμμετρίας, η διαφορά δυναμικού μεταξύ του M και του N θα είναι δύο φορές αυτό το δυναμικό. Ως εκ τούτου το μετρούμενο δυναμικό είναι:

$$V_{MN} = \frac{2\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{b-a} - \frac{1}{b+a} \right] = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{4a}{b^2 - a^2} \right] \quad (1.7)$$

Η μετρούμενη αντίσταση είναι  $R=V/I$  και έτσι προκύπτει η σχέση:

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left[ \frac{4}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1} \right] \quad (1.8)$$

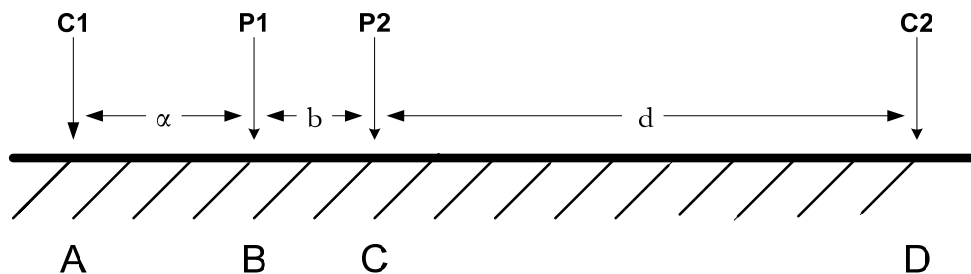
Αν ορίσουμε  $b/a=A$ , τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = 2\pi aR \left[ \frac{A^2 - 1}{4} \right] \quad (1.9)$$

Σε περίπτωση που επιθυμούμε να μελετήσουμε πώς η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται με το βάθος, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται μετακινώντας τα συμμετρικά ως προς το κέντρο διάταξης.

### 1.5.1.3 Σύστημα κεντρικού ηλεκτροδίου

Όταν το σύστημα τεσσάρων ηλεκτροδίων του Wenner χρησιμοποιείται και ζητηθεί να αλλαχθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων ή η θέση της δοκιμής, τότε και τα τέσσερα ηλεκτρόδια καθώς και οι σύνδεση των καλωδίων τους πρέπει να αλλαχθούν [5]. Σε ανώμαλα εδάφη αυτή η διαδικασία θα ήταν πολύ επίπονη. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτείνεται η διάταξη, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.8**. Σε αυτήν απαιτείται η μετακίνηση μόνο δύο ηλεκτροδίων αντί και των τεσσάρων.



**Σχήμα 1.8** Σύστημα κεντρικού ηλεκτροδίου.

Τα ηλεκτρόδια A και D είναι πάλι τα ηλεκτρόδια έγχυσης του ρεύματος. Το ηλεκτρόδιο D είναι τοποθετημένο αρκετά μακριά ( $d > 10a$ ) έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων B και C, που οφείλεται στο ρεύμα I που αναχωρεί από το D, να μπορεί να αμεληθεί. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των B και C που οφείλεται στο ρεύμα που αναχωρεί από το ηλεκτρόδιο A είναι:

$$V_{AB} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} - \frac{1}{a+b} \right] = IR \quad (1.10)$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς  $\rho$  προκύπτει ο τύπος **Error! Reference source not found.** για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης

$$\rho = \frac{2\pi a(a+b)R}{b} \quad (1.11)$$

Για να εξασφαλίσουμε σταθερή ροή ρεύματος μακριά από το ηλεκτρόδιο A, συχνά το ηλεκτρόδιο D παίρνει το σχήμα ενός κύκλου αποτελούμενου από ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και έχουν το A ως κέντρο, σχηματίζοντας έτσι το ηλεκτρόδιο επιστροφής.

Η δυσκολία αυτής της μεθόδου είναι η ποσότητα του χώρου που απαιτείται για το σύστημα των ηλεκτροδίων συγκρινόμενη με τη διάταξη Wenner.

#### 1.5.1.4 Εναλλακτικές διατάξεις ηλεκτροδίων [5]

Στη διάταξη Wenner η συνηθισμένη διεύθυνση των ηλεκτροδίων είναι C, P, P, C, όπου το C αποτελεί το ηλεκτρόδιο ρεύματος και το P το ηλεκτρόδιο δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια C και P μπορούν να εναλλαχθούν χωρίς να μεταβληθεί η τιμή της μετρούμενης αντίστασης.

Ο Carpenter είχε προτείνει ότι με τέσσερα ηλεκτρόδια μπορούν να γίνουν τρεις πιθανές μετρήσεις βάσει των οποίων υπολογίζεται η τιμή της ειδικής αντίστασης. Σε ομοιογενή εδάφη αυτές οι τρεις τιμές είναι ίδιες, αλλά σε ανομοιογενή εδάφη οι τιμές της ειδικής αντίστασης, που προκύπτουν από την εφαρμογή των τριών τρόπων είναι διαφορετικές. Μάλιστα από τις διαφορές τους προκύπτουν πορίσματα σχετικά με την ανομοιογένεια. Οι πιθανές διευθετήσεις των ηλεκτροδίων δίνονται στον παρακάτω **Πίνακα 1.6**.

**Πίνακας 1.6** Παραλλαγές των διατάξεων των ηλεκτροδίων.

Διευθέτηση ηλεκτροδίων				Τύπος ειδικής αντίστασης
C	P	P	C	$\rho_1 = 2\pi\alpha R_1$
P	C	C	P	
C	C	P	P	$\rho_2 = 2\pi\alpha R_2$
P	P	C	C	
C	P	C	P	$\rho_3 = 2\pi\alpha R_3$
P	C	P	C	

Οι τύποι για τον υπολογισμό των ειδικών αντιστάσεων προκύπτουν με παρόμοιο τρόπο όπως αυτοί για το σχηματισμό κατά Wenner. Μπορεί ναδειχθεί ότι για ομοιογενή εδάφη για τις τιμές της ειδικής αντίστασης ισχύει:



$$3\rho_1 = \rho_2 + 2\rho_3 \quad (1.12)$$

και

$$R_1 = R_2 + R_3 \quad (1.13)$$

### 1.5.1.5 Μέθοδος Lee [5]

Ο Lee πρότεινε αυτό που ονόμασε μέθοδο διαχωρισμού, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.9**. Σε αυτή τη μέθοδο έχουμε πέντε ηλεκτρόδια, όμως τέσσερα μόνο χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε μέτρηση. Τα εξωτερικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την έγχυση του ρεύματος, ενώ τα ηλεκτρόδια A, B, C είναι τα ηλεκτρόδια στα οποία μετράται το δυναμικό. Παίρνουμε δύο μετρήσεις του δυναμικού, στην πρώτη χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια A και B και στη δεύτερη τα ηλεκτρόδια B και C. Λόγω συμμετρίας το δυναμικό του ηλεκτροδίου B θα είναι μηδέν. Το δυναμικό του ηλεκτροδίου A είναι:

$$V_A = \frac{I_p}{2\pi} \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2\alpha} \right) = V_{AB} \quad (1.14)$$

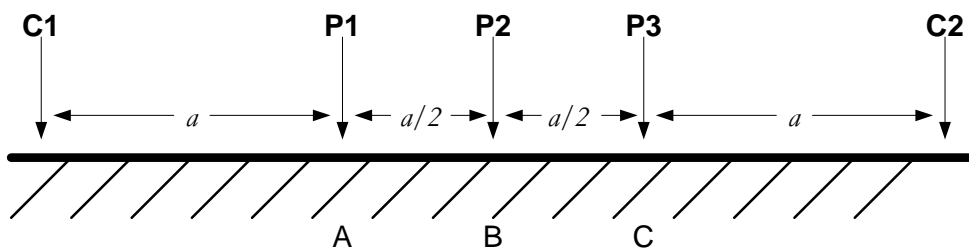
Αν η μετρούμενη αντίσταση μεταξύ των A και B ( $R_{AB}$ ) είναι ίση με  $V_{AB}/I$ , τότε η ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = 4\pi a R_{AB} \quad (1.15)$$

Όμοια αν  $R_{BC}$  είναι η αντίσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων B και C, τότε:

$$\rho = 4\pi a R_{BC} \quad (1.16)$$

Έχει παρατηρηθεί ότι δύο μετρήσεις μπορούν να γίνουν χωρίς να μετακινήθούν τα ηλεκτρόδια, και αν οι τιμές της ειδικής αντίστασης που θα ληφθούν από αυτούς τους δύο τύπους διαφέρουν, τότε το έδαφος δεν είναι ομοιογενές. Με τη βοήθεια επιπλέον μετρήσεων, που μπορούν να επιτευχθούν αλλάζοντας την απόσταση  $a$ , ή μετακινώντας τη θέση του συστήματος ηλεκτροδίων, προκύπτουν συμπεράσματα για την ανομοιογένεια του εδάφους.

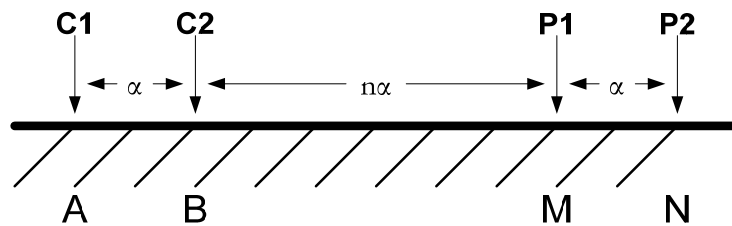


**Σχήμα 1.9** Μέθοδος Lee.

### 1.5.1.6 Η μέθοδος διπόλου-διπόλου [12]

Η διάταξη αυτή [12] αποτελείται από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος A, B τοποθετημένα σε απόσταση  $\alpha$  και ένα ζεύγος ηλεκτροδίων δυναμικού M, N επίσης σε απόσταση  $\alpha$  (**Σχήμα 1.10**). Η απόσταση μεταξύ των ζευγών ρεύματος και δυναμικού είναι κατά κανόνα ακέραιο πολλαπλάσιο εκείνης των ατομικών ζευγών, δηλαδή είναι  $n \cdot \alpha$ . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση στη διάταξη διπόλου-διπόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \pi\alpha \frac{\Delta V}{I} n(n+1)(n+2) \quad (1.17)$$



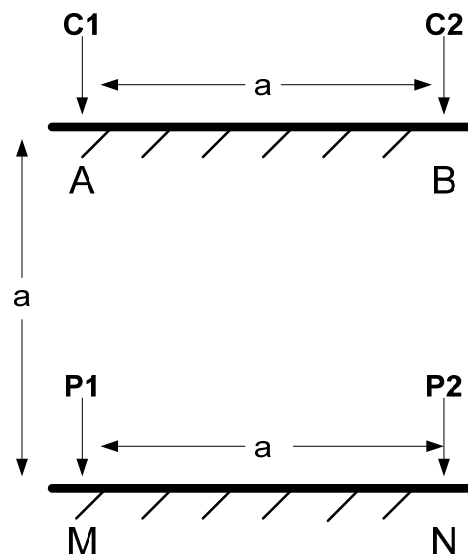
**Σχήμα 1.10** Διάταξη διπόλου-διπόλου.

### 1.5.1.7. Η τετραγωνική διάταξη

Στη διάταξη αυτή [12] τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις κορυφές ενός τετραγώνου και δίνουν τη δυνατότητα της εξομάλυνσης των τιμών από αζιμουθιακές μεταβολές της ειδικής αντίστασης (**Σχήμα 1.11**). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{a}{2-\sqrt{2}} \quad (1.18)$$

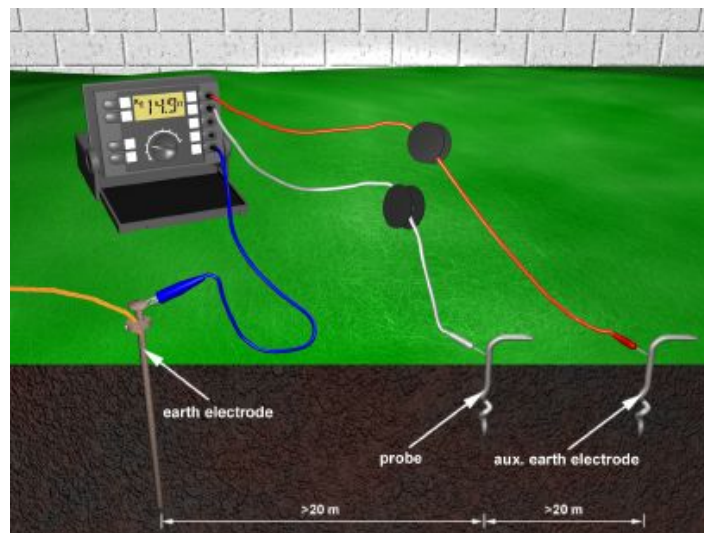
όπου  $a$  είναι το μήκος της πλευράς του τετραγώνου.



**Σχήμα 1.11** Τετραγωνική διάταξη.

### 1.5.2 Διάταξη με χρήση τριών ηλεκτροδίων

Στη μέθοδο αυτή [13], που ονομάζεται και μέθοδος της πτώσης δυναμικού, γίνεται ουσιαστικά μέτρηση της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου. Η διάταξη μέτρησης και η σύνδεση του οργάνου μέτρησης της αντίστασης γείωσης φαίνονται στο **Σχήμα 1.12**. Η διαφορά δυναμικού (V) μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης E και του ηλεκτροδίου S μετράται με ένα βολτόμετρο, ενώ με ένα αμπερόμετρο μετράται το ρεύμα (I) στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο H. Αυτές οι λειτουργίες γίνονται εσωτερικά από τη συσκευή που χρησιμοποιούμε. Με χρήση του νόμου του Ohm υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης  $R = V/I$  και επομένως μπορεί να υπολογιστεί το  $\rho$ . Είναι προφανές ότι η μέτρηση αυτή μπορεί να έχει μεγάλο σφάλμα, ειδικά στην περίπτωση του ανομοιογενούς εδάφους.



**Σχήμα 1.12** Συνδεσμολογία μέτρησης της ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων.[13]

## Βιβλιογραφία

- [1] [www.erico.com](http://www.erico.com)
- [2] IEEE Std 81-1983, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system”, 11 March 1983.
- [3] Κ.Βουρνάς – Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας,” Αθήνα, 1997.
- [4] Πέτρος Ντοκόπουλος “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384” , Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2005.
- [5] Tagg G.F., “Earth Resistances”, George Newnes Limited, London, 1964.
- [6] Megger, “Getting down to earth”, A practical guide to earth resistance.
- [7] ANSI/IEEE Std 80-1986, “IEEE guide for safety in AC substation grounding”, 1986.
- [8] ANSI/IEEE Std 80-2000, “IEEE guide for safety in AC substation grounding”, 2000.
- [9] Sunde E.D., “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, Dover Publications, New York, 1968.
- [10] IEEE Std 81.2-1991, “IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems”, June 1992.
- [11] IEEE Std 142-1991, “IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems”, 22 June 1992
- [12] US Army Corps of Engineers titled Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Report number EM 1110-1-1802, 1995.
- [13] Electrical Grounding Techniques from LEM

# Κεφάλαιο 2

## Ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους

### 2.1 Μηχανισμοί διάσπασης

Όπως είναι γνωστό, το έδαφος σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιόμορφα αγώγιμα σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα, ή αέρας. Στο νερό και τα 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 [1], [2] και η συμπεριφορά τους είναι πλήρως κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος) τότε, μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης, αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους.

Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η διάσπαση του εδάφους μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστός. Ωστόσο έχουν καταβληθεί προσπάθειες από πλήθος ερευνητών για τη μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους σε μεταβατικά φαινόμενα και την περιγραφή των μηχανισμών, που λαμβάνουν χώρα.

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

Σύμφωνα με το θερμικό μηχανισμό, που προτάθηκε από τους Snowden et al. [3] και [4], όταν το ρεύμα εγχέεται μέσω του συστήματος γείωσης στο έδαφος, λόγω του φαινομένου Joule, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, που είναι παγιδευμένο στο έδαφος, και μείωση της ειδικής του αντίστασης. Καθώς το ρεύμα επιλέγει να ρέει μέσω του δρόμου μικρότερης αντίστασης θα διαρρεύσει εκείνα τα μονοπάτια, που παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση (και συνεπώς έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία) προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Στις περιοχές εκείνες, που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ξεπερνάει μία κρίσιμη

τιμή εκδηλώνεται διάσπαση του εδάφους. Ο 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 δεύτερος μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους και προτάθηκε από τους Leadon et al [5]. Ο μηχανισμός του ιονισμού του εδάφους είναι ηλεκτρική διαδικασία και λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους. Μάλιστα, λόγω της ανομοιομορφίας των κόκκων, η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης, που προκαλεί διάσπαση του εδάφους, είναι μικρότερη από την τιμή που απαιτείται για διάσπαση ενός διακένου αέρα αντίστοιχων διαστάσεων [6]. Με τη βοήθεια πειραμάτων, οι Flanagan et al. [7], [8] υπολόγισαν την κρίσιμη τιμή της έντασης στα 10-20kV/cm.

Πειραματικά αποτελέσματα των Oettle [9], [10], Petropoulos [11] και Liew et al. [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. Οι δυσκολίες, που σχετίζονται με τον υπολογισμό της απορροφούμενης ενέργειας από το υγρό έδαφος, τους οδήγησαν στη μελέτη ξηρών εδαφών. Όπως ήταν αναμενόμενο ο επικρατών μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους, παραδόξως, όμως, παρατηρήθηκαν και φαινόμενα που σχετίζονται με το θερμικό μηχανισμό διάσπασης.

## **2.2 Μοντέλα ιονισμού**

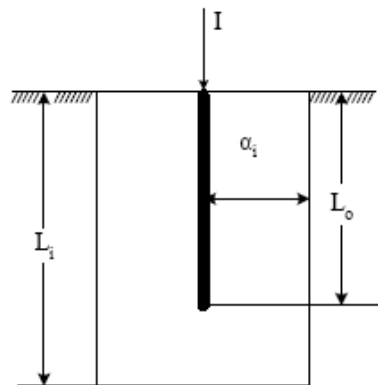
Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω.

### **2.2.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων**

Οι Bellaschi et al. [14] και ο Petropoulos [11] θεώρησαν ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου. Με άλλα λόγια, μοντελοποίησαν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων.

Αναλυτικότερα, ο Bellaschi σε εργασία του [14] συνέκρινε τη συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης σε μόνιμη κατάσταση με τη συμπεριφορά τους σε μεταβατική κατάσταση. Προς επίτευξη τούτου διεξήγαγε πειράματα τρεις διαφορετικές εποχές του χρόνου, υπολόγισε τους λόγους της κρουστικής αντίστασης προς την τιμή της αντίστασης γείωσης μονίμου καταστάσεως και παρατήρησε τη μείωση της μεταβατικής τιμής της αντίστασης όσο το επιβαλλόμενο κρουστικό ρεύμα αυξανόταν. Αυτό αποδόθηκε στη βραχυκύκλωση μέσω τόξων της αντίστασης επαφής μεταξύ των αγώγιμων συστατικών του εδάφους στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Έτσι, καθώς η εφαρμοζόμενη στο ηλεκτρόδιο γείωσης τάση αυξάνεται, η τιμή της αντίστασης του παραμένει σταθερή μέχρις ότου η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Τότε εμφανίζονται εκκενώσεις και η αντίσταση μειώνεται.

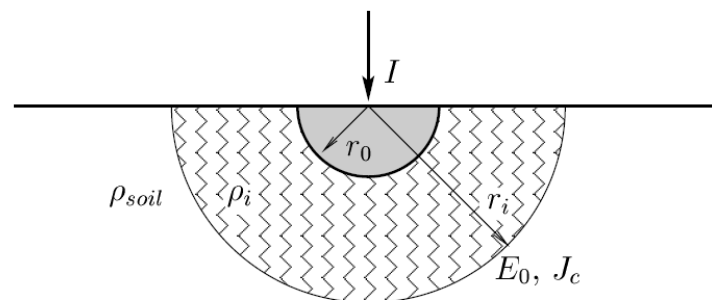
Σε άλλη εργασία τους, ο Bellaschi και οι συνεργάτες του [15] έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Στο **Σχήμα 2.1** παρουσιάζεται η μορφή της ζώνης ιονισμού, σύμφωνα με τους Bellaschi et al. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκενώσεων και, κατ' επένταση, τη μείωση της αντίστασης.



**Σχήμα 2.1** Μοντέλο Bellaschi [6].

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 αγώγιμα σώματα υπάρχουν κοντά στα

ηλεκτρόδια γείωσης, τότε η αντίσταση γείωσης μειώνεται ακόμα περισσότερο. Η μείωση αυτή της αντίστασης αποδίδεται σε ηλεκτρικές εκκινώσεις, οι οποίες βραχυκυκλώνουν τη σχετικά υψηλή αντίσταση μεταξύ των αγωγίμων τμημάτων του εδάφους καταλαμβάνοντας ένα χώρο στον οποίο η αγωγιμότητα γίνεται πολύ μεγαλύτερη απ' ό τι στο υπόλοιπο έδαφος. Τότε το ηλεκτρόδιο εμφανίζεται σαν να έχει αυξημένες διαστάσεις και συνεπώς παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση ως προς τη γη. Στα πειράματα, που διεξήγαγε, χρησιμοποίησε ημισφαιρικό δοχείο από άνθρακα γεμάτο με χώμα. Στο κέντρο του τοποθέτησε το σφαιρικό ηλεκτρόδιο. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκινώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης ένα συγκεκριμένο χώρο εκκινώσεων για κάθε τάση, διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο χώμα με μία ημισφαιρική επιφάνεια, η ακτίνα του οποίου εξαρτάται από την τιμή της τάσης. Στο **Σχήμα 2.2** φαίνεται το μοντέλο των εκκινώσεων που πρότεινε ο Πετρόπουλος.



**Σχήμα 2.2** Μοντέλο Πετρόπουλου [16].

Η αντίσταση μονίμου καταστάσεως του ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο:

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

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

$r_0$  είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου σε m

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

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

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

όπου  $J$  είναι η πυκνότητα ρεύματος σε  $\text{A}/\text{m}^2$

$I$  είναι το επιβαλλόμενο ρεύμα σε A

$r$  είναι η απόσταση από το ηλεκτρόδιο



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

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

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

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

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

Από τις εξισώσεις (2.2) και (2.3) μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της περιοχής ιονισμού, η οποία δίδεται από τον τύπο:

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

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

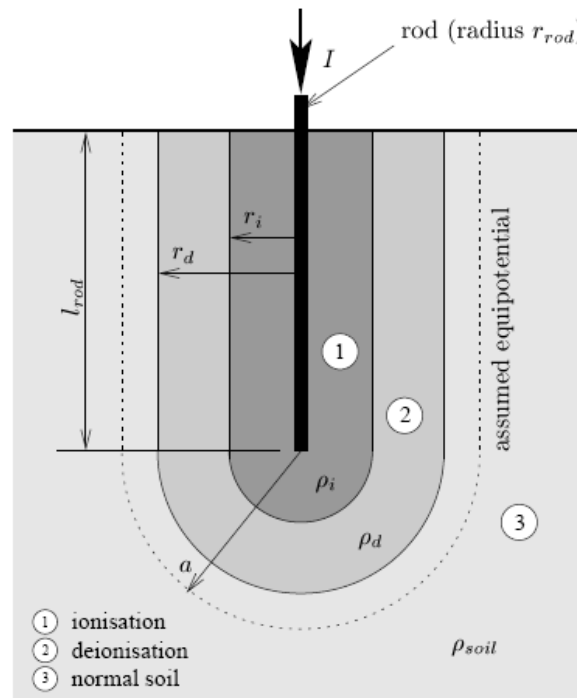
Τέλος, σύμφωνα με τις έρευνες των Loboda et al [17], όταν ένα ηλεκτρόδιο διαρρέεται από ρεύμα τότε στο έδαφος γύρω από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου δημιουργείται μία ζώνη εκκένωσης. Στη ζώνη αυτή, αρχικά, εκδηλώνονται σπινθήρες και καθώς η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται, δημιουργούνται τόξα. Στην περιοχή, που εκδηλώνονται τα τόξα η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το ηλεκτρόδιο μαζί με τη γύρω απ' αυτό περιοχή ισοδυναμούν με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων (κυρίως αυξημένης διαμέτρου). Η ζώνη των εκκένωσης εκτείνεται μέχρι εκείνη την περιοχή, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δεν προκαλεί διάσπαση του εδάφους.

### 2.2.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

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

Το 1974 οι Liew και Darveniza [12] πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων ειδών χώματος σε κρουστικά ρεύματα, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ισοτροπικό, δηλαδή η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Σύμφωνα με το μοντέλο τους το έδαφος, γύρω από το ηλεκτρόδιο, χωρίζεται σε

τρεις περιοχές ανάλογα με την τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος που εγχέεται. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.3** διακρίνονται τρεις περιοχές: (1) η περιοχή ιονισμού, (2) η περιοχή απιονισμού και (3) η περιοχή όπου δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού.



**Σχήμα 2.3** Μοντέλο Liew και Darveniza [16].

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

$$\rho = \rho_{soil} \text{ για } J < J_c \quad (2.5)$$

$$\rho = \rho_{soil} e^{-t/\tau_i} \text{ για } J \geq J_c \quad (2.6)$$

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

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

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

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

- Η περιοχή 3 ( $r > r_{cm}$ ,  $J < J_c$ ) στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού και συνεπώς η τιμή της ειδικής αντίστασης είναι  $\rho_{soil}$ .
- Η περιοχή 2 στην οποία η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή και η ειδική αντίσταση αρχίζει να ανακάτ την αρχική τιμή της, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = \rho_i + (\rho_{soil} - \rho_i) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\right) \left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \text{ για } r < r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (2.7)$$

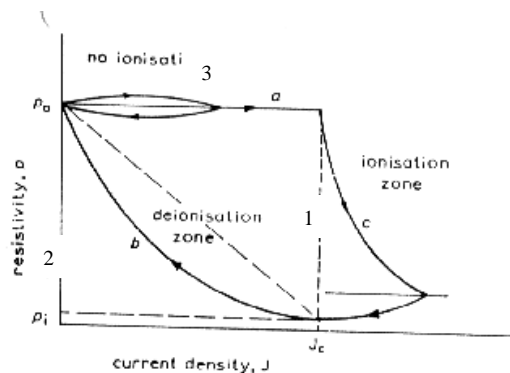
όπου:  $\rho_i$  είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης, όταν η πυκνότητα του ρεύματος ( $J$ ) είναι ίση με την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ρεύματος ( $J_c$ )

$\tau_2$  είναι η χρονική σταθερά απιονισμού

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

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

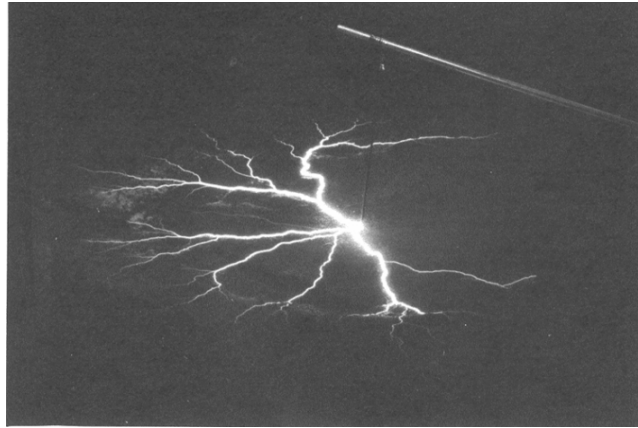
Το παρακάτω **Σχήμα 2.4** δείχνει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης καθώς το εγγεόμενο ρεύμα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται.



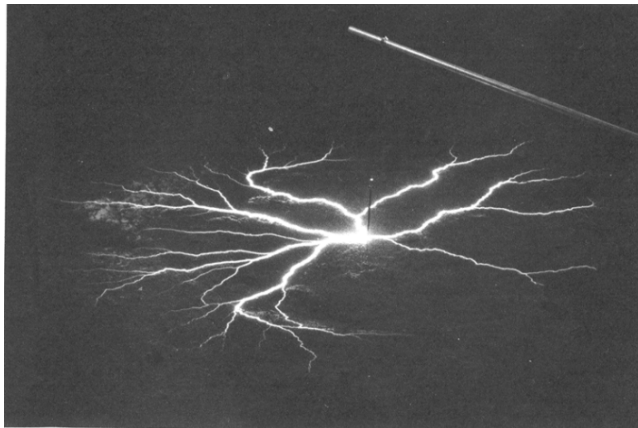
**Σχήμα 2.4** Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος.

Καθώς όλα τα στοιχειώδη κελύφη έχουν διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος για μία ορισμένη τιμή ρεύματος και χρόνου, κάθε κελύφος εντός της  $r_{cm}$  πρέπει να έχει διαφορετική ειδική αντίσταση. Η συνολική αντίσταση σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται αθροίζοντας τις στοιχειώδεις αντιστάσεις όλων των κελυφών κατά τις διάφορες φάσεις του ιονισμού τους. Ένας τέτοιος υπολογισμός μπορεί να γίνει πολύ εύκολα με χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Κατά τη δεκαετία του '90 διενεργήθηκαν πειράματα στη Φλόριδα και την Αλαμπάμα στα οποία καταγράφηκαν μέσω φωτογραφιών ακτινωτά νηματοειδή τόξα κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους με κέντρο το σημείο της εκφόρτισης (*Εικόνες 2.1 και 2.2*).



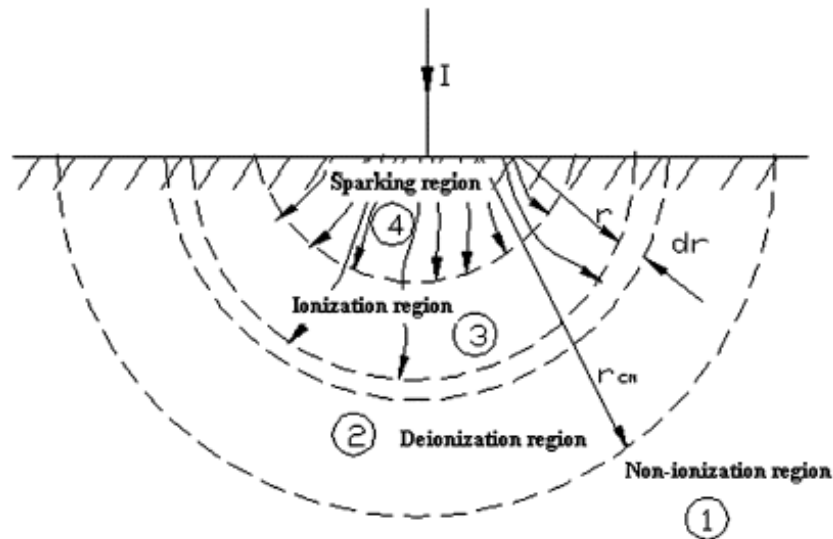
*Εικόνα 2.1* Επιφανειακές εκκενώσεις [18].



*Εικόνα 2.2* Επιφανειακές εκκενώσεις [18].

Από πειραματικά αποτελέσματα αλλά και αναλύσεις, οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι η διαδικασία της διάσπασης οδηγεί στη διαμόρφωση διακριτών τόξων τόσο μέσα στο έδαφος όσο και στην επιφάνειά του και είναι πιθανόν αυτά τα δύο φαινόμενα να οδηγούν στη μείωση της αντίστασης γείωσης [19]. Ο Song, κατόπιν διεξαγωγής πειραμάτων, τόσο σε εργαστηριακό, όσο και σε εξωτερικό χώρο, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, αλλά και από το μηχανισμό διάσπασης [20]. Επίσης, διεξήγαγε πειράματα με σκοπό τον καθορισμό των παραγόντων, που δημιουργούν διακριτά μονοπάτια διάσπασης ώστε να καταστεί δυνατή η επαλήθευση ενός μοντέλου ικανού να περιγράψει τη μεταβατική συμπεριφορά του εδάφους υπό την επίδραση υψηλών κεραυνικών ρευμάτων [21]. Βάσει των αποτελεσμάτων των νέων μελετών, οι J. Wang, A.C. Liew και M. Darveniza σε εργασία τους το 2005 [22] επέκτειναν το μοντέλο του 1974, εισάγοντας και την

περιοχή όπου εκδηλώνονται τόξα. Χάριν απλότητας θεώρησαν ότι οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ημισφαιρικές. Κατ' αυτόν τον τρόπο η συνολική αντίσταση μπορεί να υπολογισθεί αθροίζοντας το στοιχειώδη ημισφαιρικά κελύφη πλάτους  $dr$ . Στο **Σχήμα 2.5** παρουσιάζεται το ημισφαιρικό μοντέλο, γνωστό και ως μοντέλο Wang – Liew – Darveniza.



**Σχήμα 2.5** Μοντέλο Wang: (1) μη ιονισμένη περιοχή, (2) περιοχή απιονισμού, (3) περιοχή ιονισμού, (4) περιοχή τόξων [22].

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, καθώς το εγχεόμενο ρεύμα αυξάνεται και διαπερνά το έδαφος, η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους μεταβάλλεται ως εξής: όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή  $J < J_c$  δεν εκδηλώνονται τόξα στο έδαφος και η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή και ίση με  $\rho_{soil}$ .

Όταν η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί την κρίσιμη τιμή τότε μπορούν να θεωρηθούν δυο περιοχές: μία περιοχή, στην οποία εκδηλώνεται ο ιονισμός του εδάφους ( $r < r_{cm}$  (κρίσιμη απόσταση) και  $J \leq J_c < J_s$ ) και η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο (2.6), και μία περιοχή σπινθηρισμού ( $r < r_{cm}$  και  $J \geq J_s$ ), στην οποία η ειδική αντίσταση εδάφους μηδενίζεται. Παρουσιάζεται επομένως, η ανάγκη εισαγωγής μίας νέας σταθεράς, η οποία συσχετίζει την  $J_s$  με την  $J_c$ , όπου  $J_s$  είναι η πυκνότητα ρεύματος πάνω από την οποία εκδηλώνονται τόξα. Η σταθερά  $a$  ορίζεται ως εξής:

- i) Καθώς το ρεύμα αυξάνεται και διαπερνά το έδαφος, η σταθερά μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο (2.8):

$$a = a_0(1 - \lambda e^{-I^{\beta_1}}) \quad (2.8)$$

όπου  $I$  είναι το εγγερόμενο ρεύμα,  $a_0$  είναι η αρχική τιμή του  $a$ , ο όρος  $\beta_1$  περιλαμβάνεται στην ενεργειακή θεώρηση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του  $J_s$  τόσο πιο έντονα θα είναι τα τόξα και θα εκδηλώνονται σε μεγαλύτερη περιοχή. Με άλλα λόγια όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του εγγερόμενου ρεύματος τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η περιοχή εμφάνισης τόξων. Η σταθερά  $\lambda$  χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της χρονικής στιγμής που το  $a$  θα αρχίσει να μειώνεται.

Η παραπάνω συνθήκη (2.8) εφαρμόζεται μόνο για  $a > 1$ . Καθώς το  $a$  μειώνεται λόγω των τόξων και του ιονισμού, εκδηλώνονται τόξα και στην επιφάνεια του εδάφους. Για την περιγραφή αυτής της κατάστασης χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι:

$$\begin{aligned} a &= 1 + (e^{1/I})^{\beta_2} & (\alpha) \\ \beta_2 &= I(t - \Delta t) \ln(a_s - 1) & (\beta) \end{aligned} \quad (2.9)$$

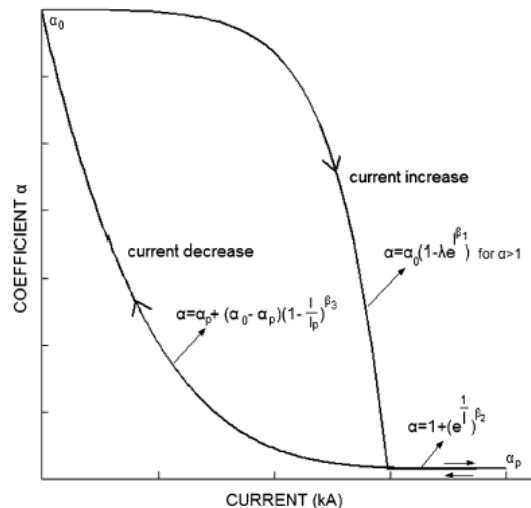
με  $a_s > 1$  και είναι η ελάχιστη τιμή που υπολογίζεται από τον (2.9(α)).

ii) Καθώς το ρεύμα μειώνεται από τη μέγιστη τιμή του, το  $a$  ανακτά την αρχική τιμή του σύμφωνα με τον τύπο:

$$a = a_p + (a_0 - a_p) \left( 1 - \frac{I}{I_p} \right)^{\beta_3} \quad (2.10)$$

όπου  $a_p$  είναι η τιμή του  $a$  που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα  $I_p$  και  $\beta_3$  είναι μια σταθερά προς προσδιορισμό. Η τιμή του  $\beta_3$  μεταβάλλεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρεύματος τόσο πιο αργά το  $a$  θα ανακτήσει την αρχική του τιμή ( $a_0$ ).

Στο **Σχήμα 2.6** παρουσιάζεται η συμπεριφορά του  $a$  καθώς το ρεύμα μεταβάλλεται.



**Σχήμα 2.6** Η μεταβολή του συντελεστή  $\alpha$  καθώς μεταβάλλεται το εγγεώμενο ρεύμα [22].

Εν συνεχεία, καθώς το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται μπορούν να θεωρηθούν 4 περιοχές:

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

Η περιοχή 2, όπου  $r < r_{cm}$  και  $J < J_c$ . Σε αυτήν την περιοχή η πυκνότητα του ρεύματος είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή ιονισμού και η τιμή της ειδικής αντίστασης ανακτά την αρχική τιμή της σύμφωνα με τον τύπο (2.7).

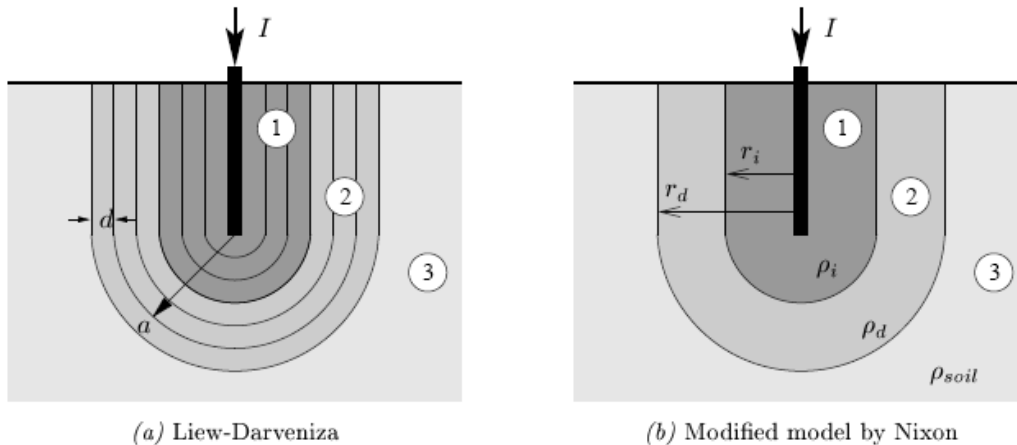
Η περιοχή 3, όπου  $r < r_{cm}$  και  $J_s > J \geq J_c$ . Σε αυτήν την περιοχή θα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα ο ιονισμός μέχρι τη στιγμή που  $J = J_c$  οπότε και θα ξεκινήσει η διαδικασία απιονισμού.

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

Μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι η εισαγωγή και άλλων παραμέτρων, που θα πρέπει να προσδιοριστούν, καθιστώντας το δύσχρηστο.

Το 2006 ο K.J. Nixon [16] πρότεινε μια απλοποίηση του μοντέλου των Liew – Darveniza (1974). Το μοντέλο των Liew - Darveniza υπέθετε ότι η ζώνη ιονισμού (απιονισμού αντίστοιχα) αποτελείται από στοιχειώδη κελύφη, στα οποία η πυκνότητα ρεύματος μεταβάλλεται κάθε στιγμή, και συνεπώς για τον υπολογισμό της συνολική αντίστασης της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η αντίσταση κάθε κελύφους. Ο Nixon εκτίμησε ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) μπορεί να θεωρηθεί ίδια σε όλο τον όγκο της ζώνης και μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα ρεύματος που ρέει στο εξωτερικό

όριο της ζώνης. Στο **Σχήμα 2.7** μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαφορά μεταξύ του μοντέλου των Liew και Darveniza [12] και του μοντέλου που πρότεινε ο Nixon.



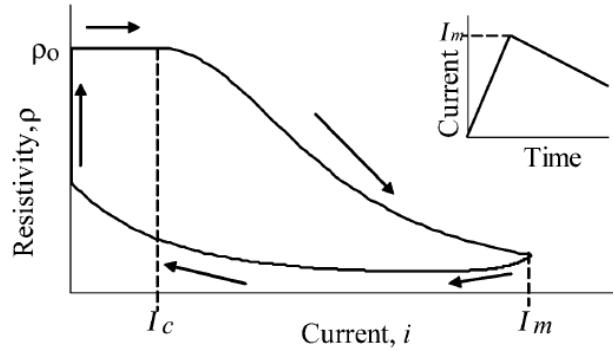
**Σχήμα 2.7** Διαφορές μεταξύ του μοντέλου των Liew – Darveniza (2.7a) και του μοντέλου του Nixon (2.7b).  
(1) Περιοχή ιονισμού, (2) Περιοχή απιονισμού, (3) Περιοχή όπου δεν έχει λάβει χώρα ο ιονισμός [16].

Όπως προέκυψε από συγκρίσεις που έκανε ο Nixon με το μοντέλο των Liew και Darveniza αλλά και με πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο του είναι αρκετά ακριβές.

### 2.2.3 Μοντέλο Διατήρησης Ενέργειας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του ιονισμού έχει προταθεί από τους Sekiocka et al [23]. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας εφόσον η ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με τις εκφορτίσεις στον αέρα. Ο Hayashi [24] περιγράφει την ανάπτυξη των ζωνών ιονισμού και αντιστοιχεί τα χαρακτηριστικά τους με αυτά της διάσπασης στον αέρα. Στην εργασία [6] επιβεβαιώνεται η ομοιότητα μεταξύ του ιονισμού του εδάφους και της διάσπασης του ιονισμένου αέρα. Συνεπώς, ο ιονισμός του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος εκφόρτισης και μπορεί να παρομοιαστεί με το φαινόμενο τόξου που εμφανίζεται στο εσωτερικό των διακοπών. Έτσι, η αποκτηθείσα εμπειρία στη μοντελοποίηση των τόξων σε διακόπτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού στο έδαφος και τον προσδιορισμό της ζώνης ιονισμού. Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην περιοχή, όπου λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους.





**Σχήμα 2.8** Μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του ρεύματος [23].

Με βάση την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου και την εξίσωση του Mayr [25] προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση (2.11):

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{Q_0} (\mu i - P) \xrightarrow{\frac{\mu i - P}{Q_0} = -a, \text{ σταθερά}} \rho = \rho_0 \exp(-at) \quad (2.11)$$

όπου  $\mu$  είναι η τάση εκφόρτισης

$i$  είναι το ρεύμα εκφόρτισης

$Q$  είναι η αποθηκευμένη ενέργεια

$P$  είναι οι απώλειες ισχύος

$\rho = K \exp\left(\frac{Q}{Q_0}\right)$  είναι η αγωγιμότητα του τόξου (Sm)

$t$  είναι ο χρόνος

$K$  (Sm) και  $Q_0$  (J/m) είναι σταθερές.

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 μάλιστα 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. Αυτό οδηγεί στην απώλεια ισχύος. Έτσι λοιπόν, η απώλεια ενέργειας στο προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη προς την επιφάνεια κάθε τμήματος σύμφωνα με το μοντέλο του Cassie [26] για το τόξο και να περιγραφεί από την εξίσωση

$$P = \lambda S \quad (2.12)$$

όπου  $\lambda$  (W/m<sup>3</sup>) σταθερά.

Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, η ειδική αντίσταση του εδάφους  $\rho$  όταν το εγχεόμενο ρεύμα υπερβεί μια κρίσιμη τιμή  $I_c$  αρχίζει να μειώνεται. Ωστόσο, μετά τη μείωση του ρεύματος

η ειδική αντίσταση δεν αρχίζει να αυξάνεται άμεσα, αλλά παρουσιάζεται μία υστέρηση λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας  $E_n - N$ , όπου  $E_n = \int u i dt$  (2.13) (J/m) και  $N = \int p dt$  (2.14) (J/m), που εξακολουθεί να είναι αποθηκευμένη σε κάθε στοιχειώδες κέλυφος. Η ειδική αντίσταση αρχίζει να αυξάνεται για να ανακτήσει την αρχική τιμή της κατά τον απιονισμό του εδάφους όταν  $u i < P$ .

Θεωρώντας  $i = g u$  η γενική έκφραση του προτεινόμενου μοντέλου είναι:

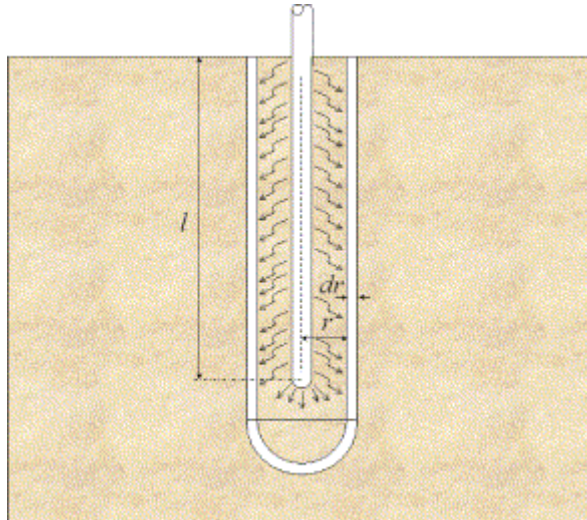
$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \left[ 1 + \frac{1}{g_0 Q_0} \int i^2 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt \right]^{-1} \quad (2.15)$$

όπου ο χρόνος  $t$  είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει ιονισμός σε ένα στοιχειώδες κέλυφος και  $\tau = Q_0 / P$  μια χρονική σταθερά που εκφράζει την επαναφορά της τιμής της ειδικής αντίστασης στην αρχική της τιμή ( $\rho_0$ ).

Πλεονέκτημα του προτεινόμενου μοντέλου είναι ότι δίδεται φυσική σημασία στα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της αντίστασης γείωσης, εξαιτίας του ιονισμού και του απιονισμού του εδάφους.

Οι Cooray et al. [27] εισήγαγαν ένα φυσικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων. Στο μοντέλο τους λαμβάνουν υπ' όψιν τη δημιουργία ιονισμένων οχετών εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση αυτών των οχετών, ως συνάρτηση της ροής του ρεύματος μέσω αυτών, διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή θερμότητας και την απαγωγή της από τους οχετούς και την εξαρτημένη από τη θερμοκρασία αγωγιμότητα του αέρα. Φυσικά, όπως σε κάθε μοντέλο έτσι και στο συγκεκριμένο, οι συγγραφείς υιοθέτησαν κάποιες προσεγγίσεις, χάριν απλότητας. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες:

- Οι ισοδυναμικές επιφάνειες που περιβάλλουν την εμπηγμένη ράβδο μπορούν να απεικονιστούν από κυλινδρικά τμήματα με μία ημισφαιρική απόληξη, που διατηρούνται και κατά τη διάρκεια του ιονισμού του αέρα στο χώμα.



**Σχήμα 2.9** Ισοδυναμικές επιφάνειες που περιβάλλουν τη θαμμένη ράβδο [27].

- Η διαδικασία ιονισμού σε έναν δεδομένο στοιχειώδες κελυφός θα αρχίσει όταν το ηλεκτρικό πεδίο σε αυτό ξεπεράσει μία ορισμένη κρίσιμη τιμή. Δεδομένου ότι κάθε κελυφός υποτίθεται ότι οριοθετείται από τις ισοδυναμικές επιφάνειες, ο ιονισμός πραγματοποιείται σε ολόκληρο το κελυφός ταυτόχρονα.
- Η διαδικασία διάσπασης στο χώμα είναι δυνατό να αποτελείται από μια σειρά ηλεκτρικών εκκενώσεων που πραγματοποιούνται στα κενά αέρα μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Στην πραγματικότητα, ένα μέρος αυτής της ενέργειας διασπά μόρια αζώτου και οξυγόνου, ένα μέρος προκαλεί ιονισμό και ένα άλλο μέρος διεγείρει τα μόρια του αέρα.
- Ο όγκος του θερμαινόμενου αέρα υποτίθεται ότι είναι ένα ποσοστό  $F$  του συνολικού όγκου της άμμου, στον οποίο πραγματοποιείται ο ιονισμός, και παραμένει σταθερός καθώς τα φαινόμενα εκφόρτισης εξελίσσονται ακτινωτά γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση απαιτεί την αύξηση του αριθμού των οχετών εκκένωσης, καθώς η εκκένωση απομακρύνεται από τον αγωγό. Αυτό δεν απέχει από την πραγματικότητα, επειδή, γενικά, οι ηλεκτρικές εκκενώσεις διακλαδίζονται και επεκτείνονται πλευρικά γύρω από τα ηλεκτρόδια υψηλής τάσεως. Εντούτοις, το μέγεθος  $F$  δεν χρειάζεται να παραμείνει σταθερό καθώς η εκκένωση αναπτύσσεται. Η ροή ρεύματος μέσω αυτού του θερμανθέντος όγκου του αέρα θα συμβάλει στην έλκυση περισσότερης ενέργειας προκαλώντας περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας του αέρα. Επίσης, υποτίθεται ότι η απαγωγή θερμότητας από τον θερμανθέντα όγκο στο περιβάλλον χώμα είναι ανάλογη προς τον όγκο και τη θερμοκρασία του θερμανθέντος αέρα. Τέλος, έχει γίνει η υπόθεση ότι η έλκυση ενέργειας από τους οχετούς στον περιβάλλοντα χώρο είναι ανάλογη προς τον θερμανθέντα όγκο αέρα και τη θερμοκρασία

του (έστω  $S$  η σταθερά αναλογίας). Εάν οι διάμετροι των καναλιών εκκένωσης είναι ίδιες σε ολόκληρη την περιοχή ιονισμού, τότε ο ιονισμένος όγκος αερίου είναι ανάλογος προς την επιφάνεια των καναλιών εκφόρτισης. Αυτό επικυρώνει την υπόθεση, επειδή η έκλυση θερμότητας είναι ανάλογη προς την επιφάνεια των οχετών εκκένωσης. Στην πραγματικότητα, η έκλυση θερμότητας από τα κανάλια είναι ανάλογη προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των οχετών εκκένωσης και των μορίων του εδάφους με τα οποία έρχεται σε επαφή ο οχετός εκκένωσης. Επομένως, η υπόθεση ισχύει μόνο εάν η θερμότητα, που απορροφάται από το χώμα, απάγεται γρήγορα από την περιοχή επαφής, έτσι ώστε η θερμοκρασία του εδάφους στα σημεία επαφής να παραμένει μικρότερη από τη θερμοκρασία των οχετών.

Στο μοντέλο τα  $T_0$ ,  $F$  και  $S$  είναι οι παράμετροι, που πρέπει να καθοριστούν συγκρίνοντας τα πειραματικά στοιχεία με τις προσομοιώσεις.

Στην παράγραφο, που ακολουθεί, περιγράφεται αναλυτικά το προτεινόμενο μοντέλο.

Έστω ένας όγκος πάχους  $dr$  που βρίσκεται σε μια ακτινωτή απόσταση  $r$  από τη θαμμένη ράβδο. Η πυκνότητα του ρεύματος που περνά μέσω αυτού του στοιχείου σε χρόνο  $t$  δίνεται από τη σχέση (2.16):

$$J(t) = \frac{I(t)}{2\pi r l + 2\pi r^2} \quad (2.16)$$

όπου  $I(t)$  είναι το ρεύμα που εισέρχεται στη ράβδο

$l$  το μήκος της ράβδου.

Υποτίθεται ότι ο ιονισμός του αέρα σε αυτό το στοιχείο θα αρχίσει όταν η πυκνότητα του ρεύματος που περνά μέσω αυτού υπερβεί μια κρίσιμη τιμή ( $J_c$ ). Αυτή δίνεται από τη σχέση (2.3).

Για μια δεδομένη τιμή κορυφής του εισερχομένου ρεύματος  $I_p$ , η κρίσιμη ακτίνα  $r_c$ , πέρα από την οποία δεν πραγματοποιείται ιονισμός του χώματος υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης (2.17):

$$J_c = \frac{I_p}{2\pi r_c l + 2\pi r_c^2} \quad (2.17)$$

Τότε η αντίσταση των στοιχείων του όγκου που βρίσκονται πέρα από αυτήν την κρίσιμη ακτίνα δίνεται από την (2.18):

$$dR_s = \frac{dr}{\sigma_s (2\pi r l + 2\pi r^2)} \quad \text{για } r \geq r_c \quad (2.18)$$

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 τις τιμές  $t \leq t_0$ , η αντίσταση του στοιχείου δίνεται από την (2.19):

$$dR(t < t_0) = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi rl + 2\pi r^2)} \text{ για } r \leq r_c \quad (2.19)$$

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 ( $2\pi rl \, dr + 2\pi r^2 \, dr$ ) αυξάνεται σε κάποια τιμή  $T_0$ . Κατά συνέπεια, η αντίσταση του στοιχείου για  $t=t_0$  θα δίνεται από τη σχέση (2.20):

$$dR(t = t_0) = \frac{dr}{(\sigma_s + \sigma_a(T_0)F\{T_0 / T_a\})(2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad (2.20)$$

όπου  $\sigma_a$  είναι η αγωγιμότητα του αέρα, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας

$T_a$  είναι η θερμοκρασία του όγκου του αέρα πριν από τον ιονισμό.

Η μεταβολή της αγωγιμότητας του αέρα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας προκύπτει από τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία [28], [29]. Στην παραπάνω εξίσωση θεωρείται ότι το  $F$  είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα και ότι ο θερμός αέρας βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση.

Στο χρονικό διάστημα  $t=t_0$  μέχρι  $t=t_0+dt$  εκλύεται στον στοιχειώδη όγκο θερμότητα Joule, που δίνεται από τη σχέση (2.21):

$$dH = \frac{I^2(t_0)drdt}{(\sigma_s + \sigma_a(T_0) \cdot F\{T_0 / T_a\})(2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad (2.21)$$

ενώ η ενέργεια που εκλύεται από τον όγκο του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο δίνεται από τη σχέση (2.22).

$$dU = SF\{T_0 / T_a\}(2\pi rl + 2\pi r^2)T_0 drdt \quad (2.22)$$

Επομένως, η αύξηση της θερμοκρασίας του όγκου του αέρα στο χρονικό διάστημα  $dt$  υπολογίζεται από τη σχέση (2.23):

$$dT = \frac{dH - dU}{F\{T_0 / T_a\}(2\pi rl + 2\pi r^2)dr\delta(T)C_p} \quad (2.23)$$

όπου  $\delta(T)$  είναι η πυκνότητα του αέρα σε θερμοκρασία  $T$  και πίεση ίση με την ατμοσφαιρική

$C_p$  είναι η θερμοχωρητικότητα του αέρα σε σταθερή πίεση.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί ώστε να εκτιμηθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του όγκου του αέρα ως συνάρτηση του χρόνου και να υπολογιστεί, στη συνέχεια, η χρονική μεταβολή της αντίστασης του όγκου του αέρα. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται σε κάθε

στοιχειώδη όγκο από  $r=r_0$  (όπου  $r_0$  είναι η ακτίνα του αγωγού) μέχρι  $r=\infty$ . Συνεπώς, η συνολική αντίσταση του ηλεκτροδίου συναρτήσει του χρόνου,  $R(t)$ , μπορεί έτσι να ληφθεί από τη σχέση (2.24):

$$R(t) = \int_{r_0}^{R_s} dR(t)dr + \int_{R_s}^{\infty} dR_s dr \quad (2.24)$$

## Βιβλιογραφία

- [1] J.H. Scott, “Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soils,” Note 18, Electromagnetic Pulse Theoretical Notes, AFWL EMP 2-1, April, 1971.
- [2] C.L. Longmire and K.S. Smith, “A Universal Impedance for Soils,” DNA report 3788T, October 1975.
- [3] J.W. Erler and D.P. Snowden, “High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4564- 4567.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] T.M. Flanagan, C.E. Mellon, R. Denson, R.E. Leadon, “electrical Breakdown Properties of Soil,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-28, No.6, December 1981, pp.4432- 4439.
- [8] T.M. Flanagan, C.E. Mallon, R. Denson, “Electrical Breakdown Characteristics of Soil,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-29, No.6, December 1982, pp.1887- 1890.
- [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] K.J. Nixon. "The lightning transient behavior of a driven rod earth electrode in multi-layer soil," Διδακτορική Διατριβή, Ιούλιος 2006
- [17] M. Loboda, Z. Pochanke, "Experimental Study of Electric Properties of Soil with Impulse Current Injections," 18th International Conference on Lightning Protection, 1985, Munich, pp. 191-198.
- [18] A.C. Liew, "Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines," Ph.D., University of Queensland, Australia, 1972
- [19] V. A. Rakov, M.A. Uman, K.J. Rambo, M.I. Fernandez, R.J. Fisher, G.H. Schnetzer, R. Thottappillil, A. Eybert-Berard, J.P. Berlandis, P. Lalande, A. Bonamy, P. Laroche, and A. Bondiou-Clergerie, "New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama," Journal of Geophysics. Res., Vol. 103, No. D12, pp.14.117–14.130, 1998.
- [20] Z. Song, M. R. Raghuvver, J. He, "Influence of the nature of impulse current propagation in soils on transient impedance characteristics," Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 739–742, 2000.
- [21] Z. Song, H. Jingliang, and M. R. Raghuvver, "Experimental study on lightning breakdown channels in the soils," presented at the IEE High Voltage Engineering Symposium, 1999, No. 467, pp. 2.426–2.429.



- [22] J. Wang, A.C.Liew, M. Darveniza, "Extension of Dynamic model of Impulse Behavior of concentrated Grounds at High Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20,no. 3, July 2005, pp.2160-2165.
- [23] 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.
- [24] M. Hayashi, "Observation of streamer in the soil by surge current," JIEE, Vol 87-14, pp 133-141,1967
- [25] O. Mayr, "Beitrage zur Theorie des statschen und des dynamischen Lichtbogens, Arch. für Elektrotechnik, Vol. 37, pp. 588–608, 1943.
- [26] A. M. Cassie, "Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory", CIGRE, Paris, France, Report No. 102, 1939.
- [27] 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.
- [28] J.M. Yos, Transport properties of nitrogen, hydrogen, and air to 30,000 K, Tech. Mem. AVCO-RAD-TM-63-1, AVCO Corp., March, 1963.
- [29] J.E. Borovsky, "An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: guided wave propagation along conducting cylindrical channels," Journal of Geophysics. Res. 100 (1995), pp. 2697–2726.

# Κεφάλαιο 3

## Πειραματική διάταξη

### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός, που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, που αφορούν τη διάσπαση του εδάφους.

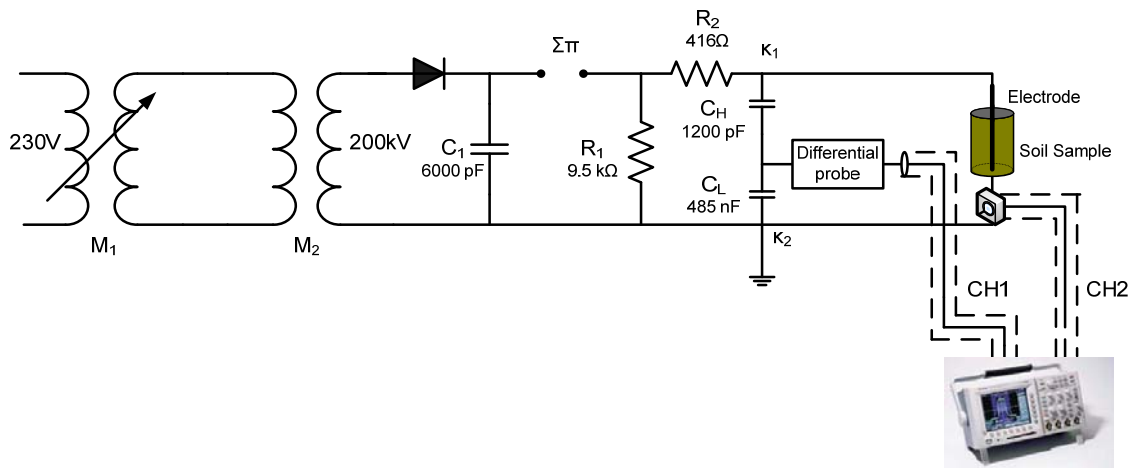
### 3.2 Εξοπλισμός

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

- λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας
- τράπεζα χειρισμών
- μηχανισμός μεταβολής αποστάσεως σφαιρών
- σταθεροποιητής τάσης
- διαφορικός καταμεριστής
- αμπεροσιμπίδα
- παλμογράφος
- ομοαξονικά καλώδια
- κλωβός Faraday
- υγρόμετρο – θερμόμετρο

### 3.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο **Σχήμα 3.1** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης.



*Σχήμα 3.1* Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης για τη διεξαγωγή των πειραμάτων



*Εικόνα 3.1* Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης

### 3.3.1 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 υψηλής εναλλασσόμενης, συνεχούς και κρουστικής τάσης με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον **Πίνακα 3.1**.

*Πίνακας 3.1* Χαρακτηριστικά της λυόμενης κρουστικής γεννήτριας της Messwandler-Bau GmbH Bamberg

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

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  $-10^{\circ}\text{C}$  έως και  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Για τη διεξαγωγή του πειράματος η γεννήτρια διαμορφώθηκε, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.2**, σε μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια, που παράγανε κρουστική τάση θετικής και αρνητικής πολικότητας. Η τάση του δικτύου πόλεως (230V) φθάνει στο πρωτεύον του μετασχηματιστή  $M_1$ , μέσω του οποίου μπορούμε να ρυθμίζουμε τη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή  $M_2$  με σχέση μεταφοράς 230V/200V, μεταθέτοντας τη λήψη του δευτερεύοντος του  $M_1$ .



**Εικόνα 3.2** Λυόμενη μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια

Στη συνέχεια, η υψηλή εναλλασσόμενη τάση που παίρνουμε ανορθώνεται μέσω του ανορθωτικού στοιχείου, το οποίο περιέχει αντίσταση προστασίας, και μετατρέπεται σε συνεχή τάση  $U_-$ , η οποία φορτίζει τον πυκνωτή  $C_1$ . Μετά τη φόρτιση του πυκνωτή  $C_1$  ο σπινθηριστής  $\Sigma\pi$ , τίθεται σε κοινή τάση με τον πυκνωτή. Όπως είναι προφανές το διάκνeno 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  $n_1$  και  $n_2$ .

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 τον 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  $C_1$ .

Σημειώνεται, ότι η παραγόμενη κρουστική τάση δεν 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 λέγεται συντελεστής χρησιμοποίησεως και ορίζεται:

$$\eta = \frac{U_{k(\max)}}{U_-} \quad (3.1)$$

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 υψηλότερος 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 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 λέγεται κρουστική γη και συνδέεται με το δίκτυο E.P. μέσω αντίστασης προστασίας (της τάξης των  $M\Omega$ ) 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 χωρητικότητων της γεννήτριας θα δημιουργούνταν βρόχοι μικρής αντίστασης στους οποίους θα επάγονταν υψηλές τάσεις μεγάλης συχνότητας, οι οποίες θα υπερτίθενταν στην κρουστική τάση και θα την παραμόρφωναν σημαντικά.

### 3.3.2 Τράπεζα χειρισμών

Οι χειρισμοί της όλης διάταξης, καθώς και η παρακολούθηση της λειτουργίας, είναι δυνατοί από την τράπεζα ελέγχου και χειρισμών, **Εικόνα 3.3**. Η τράπεζα περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Buttons για να τίθεται υπό τάση και εκτός τάσης η γεννήτρια.
- Buttons για τον έλεγχο του κινητήρα που αυξομειώνει το διάκενο του σπινθηριστή.
- Buttons 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.
- Διακόπτη ταχείας θέσεως εκτός τάσης σε περίπτωση κινδύνου και ηλεκτρονόμος υπερεντάσεως.



**Εικόνα 3.3** Τράπεζα ελέγχου και χειρισμών

Για να τεθεί σε λειτουργία η τράπεζα χειρισμών θα πρέπει να πραγματοποιηθούν τα εξής βήματα, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.3**.

- Ανοίγουμε το μεταγωγικό διακόπτη δύο θέσεων (O, I) (1).
- Γυρίζουμε το κλειδί (2).
- Οπλίζουμε τη τράπεζα πατώντας διαδοχικά τα button (3) και (4).
- Αυξομειώνουμε την τάση με το Variac (5).
- Αποκόπτουμε την τάση με το button stop της τράπεζας (6).
- Το μέγεθος του διάκενου ρυθμίζεται με τα δύο button χρώματος κίτρινου (7).

Για να τεθεί εκτός λειτουργίας η τράπεζα χειρισμών θα πρέπει να ακολουθηθεί η εξής διαδικασία:

- Πατάμε το button (6) της τράπεζας για να αποκόψουμε τελείως την τάση.
- Πατάμε τα button (3) και (4) για να απενεργοποιήσουμε την τράπεζα.
- Μειώνουμε την τάση με το Variac (5) μέχρι να μηδενιστεί εντελώς.
- Γυρίζουμε το κλειδί (2).
- Στρέφουμε το μεταγωγικό διακόπτη στη θέση “O” (1).

### 3.3.3 Μηχανισμός μεταβολής αποστάσεως σφαιρών

Η απόσταση μεταξύ των σφαιρών του σπινθηριστή μεταβάλλεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα ο οποίος ελέγχεται από τη τράπεζα χειρισμών πιέζοντας το κατάλληλο button. Έτσι η απόσταση μεταξύ των σφαιρών μεταβάλλεται από 0 έως 80mm.

### 3.3.4 Σταθεροποιητής τάσης

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



*Εικόνα 3.4* Σταθεροποιητής τάσης

### 3.3.5 Διαφορικός καταμεριστής [2]

Τα διαφορικά probe είναι συσκευές με τις οποίες οι παλμογράφοι μπορούν να καταγράψουν αρκετά υψηλές τιμές τάσεων, που μπορεί να εμφανιστούν στα κυκλώματα. Έτσι λοιπόν, εκτείνεται η περιοχή μέτρησης των παλμογράφων στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, στους αναστροφείς, στους ελέγχους ταχύτητας των μηχανών και σε αρκετές άλλες εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή φαίνονται στο παρακάτω **Πίνακα 3.2**, ενώ στην **Εικόνα 3.5** παρουσιάζεται το όργανο.

**Πίνακας 3.2** Χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή

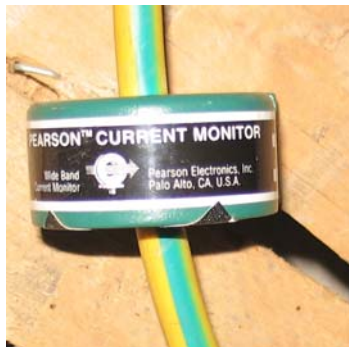
Εξασθένιση	1:100/1000
Εύρος ζώνης	DC - 50MHz (-3db)
Ακρίβεια	$\pm 2\%$
Σύνθετη αντίσταση εισόδου	10MΩ//7pF ως προς γη
Τάση εισόδου -Διαφορικό εύρος	$\pm 700V(DC+ Peak AC)$ ή 500Vrms για 1/100 $\pm 7000V(DC+ Peak AC)$ ή 5000Vrms για 1/1000
-Μέγιστη τάση	$\pm 7000V(DC+ Peak AC)$ ή 2500Vrms για 1/100 και 1/1000 $\pm 7000V(DC+ Peak AC)$ ή 5000Vrms για 1/100 και 1/1000
Τάση εξόδου -Μέγιστο πλάτος	$\pm 7V$ (μέσα σε 50kΩ ή περισσότερο)



*Εικόνα 3.5 Διαφορικός καταμεριστής MD200*

### 3.3.6 Αμπεροτσιμπίδα

Η αμπεροτσιμπίδα που χρησιμοποιήσαμε στη πειραματική μας διάταξη για να μετρήσουμε το ρεύμα που διέρρεε το κύκλωμά μας είναι η Pearson Current Monitor Model 8260, με λόγο μετασχηματισμού 0,002V/A και φαίνεται στην *Εικόνα 3.6*.



*Εικόνα 3.6 Αμπεροτσιμπίδα*

### 3.3.7 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

Ο παλμογράφος [3] αυτός, που είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix, λειτουργεί με εύρος ζώνης στα 500MHz, διαθέτει 2 κανάλια, οθόνη διαστάσεως 6 in(165mm) και ανάλυσης 640×480 και 3,5' δισκέτα για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 3052 παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3.7*, ενώ τα χαρακτηριστικά του στον *Πίνακα 3.3* που ακολουθεί.



**Πίνακας 3.3** Χαρακτηριστικά παλμογράφου

Κανάλια εισόδου	2
Εύρος ζώνης	500MHz, 5mV/div έως 1V/div
Χρόνος ανόδου	0,7ns
Ακρίβεια DC κέρδους	± 2%
Ζεύξη εισόδου	DC, AC ή GND
Αντίσταση εισόδου	1MΩ ± 1% παράλληλα με 13pF
Ευαισθησία εισόδου στα 50Ω	1mV/div έως 1V/div
Κάθετη ανάλυση	9 bit ανάλυση, ξεχωριστή για κάθε κανάλι
Μέγιστη τάση εισόδου, 50Ω	5 Vrms με κορυφές ≤ ± 30
Ταχύτητα δειγματοληψίας	100 S/s έως 5 GS/s



**Εικόνα 3.7** Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

### 3.3.8 Ομοαξονικά καλώδια

Για τη σύνδεση της πειραματικής διάταξης με τα κανάλια (Ch1 και Ch2), του παλμογράφου χρησιμοποιήσαμε ομοαξονικά καλώδια με χαρακτηριστικά [4], που φαίνονται στον παρακάτω

**Πίνακας 3.4.**

**Πίνακας 3.4** Χαρακτηριστικά ομοαξονικού καλωδίου

Εσωτερικός αγωγός	Πλεγμένος χαλκός, 7×1.0mm
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%
Περιβλήμα	Μαύρο PVC, υν-αντίστασης
Εξωτερική διάμετρος	10.2 mm
Σύνθετη αντίσταση	50hm
Χωρητικότητα	78pF/m
$F_{max}$	6GHz
DC-αντίσταση κεντρικού αγωγού	3.3Ωhm/km
DC-αντίσταση εξωτερικού αγωγού	8.4Ωhm/km
Εξασθένηση 1GHz/100m	14.2dB
Εξασθένηση 1GHz/100ft	4.33dB

### 3.3.9 Θερμόμετρο – Υγρόμετρο

Για τη καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασίας και θερμοκρασίας) κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε το υγρόμετρο - θερμομόμετρο TESTO 625, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω *Εικόνα 3.8*.



*Εικόνα 3.8* Θερμόμετρο – Υγρόμετρο

## 3.4 Μετρήσεις

### 3.4.1 Προετοιμασία χώματος

Κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας επεξεργαστήκαμε ένα δείγμα χώματος.

Αρχικά ψήσαμε το δείγμα μας σε φούρνο στους 100°C, έτσι ώστε να επιτύχουμε τη ξήρανση τους. Εν συνεχεία, κοσινίσαμε τα δείγματά μας για να τα καθαρίσουμε από τις περιττές προσμίξεις και για να επιτευχθεί ομοιογένεια.

Για να επιτύχουμε κάθε φορά τα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας του δείγματός μας (5, 10 και 15%) προσδίδαμε τόση ποσότητα νερού όση ήταν η αναλογία του ποσοστού υγρασίας ως προς το βάρος του ξηρού χώματος.

### 3.4.2 Δοκίμια

Το δείγμα χώματος που χρησιμοποιήσαμε τοποθετήθηκαν εντός κυλινδρικού δοχείου. Ο κύλινδρος ήταν φτιαγμένος από σίδηρο, ενώ οι βάσεις του ήταν ξύλινες. Στο κέντρο του έφερε χάλκινο ηλεκτρόδιο σταθερής διατομής (0,5 cm), το οποίο έφτανε και ακουμπούσε την κάτω βάση του κυλίνδρου ενώ προεξείχε από την πάνω. Στον *Πίνακα 3.5* δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις διαστάσεις του κυλίνδρου, καθώς και του ηλεκτροδίου.

Κύλινδρος	Μήκος Κυλίνδρου		Διάμετρος Κυλίνδρου		Εσωτερικό Ηλεκτρόδιο	
	Χωρίς Βάσεις $l_2$	Με Βάσεις $l_2'$	Εσωτερική $D_2$	Εξωτερική $D_2'$	Μήκος $l_1$	Διάμετρος $D_1$
<b>A</b>	59,5cm	61,5cm	14,9cm	15,9cm	79cm	0,5cm

**Πίνακας 3.5** Διαστάσεις Κυλίνδρου και Ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ο κύλινδρος, τοποθετείτο κατακόρυφα. Για διαφορετικές τιμές υγρασίας του δοκιμίου έγιναν μετρήσεις τόσο με θετική όσο και με αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης.

### 3.4.3 Διαδικασία μέτρησης

Τα βήματα που ακολούθησαμε για να συνδέσουμε τα τμήματα της πειραματική μας διάταξη και εν συνεχεία να τη θέσουμε σε λειτουργία για να πάρουμε τις πειραματικές μας μετρήσεις είναι τα ακόλουθα:

- Συνδέουμε το διαφορικό καταμεριστή και την αμπεροτσιμπίδα στο Ch1 και Ch2 του παλμογράφου, αντίστοιχα.
- Αφού συνδέσουμε στη διάταξη το διαφορικό καταμεριστή και το βάλουμε στη τροφοδοσία, ελέγχουμε ότι λόγος είναι στο 1/100 και το ανοίγουμε.
- Ελέγχουμε ότι όλες οι γειώσεις είναι σωστά συνδεδεμένες.
- Τοποθετούμε δισκέτα στον παλμογράφο για την αποθήκευση των μετρήσεων.
- Ανοίγουμε το διακόπτη ασφαλείας στο κλωβό Faraday και θέτουμε σε λειτουργία το παλμογράφο.
- Ελέγχουμε ότι ο γειωτής δεν ακουμπάει τη διάταξη.
- Θέτουμε σε λειτουργία το σταθεροποιητή τάσης (διακόπτης ON).
- Ανοίγουμε την τράπεζα χειρισμών, όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 3.3.2

Μετά το πέρας των μετρήσεων και την καταγραφή τους αποσυνδέουμε τη πειραματική μας διάταξη πραγματοποιώντας τα εξής βήματα:

- Γειώνουμε τη διάταξη.
- Κλείνουμε τον παλμογράφο.
- Αποσυνδέουμε τη τράπεζα όπως έχουμε περιγράψει στην παράγραφο 3.3.2.
- Κλείνουμε το σταθεροποιητή τάσης (διακόπτης OFF).
- Αποσυνδέουμε το διαφορικό καταμεριστή τόσο από τη τροφοδοσία όσο και από το κύκλωμα.

## Βιβλιογραφία

- [1] Δήμητρα Σαμαρά, «Πειραματική μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διπλωματική Εργασία.
- [2] Differential Probe, MD 200 User Manual, Version 1.01 Apr2003.
- [3] Digital Phosphor Oscilloscopes, Tektronix TDS3000 Series, User Manual.
- [4] [www.ssb.de](http://www.ssb.de)

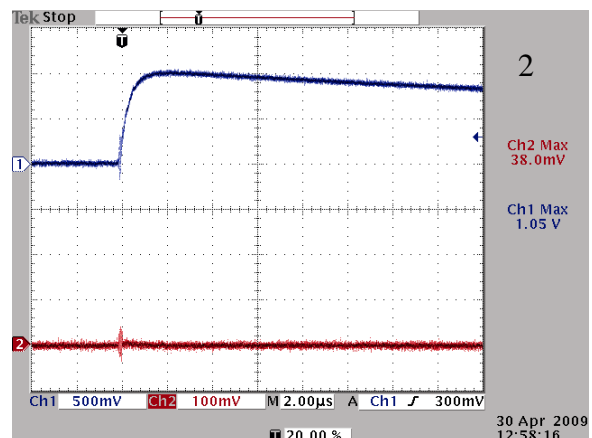
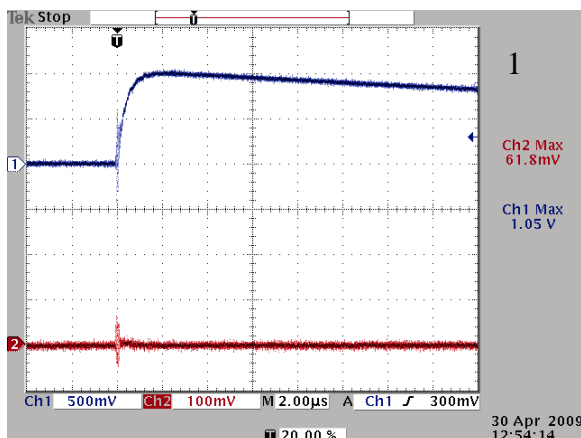
# Κεφάλαιο 4

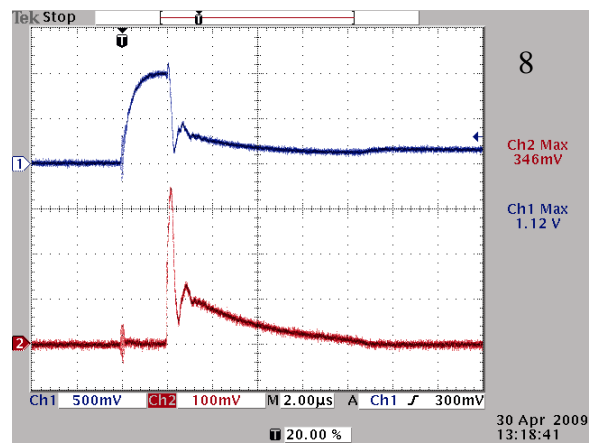
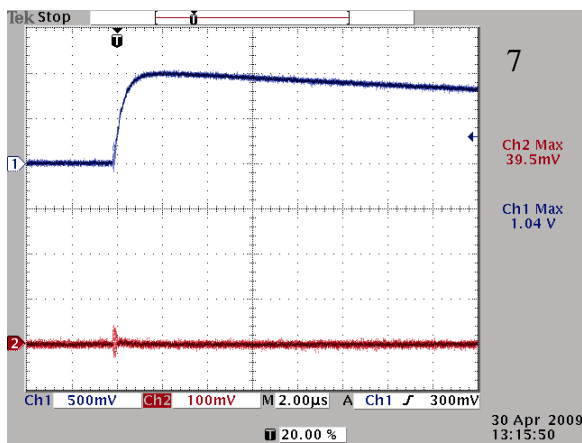
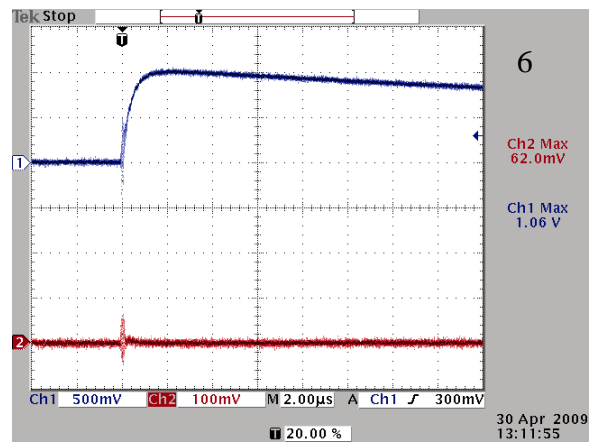
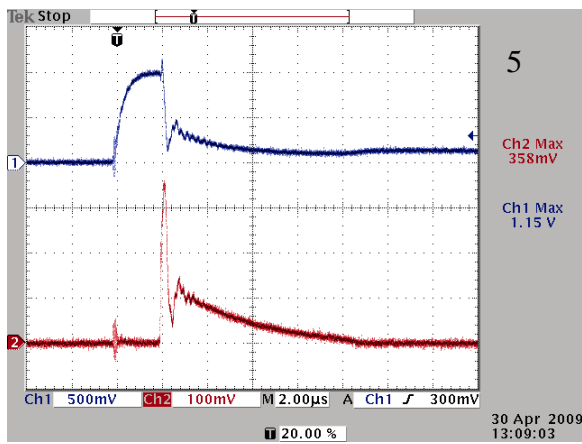
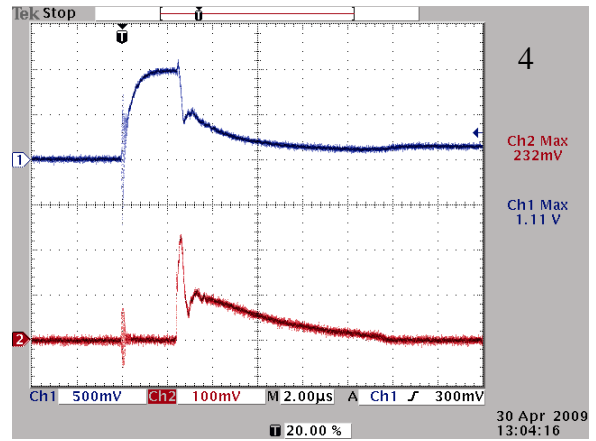
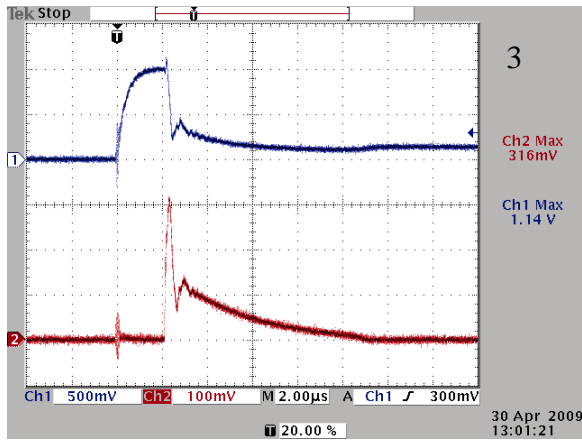
## Παλμογραφήματα

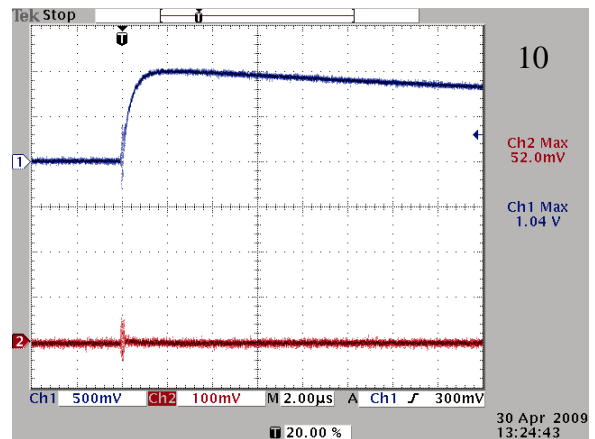
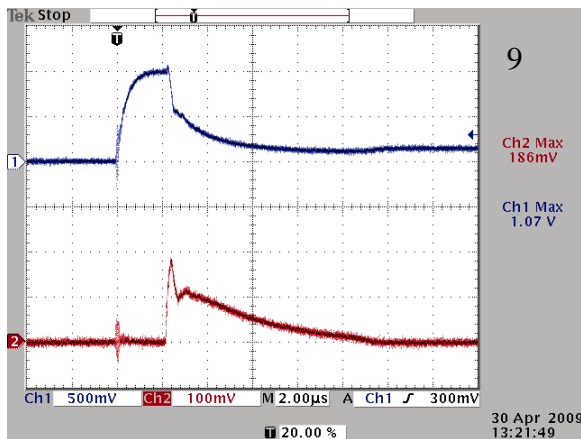
### 4.1 Παλμογραφήματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και να προσδιοριστεί η κρίσιμη πεδιακή ένταση  $E_C$ . Ο ιονισμός του εδάφους εντοπίζεται όταν, στα παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος, υπάρχει απότομη κατά απόλυτη τιμή μείωση της τάσης και ταυτόχρονα απότομη, κατά απόλυτη τιμή, αύξηση του ρεύματος. Για το λόγο αυτό, καταγράψαμε με τη βοήθεια του διαφορικού του probe την κρουστική τάση (Ch1 του παλμογράφου) και με τη βοήθεια της αμπεροτσιμπίδας τη μορφή του κρουστικού ρεύματος (Ch2 του παλμογράφου). Τα πειράματα έγιναν τοποθετώντας το χώμα στον κύλινδρο εσωτερικής διαμέτρου 14,6cm για τρία διαφορετικά ποσοστά υγρασίας 0, 5 και 10% τόσο με θετική όσο και με αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης.

#### 4.1.1 Παλμογραφήματα με θετική πολικότητα και 0% ποσοστό υγρασίας του χώματος

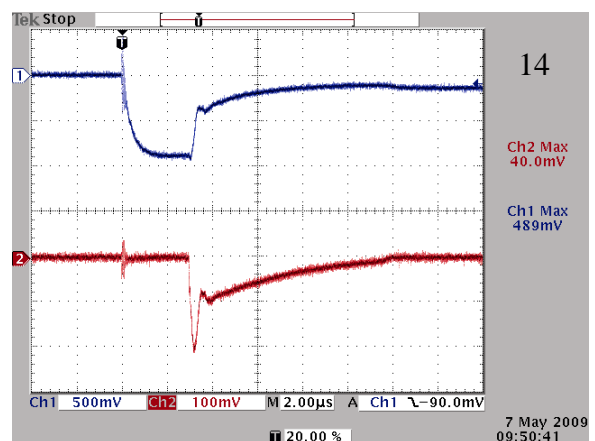
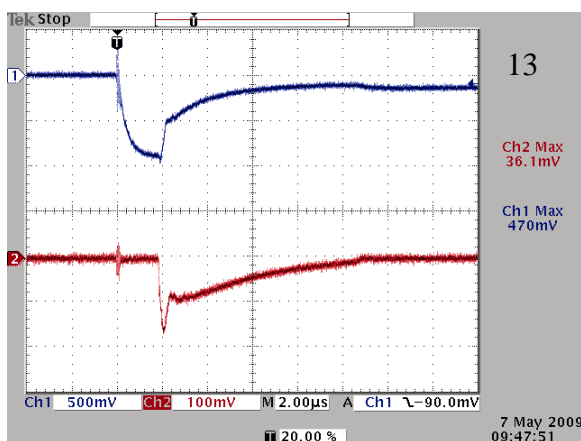
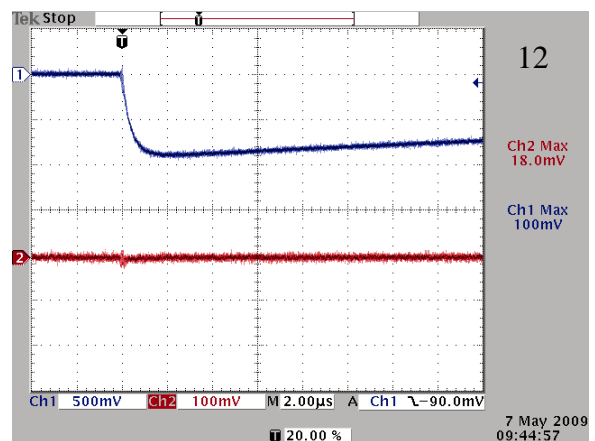
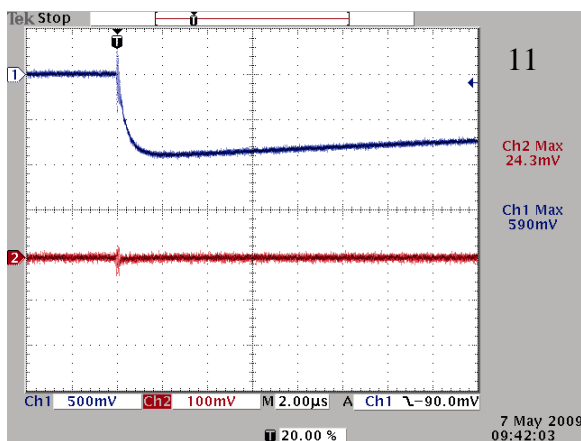


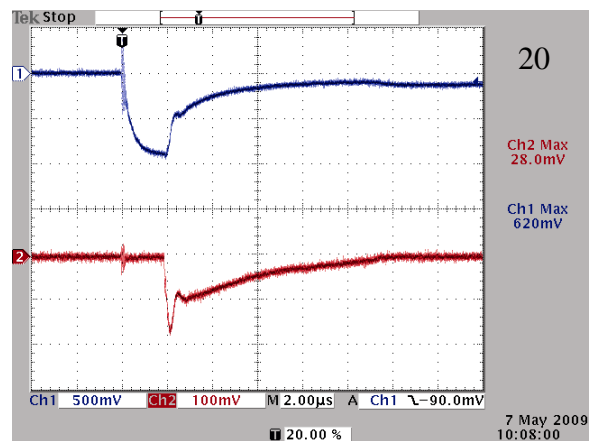
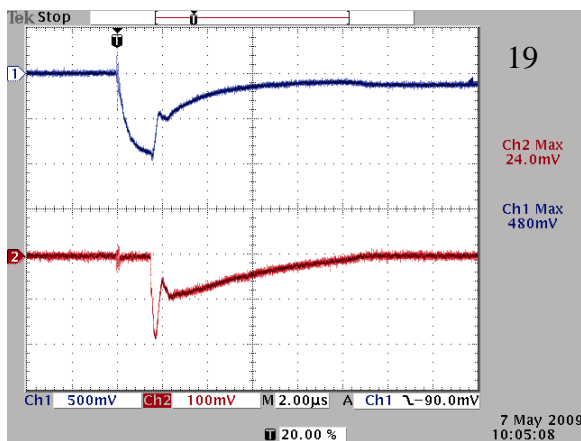
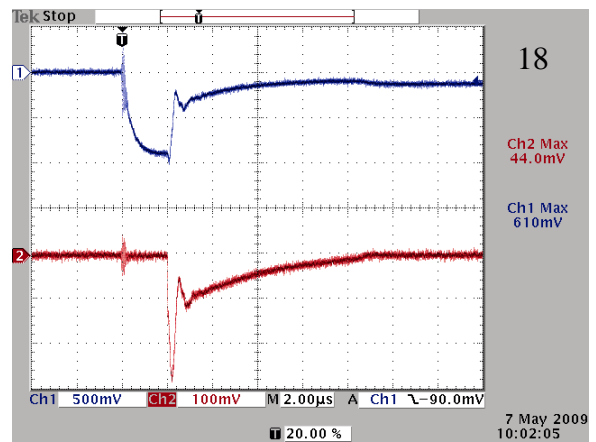
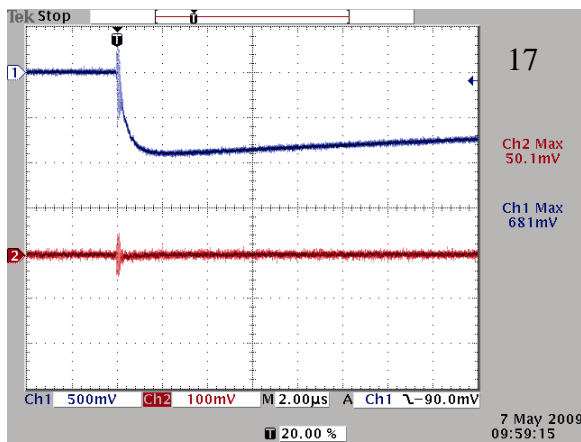
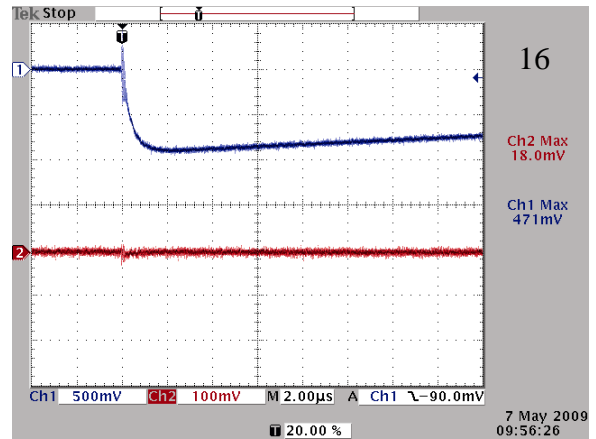
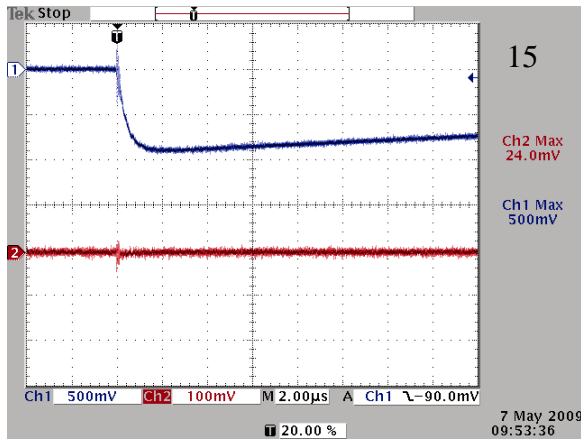




Σχήμα 4.1 0% υγρασία – θετική πολικότητα – διάκενο σπινθηριστή = 1,7cm

#### 4.1.2 Παλμογραφήματα με αρνητική πολικότητα και 0% ποσοστό υγρασίας του χώματος

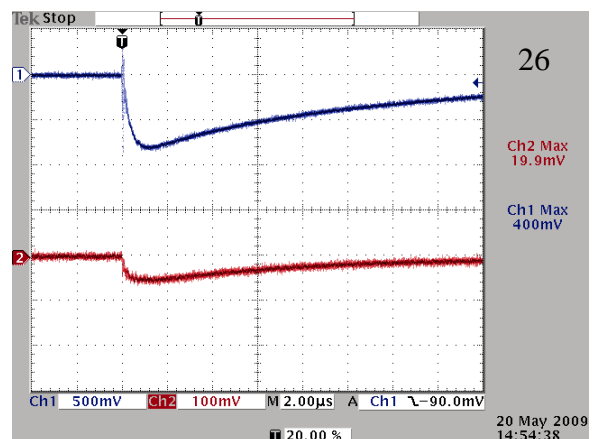
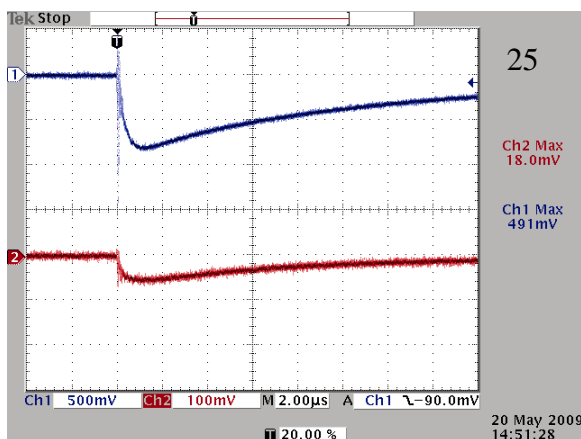
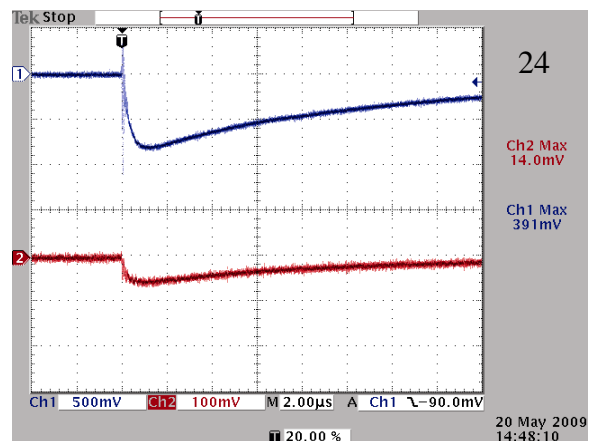
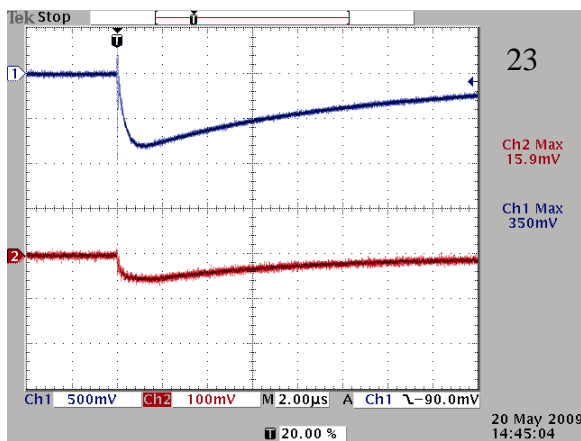
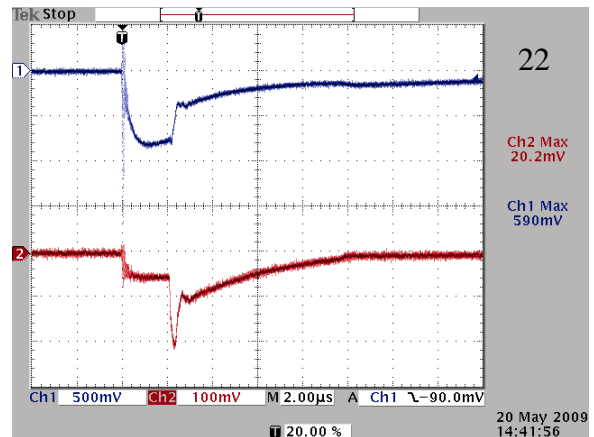
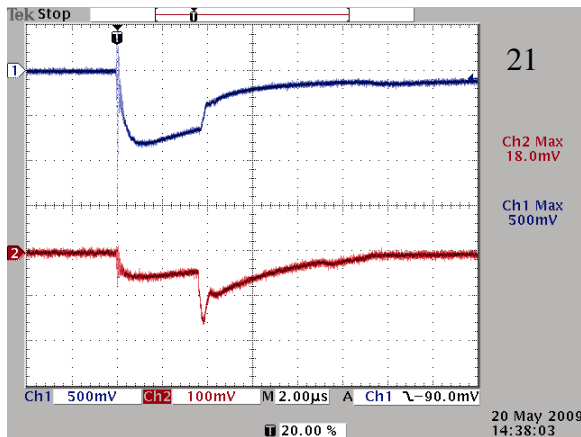


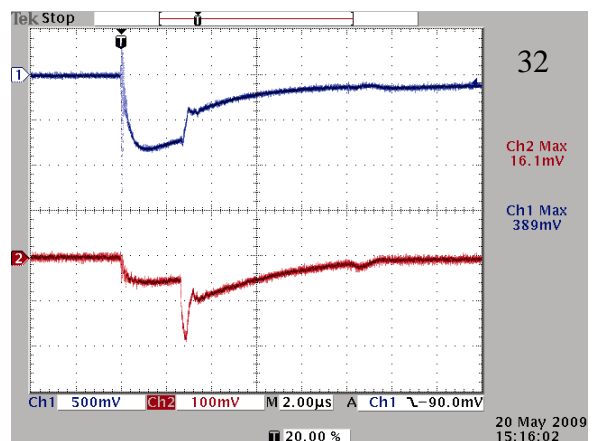
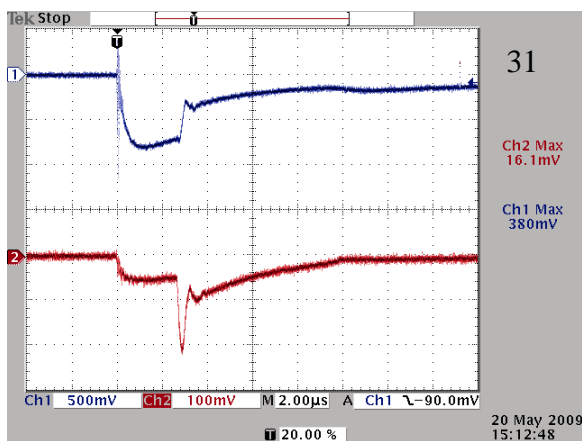
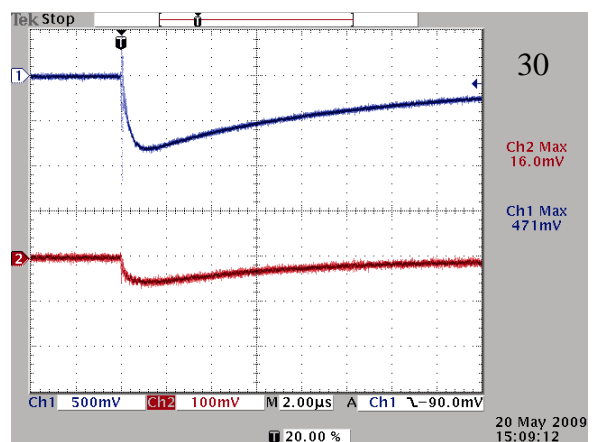
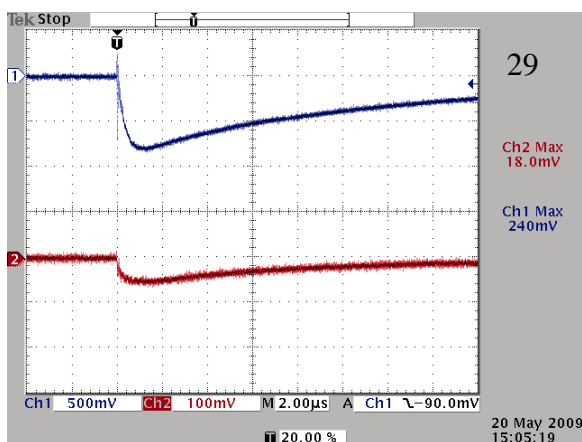
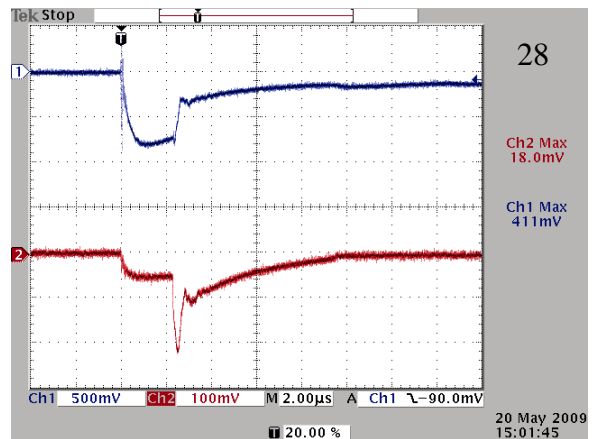
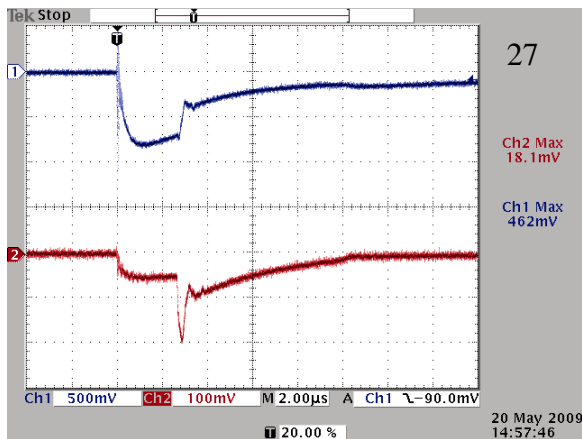


Σχήμα 4.2 0% υγρασία – αρνητική πολικότητα – διάκενο σπινθηριστή = 1,54cm



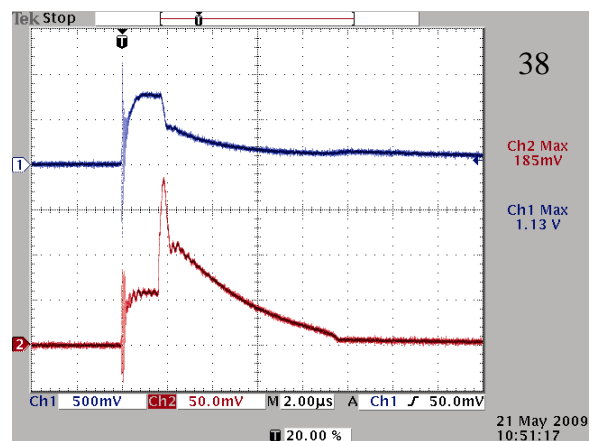
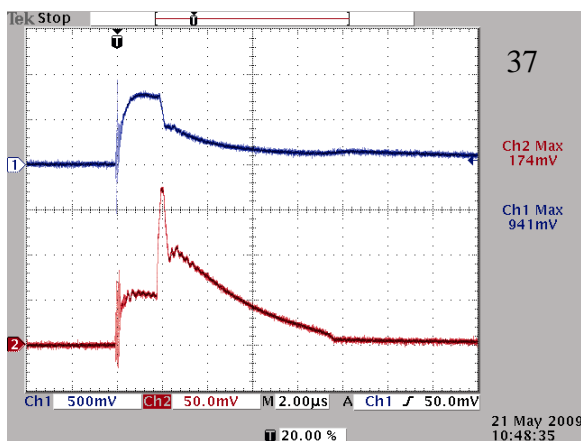
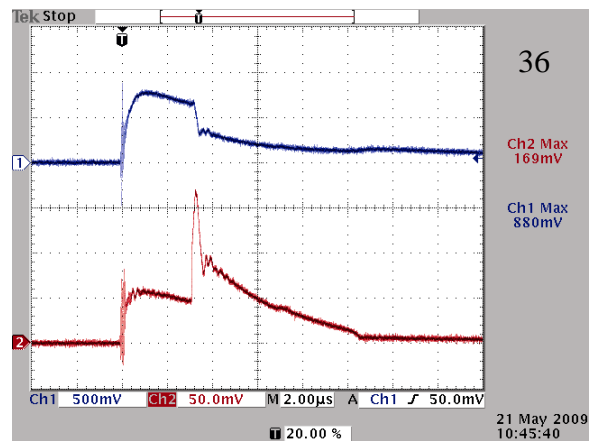
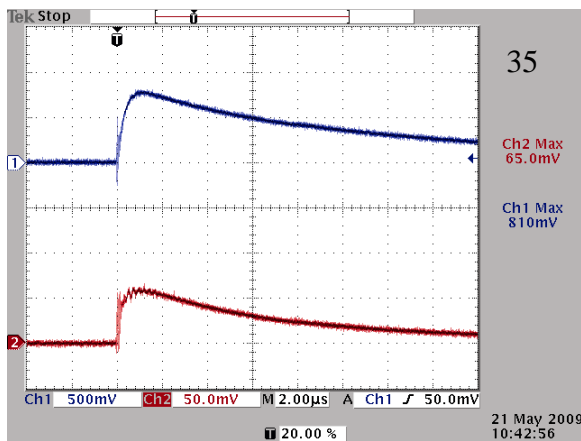
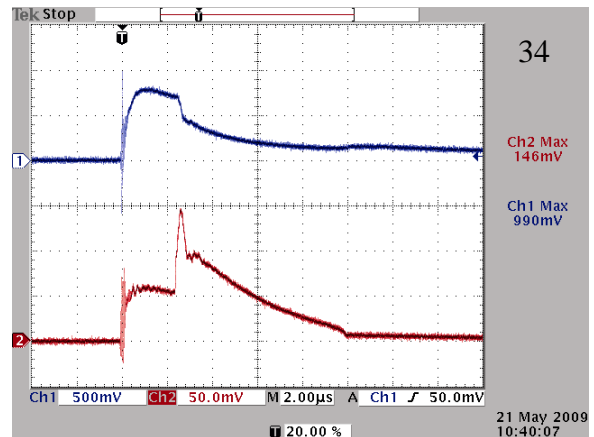
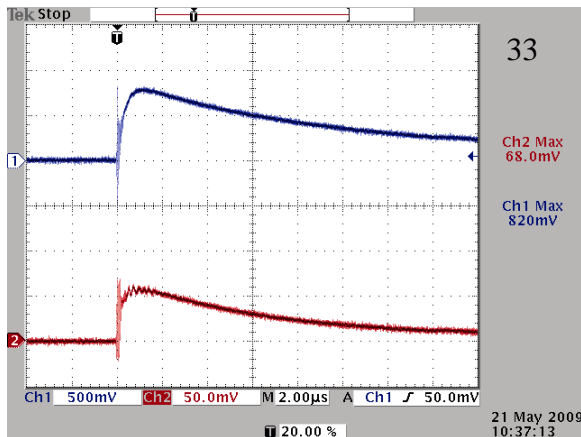
#### 4.1.3 Παλμογραφήματα με αρνητική πολικότητα και 5% ποσοστό υγρασίας του χώματος

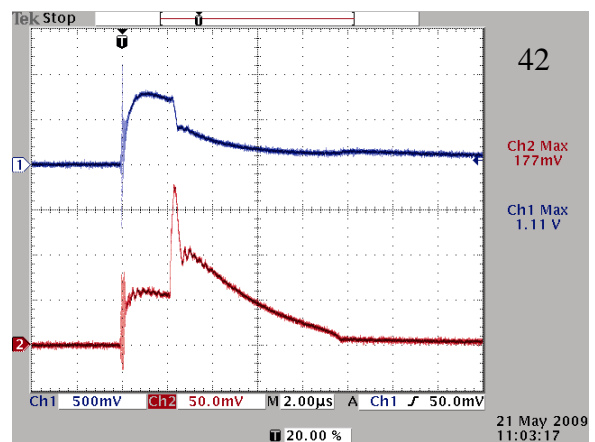
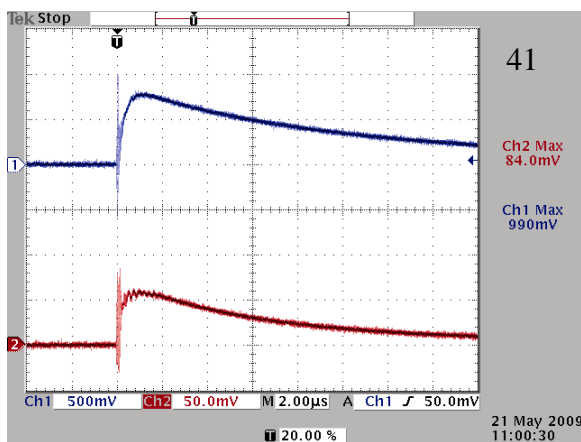
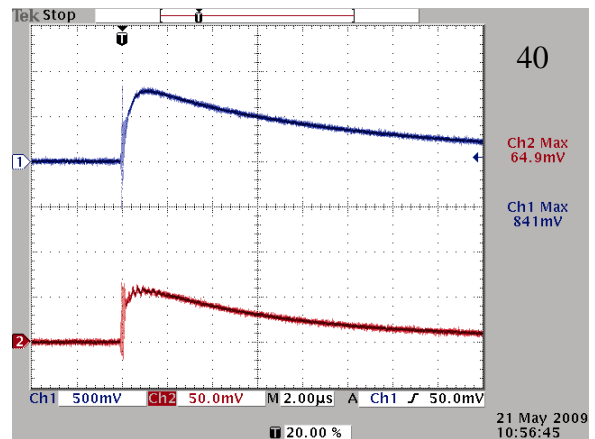
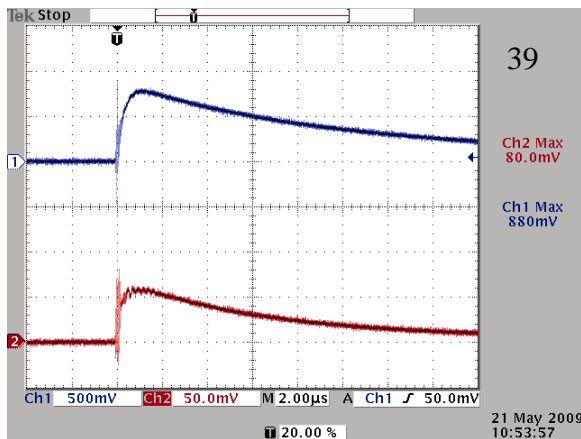




Σχήμα 4.3 5% υγρασία – αρνητική πολικότητα – διάκενο σπυθηριστή = 1,95cm

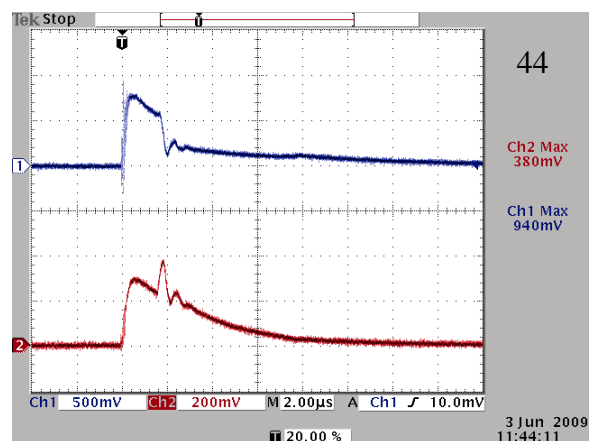
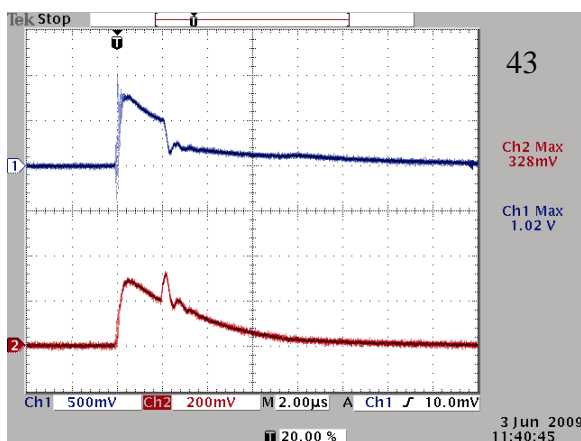
#### 4.1.4 Παλμογραφήματα με θετική πολικότητα και 5% ποσοστό υγρασίας του χώματος

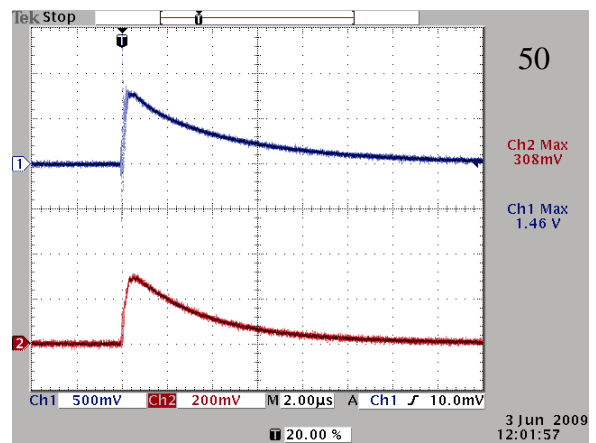
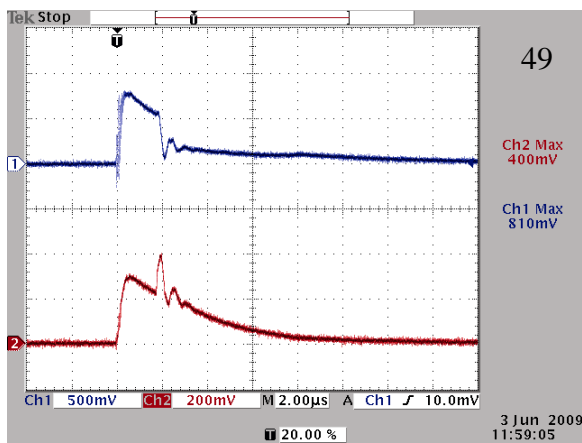
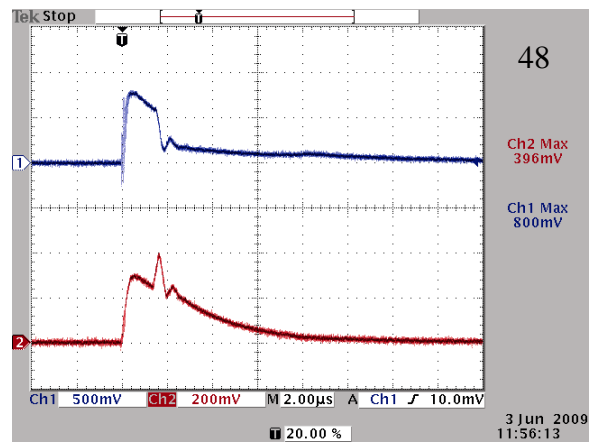
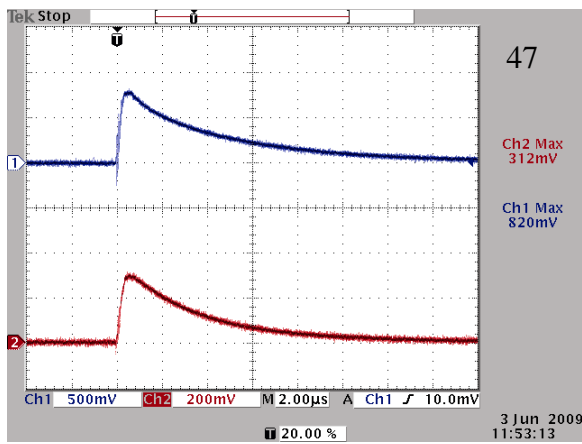
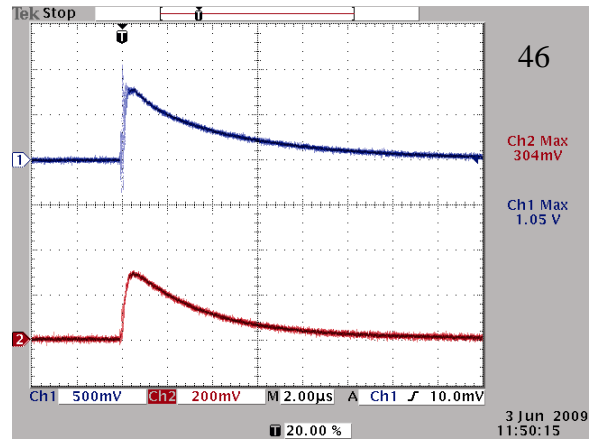
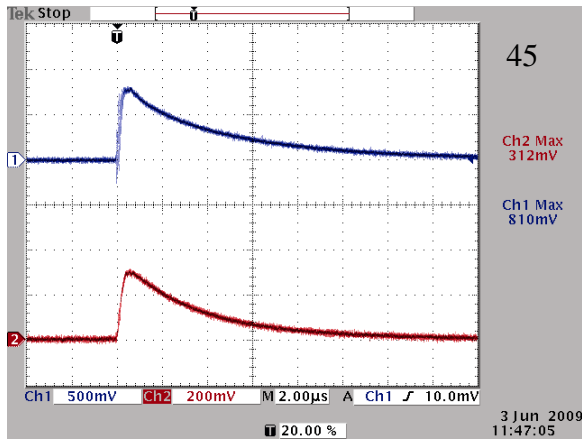


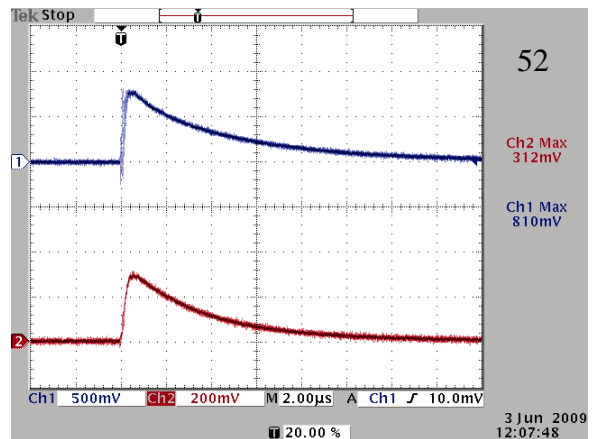
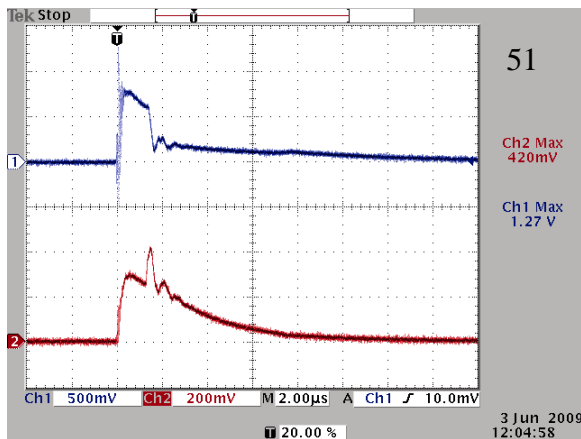


Σχήμα 4.4 5% υγρασία – θετική πολικότητα – διάκενο σπινθηριστή = 1,95cm

#### 4.1.5 Παλμογραφήματα με θετική πολικότητα και 10% ποσοστό υγρασίας του χώματος

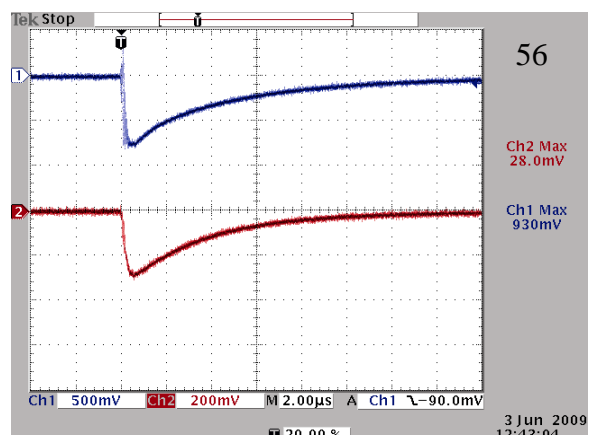
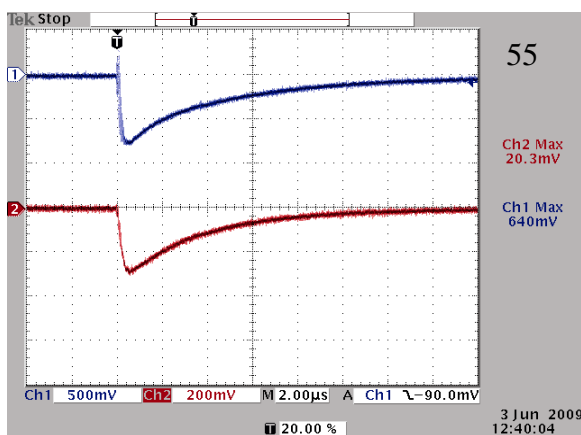
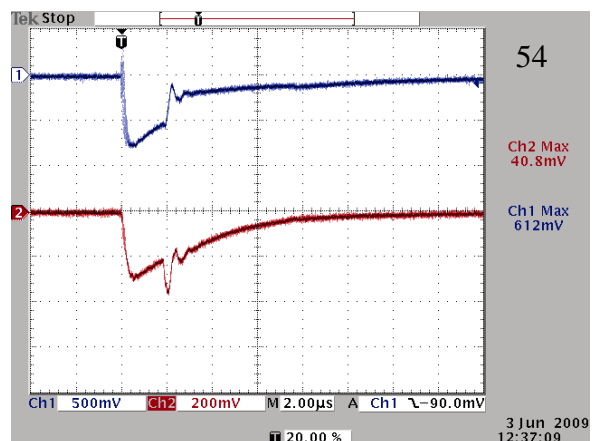
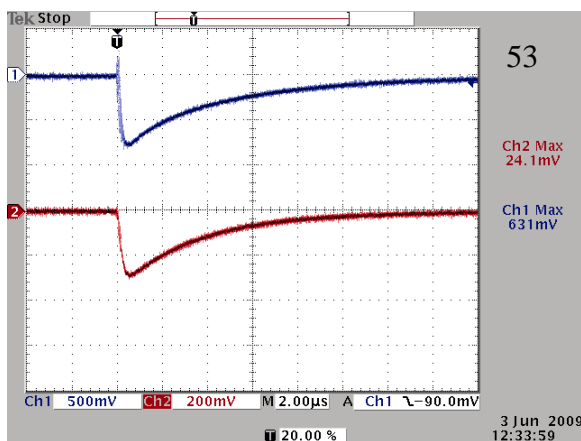


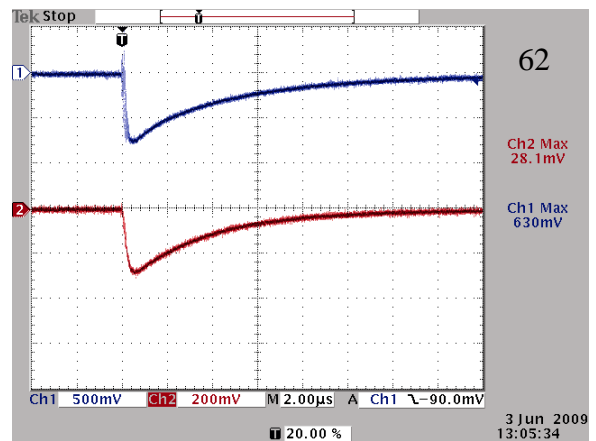
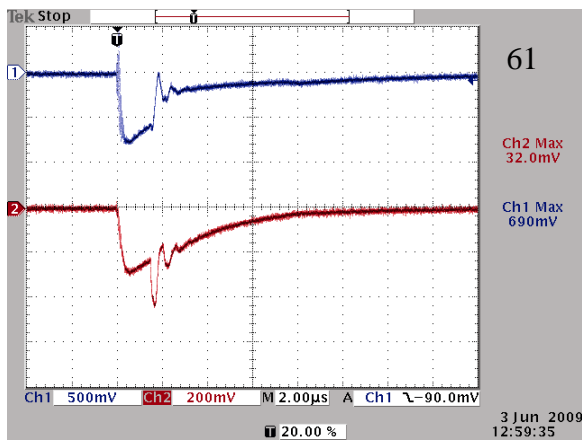
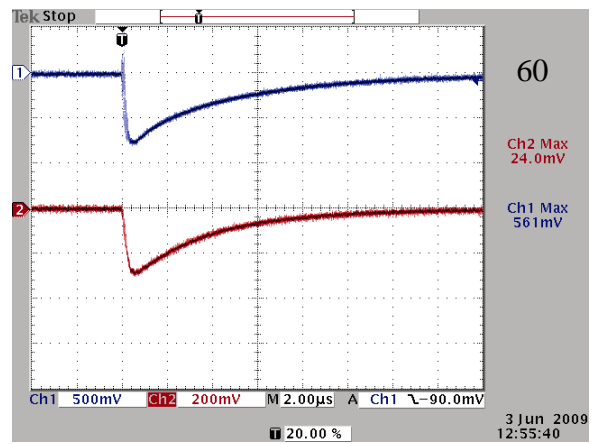
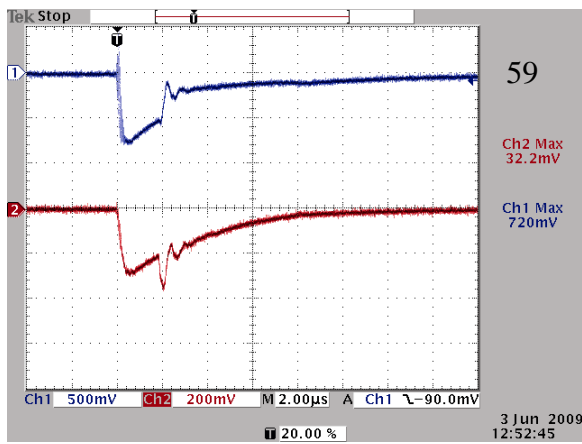
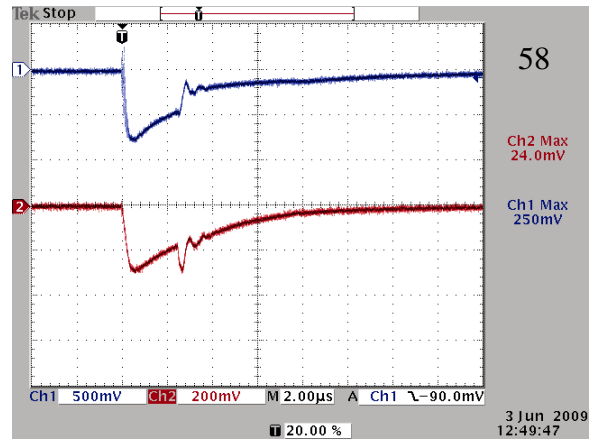
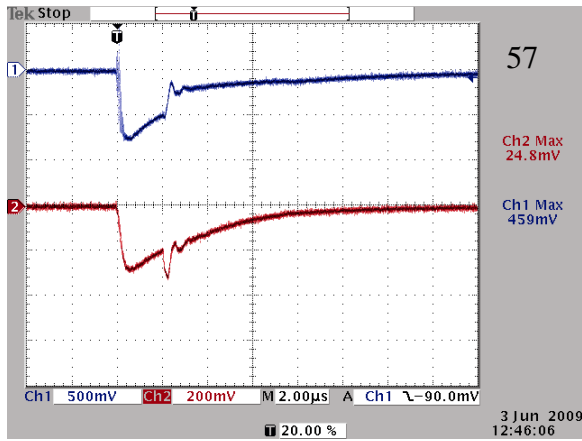


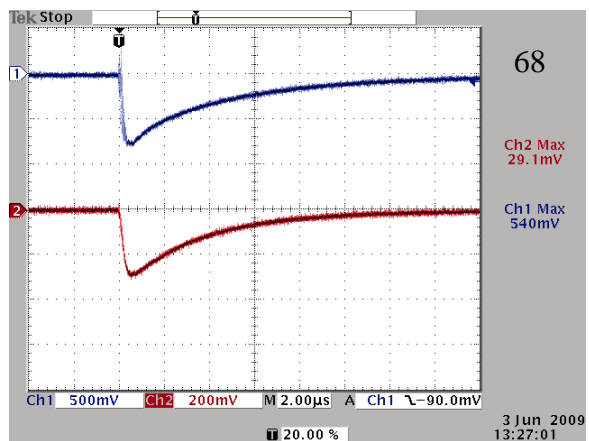
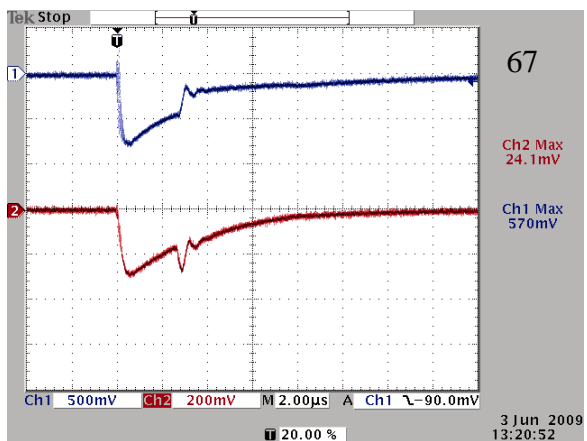
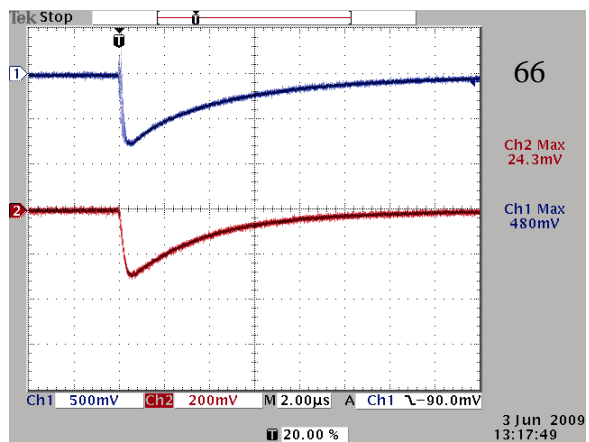
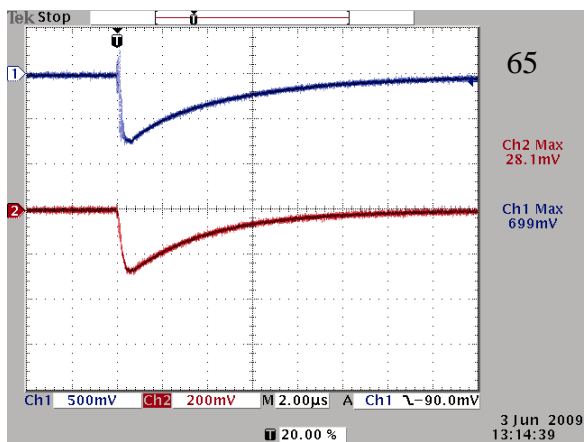
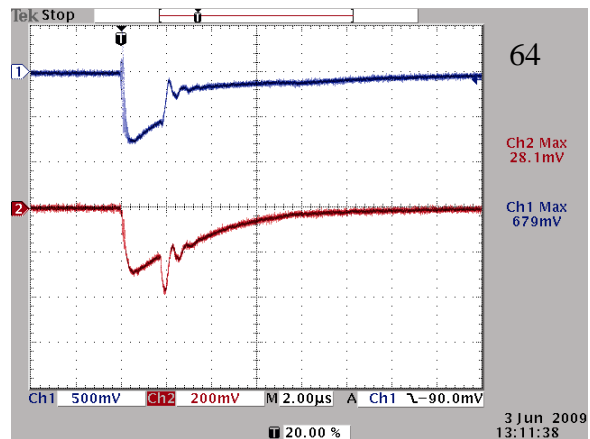
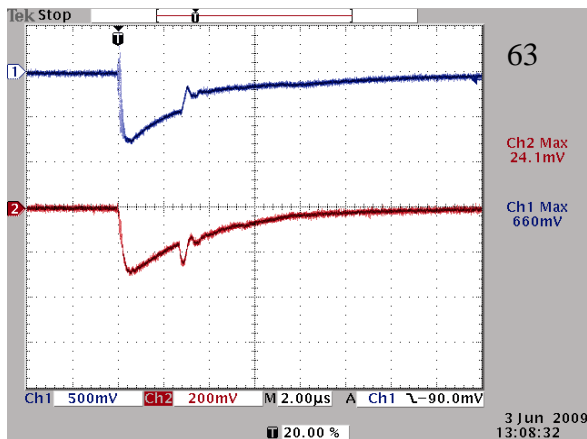


Σχήμα 4.5 10% υγρασία – θετική πολικότητα – διάκενο σπυθηριστή = 4.1cm

#### 4.1.6 Παλμογραφήματα με αρνητική πολικότητα και 10% ποσοστό υγρασίας του χώματος







Σχήμα 4.6 10% υγρασία – αρνητική πολικότητα – διάκενο σπινθηριστή = 3.9cm



# Κεφάλαιο 5

## Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

### 5.1 Υπολογισμός κρίσιμης έντασης ιονισμού $E_C$

Ο προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού ( $E_C$ ), είναι καθοριστικής σημασίας, για τον καθορισμό της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης ενός συστήματος γείωσης. Η μείωση της αντίστασης, που προκύπτει από το φαινόμενο του ιονισμού, μπορεί να αποδειχτεί ευεργετική για την επίδοση του συστήματος γείωσης και η κρίσιμη ένταση  $E_C$  είναι το κλειδί για την έναρξη του φαινομένου.

Αρκετοί ερευνητές έχουν καθορίσει την κρίσιμη ένταση ιονισμού για διαφορετικά είδη εδάφους. Κάποιοι από αυτούς καθόρισαν την  $E_C$  πειραματικά [1], [2], [3], [4], ενώ κάποιοι άλλοι εισήγαγαν κάποια τιμή  $E_C$  τέτοια ώστε τα θεωρητικά τους συμπεράσματα να ταιριάζουν με τα πειραματικά τους αποτελέσματα [5].

Η **Oettle**, βασισμένη σε πειραματικά αποτελέσματα, πρότεινε, για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης, τον ακόλουθο τύπο [6]:

$$E_C = 241 \cdot \rho^{0.215} \quad (5.1)$$

Όπου:

$E_C$  = κρίσιμη ένταση ιονισμού (kV/m)

$\rho$  = ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega\text{m}$ )

Ο **Manna** διεξήγαγε πειράματα χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικούς τύπους εδάφους με τέσσερις διαφορετικές περιεκτικότητες υγρασίας [7]. Στόχος του ήταν η συσχέτιση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με την κρίσιμη ένταση. Κατέληξε έτσι στην παρακάτω σχέση:

$$E_C = 843.2 \cdot \rho^{0.124} \quad (5.2)$$

Όπου:

$E_C$  = κρίσιμη ένταση ιονισμού (kV/m)

$\rho$  = ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega\text{m}$ )

Με δεδομένο τον κυλινδρικό σχηματισμό της πειραματικής διάταξης, η **Nor** [4] χρησιμοποίησε την παρακάτω εξίσωση για να υπολογίσει την κρίσιμη ένταση  $E_C$  στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου:

$$E_C = \frac{U_{50\%}}{r_i \cdot \ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (5.3)$$

Όπου:

$U_{50\%}$  = η τάση διάσπασης καθορισμένη σύμφωνα με το IEC 60-1 [9]

$r_{out}$  = εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου (m)

$r_i$  = ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου (m)

Ωστόσο στην εξίσωση (5.3) δεν λαμβάνεται υπόψη η ακτίνα ιονισμού. Συνεπώς, η Nor [8] χρησιμοποίησε τον εξής τύπο:

$$E_C = \frac{U_{50\%}}{r_{ion} \cdot \ln \frac{r_e}{r_{ion}}} \quad (5.4)$$

Όπου:

$U_{50\%}$  = η τάση διάσπασης καθορισμένη σύμφωνα με το IEC 60-1 [9]

$r_{out}$  = εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου (m)

$r_{ion}$  = ακτίνα της ιονισμένης περιοχής (m)

Ο προσδιορισμός της ακτίνας ιονισμού ( $r_{ion}$ ) απαιτείται για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Επομένως, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$r_{ion_i} = r_{out}^{(1-Z_0/Z_i)} \cdot r_{in}^{(Z_0/Z_i)} \quad (5.5)$$

Όπου:

$r_{out}$  = εσωτερική ακτίνα του εξωτερικού ηλεκτροδίου (m)

$r_i$  = η ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου (m)

$r_{ion}$  = ακτίνα της ιονισμένης περιοχής (m)

$Z_0$  = η αντίσταση όταν δεν έχουμε ιονισμού (Ω)

$Z_i$  = η αντίσταση όταν έχουμε ιονισμό (Ω) και υπολογίζεται από τις σχέσεις (4.6) – (4.9)

Ο προσδιορισμός της ακτίνας ιονισμού εξαρτάται σημαντικά από τον προσδιορισμό των δύο παραπάνω αντιστάσεων. Η  $Z_0$  μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, όμως ο καθορισμός της  $Z_i$  μπορεί να γίνει με έναν από τους παρακάτω τύπους:

$$Z_1 = \frac{U_{50\%}}{I_{\max}} \quad (5.6)$$

$$Z_2 = \frac{U_{I_{\max}}}{I_{\max}} \quad (5.7)$$

$$Z_3 = \frac{U_{50\%}}{I_{U_{50\%}}} \quad (5.8)$$

$$Z_4 = \min(Z(t)) \quad (5.9)$$

Όπου:

$U_{50\%}$  = η τάση διάσπασης (kV)

$I_{\max}$  = η μέγιστη τιμή του ρεύματος (A)

$U_{I_{\max}}$  = η τάση όταν το ρεύμα είναι μέγιστο (kV)

$I_{U_{50\%}}$  = η τιμή του ρεύματος για  $U_{50\%}$  (A)

$Z(t) = \frac{U(t)}{I(t)}$ , η αντίσταση σε χρόνο t (kΩ)

Τέλος, ο **Loboda** [1] για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης του ιονισμού βασίστηκε στα παλμογραφήματα της τάσης, του ρεύματος και τη μεταβολή της κρουστικής αντίστασης. Μετά τον προσδιορισμό της ελάχιστης κρουστικής αντίστασης ( $\min Z$ ), η ακτίνα ιονισμού μπορεί να υπολογιστεί. Με δεδομένες τις διαστάσεις του ηλεκτροδίου, το ρεύμα που ρέει ( $J$ ) σε όλη την επιφάνεια της ιονισμένης ζώνης μπορεί να προσδιοριστεί υποθέτοντας ένα ηλεκτρόδιο με αυξημένες διαστάσεις. Τελικά, η κρίσιμη ένταση ιονισμού υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_c = \rho \cdot J \quad (5.10)$$

Όπου:

$\rho$  = ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm)

$J$  = πυκνότητα ρεύματος (A/m<sup>2</sup>)

## 5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας καταγράψαμε με τη βοήθεια του παλμογράφου, για ένα δείγμα χώματος και τρία διαφορετικά ποσοστά υγρασίας (0%, 5% και 10%), τόσο την κρουστική τάση όσο και το κρουστικό ρεύμα. Εν συνεχεία, τις μετρήσεις αυτές τις επεξεργαστήκαμε κάνοντας χρήση των τύπων (5.6)-(5.9) της παραγράφου 5.1 και τις καταγράψαμε στον **Πίνακα 5.1**. Ακολούθως, υπολογίσαμε την κρίσιμη ένταση ιονισμού  $E_c$  από τους τύπους (5.1)-(5.3) όπως φαίνεται

στον **Πίνακα 5.2**. Με χρήση των τύπων (5.4) και (5.10) υπολογίσαμε την  $E_C$  για τέσσερις διαφορετικές ακτίνες ιονισμού. Οι τιμές που προέκυψαν καταγράφονται στους **Πίνακες 5.3** και **5.4**, αντίστοιχα. Επίσης στους παρακάτω **Πίνακες 5.3**, **5.4** και **5.5** παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τιμών της κρίσιμης έντασης που προέκυψε από την εφαρμογή των παραπάνω τύπων για κάθε είδος χρώματος και πολικότητας.

**Πίνακας 5.1** Τιμές της τάσης διάσπασης, μέγιστης τιμής του κρουστικού ρεύματος και της κρουστικής αντίστασης, όπως υπολογίζεται από τους (5.6)-(5.9)

A/A Παλμογραφήματος	Πολικότητα/ Υγρασία	Διάκενο	$U_{50\%}$ [kV]	$I_{max}$ [A]	Z1 (5.6) [Ω]	Z2 (5.7) [Ω]	Z3 (5.8) [Ω]	Z4 (5.9) [Ω]
3	θετική/ 0%	1,7	48,1	155,0	310,3	206,5	801,7	120,0
4	θετική/0%	1,7	47,0	115,0	408,7	310,4	854,5	270,0
5	θετική/0%	1,7	48,0	175,0	274,3	202,3	470,6	87,0
8	θετική/0%	1,7	48,0	170,0	282,4	201,8	995,9	80,0
9	θετική/0%	1,7	48,0	150,0	309,7	250,3	761,9	391,0
13	αρνητική/0%	1,54	43,0	79,0	544,3	453,2	1162,2	379,0
14	αρνητική/0%	1,54	43,0	100,0	430,0	330,0	826,9	242,0
18	αρνητική/0%	1,54	43,1	135,0	319,3	237,0	862,0	240,0
19	αρνητική/0%	1,54	42,0	90,0	466,7	386,7	1105,3	329,0
20	αρνητική/0%	1,54	43,0	83,0	518,1	401,2	1343,8	350,0
21	αρνητική/5%	1,95	32,0	83,0	385,5	442,2	794,0	348,0
22	αρνητική/5%	1,95	37,0	100,0	370,0	270,0	560,6	226,0
27	αρνητική/5%	1,95	34,0	94,0	361,7	276,6	618,2	237,0
28	αρνητική/5%	1,95	35,0	106,0	330,2	245,3	795,5	189,0
31	αρνητική/5%	1,95	34,0	102,0	333,3	258,8	809,5	204,0
32	αρνητική/5%	1,95	34,4	88,0	390,9	302,3	688,0	277,0
34	θετική/5%	1,95	34,0	72,0	472,2	405,6	611,5	353,0
36	θετική/5%	1,95	31,0	83,0	373,5	318,1	508,2	243,0
37	θετική/5%	1,95	36,0	86,0	418,6	348,8	608,1	282,0
38	θετική/5%	1,95	37,0	90,0	411,1	331,1	560,6	270,0
42	θετική/5%	1,95	35,0	86,0	407,0	337,2	501,4	270,0
43	θετική/10%	4,1	24,0	155,0	154,8	116,1	203,4	60,0
44	θετική/10%	4,1	28,0	183,0	153,0	96,7	171,3	50,0
48	θετική/10%	4,1	28,6	194,0	147,4	103,6	180,6	55,0
49	θετική/10%	4,1	27,0	190,0	142,1	95,8	182,4	29,0
51	θετική/10%	4,1	29,0	205,0	141,5	141,5	155,9	40,0
54	αρνητική/10%	3,9	24,0	156,0	153,8	106,4	243,4	68,0
57	αρνητική/10%	3,9	24,0	155,0	154,8	112,9	240,0	68,0
58	αρνητική/10%	3,9	23,0	140,0	164,3	122,1	261,4	74,0
59	αρνητική/10%	3,9	26,0	172,0	151,2	100,6	205,5	50,0
61	αρνητική/10%	3,9	28,5	215,0	132,6	83,3	215,1	10,0
64	αρνητική/10%	3,9	22,0	120,0	183,3	147,5	197,7	98,0
65	αρνητική/10%	3,9	27,0	182,0	148,4	102,2	192,9	40,0
68	αρνητική/10%	3,9	22,0	131,0	167,9	120,6	212,6	79,0

Πίνακας 5.2 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού  $E_C$  βάσει των τύπων (5.1), (5.2) και (5.3)

A/A Παλμογραφήματος	$E_C(5.1)$ [kV/m]	$E_C(5.2)$ [kV/m]	$E_C(5.3)$ [kV/m]
3	1248,2	2738,7	5702,1
4	1248,2	2738,7	5571,7
5	1248,2	2738,7	5690,3
8	1248,2	2738,7	5690,3
9	1248,2	2738,7	5690,3
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1248,2</b>	<b>2738,7</b>	<b>5668,94</b>
13	1248,2	2738,7	5216,1
14	1248,2	2738,7	5097,6
18	1248,2	2738,7	5109,4
19	1248,2	2738,7	4979,0
20	1248,2	2738,7	5097,6
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1248,2</b>	<b>2738,7</b>	<b>5099,9</b>
21	1116,5	2528,5	3793,5
22	1116,5	2528,5	4386,3
27	1116,5	2528,5	4030,6
28	1116,5	2528,5	4149,2
31	1116,5	2528,5	4030,6
32	1116,5	2528,5	4078,0
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1116,5</b>	<b>2528,5</b>	<b>4078,0</b>
34	1116,5	2528,5	4030,6
36	1116,5	2528,5	3675,0
37	1116,5	2528,5	4267,7
38	1116,5	2528,5	4386,3
42	1116,5	2528,5	4149,2
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1116,5</b>	<b>2528,5</b>	<b>4101,8</b>
43	873,9	2121,5	2845,1
44	873,9	2121,5	3319,3
48	873,9	2121,5	3390,5
49	873,9	2121,5	3200,8
51	873,9	2121,5	3437,9
<b>Μέση τιμή</b>	<b>873,9</b>	<b>2121,5</b>	<b>3238,7</b>
54	873,9	2121,5	2845,1
57	873,9	2121,5	2845,1
58	873,9	2121,5	2726,6
59	873,9	2121,5	3082,2
61	873,9	2121,5	3378,6
64	873,9	2121,5	2608,0
65	873,9	2121,5	3200,8
68	873,9	2121,5	2608,0
<b>Μέση τιμή</b>	<b>873,9</b>	<b>2121,5</b>	<b>2899</b>

Πίνακας 5.3 Υπολογισμός  $E_C$  από τον τύπο (5.4) για τέσσερις διαφορετικές ακτίνες ιονισμού

Α/Α Παλμογραφήματος	$E_C$ [kV/m]			
	(5.4( $r_{ion1}$ ))	(5.4( $r_{ion2}$ ))	(5.4( $r_{ion3}$ ))	(5.4( $r_{ion4}$ ))
3	2055,6	2559,4	1939,4	3764,4
4	1822,9	2008,3	1956,6	2145,8
5	2174,0	2587,1	1808,9	4880,6
8	2143,0	2591,3	2215,5	5240,7
9	2053,2	2280,9	1894,7	1884,5
<b>Μέση τιμή</b>	<b>2049,7</b>	<b>2405,4</b>	<b>1963,0</b>	<b>3583,2</b>
13	1638,5	1668,3	2352,7	1743,8
14	1647,6	1790,8	1759,5	2081,9
18	1819,6	2111,3	1803,0	2096,5
19	1584,7	1654,4	2129,9	1751,3
20	1604,3	1676,0	2763,9	1750,8
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1658,9</b>	<b>1780,2</b>	<b>2161,8</b>	<b>1884,9</b>
21	1207,9	1251,5	2035,5	1193,6
22	1388,1	1402,7	1637,2	1465,6
27	1272,2	1283,7	1625,9	1328,0
28	1303,3	1354,6	2232,0	1481,0
31	1266,2	1299,6	2223,8	1395,3
32	1301,8	1285,2	1828,4	1298,5
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1289,9</b>	<b>1312,9</b>	<b>1930,5</b>	<b>1360,3</b>
34	1364,5	1296,8	1610,6	1269,5
36	1164,4	1154,9	1289,9	1202,7
37	1384,2	1343,0	1697,2	1355,3
38	1415,9	1377,8	1637,2	1402,7
42	1336,0	1303,8	1445,9	1326,8
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1333,0</b>	<b>1295,3</b>	<b>1536,2</b>	<b>1311,4</b>
43	973,9	1177,0	898,3	1019,0
44	1130,0	1201,1	1046,1	1297,1
48	1135,9	1271,4	1065,1	1263,2
49	1057,6	1209,3	1009,6	1765,8
51	1134,1	1180,7	1134,1	1526,8
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1086,3</b>	<b>1207,9</b>	<b>1030,6</b>	<b>1374,4</b>
54	971,0	1439,5	893,8	970,3
57	973,9	1413,4	896,1	970,3
58	962,5	1524,3	866,7	904,7
59	1043,6	1287,8	969,1	1204,5
61	1092,8	1477,5	1088,2	4511,0
64	989,0	1051,3	874,0	821,1
65	1075,1	1263,3	1005,8	1421,5
68	932,5	1126,6	827,4	850,1
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1024,5</b>	<b>943,7</b>	<b>1349,1</b>	<b>1455,0</b>

Πίνακας 5.4 Υπολογισμός  $E_C$  από τον τύπο (5.10) για τέσσερις διαφορετικές ακτίνες ιονισμού

Α/Α Παλμογραφήματος	$E_C$ [kV/m]			
	( $5.10(r_{ion1})$ )	( $5.10(r_{ion2})$ )	( $5.10(r_{ion3})$ )	( $5.10(r_{ion4})$ )
3	2055,6	1702,7	5010,0	1455,7
4	1822,9	1525,4	4091,1	1417,6
5	2174,0	1908,0	3103,4	1548,1
8	2143,0	1851,7	7813,9	1484,9
9	2053,2	1843,7	4661,5	2379,4
<b>Μέση τιμή</b>	<b>2049,7</b>	<b>1766,3</b>	<b>4936,0</b>	<b>1657,1</b>
13	1638,5	1357,4	4909,1	1186,6
14	1647,6	1374,4	3383,7	1171,7
18	1819,6	1567,6	4868,0	1576,0
19	1584,7	1370,8	5044,5	1234,7
20	1604,3	1297,9	7168,8	1182,8
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1658,9</b>	<b>1393,6</b>	<b>5074,8</b>	<b>1270,4</b>
21	1207,9	1435,3	4192,3	1077,4
22	1388,1	1023,6	2480,6	895,2
27	1272,2	981,7	2778,8	870,1
28	1303,3	1006,3	5377,1	847,8
31	1266,2	1009,1	5400,7	853,9
32	1301,8	993,8	3217,9	920,2
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1289,9</b>	<b>1075,0</b>	<b>3907,9</b>	<b>910,8</b>
34	1364,5	1113,7	2085,6	949,0
36	1164,4	983,5	1755,1	782,5
37	1384,2	1119,2	2465,5	913,0
38	1415,9	1109,7	2232,6	921,2
42	1336,0	1080,3	1781,5	880,3
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1333,0</b>	<b>1081,3</b>	<b>2064,1</b>	<b>889,2</b>
43	973,9	673,8	1546,1	394,9
44	1130,0	661,3	1344,3	423,9
48	1135,9	748,5	1557,1	471,3
49	1057,6	680,5	1552,5	360,4
51	1134,1	1134,1	1301,4	431,7
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1086,3</b>	<b>779,6</b>	<b>1460,3</b>	<b>416,4</b>
54	971,0	618,2	2277,6	428,9
57	973,9	653,4	2190,7	426,1
58	962,5	644,4	2425,0	407,5
59	1043,6	644,8	1751,1	398,4
61	1092,8	683,5	2397,4	340,3
64	989,0	703,1	1133,5	438,9
65	1075,1	692,9	1642,2	383,3
68	932,5	594,2	1425,9	399,9
<b>Μέση τιμή</b>	<b>1024,5</b>	<b>686,2</b>	<b>1903,8</b>	<b>444,5</b>

Στον παρακάτω **Πίνακα 5.5** παρουσιάζονται, για εποπτικούς λόγους, συγκριτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη εφαρμογή των (5.1) έως (5.3). Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι τιμές της κρίσιμης έντασης  $E_C$  για τις μεθόδους της Nor και του Loboda προέκυψαν ως ο μέσος όρος των τιμών των  $E_C$  για κάθε μια ακτίνα ιονισμού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και με τη μορφή γραφήματος.

**Πίνακας 5.5** Τιμές  $E_C$  όπως προέκυψαν από (5.1)-(5.5)

Ερευνητές	$E_C$ (kV/m)			
	πολικότητα	0%	5%	10%
Oettle	θετική	1248,2	1116,5	873,9
	αρνητική	1248,2	1116,5	873,9
Manna	θετική	2738,7	2528,5	2121,5
	αρνητική	2738,7	2528,5	2121,5
Nor (χωρίς ακτίνα ιονισμού)	θετική	5668,9	4101,8	3238,7
	αρνητική	5099,9	4078	2899
Μέση Τιμή Nor	θετική	2500,3	1368,9	1174,8
	αρνητική	1871,4	1473,4	1193
Μέση Τιμή Loboda	θετική	2602,3	1341,9	935,7
	αρνητική	2349,4	1795,9	1014,7

### 5.3 Συμπεράσματα

Παρατηρώντας, αρχικά, τα παλμογραφήματα που βρίσκονται στο κεφάλαιο 4, μπορούμε να επισημάνουμε τα εξής:

- Στις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται το φαινόμενο του ιονισμού και το ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου μας είναι 0% (τελείως ξηρό χώμα), οι χαρακτηριστικές τάσης και ρεύματος παρουσιάζουν απότομες βυθίσεις και ανόδους, ενώ στις περιπτώσεις που τα ποσοστά υγρασίας του δοκιμίου αυξάνονται κατά 5 και 10% (βρεγμένο χώμα) οι χαρακτηριστικές αυτές εμφανίζονται πιο ήπιες.
- Στις περιπτώσεις, όπου δεν εμφανίζεται το φαινόμενο του ιονισμού και για ποσοστό υγρασίας 0%, το ρεύμα που διαρρέει το δοκίμιο μας είναι πάρα πολύ μικρό, σχεδόν μηδενικό. Αυτό οφείλεται στην υψηλή τιμή της ειδικής αντίστασης που παρουσιάζει το ξηρό έδαφος.
- Επιπλέον μεταξύ της στιγμής όπου η τάση διάσπασης μειώνεται και της στιγμής που το ρεύμα παίρνει τη μέγιστη τιμή του, παρατηρείται χρονική καθυστέρηση. Αυτή η χρονική καθυστέρηση αποτελεί ενδεικτικό παράγοντα των μη-γραμμικών μεταβατικών



χαρακτηριστικών εξαιτίας του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο.

Από τους **Πίνακες 5.2** έως **5.5** εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα για την κρίσιμη ένταση ιονισμού  $E_C$ :

- Η τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού  $E_C$  μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι, σε κανονικές συνθήκες κεραυνοπληξίας του εδάφους, οι οποίες έπονται ισχυρών βροχοπτώσεων, το χώμα είναι πολύ περισσότερο υγρό από αυτό που χρησιμοποιήσαμε εμείς στα συγκεκριμένα πειράματα άρα αναμένουμε η μείωση της  $E_C$  να είναι ακόμη μεγαλύτερη. Η μείωση της κρίσιμης έντασης  $E_C$  οφείλεται σημαντικά στη μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί εξαρτάται από την επί της εκατό αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας στο χώμα.
- Το εύρος τιμών της κρίσιμης έντασης ιονισμού  $E_C$  όπως φαίνεται στον **Πίνακα 5.5** είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη η ακτίνα ιονισμού, όπως από την εφαρμογή των τύπων (5.1) – (5.3), και μικρότερο όταν αυτή υπολογίζεται με την εφαρμογή των μεθόδων που περιγράφονται από τις εξισώσεις (5.4) και (5.10).
- Από την εφαρμογή των τύπων των Oettle και Manna, (5.1) και (5.2) αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι δεν λαμβάνουν υπόψη στους υπολογισμούς τους την κρίσιμη τάση διάσπασης  $U_{50\%}$ . Η τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού εξαρτάται μόνο από την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Έτσι η  $E_C$  παραμένει ίδια για θετική και αρνητική πολικότητα, όπως φαίνεται στους **Πίνακες 5.2** και **5.5**.
- Ακόμη από τους **Πίνακες 5.2** και **5.5** να εξάγουμε τα εξής:
  1. Ο τύπος (5.3) που χρησιμοποίησε η Nor για να υπολογίσει την κρίσιμη ένταση ιονισμού  $E_C$  μας δίνει τα μεγαλύτερα αποτελέσματα αναλογικά με τα αποτελέσματα που μας δίνουν όλοι οι υπόλοιποι τύποι.
  2. Ο τύπος (5.2) που χρησιμοποιεί ο Manna για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού και ο οποίος δεν λαμβάνει υπόψη του την ακτίνα ιονισμού δίνει αρκετά υψηλές τιμές για την  $E_C$ , αλλά μικρότερες από τις τιμές που προκύπτουν από τη Nor.
  3. Ο τύπος (5.1) που υιοθετεί η Oettle δίνει πάντα τις μικρότερες τιμές, από όλους τους άλλους τύπους, για την εύρεση της κρίσιμης έντασης ιονισμού  $E_C$ .
- Οι μέθοδοι των Loboda (τύπος (5.10)) και Nor (τύπος (5.4)) όπως προκύπτει από τον **Πίνακα 5.5** δίνουν τις ενδιάμεσες τιμές για την κρίσιμη ένταση ιονισμού.

- Σε ότι αφορά την μέθοδο του Loboda για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού, όπως αυτός έχει καταγραφεί στον **Πίνακα 5.4** παρατηρούμε ότι, όταν για τον υπολογισμό της ακτίνας της περιοχής ιονισμού χρησιμοποιείται ο τύπος (5.5) σε συνδυασμό με τον τύπο (5.9), τότε οι τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού  $E_C$  είναι μικρότερες από τις τιμές της  $E_C$  που προκύπτουν για ακτίνα ιονισμού υπολογιζόμενη με τη βοήθεια των τύπων (5.5) και (5.8). Η μεγαλύτερη τιμή της κρίσιμη ένταση ιονισμού προκύπτει για ακτίνα ιονισμού που υπολογίζεται από τον συνδυασμό των τύπων (5.5) και (5.7).
- Από τα αποτελέσματα του τύπο (5.4), που χρησιμοποιεί η Νοτ για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού, για τέσσερις διαφορετικές ακτίνες ιονισμού δεν μπορεί, από ότι φαίνεται και στον **Πίνακα 5.3** να συναχθεί κανένα συμπέρασμα για τον προσδιορισμό της  $E_C$ .

## Βιβλιογραφία

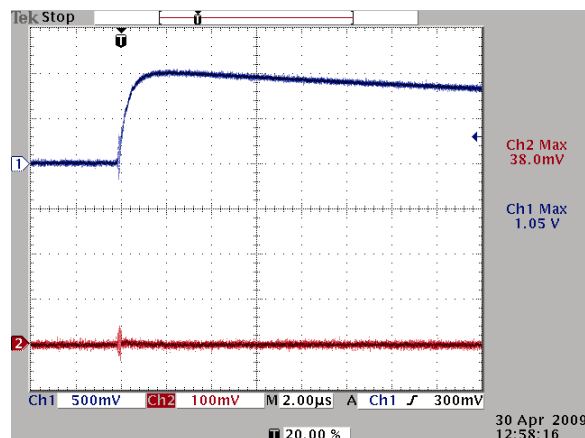
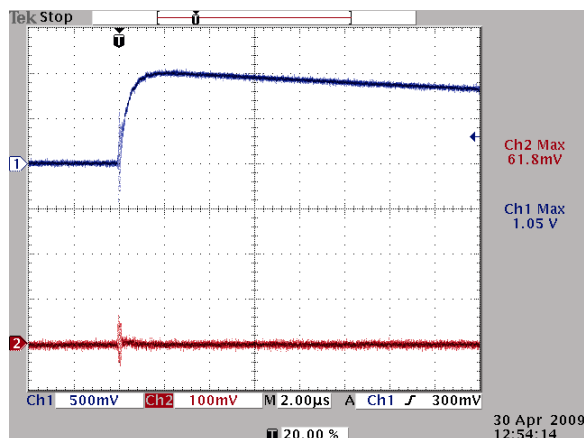
- [1] M. Loboda and V. Scuka, “On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes in soil”, in Proc. of 23rd International Conference on Lightning Protection, pp. 539-544, Sept 1996.
- [2] A. M. Mousa, “The soil ionization gradient associated with discharge of high current into concentrated electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 3, pp. 1669-1677, 1994.
- [3] I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Soil ionization under lightning impulse voltages”, IET Proceedings Science, Measurement and Technology, vol. 151, no. 5, pp. 343-346, Sept 2004.
- [4] N. M. Nor and A. Ramli, “Electrical properties of dry soil under high impulse currents”, Elsevier, Journal of Electrostatics 65, pp. 500-505, 2007.
- [5] P. L. Bellaschi, “Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds”, Transactions Am. Inst. Electr. Eng., vol. 60, pp. 123-128, Mar 1941.
- [6] 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, pp. 2020-2029, Oct 1988.
- [7] T. K. Manna, “Impulse impedance of grounding systems and its effects on tower crossarm voltage”, Dissertation, Aug 2006.
- [8] N. M. Nor and A. Ramli, “Effects of moisture content, impulse polarity and earth electrodes dimension on dry and wet sand under high voltage conditions”, IETP Transactions on Electrical Power, vol. 18, pp. 461-475, Jun 2007.
- [9] IEC-60-1: “Guide on High-Voltage Testing Techniques”, Standards, 1989.

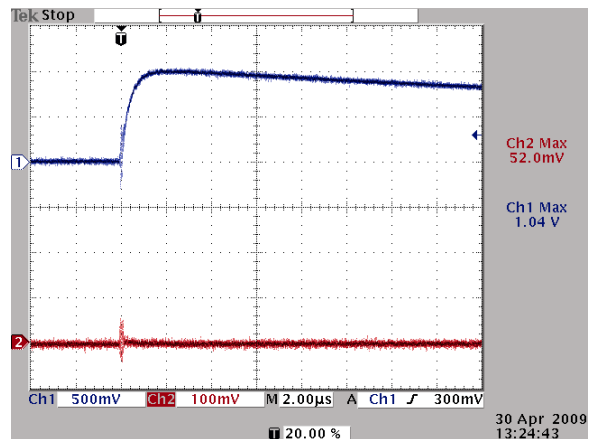
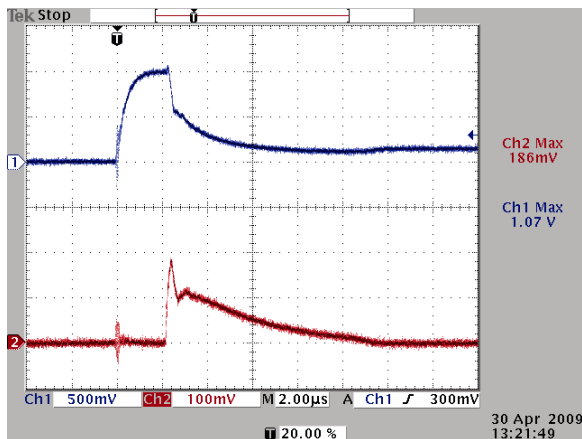
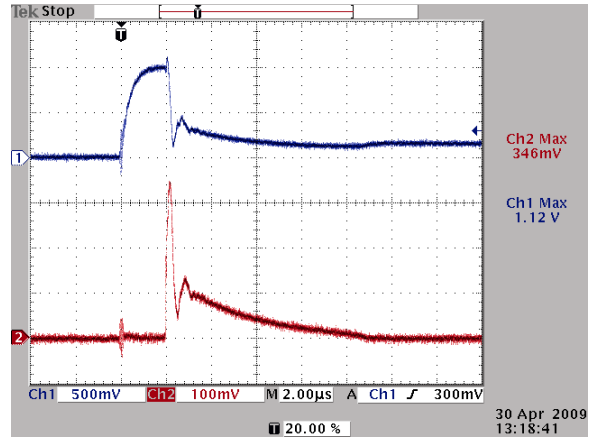
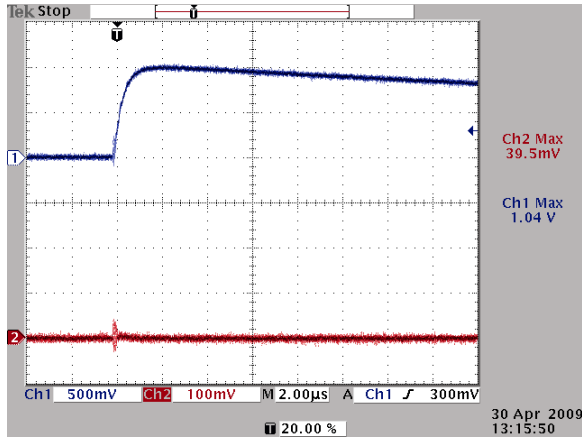
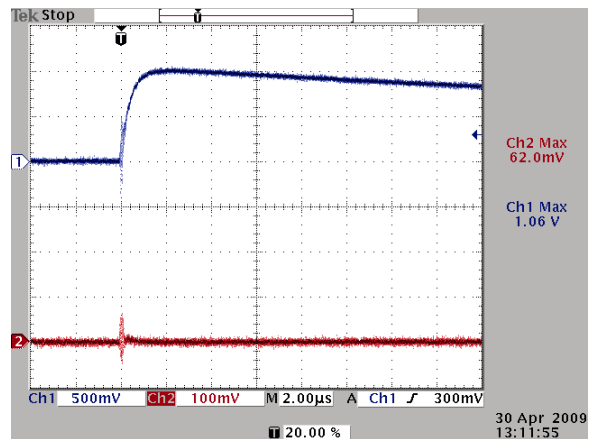
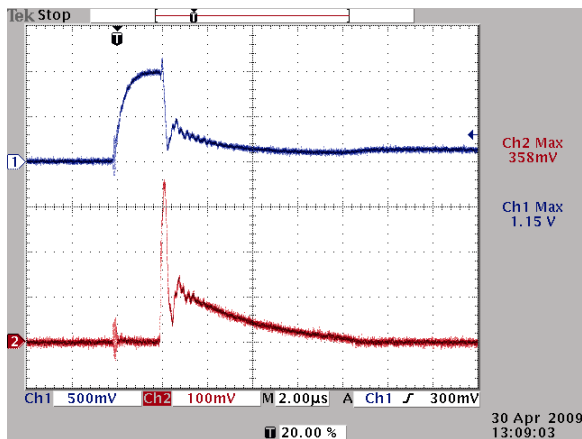
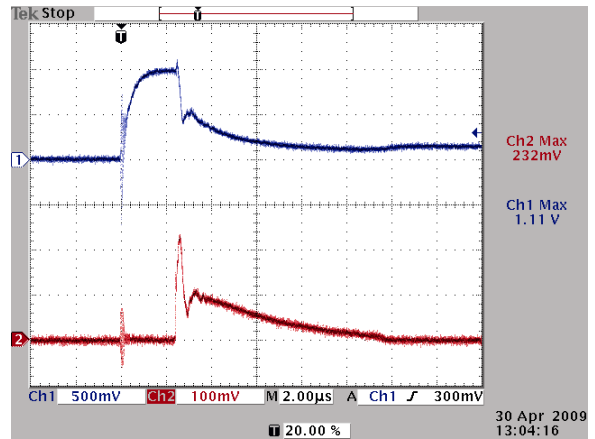
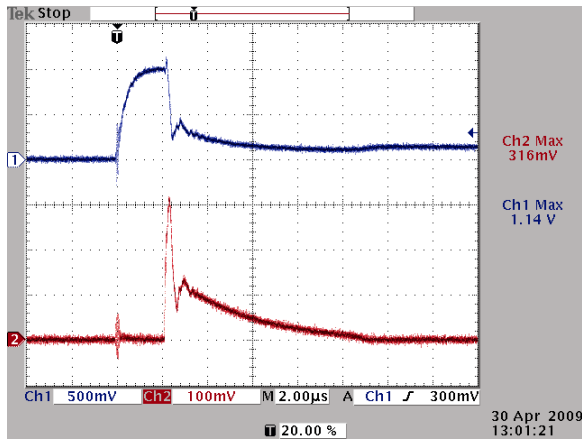
# Παράρτημα

## Π.1 Παλμογραφήματα

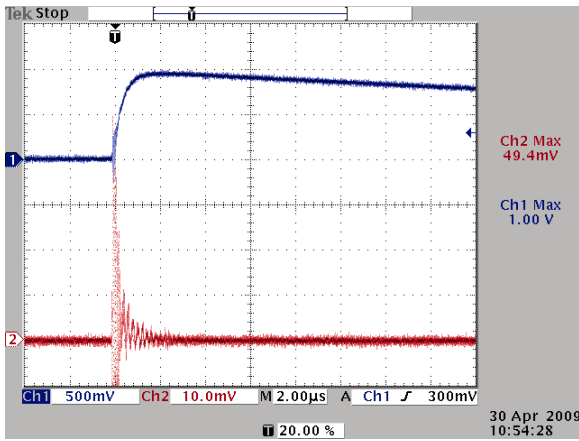
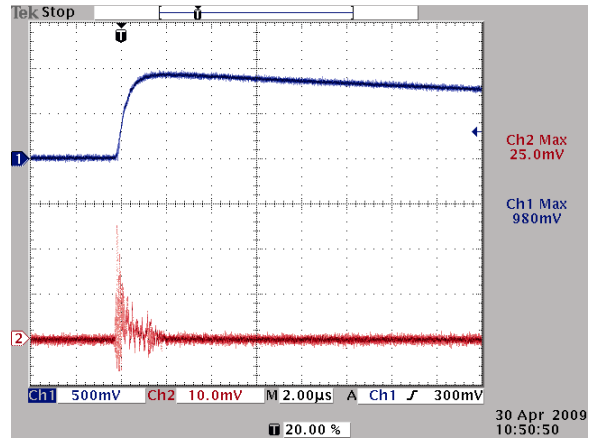
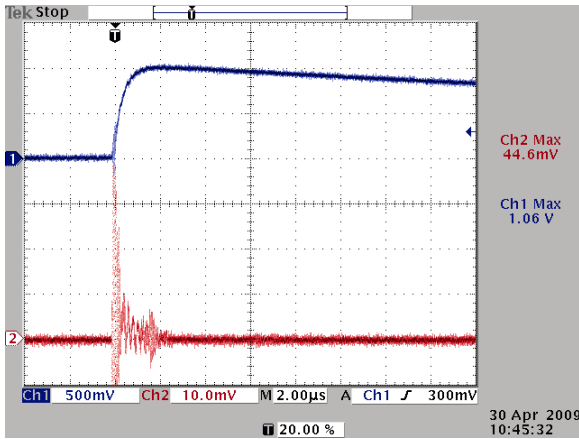
Στην προσπάθειά μας να βρούμε την τάση διάσπασης  $U_{50\%}$  καταγράψαμε την κρουστική τάση και το κρουστικό ρεύμα για διαφορετικές τιμές του διακένου του σπινθηριστή. Για σταθερό διάκενο στον σπινθηριστή, αυξάναμε σταδιακά την τάση μέχρι να γίνει διάσπαση του διακένου και παρατηρούσαμε στον παλμογράφο αν οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος και της τάσης παρουσίαζαν ιονισμό. Εφαρμόζαμε την ίδια τάση για τουλάχιστον 4 κρούσεις. Αν δε λάμβανε χώρα το φαινόμενο του ιονισμού, τότε αλλάζαμε (αυξάναμε) την τιμή του διακένου και επαναλαμβάναμε την παραπάνω διαδικασία μέχρι να εντοπίσουμε το επίπεδο τάσης στο οποίο για το 50% των κρούσεων είχαμε ιονισμό. Οι κυματομορφές αυτές καταγράφονταν. Παρακάτω φαίνονται όλα τα παλμογραφήματα, που κατέγραψε ο παλμογράφος, κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας, για τον προσδιορισμό της επιθυμητής τάσης διάσπασης  $U_{50\%}$ .

**Δείγμα χώματος Α- 0% υγρασία – θετική πολικότητα – κύλινδρος Α –  $U_{50\%} \delta=1,7C$**

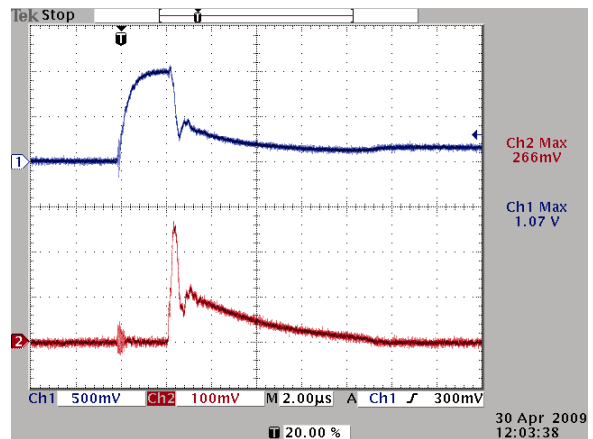
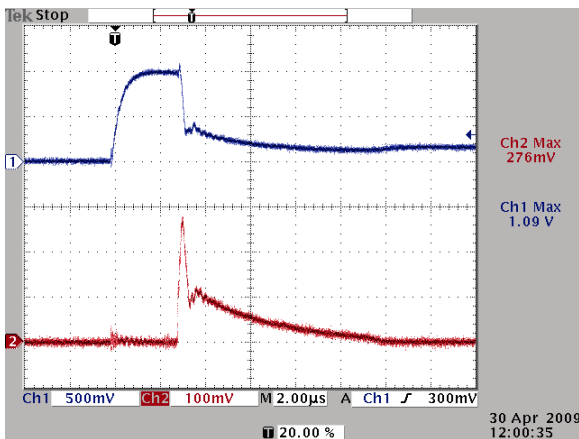


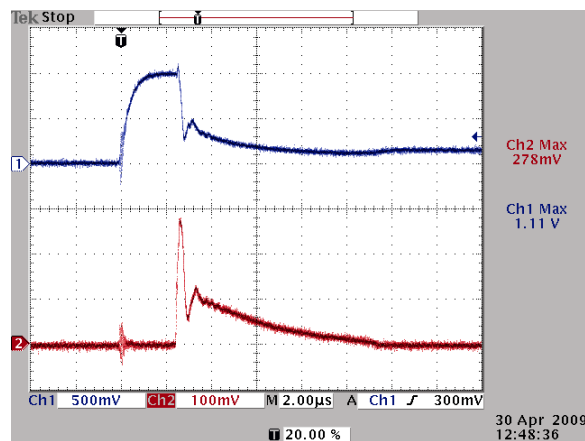
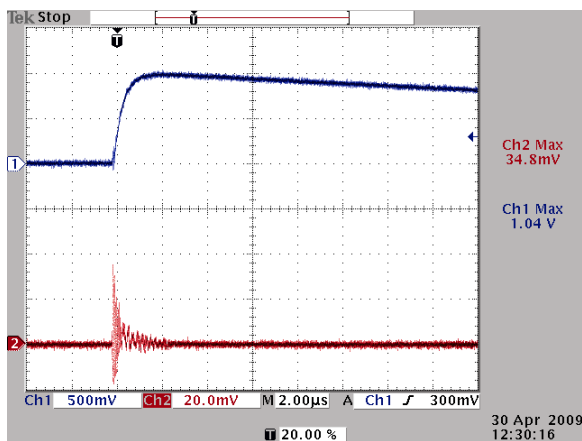
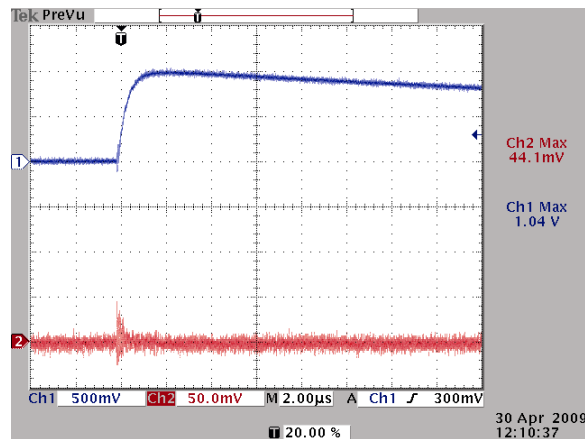
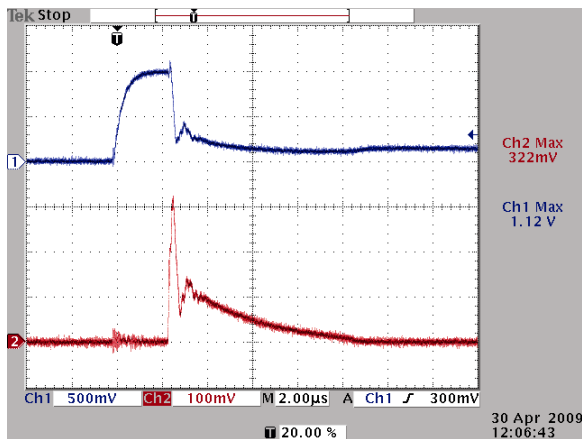


Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,7A$

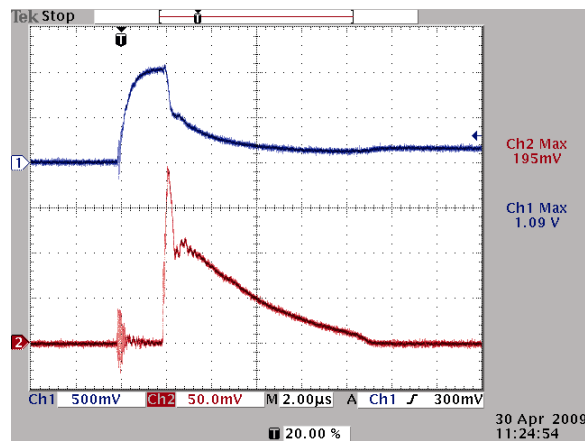
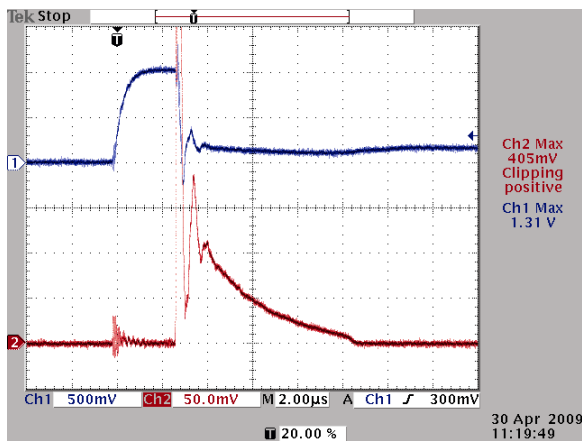


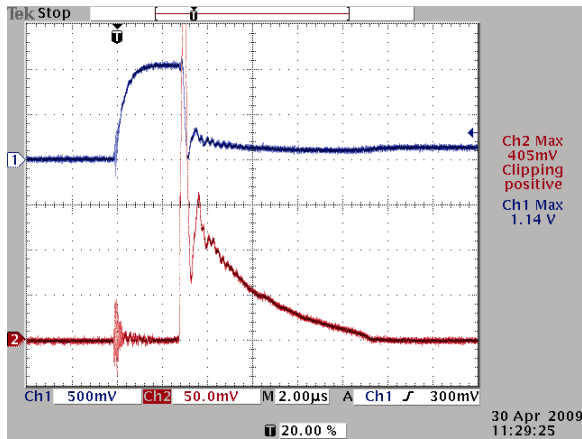
Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,7B$



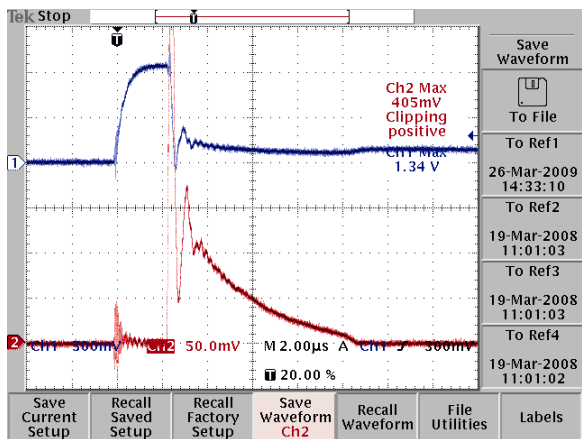
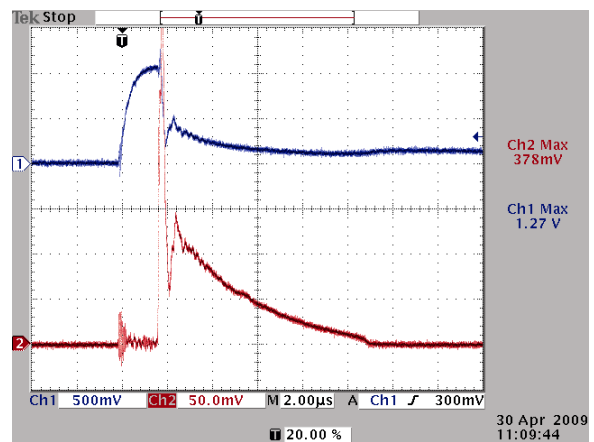
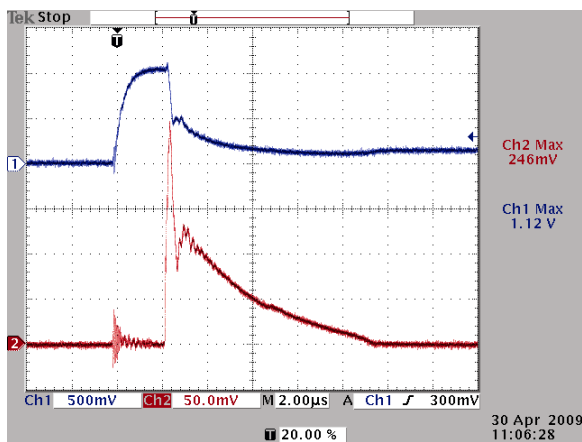


Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,8$



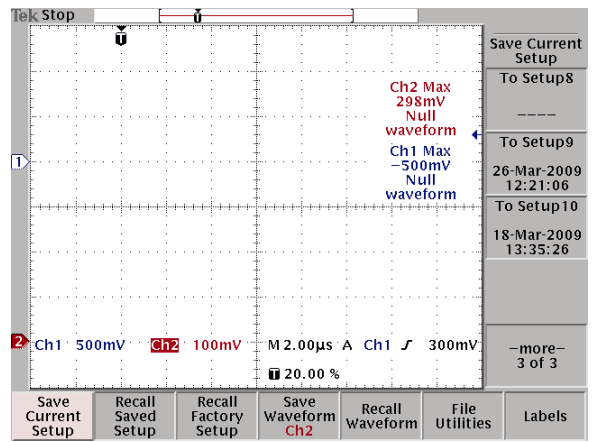
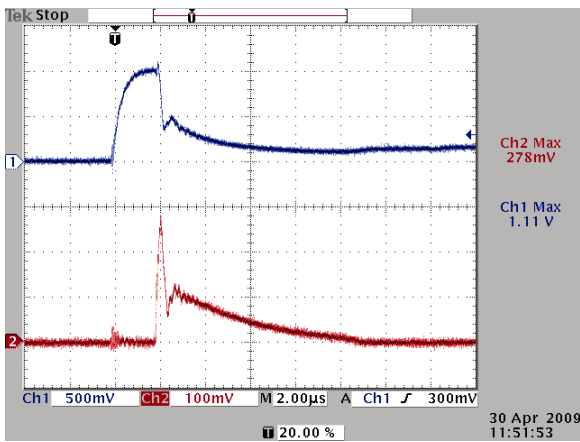
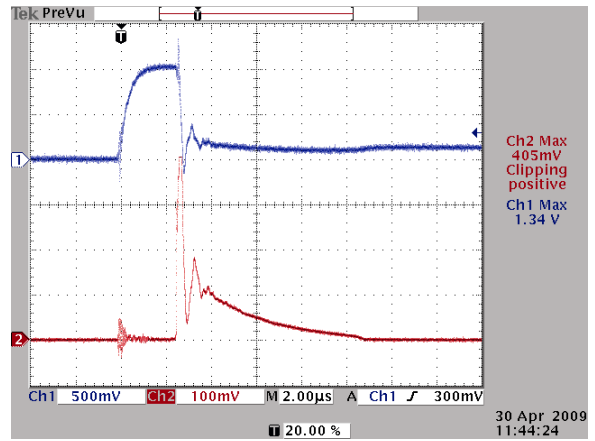
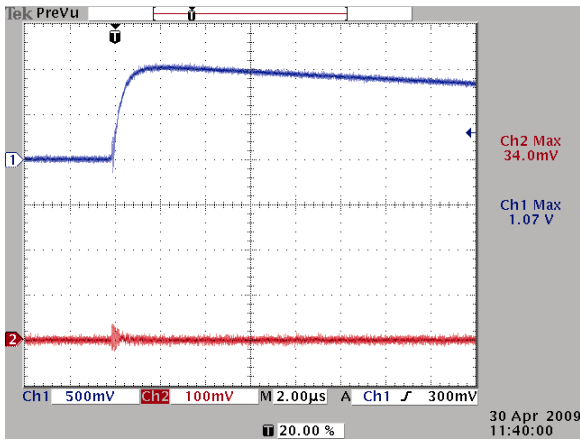


Δείγμα χώματος Α- 0% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,9$

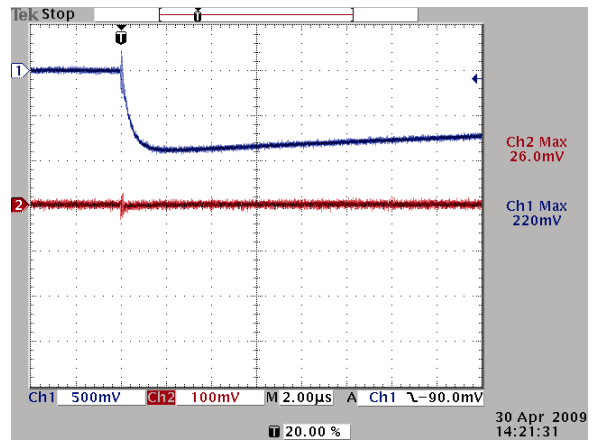
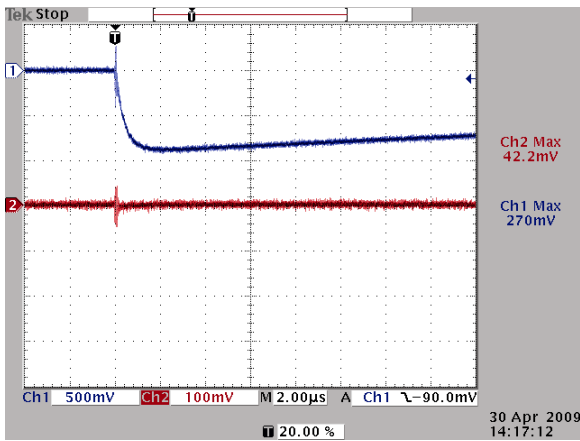


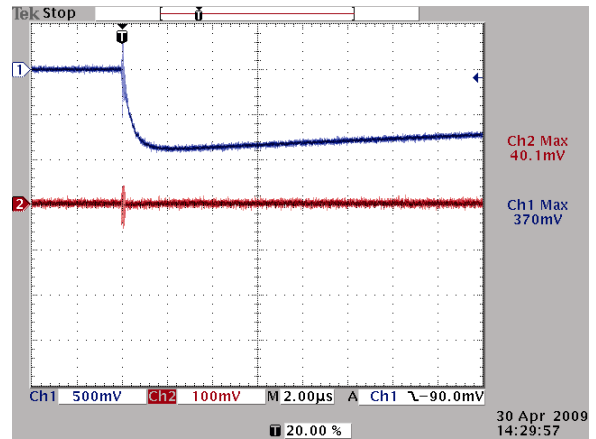
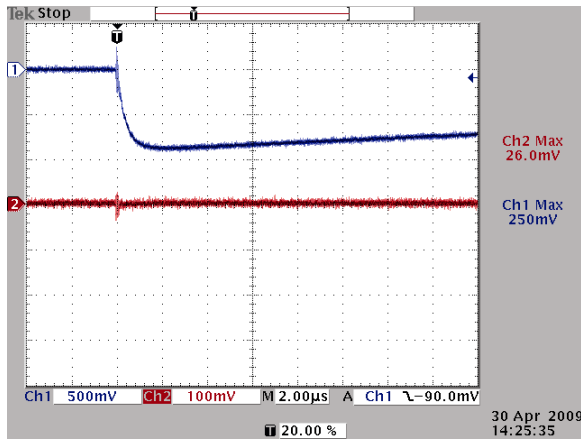


**Δείγμα χρώματος Α- 0% υγρασία – θετική πολικότητα – κύλινδρος Α –  $\delta=1,75$**

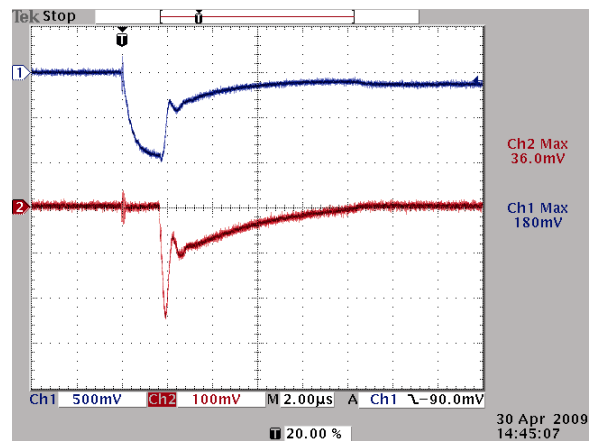
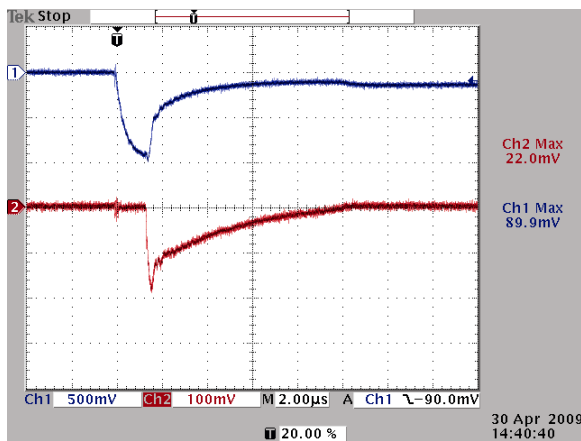
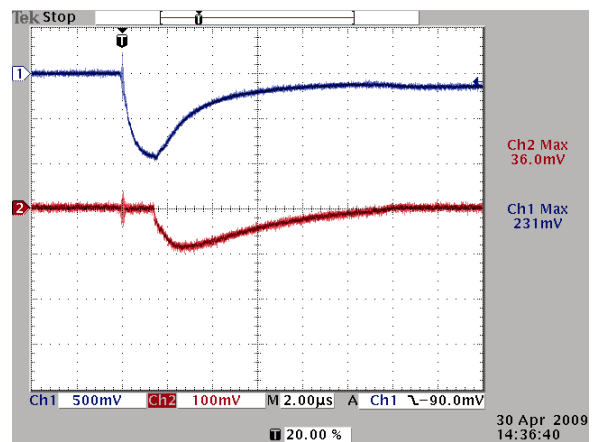
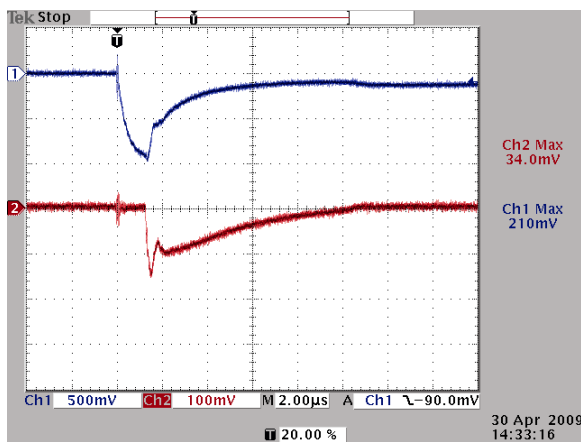


**Δείγμα χρώματος Α- 0% υγρασία – αρνητική πολικότητα – κύλινδρος Α –  $\delta=1,5$**

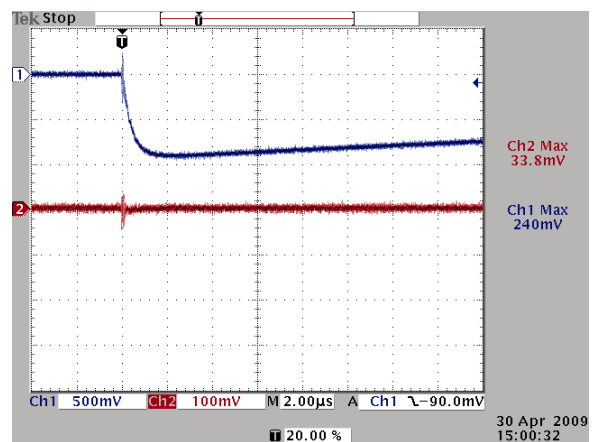
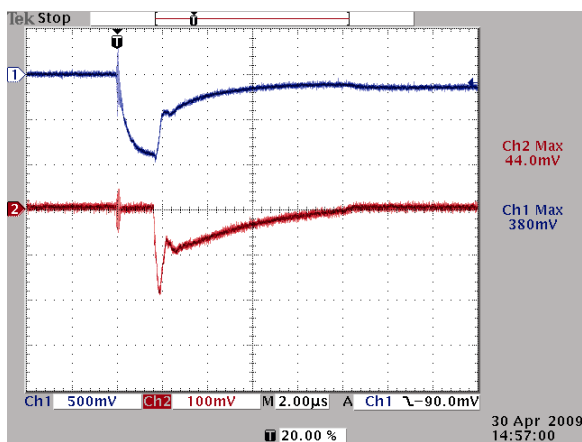
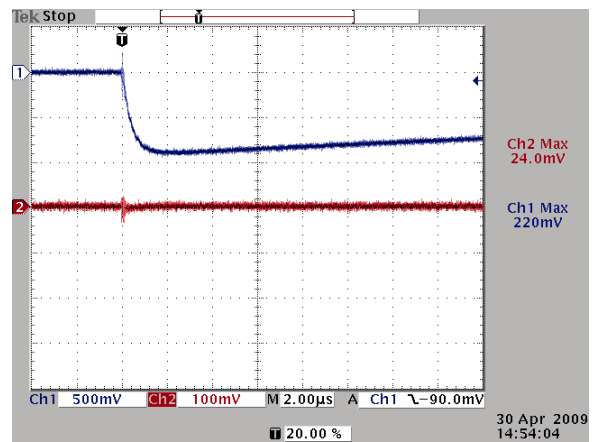
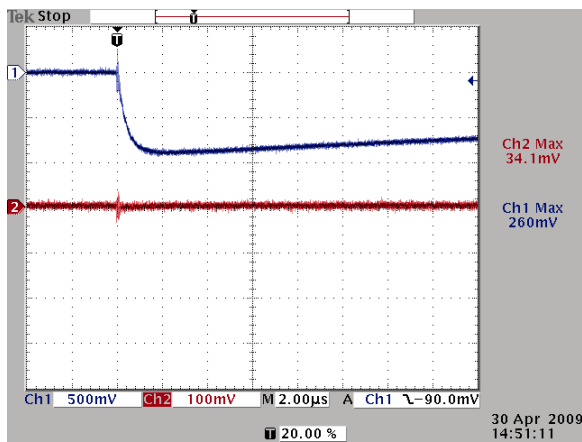




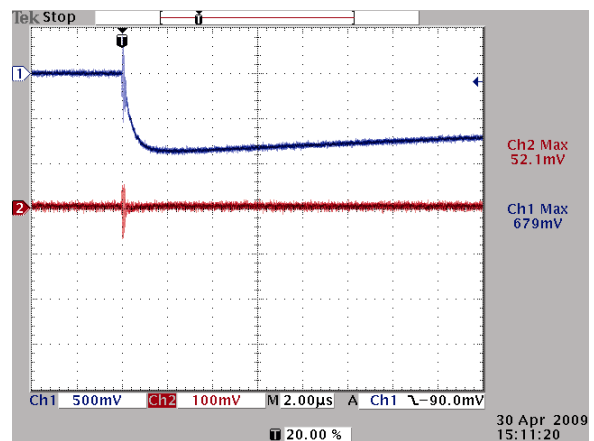
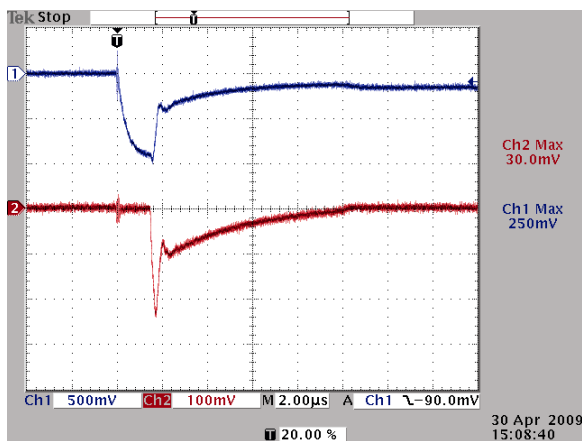
Δείγμα χώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,6$

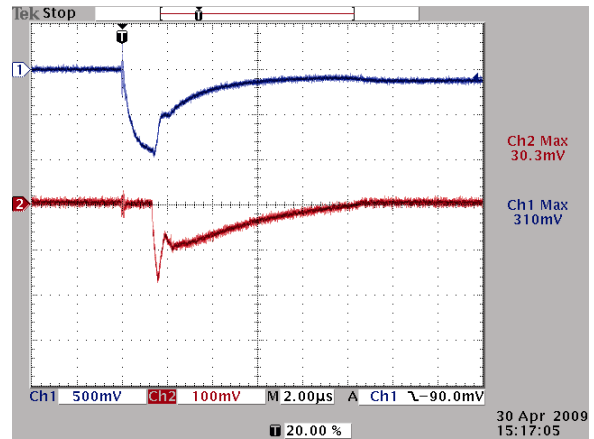
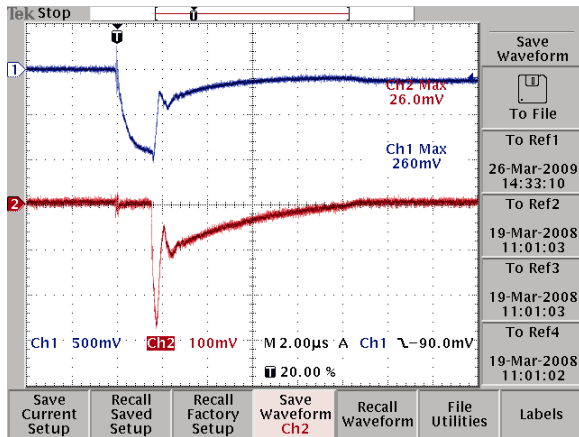


**Δείγμα χρώματος Α- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,55$**

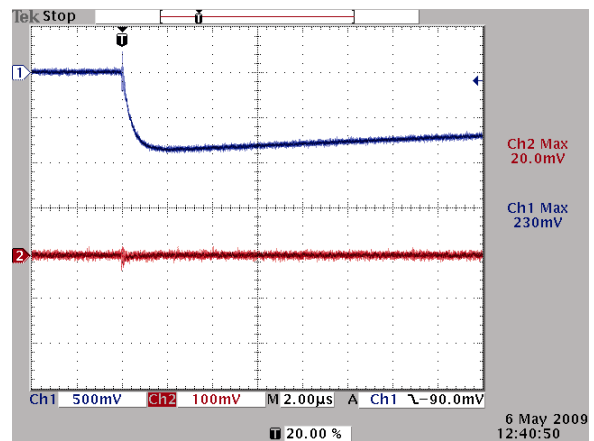
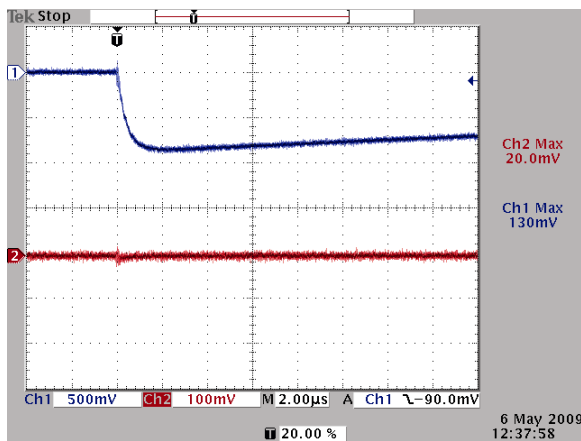
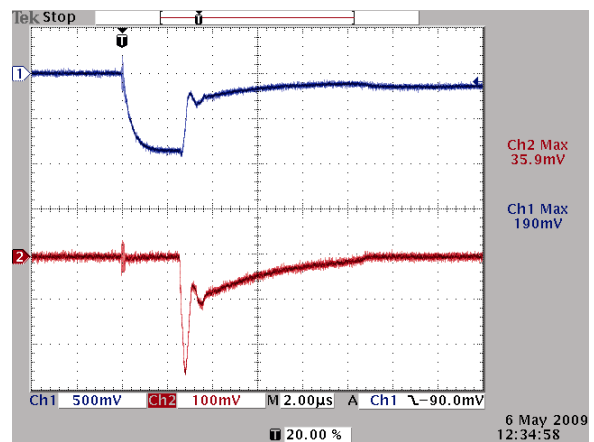
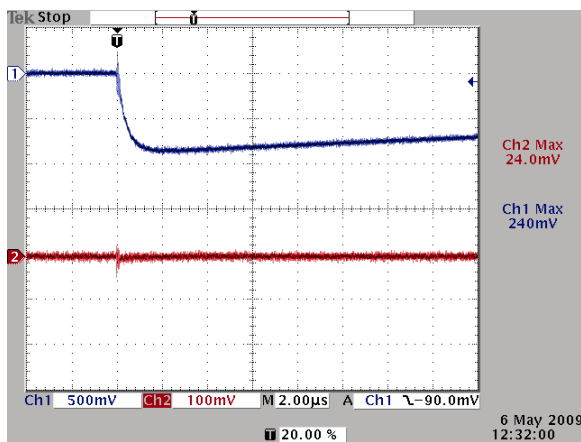


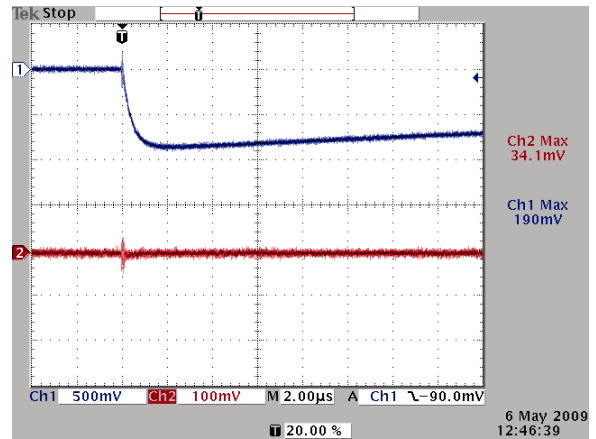
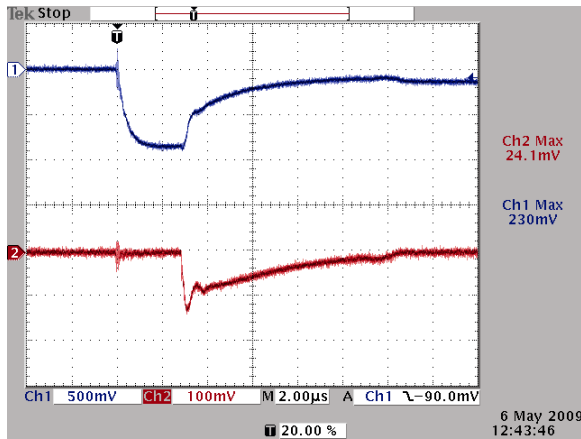
**Δείγμα χρώματος Α- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,58-59$**



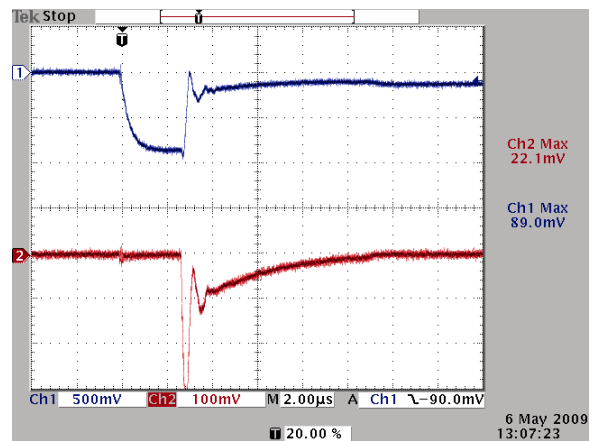
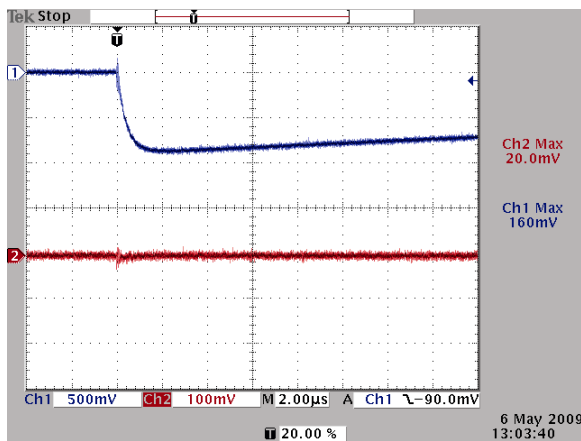
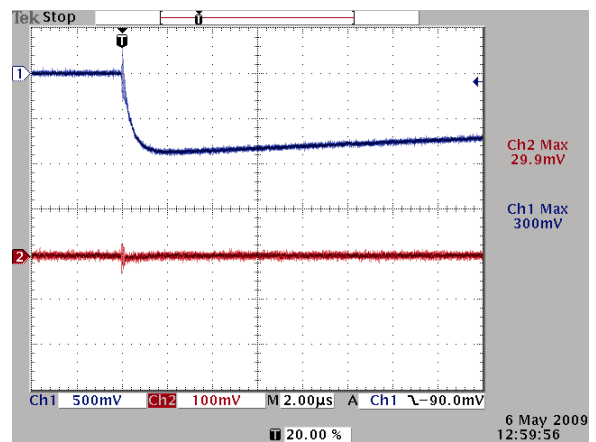
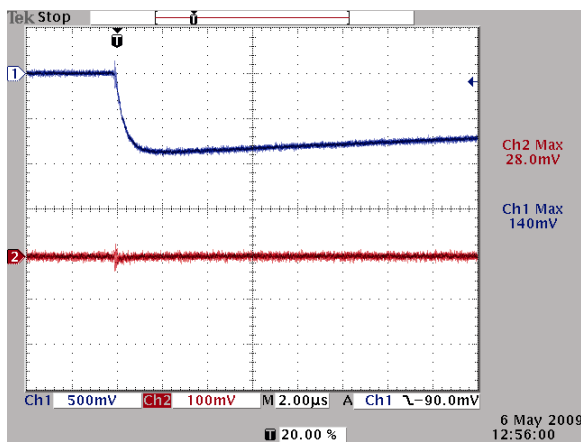


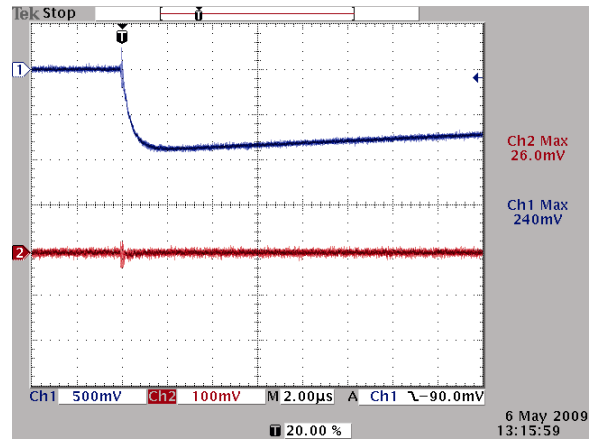
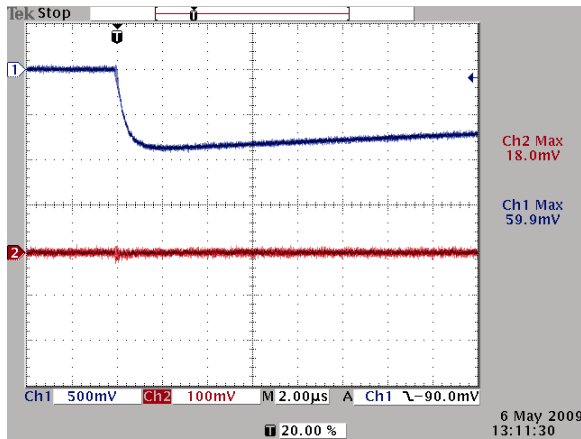
Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A - δ1



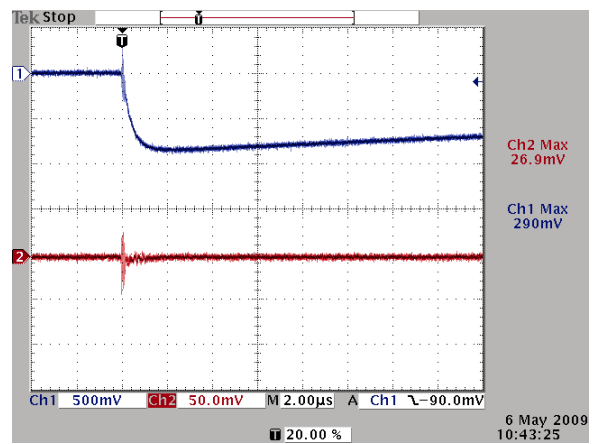
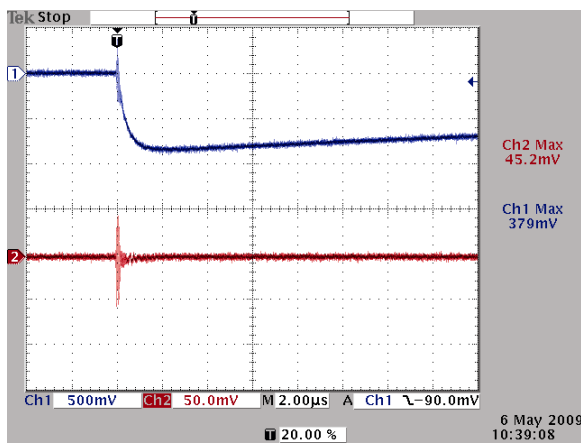
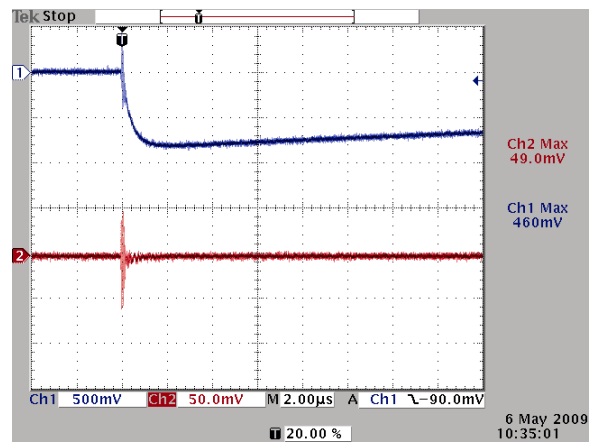
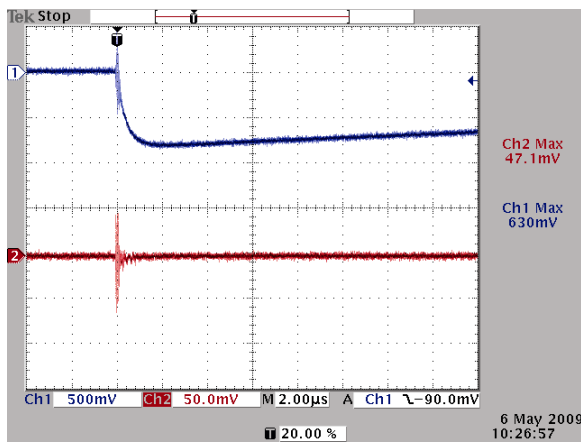


Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A - δ2

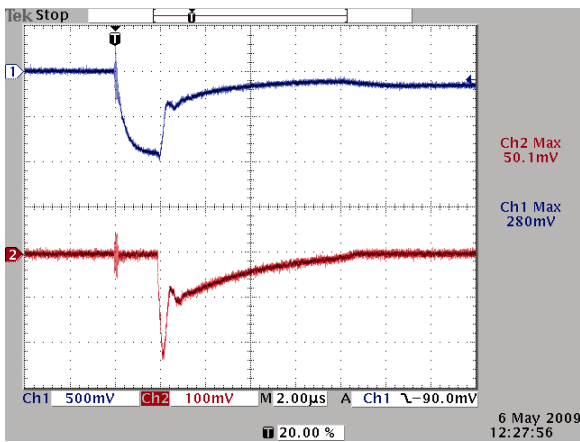
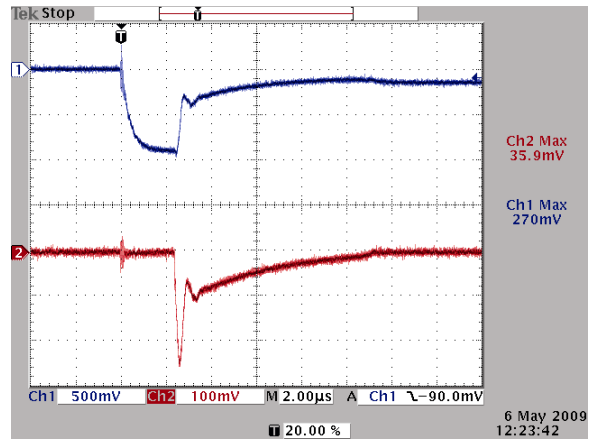
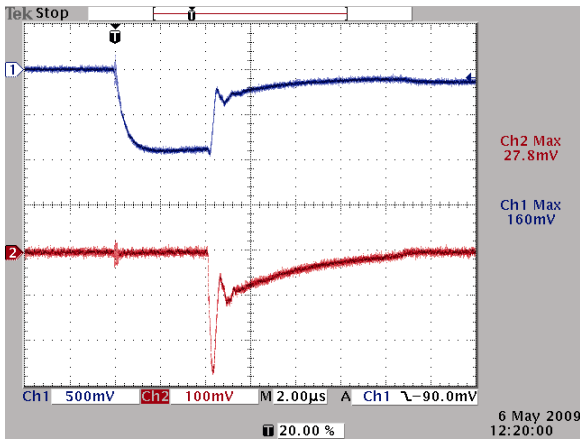




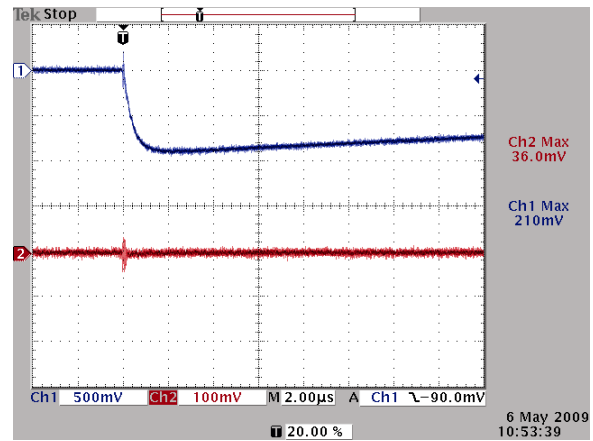
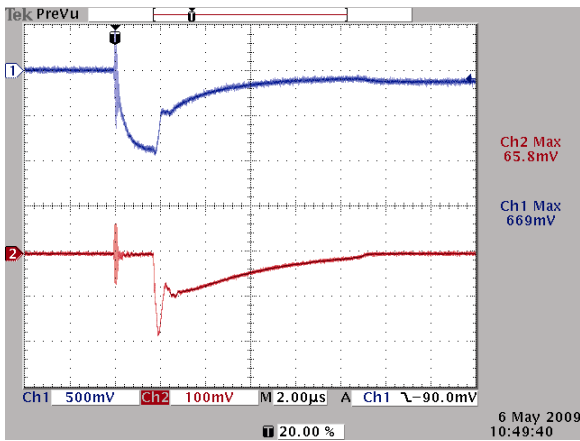
Δείγμα χώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,5$

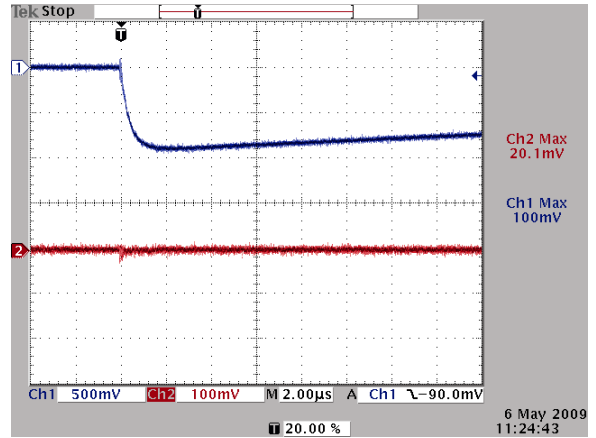
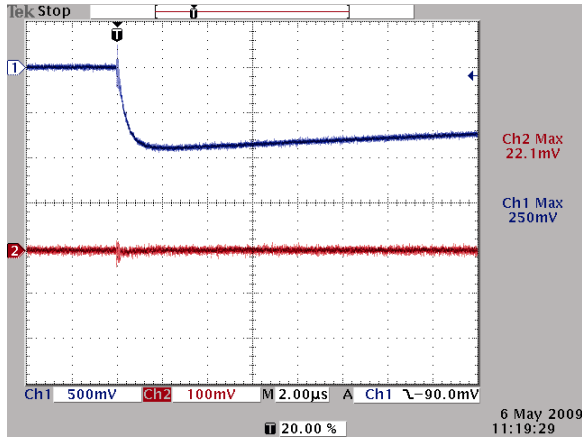
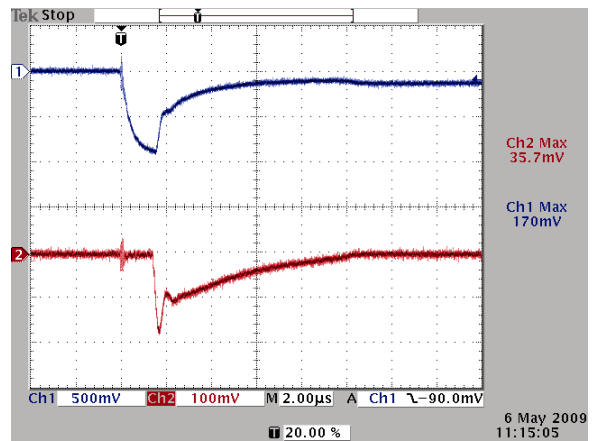
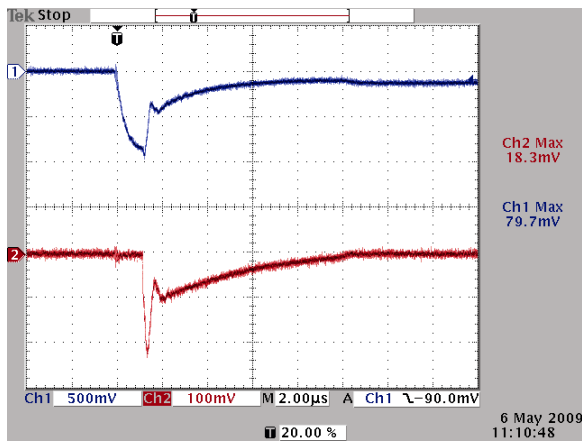
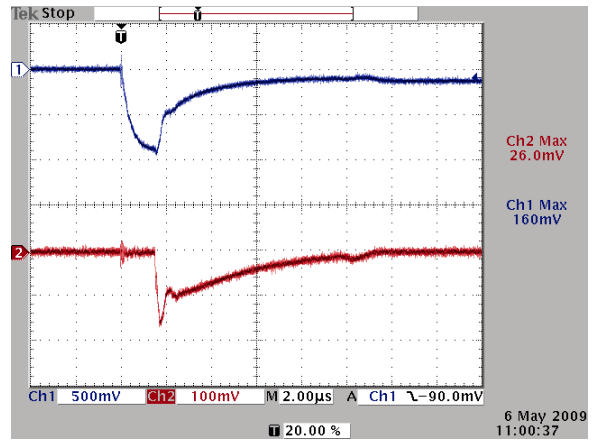
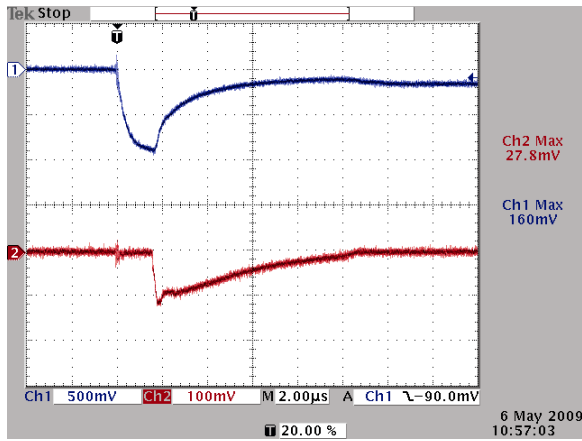


**Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,51$**



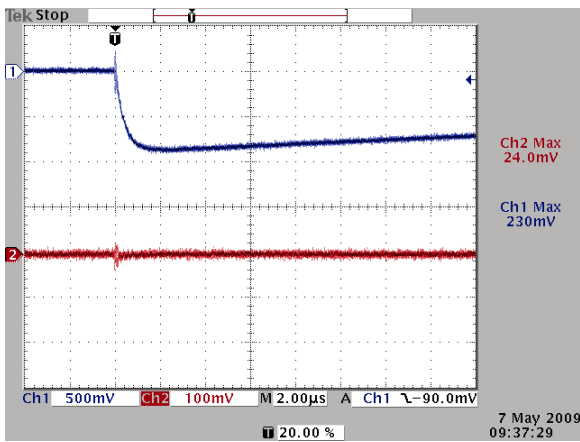
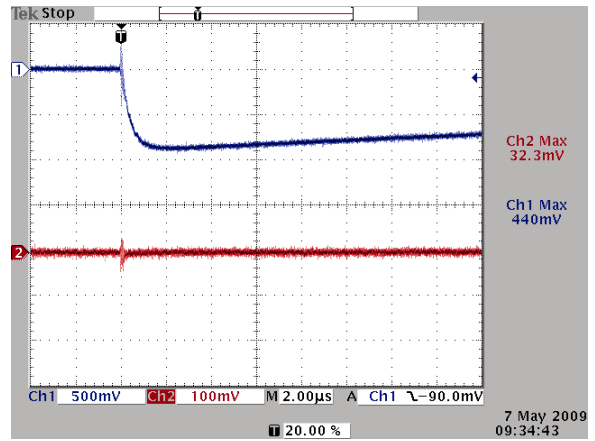
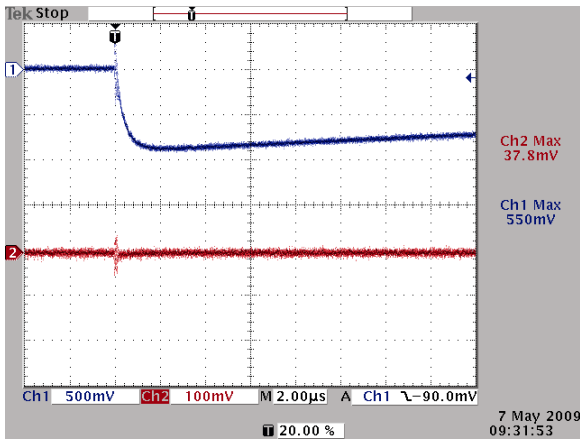
**Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,55$**



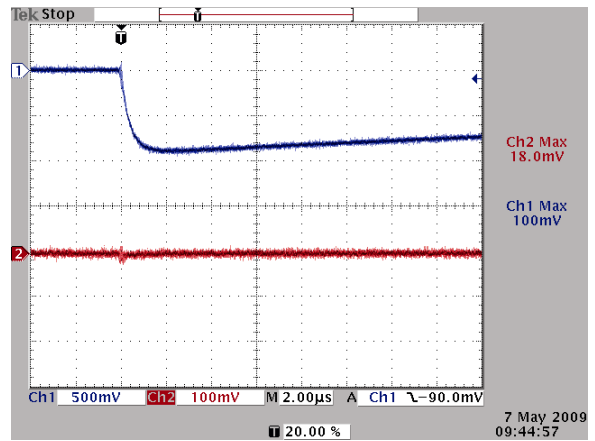
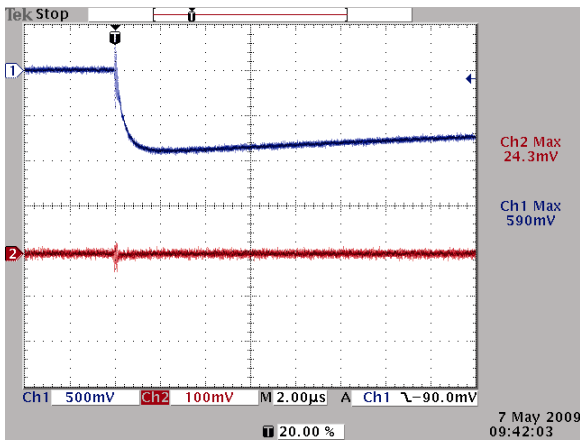


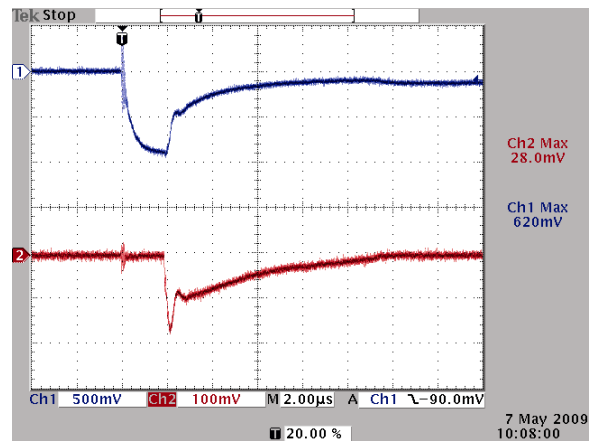
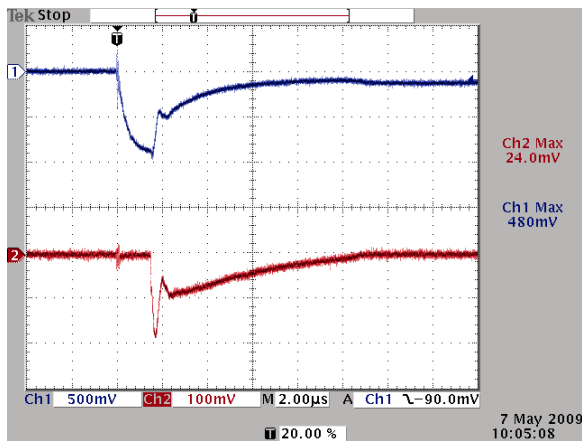
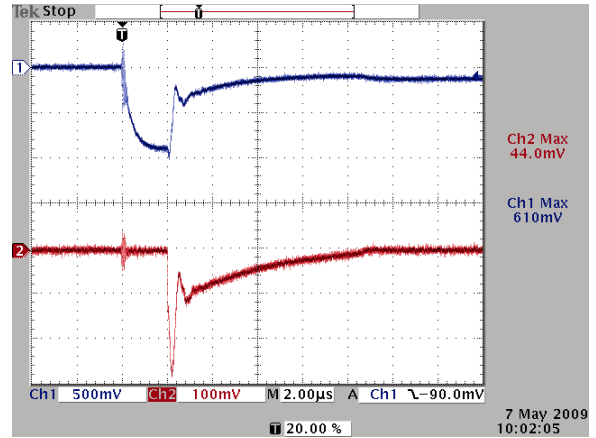
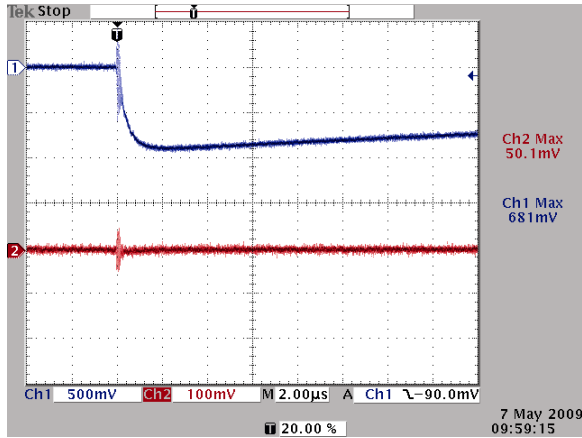
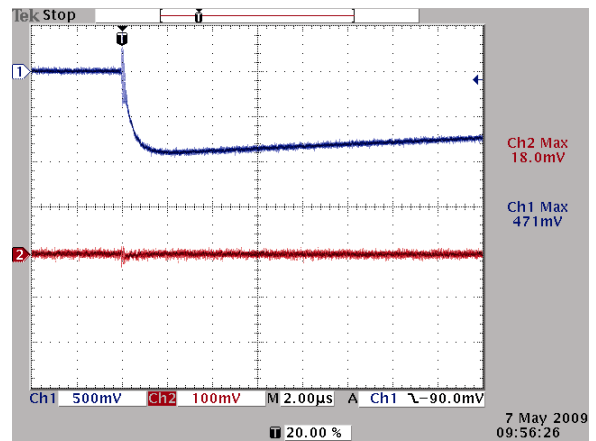
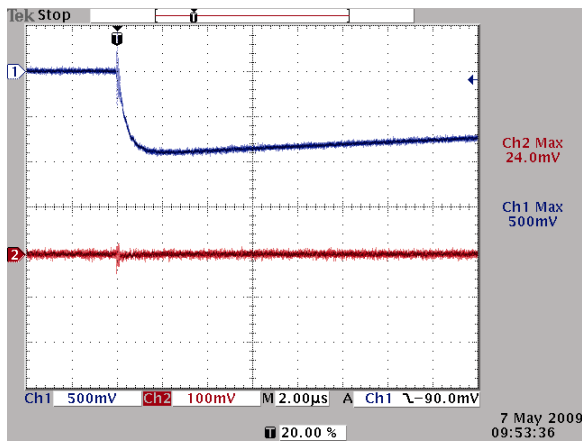
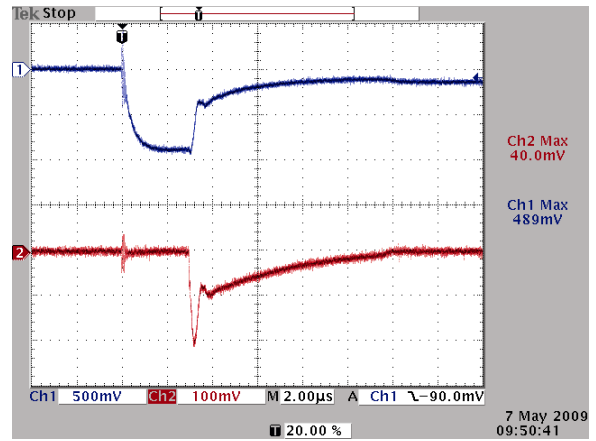
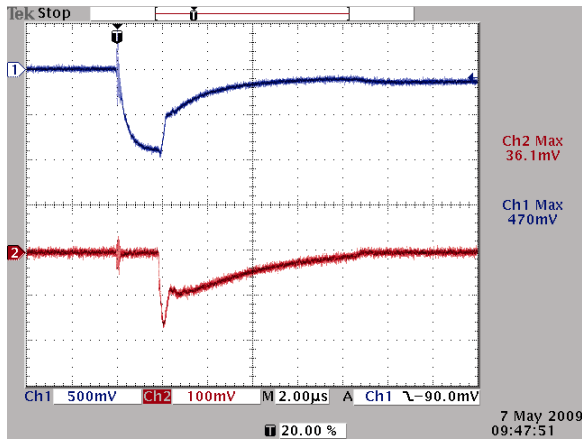


**Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,51$**

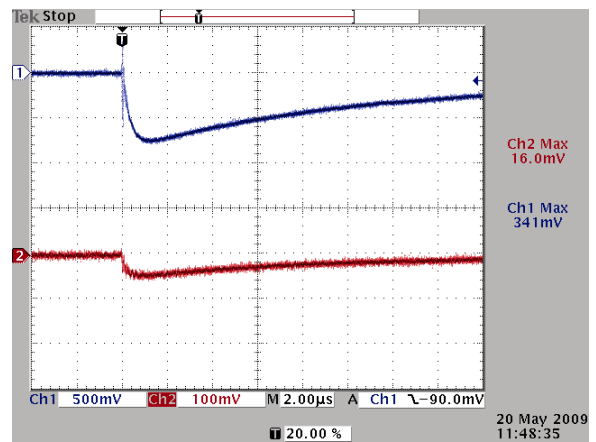
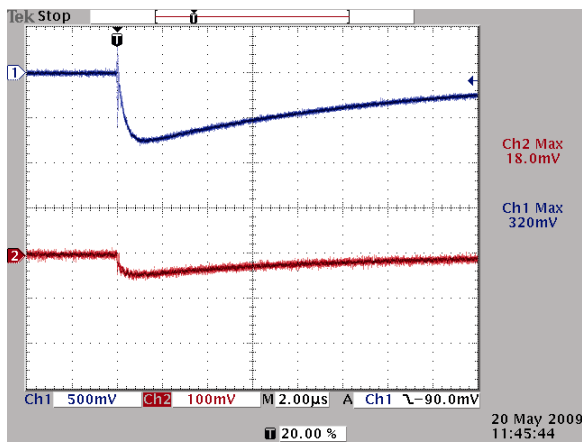


**Δείγμα χρώματος A- 0% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $U_{50\%} \delta=1,54$**

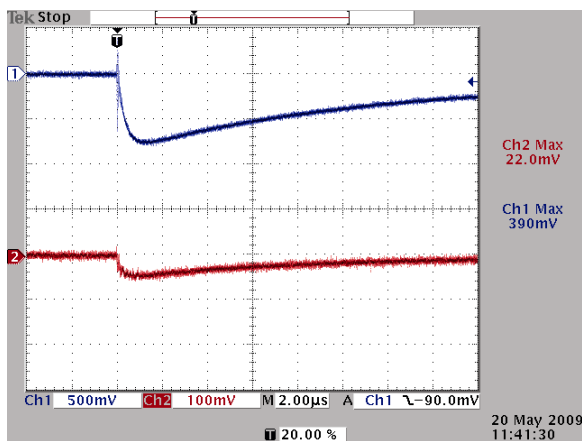
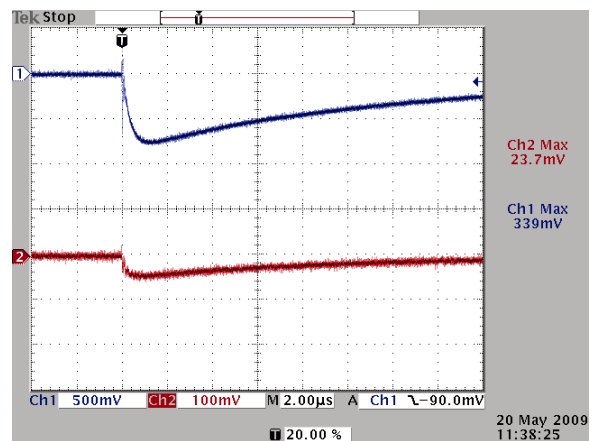
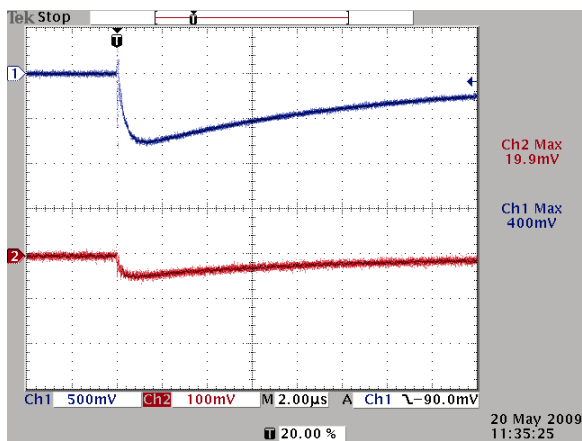




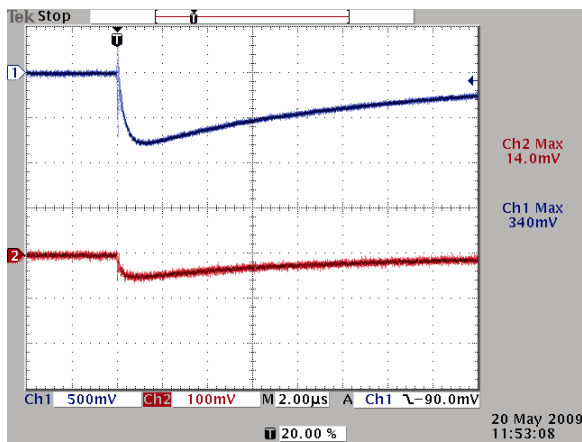
Δείγμα χώματος Α- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,8$



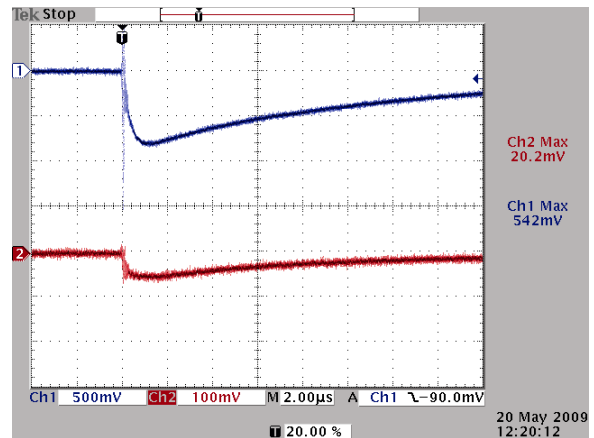
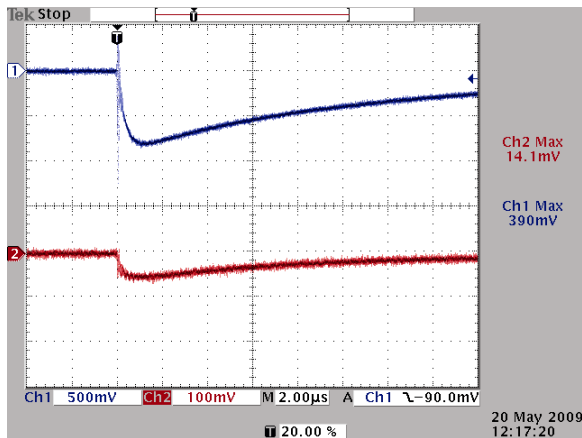
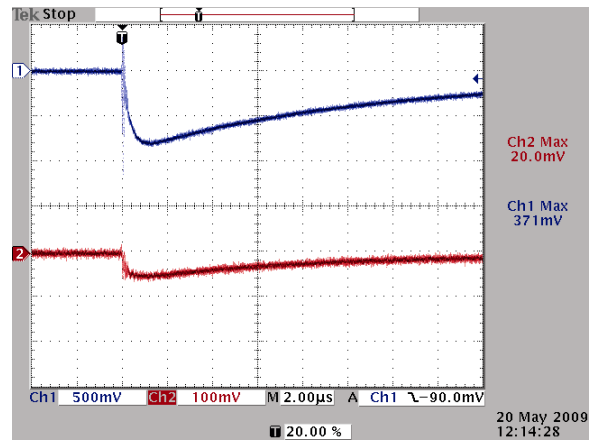
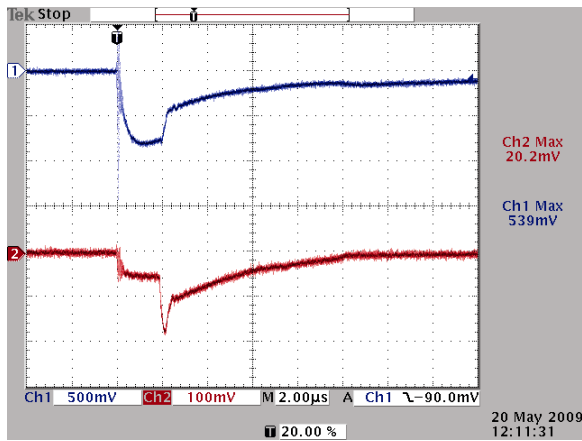
Δείγμα χώματος Α- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,75$

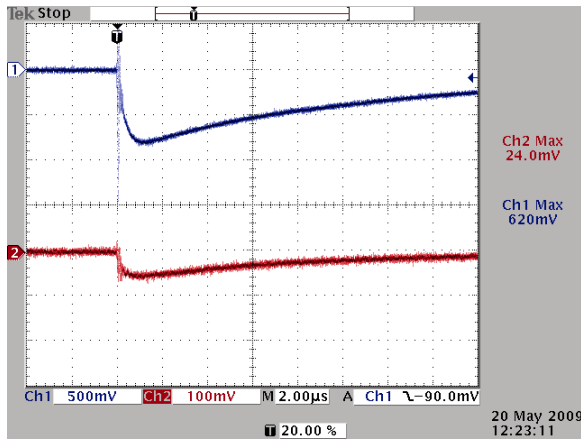


Δείγμα χώματος Α- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,85$

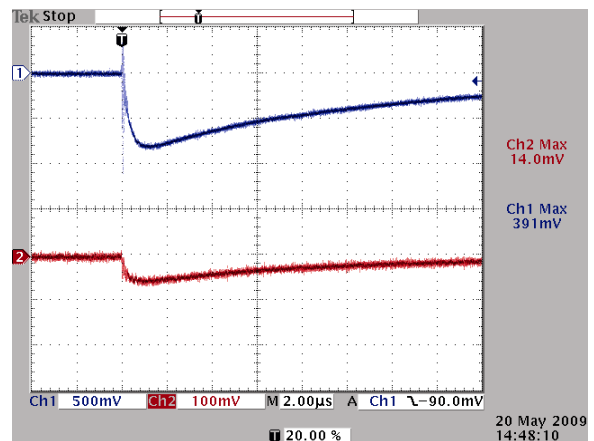
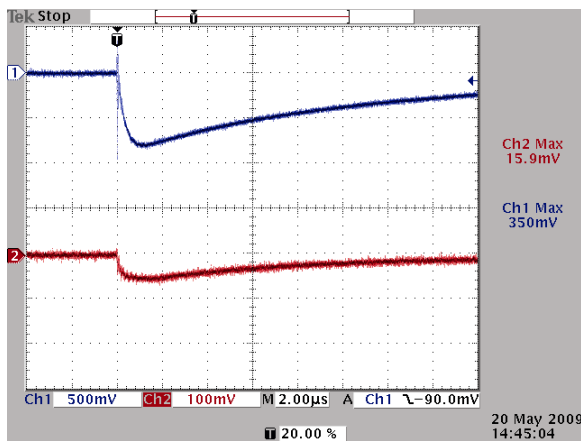
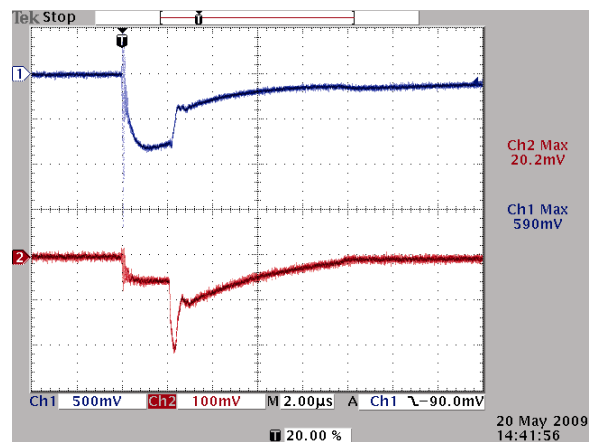
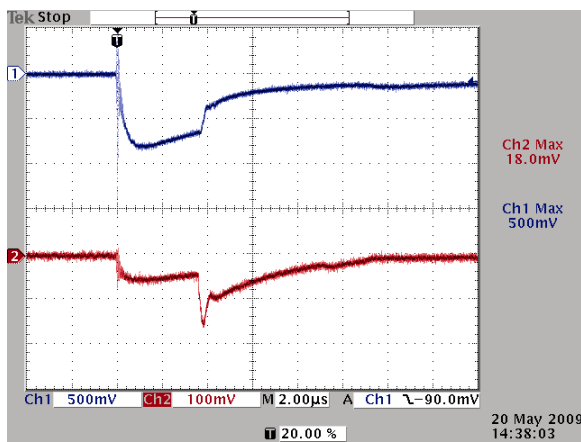


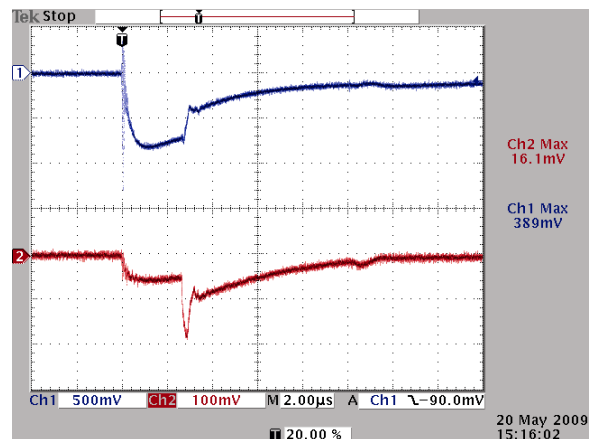
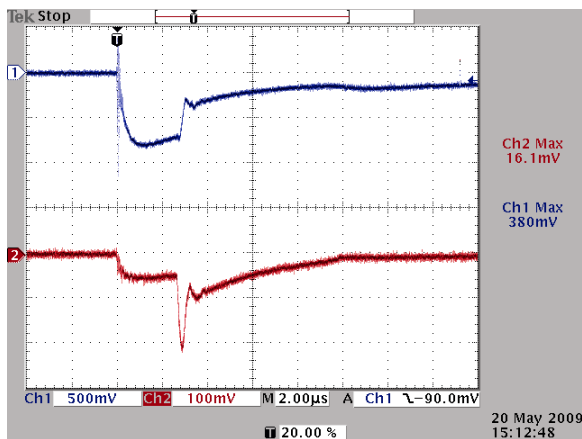
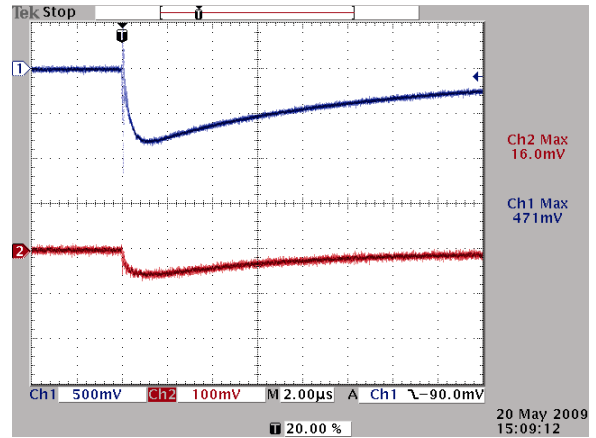
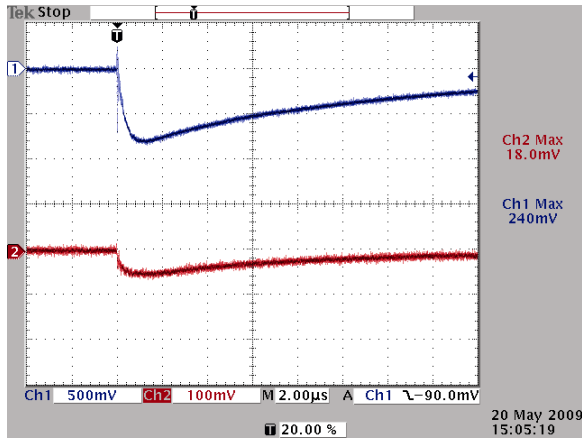
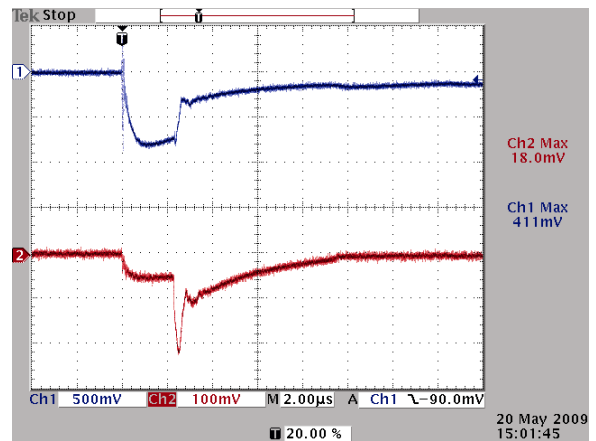
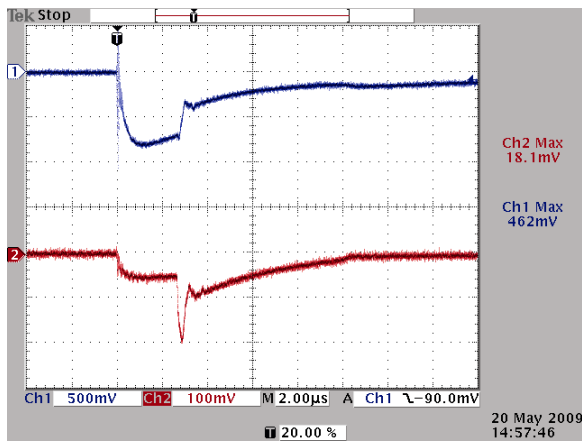
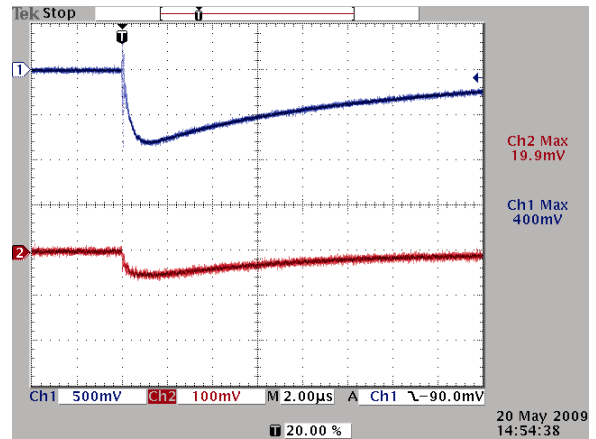
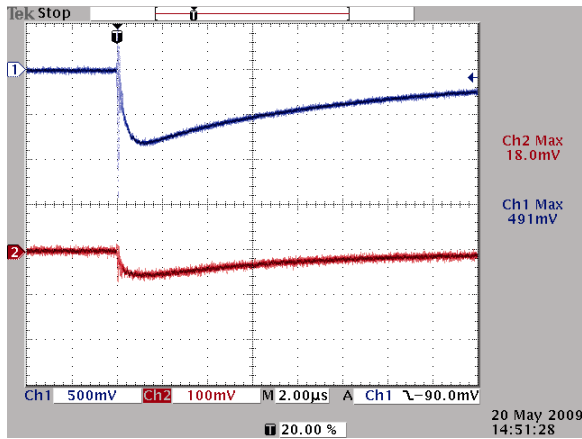
Δείγμα χώματος Α- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,95$



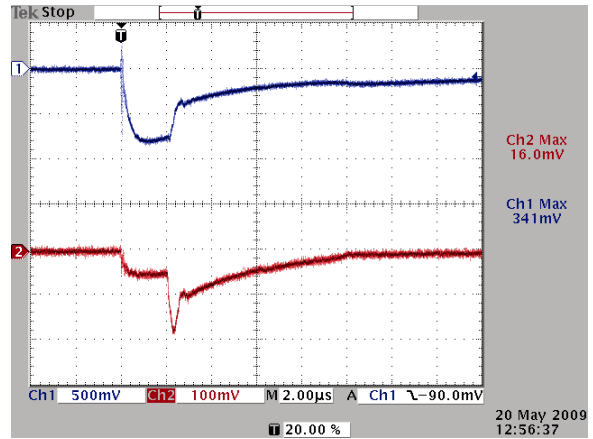
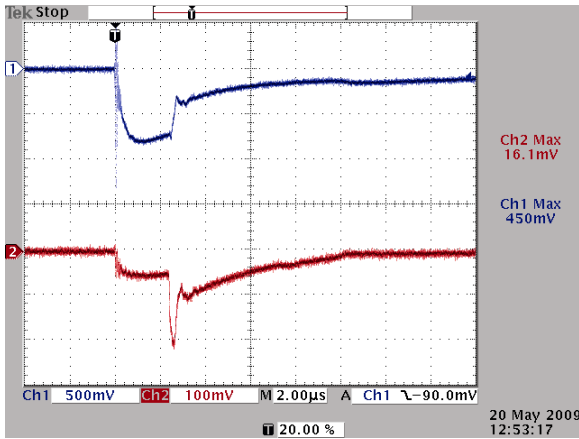


Δείγμα χρώματος A- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $U_{50\%} \delta=1,95B$

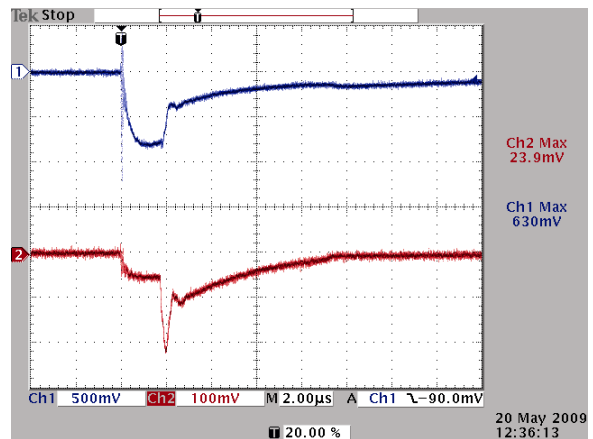
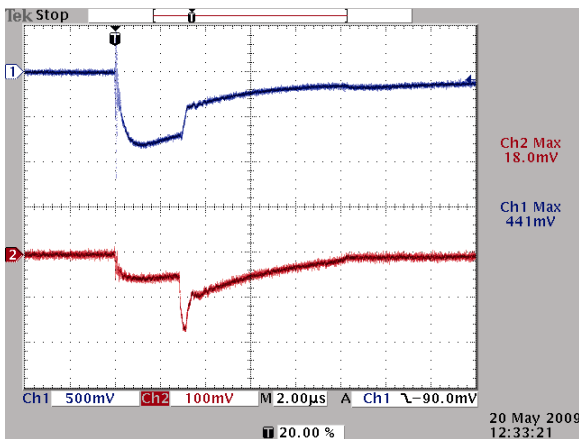
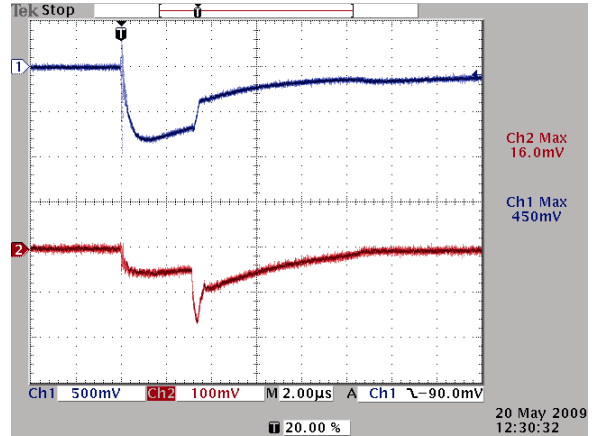
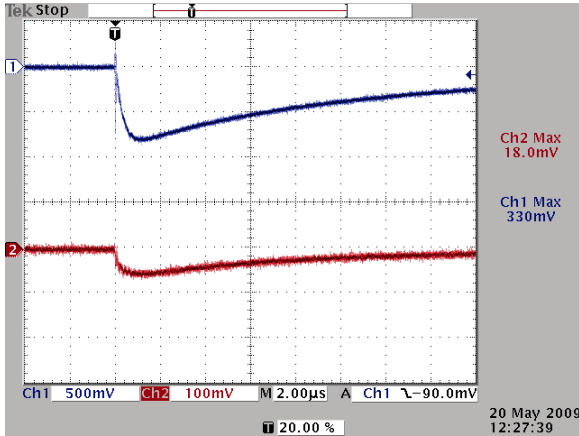


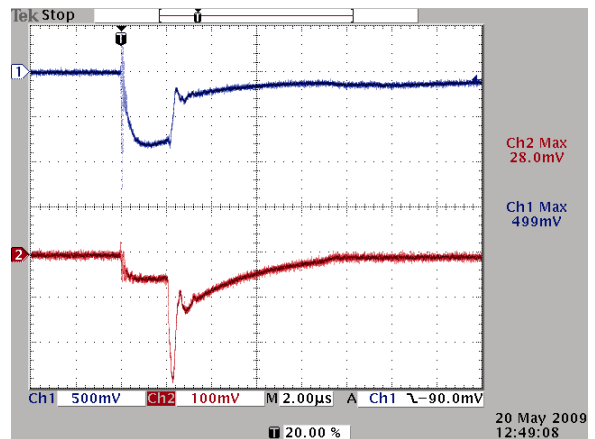
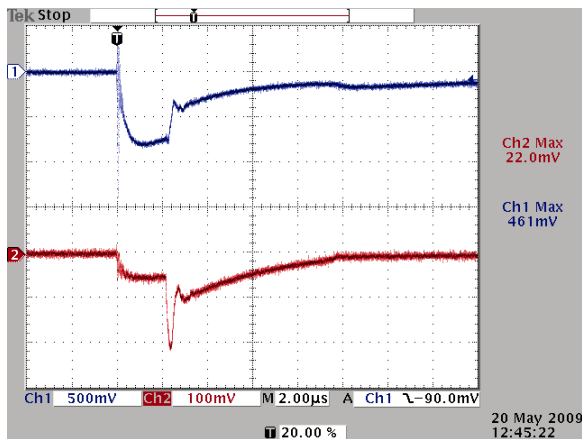
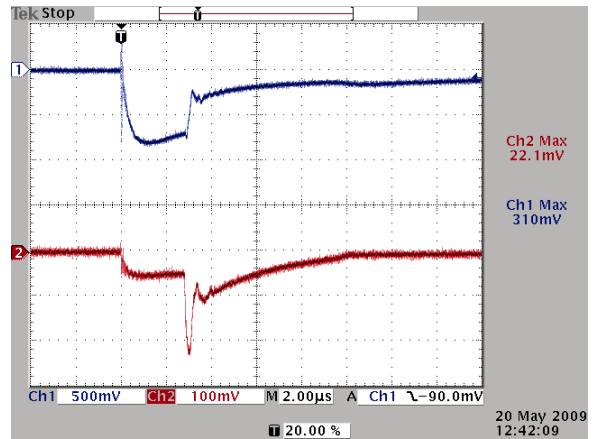
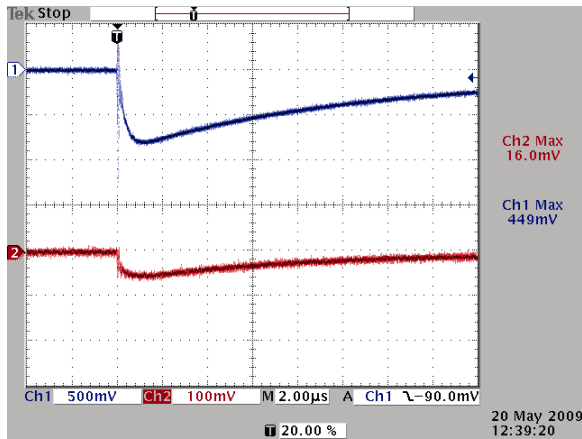


Δείγμα χόματος Α- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,96$

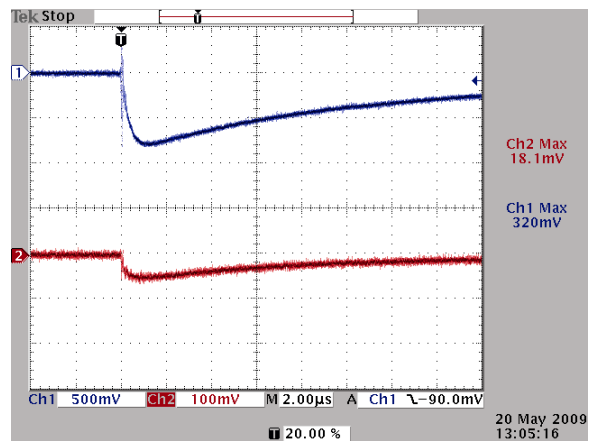
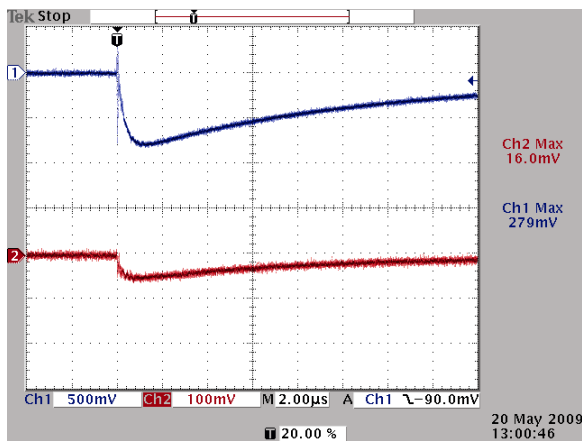


Δείγμα χόματος Α- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,97$

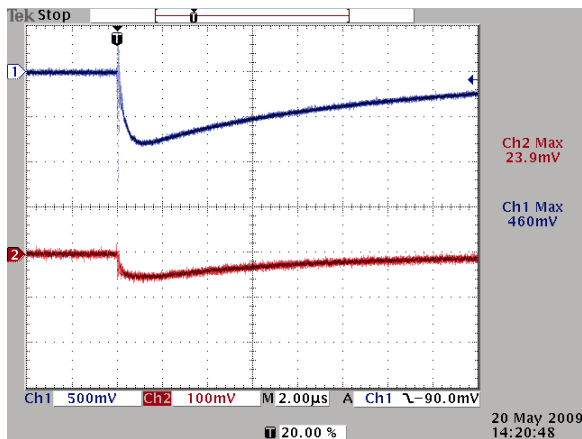
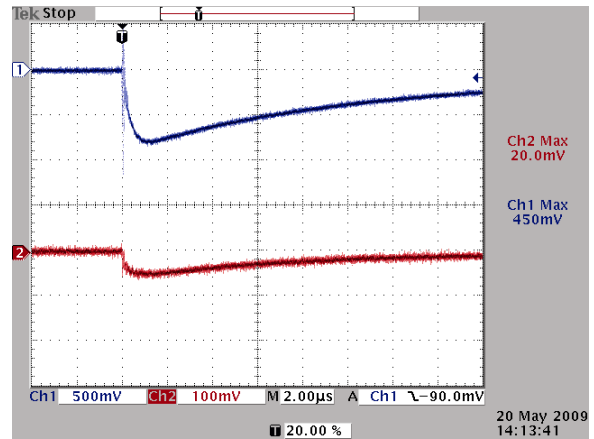
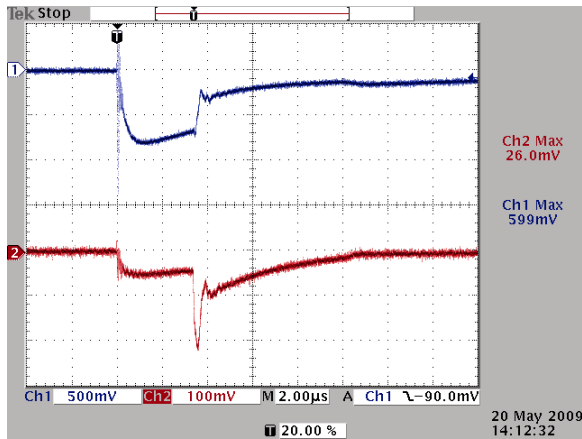




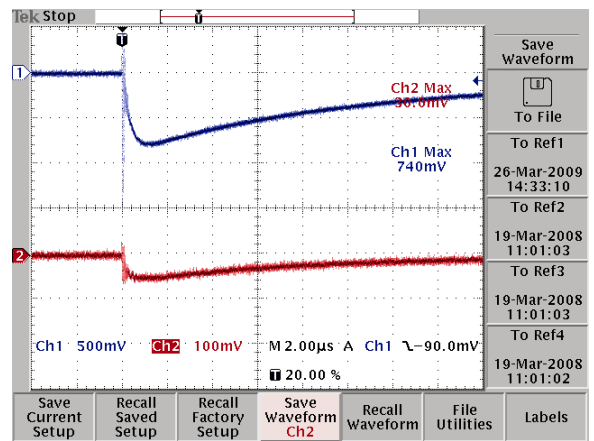
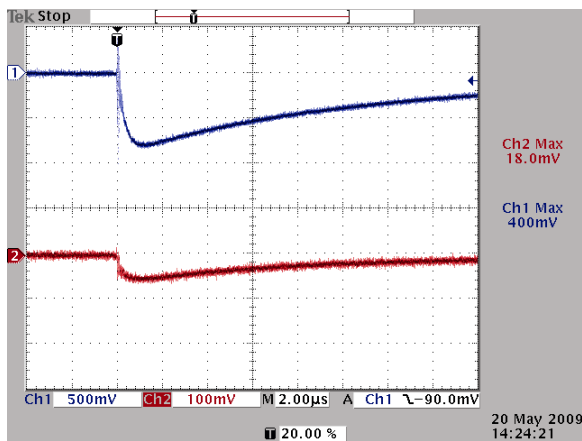
Δείγμα χώματος A- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,965$

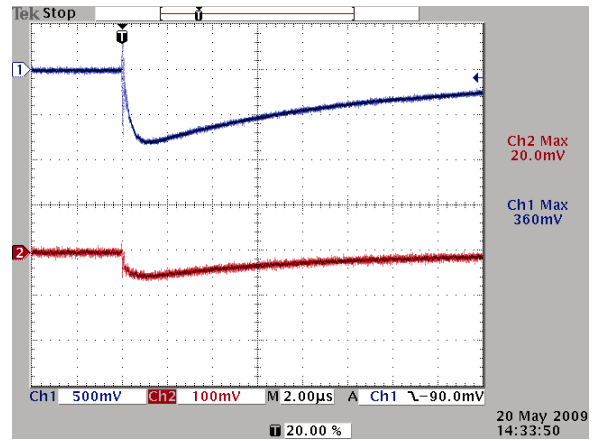
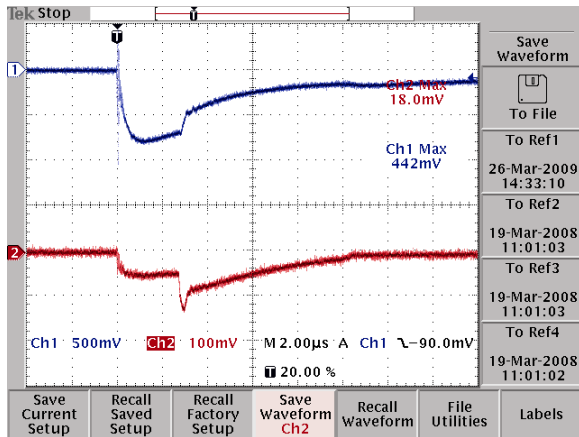




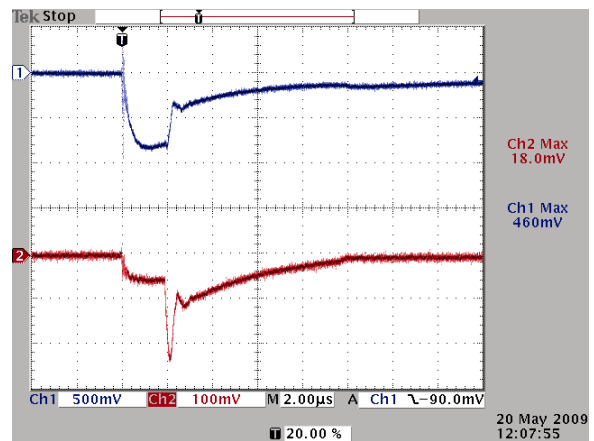
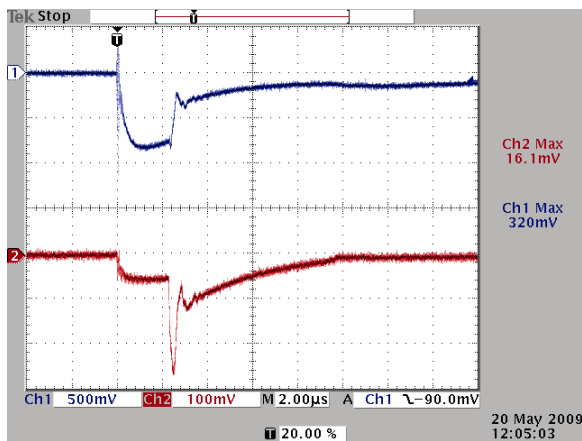
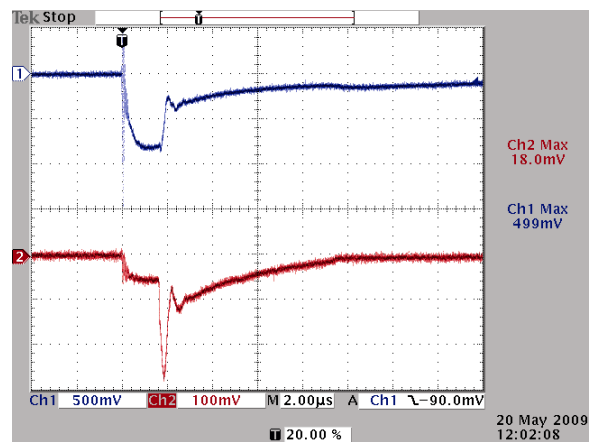
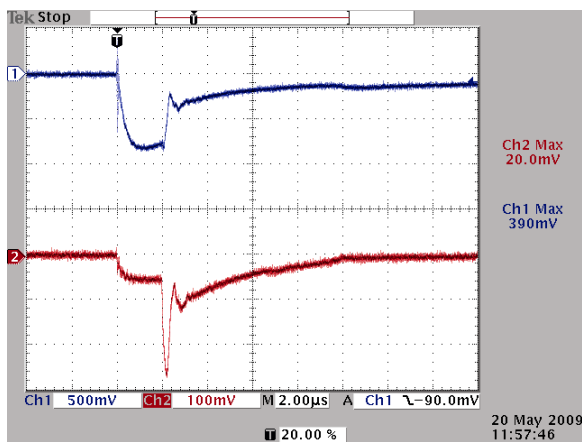


Δείγμα χρώματος A- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=1,968$

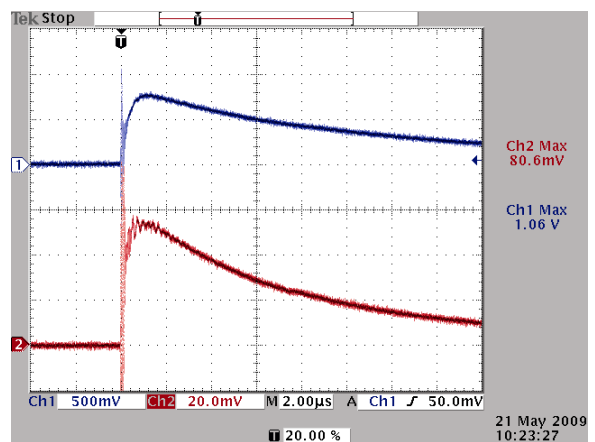
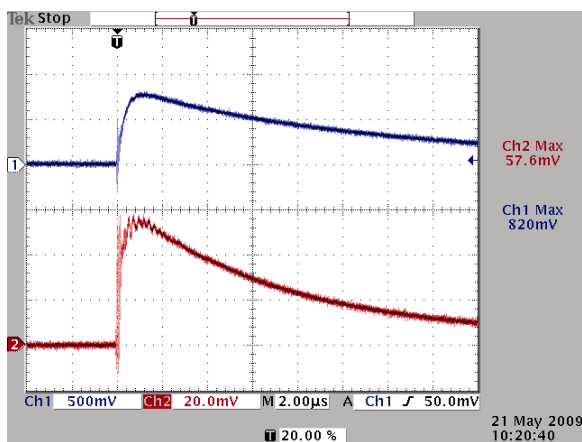
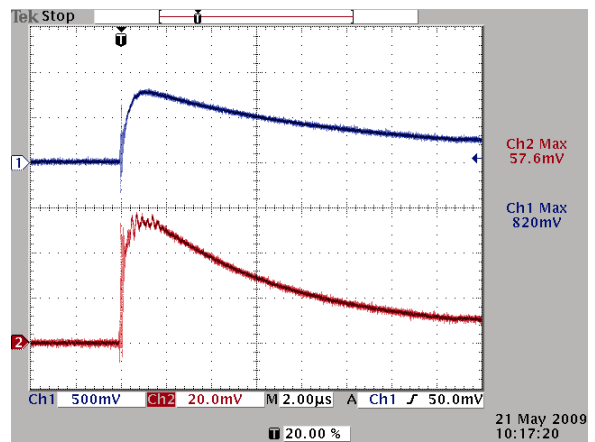
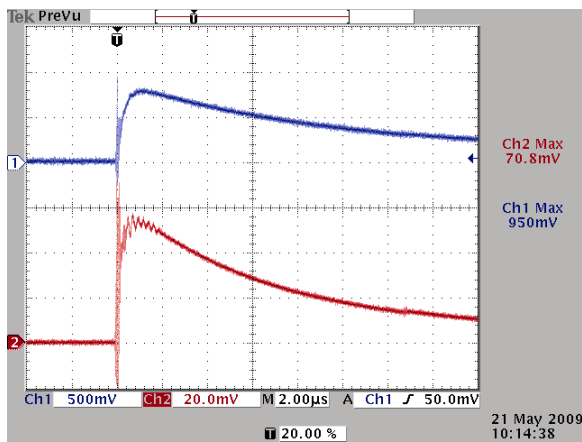




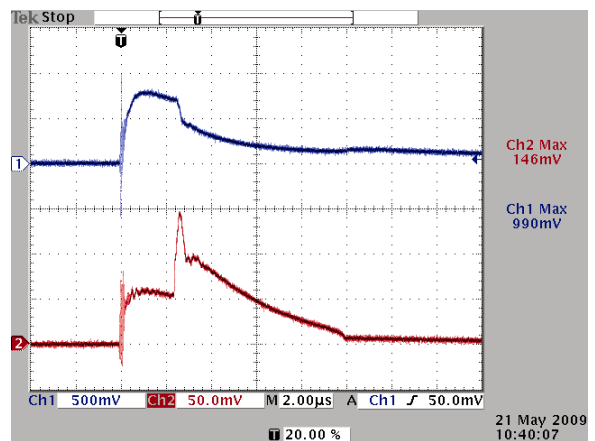
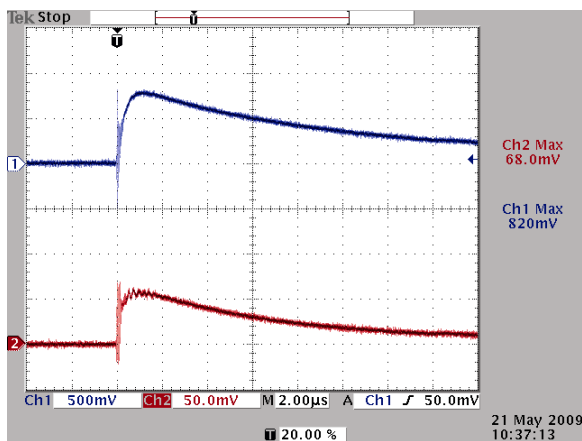
Δείγμα γώματος A- 5% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=2.0$

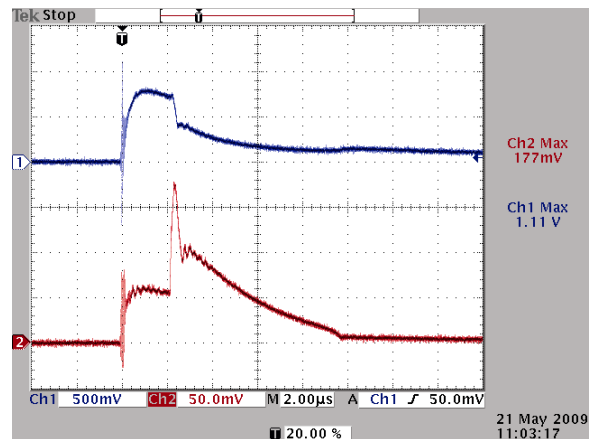
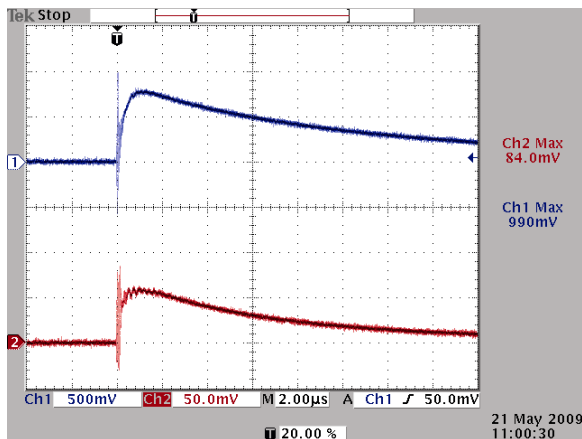
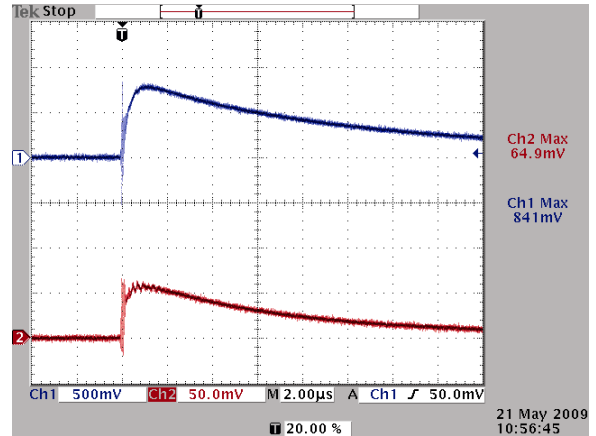
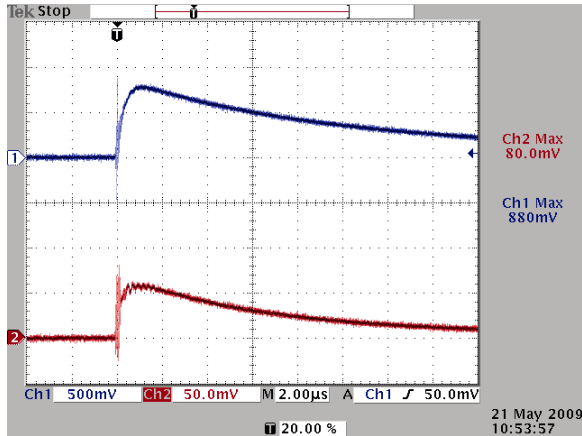
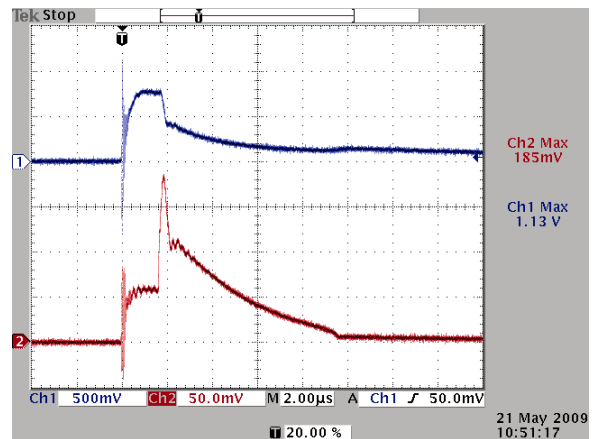
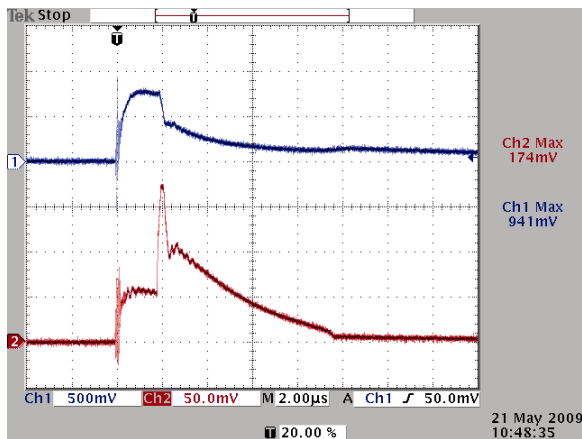
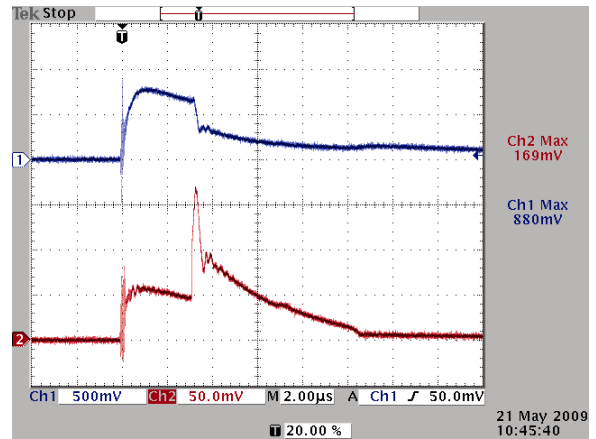
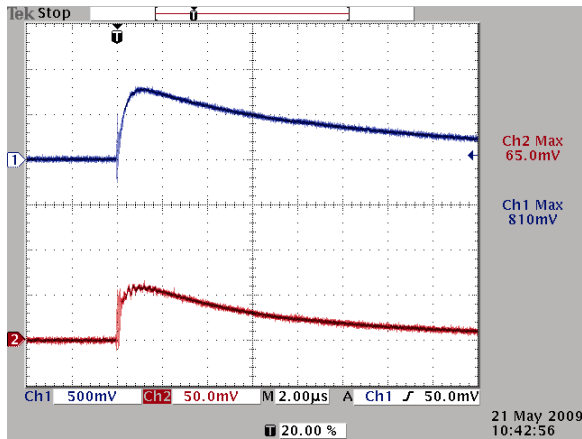


**Δείγμα χώματος Α- 5% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=1,9$**

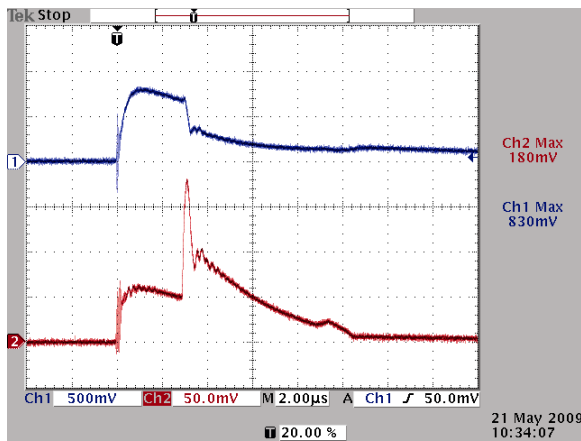
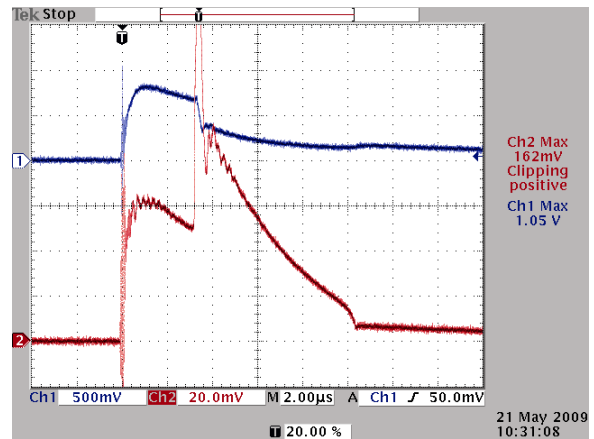
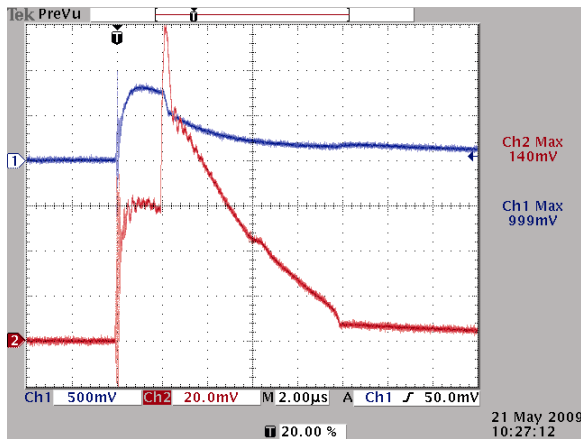


**Δείγμα χώματος Α- 5% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $U_{50\%}$   $\delta=1,95$**

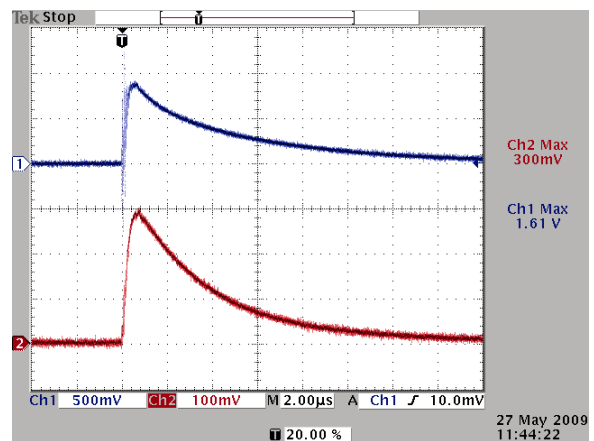
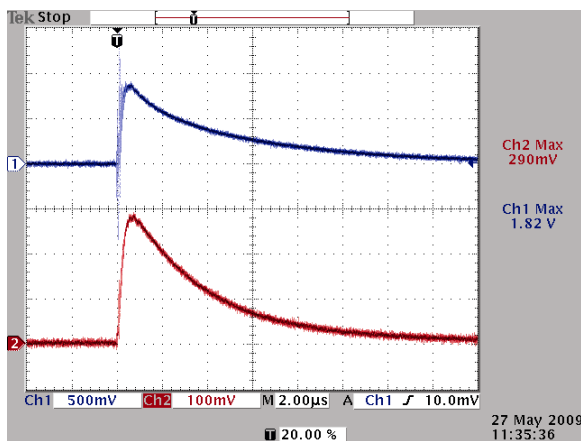


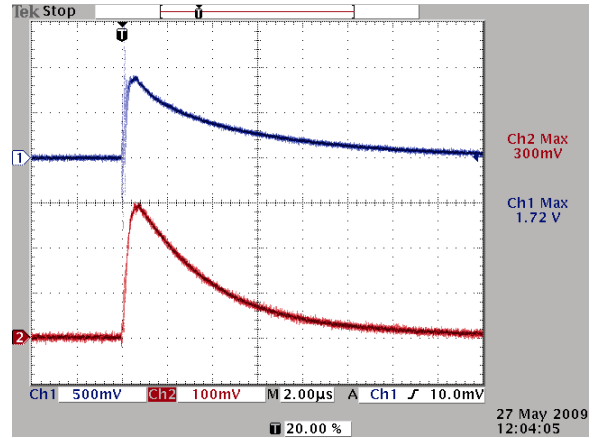
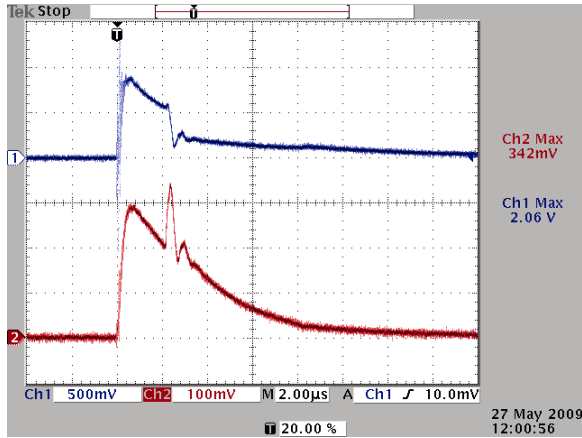
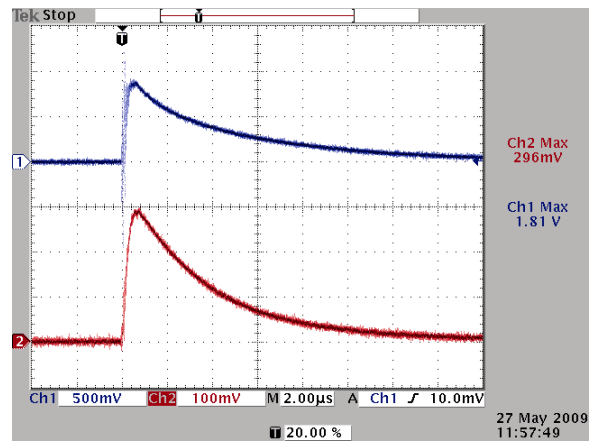
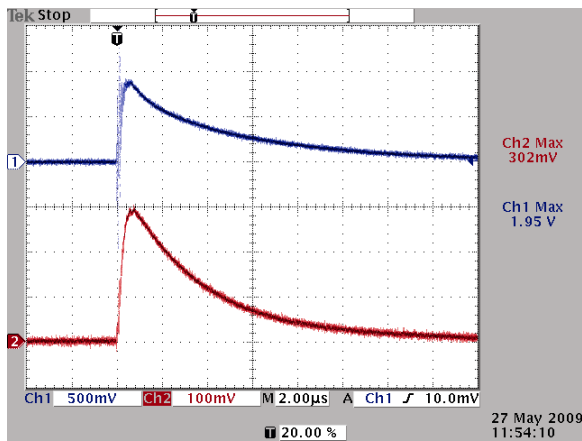
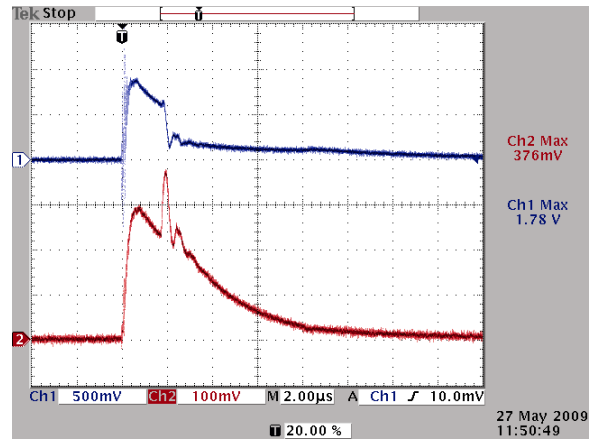
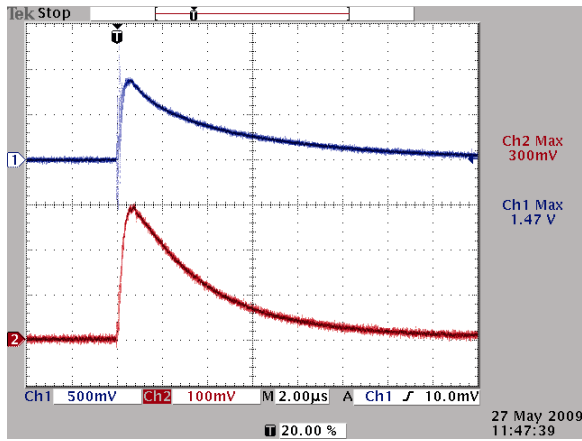


Δείγμα χώματος Α- 5% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=2.0$

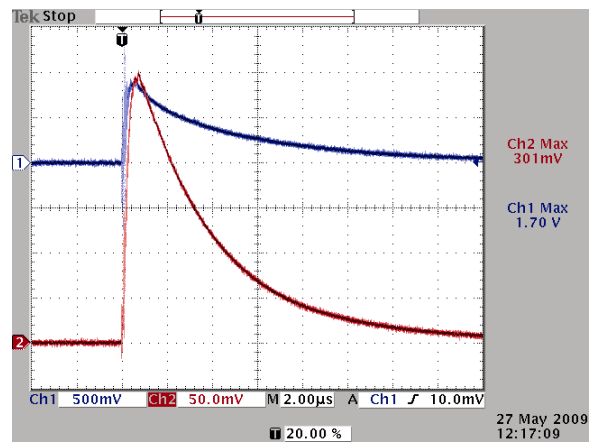
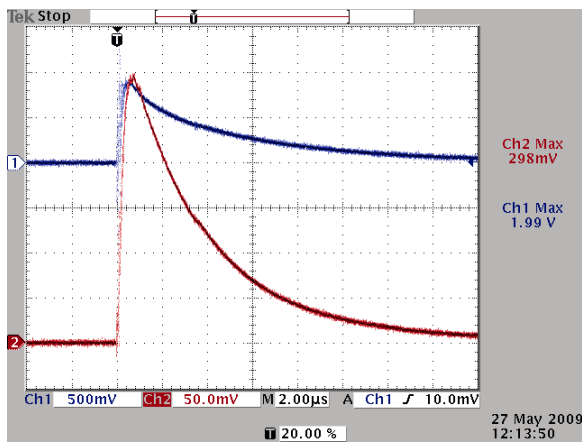


Δείγμα χώματος Α- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=4.2$

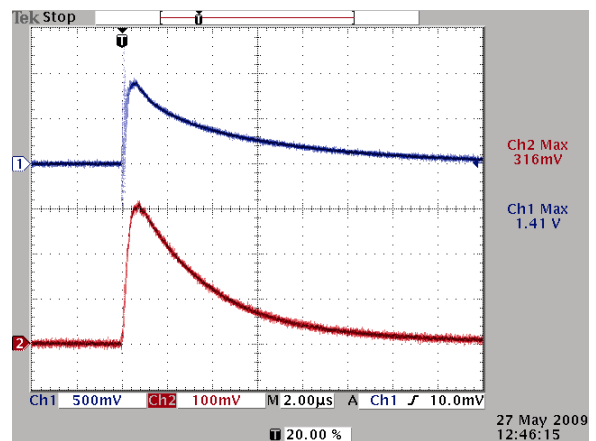
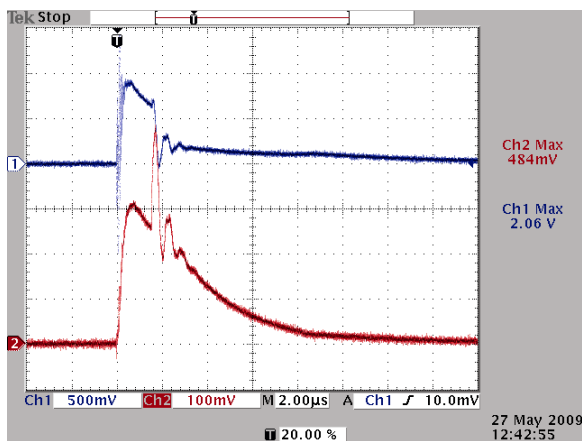
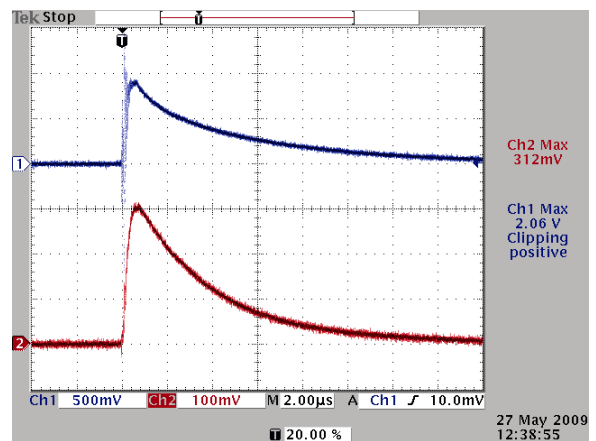
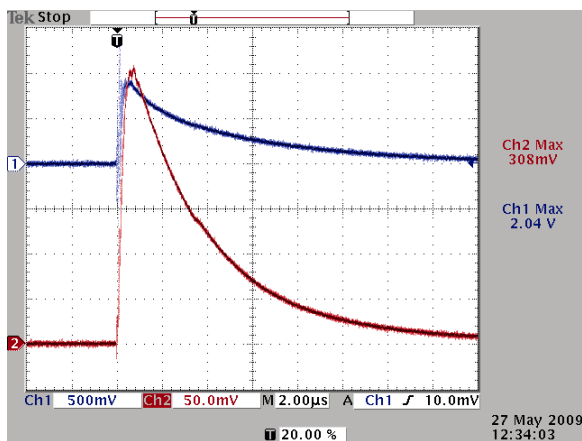




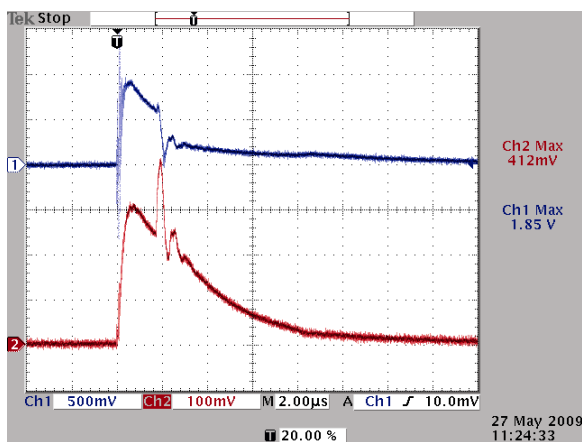
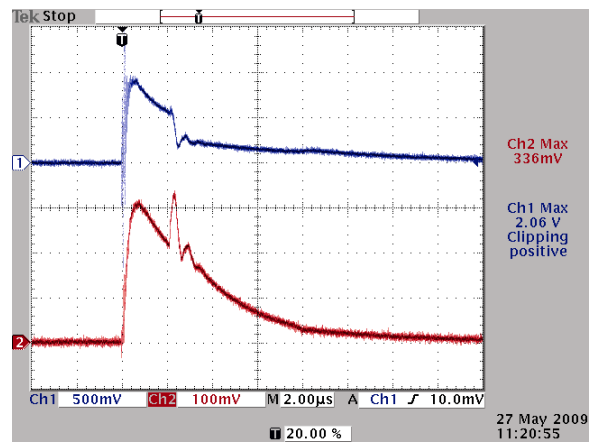
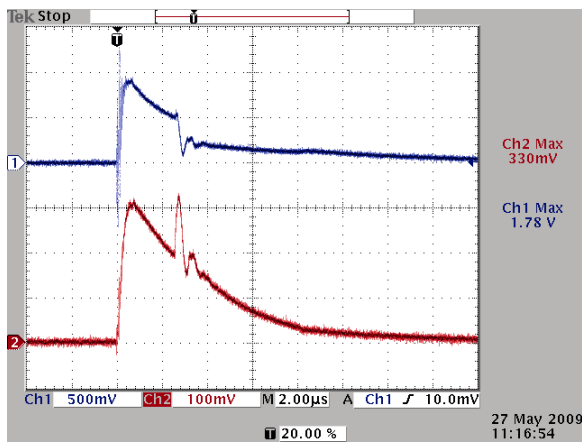
Δείγμα χρώματος Α- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=4.3$



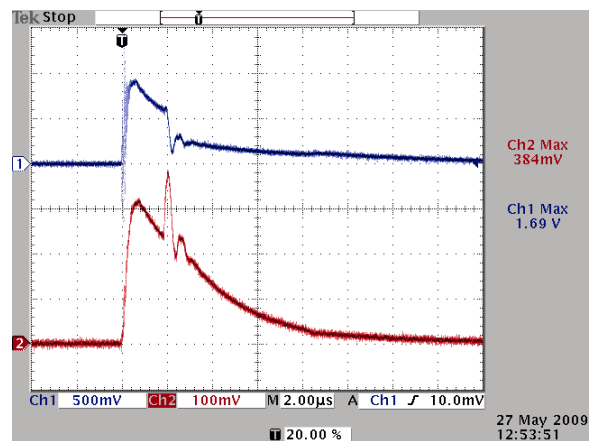
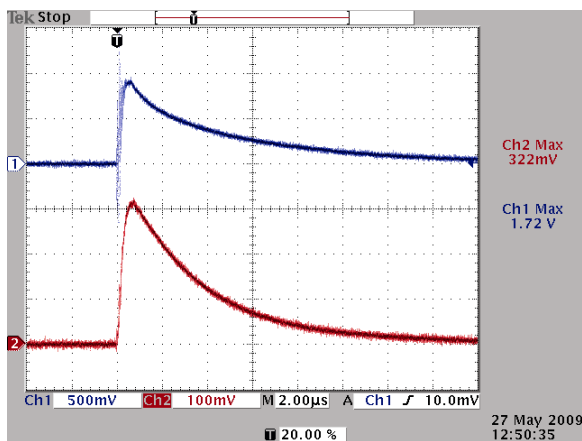
Δείγμα χρώματος Α- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=4.4$



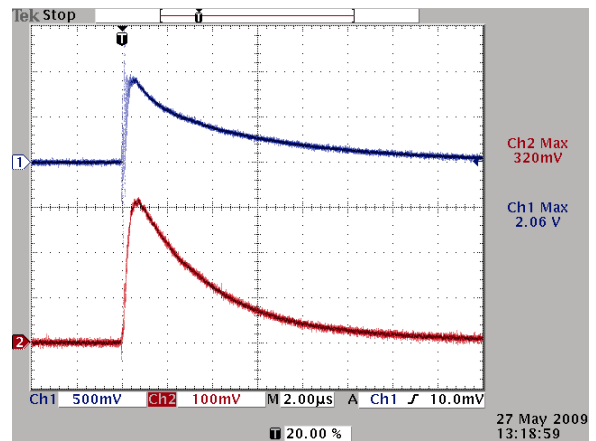
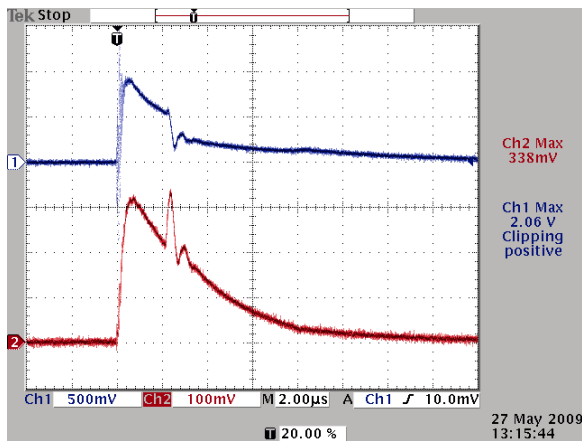
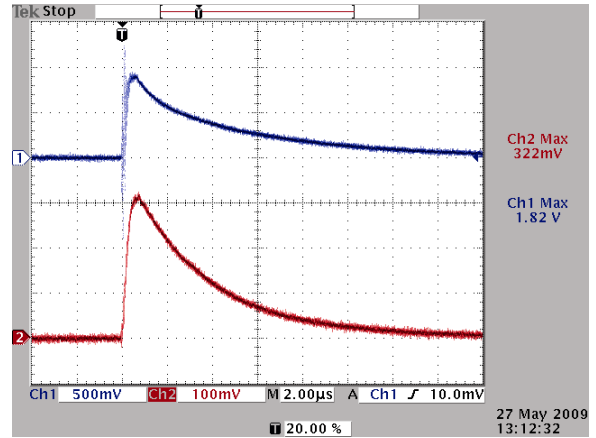
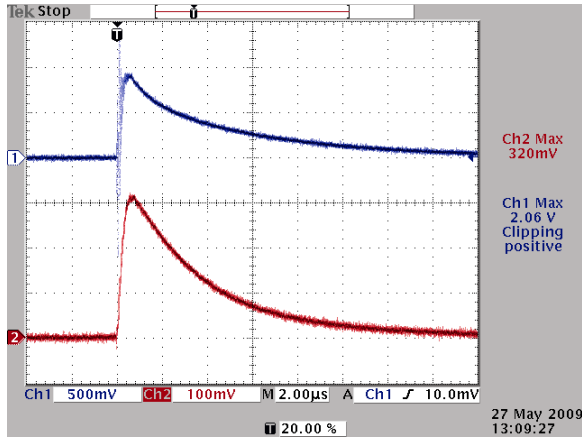
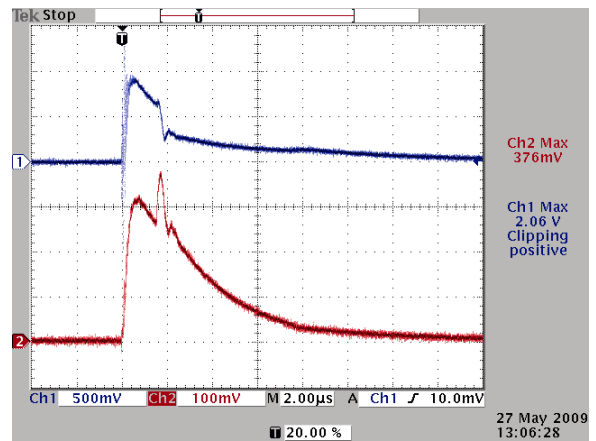
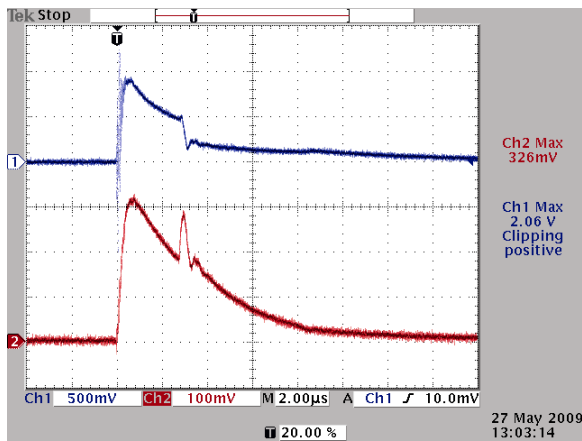
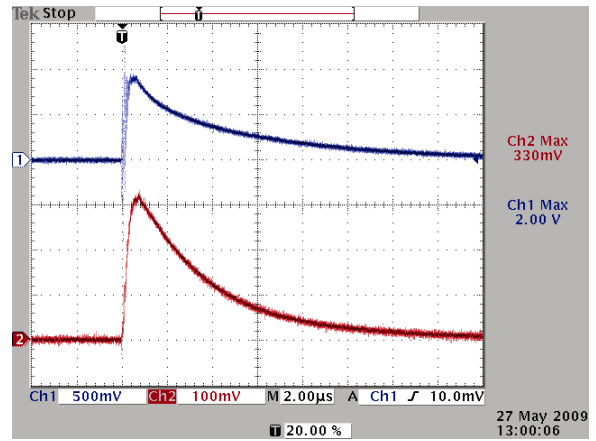
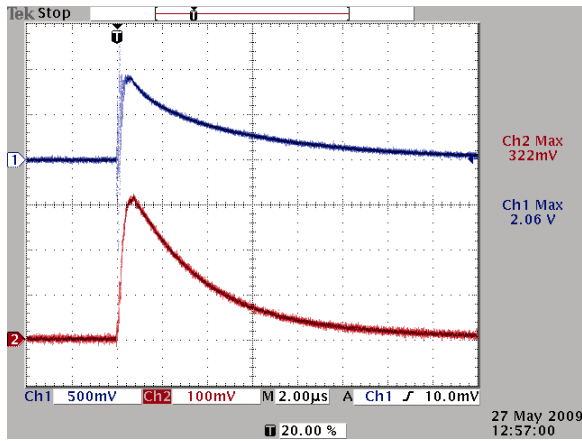
**Δείγμα χρώματος A- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=4.5A$**

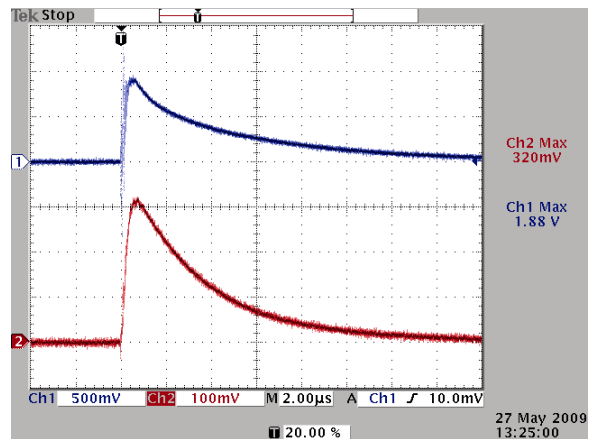
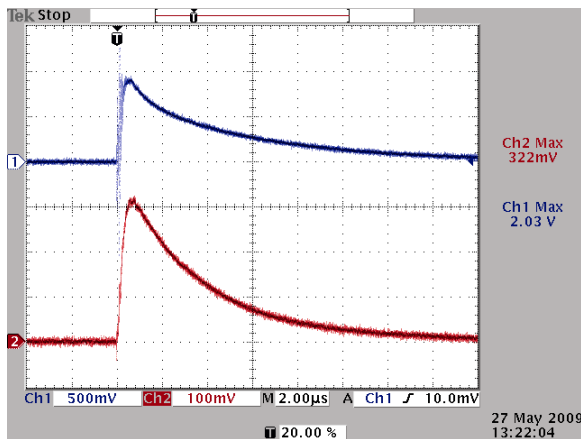


**Δείγμα χρώματος A- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=4.5B$**

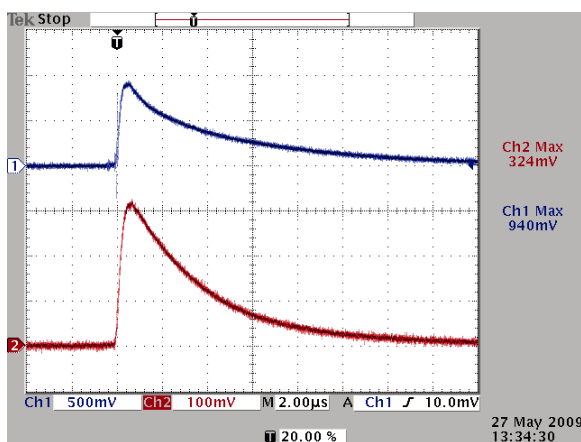




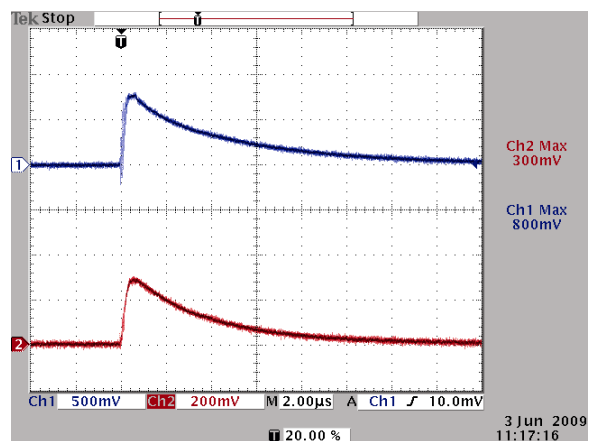
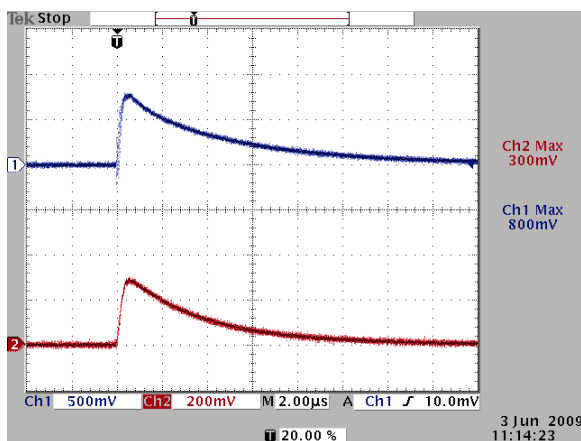


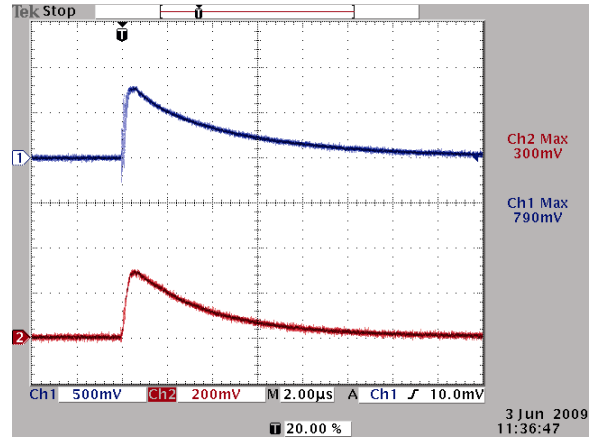
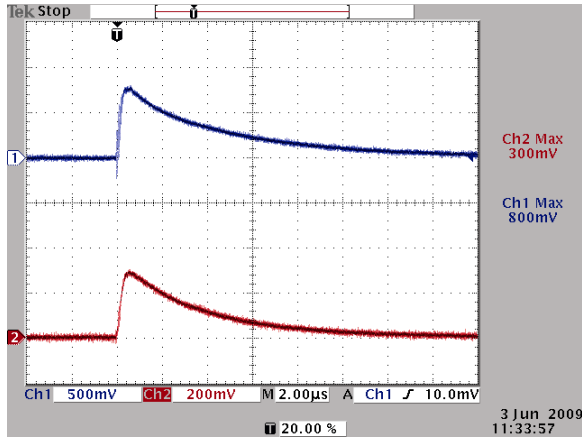
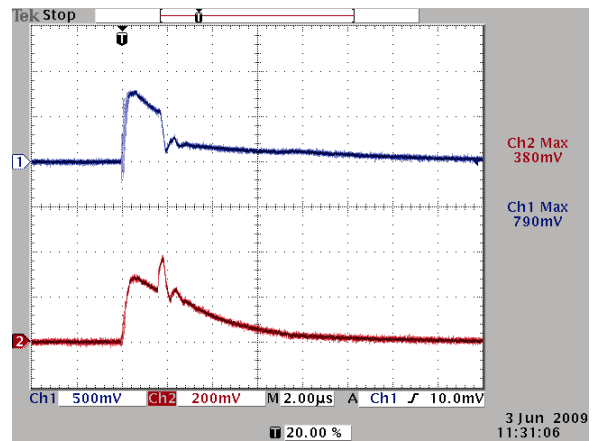
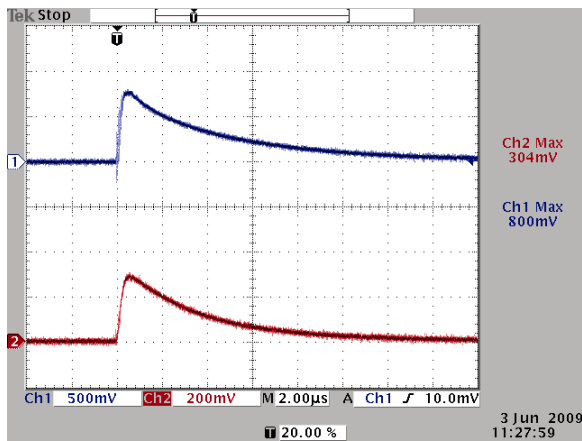
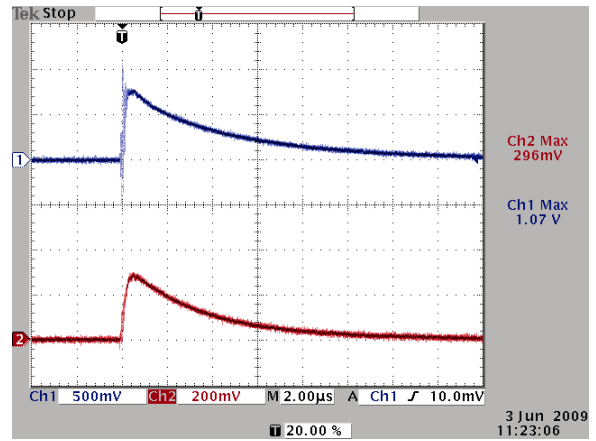
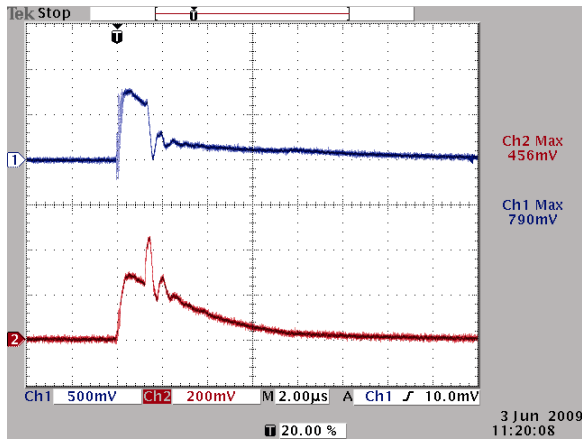


Δείγμα χρώματος A- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=4.6$

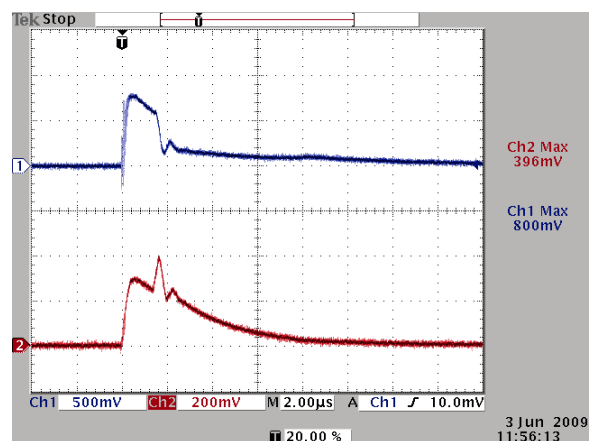
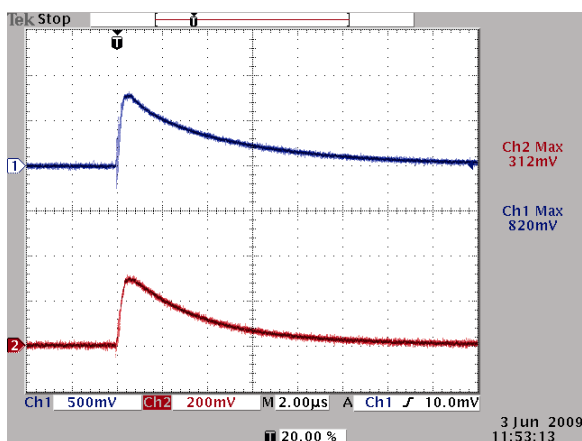
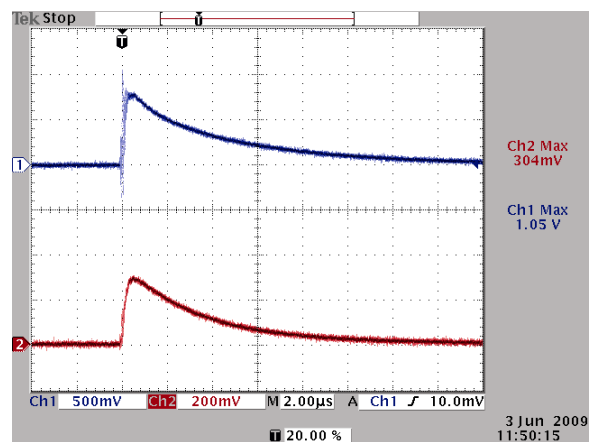
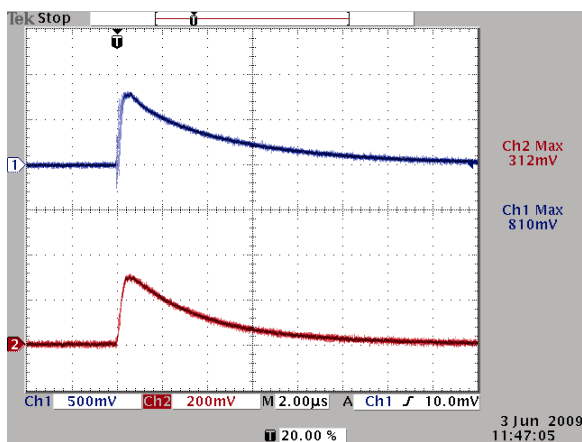
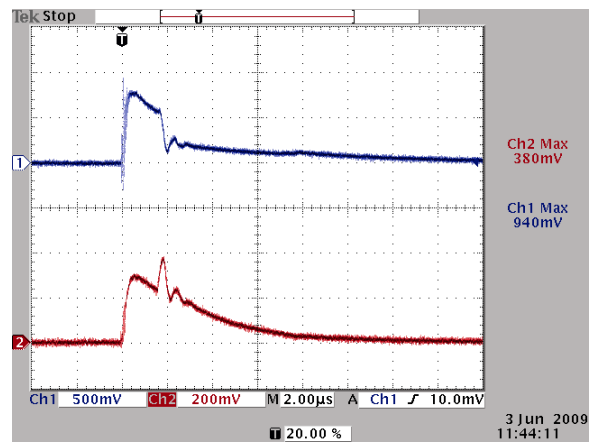
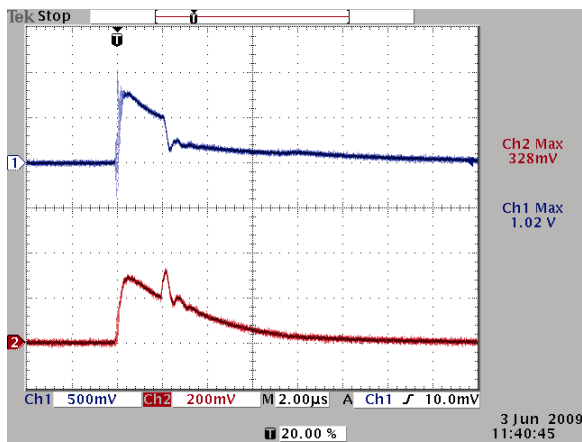


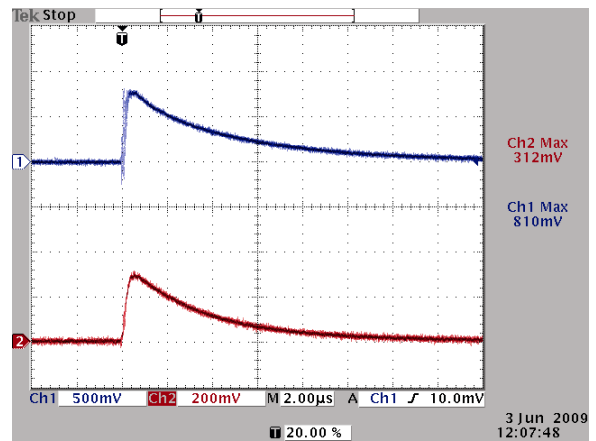
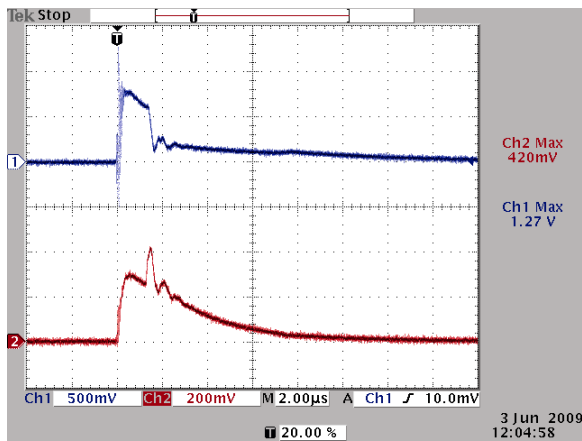
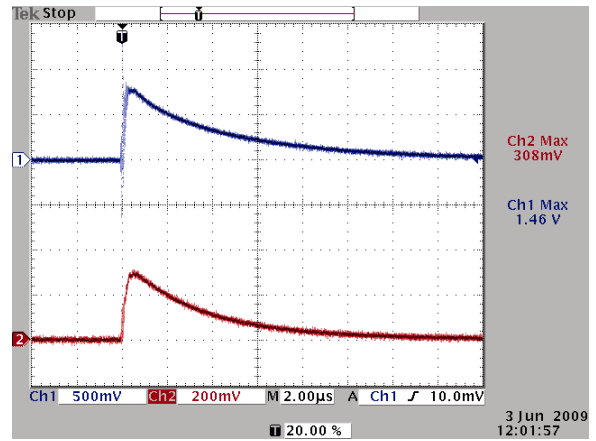
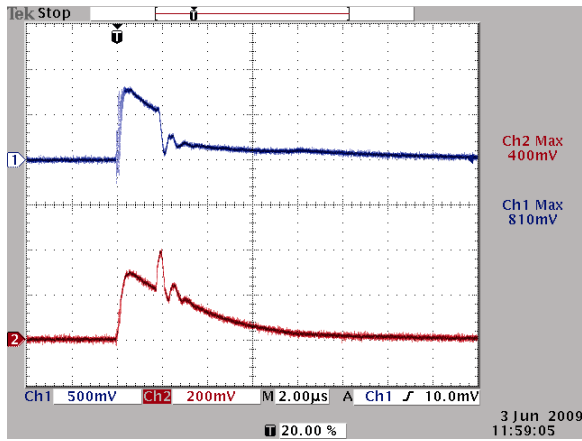
Δείγμα χρώματος A- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=4.0$



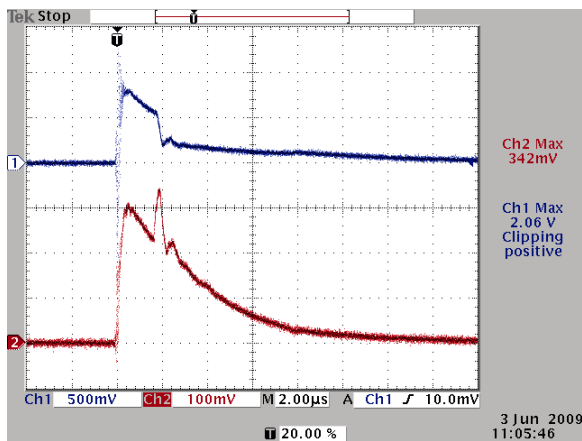


Δείγμα χώματος Α- 10% υγρασία – θετική πολικότητα – κύλινδρος Α –  $U_{50\%} \delta=4.1$

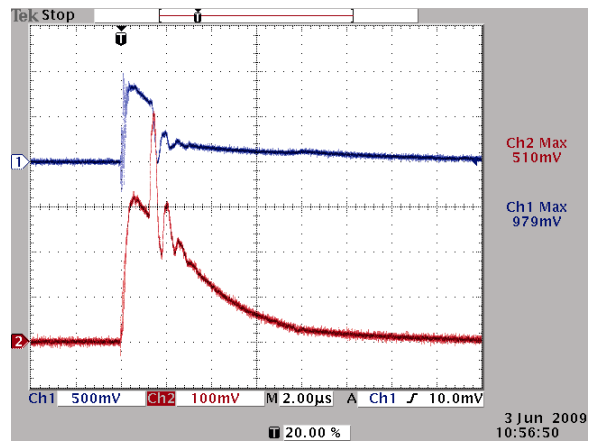
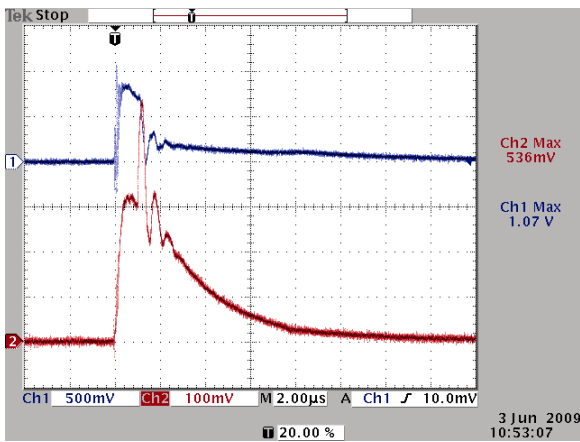
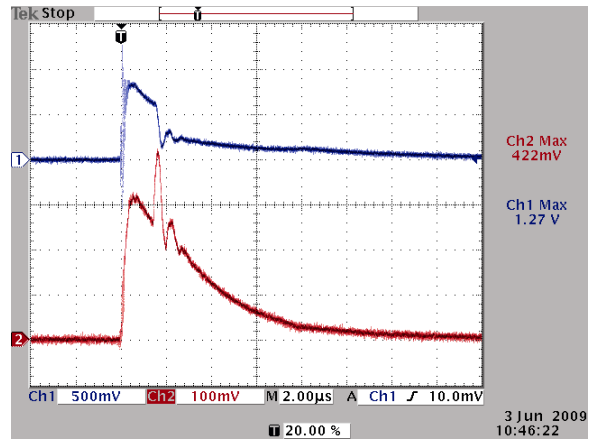
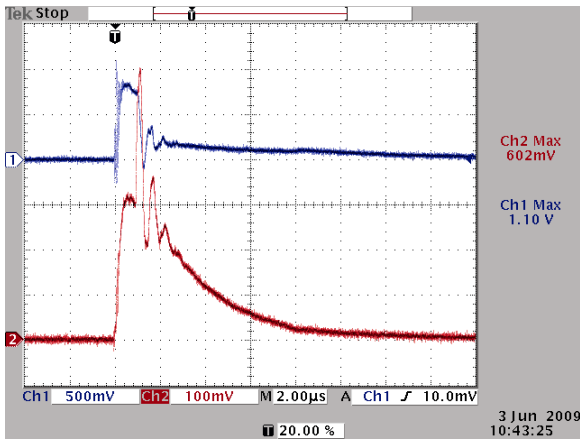




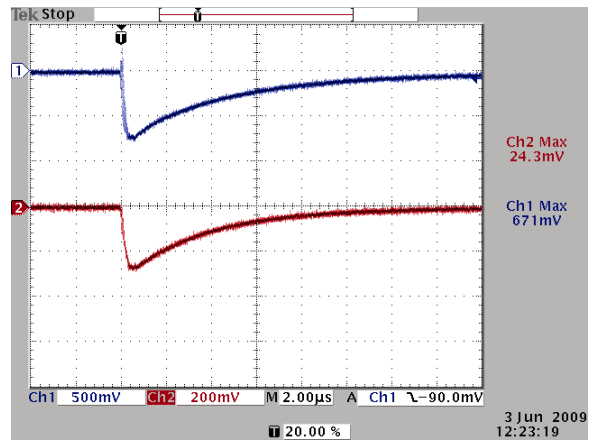
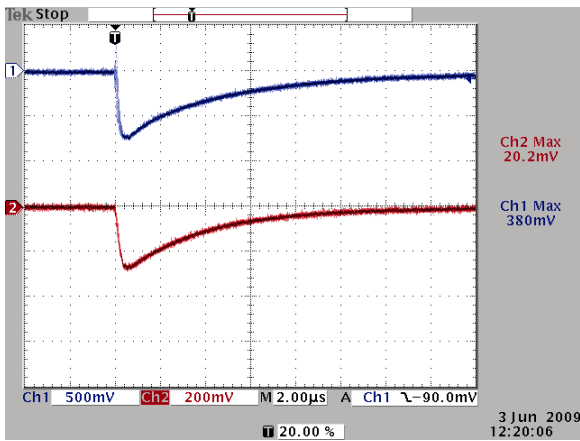
Δείγμα γώματος A- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος A -  $\delta=4.3$

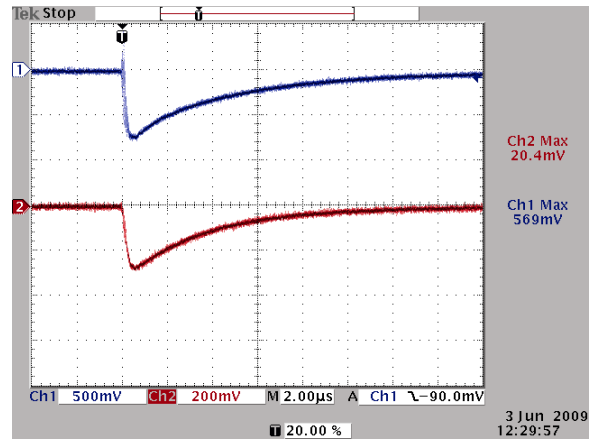
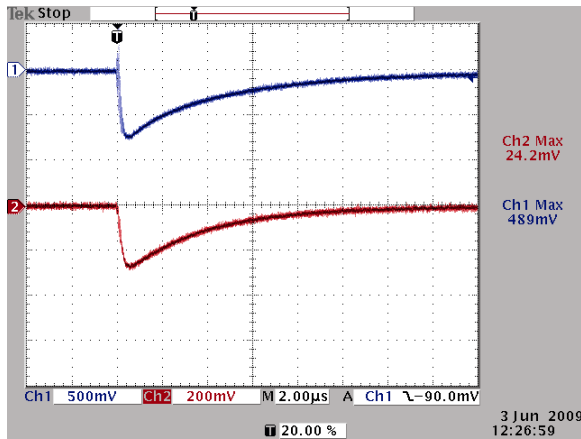


**Δείγμα χρώματος Α- 10% υγρασία - θετική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=4.5$**

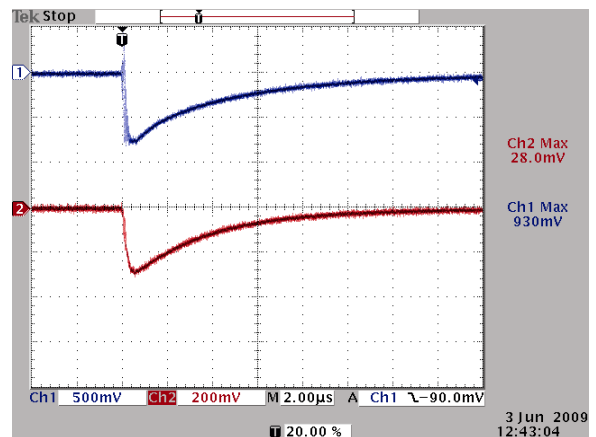
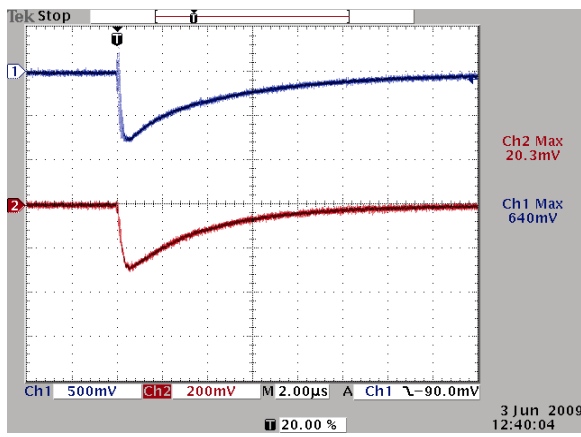
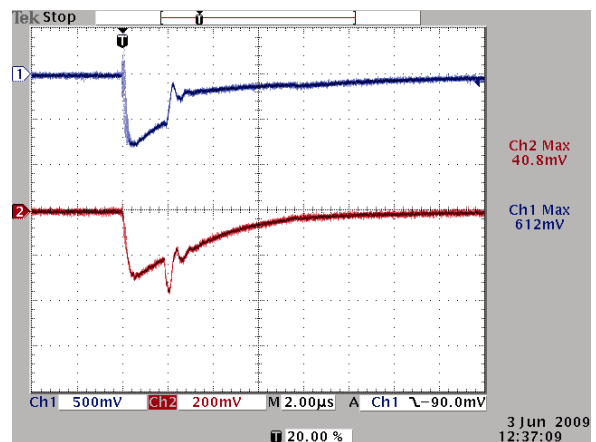
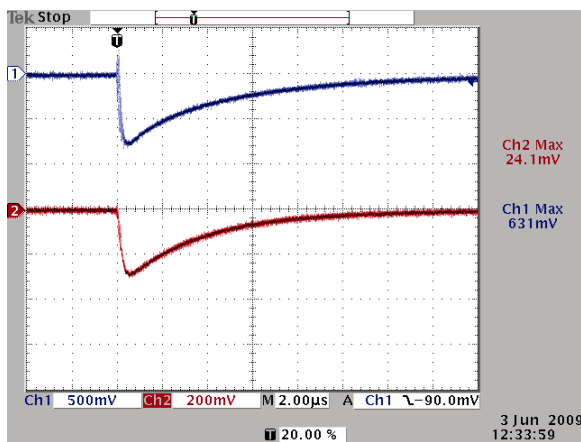


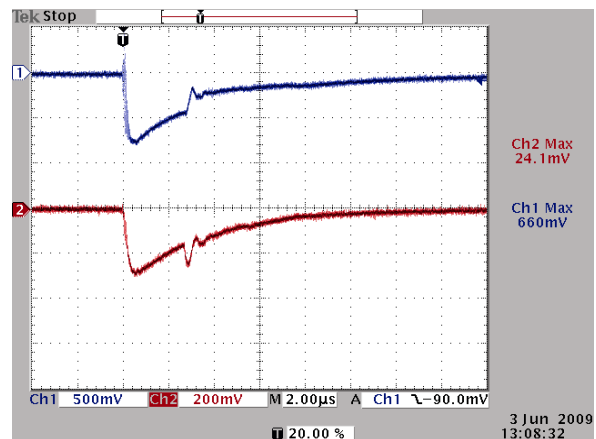
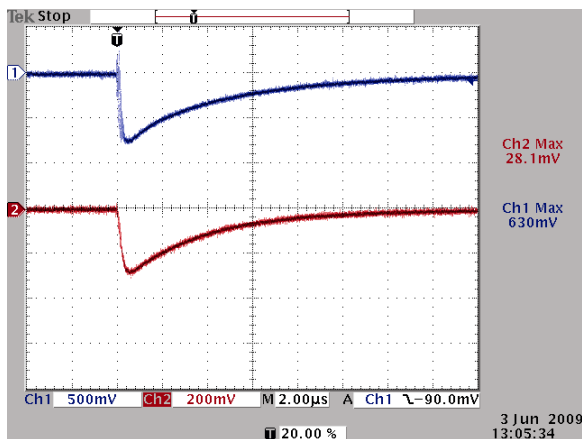
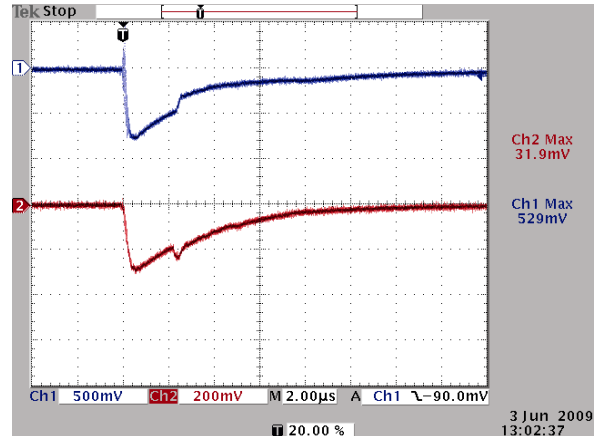
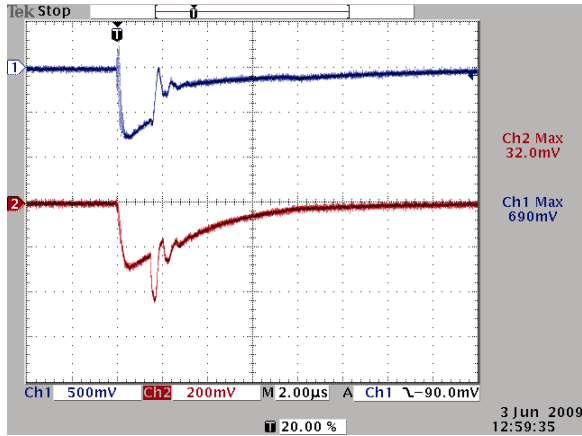
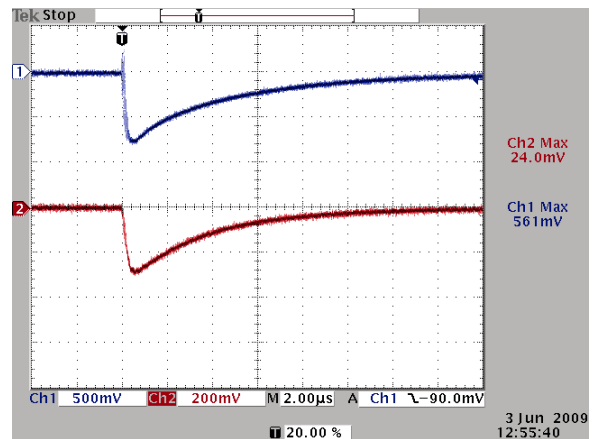
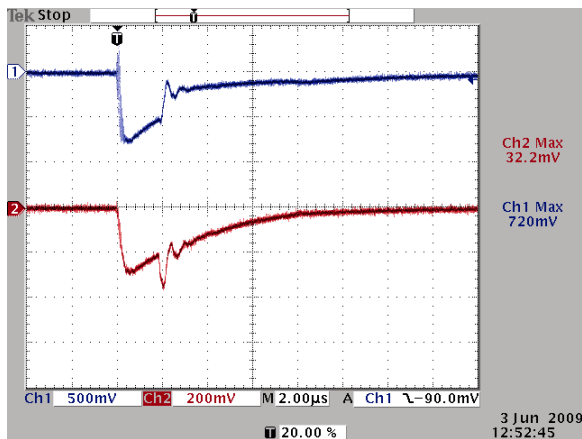
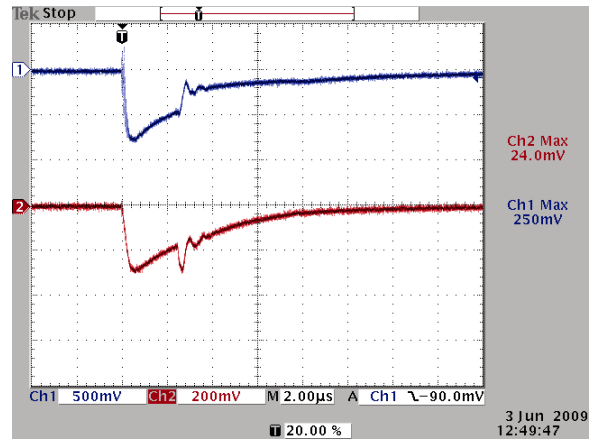
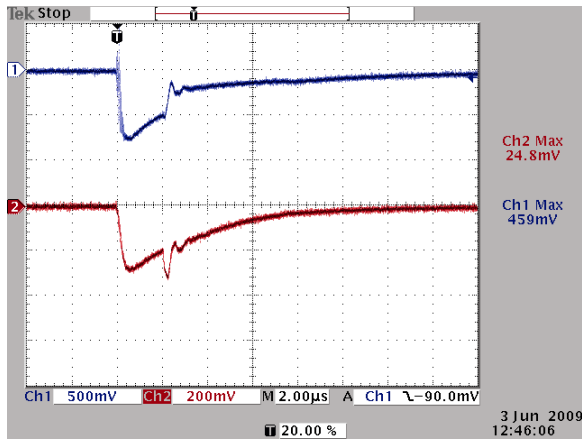
**Δείγμα χρώματος Α- 10% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=3.7$**



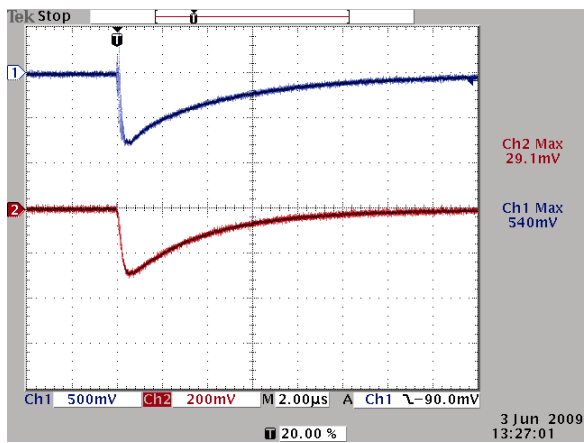
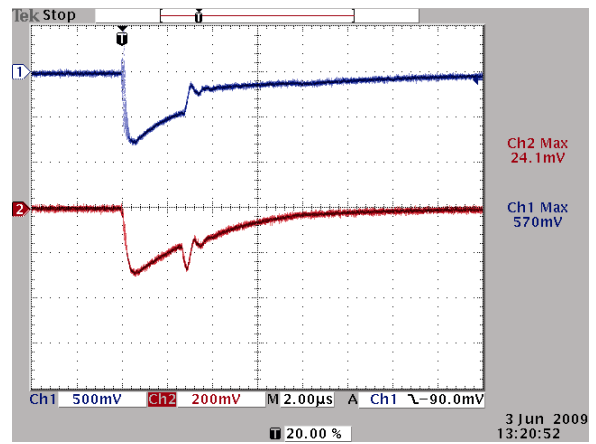
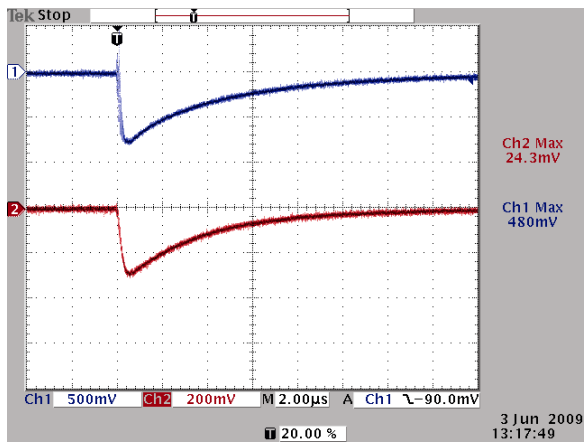
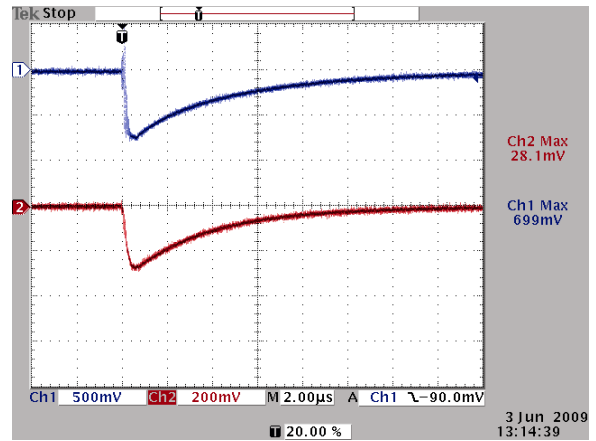
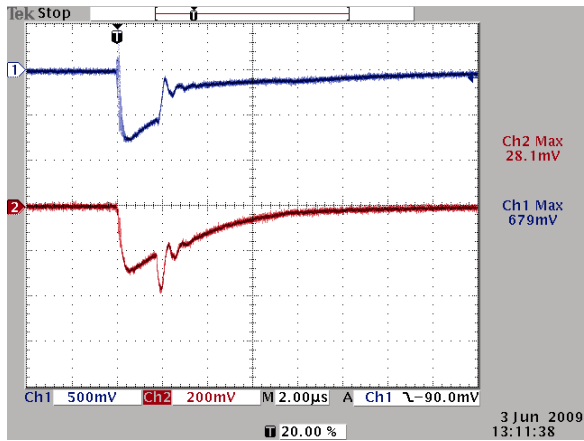


**Δείγμα χρώματος A- 10% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος A -  $U_{50\%} \delta=3,9$**









Δείγμα χρώματος Α- 10% υγρασία - αρνητική πολικότητα - κύλινδρος Α -  $\delta=4.1$

