



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ PERTINAX ΕΝΤΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ**  
**ΕΛΑΙΟΥ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ**  
**ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ  $\pm 1,2/100\mu\text{s}$**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΔΡΑΓΟΥΜΑΝΟΣ**

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννοπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ PERTINAX ΕΝΤΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ**  
**ΕΛΑΙΟΥ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ**  
**ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ  $\pm 1,2/100\mu s$**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΔΡΑΓΟΥΜΑΝΟΣ**

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννοπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011**

.....

## ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΔΡΑΓΟΥΜΑΝΟΣ

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

Copyright © Γεώργιος Π. Δραγουμάνος, 2011

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.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Κωνσταντίνου Καραγιαννόπουλου και αφορά στην μελέτη των κρούσεων ρεύματος σε δοκίμια του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax εντός μονωτικού ελαίου αναλόγως της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων υπό κρουστικές τάσεις  $\pm 1,2/100\mu\text{s}$ .

Συγκεκριμένα, διεξήχθη στο εργαστήριο σειρά μετρήσεων η οποία στοχεύει στην εξέταση της αγωγιμής συμπεριφοράς του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax καθώς και στον υπολογισμό διάφορων ηλεκτρικών μεγεθών πάνω στο συγκεκριμένο ηλεκτρομονωτικό υλικό. Πρόκειται για μετρήσεις ρεύματος σε φύλλα δοκιμίου πάχους 1mm και 2mm αναλόγως της μεταβαλλόμενης τιμής και πολικότητας της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης. Απώτερος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αποκτήσει ο αναγνώστης μία άμεση εποπτική εικόνα της μεταβολής των προαναφερθέντων μεγεθών καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στο γενικότερο φαινόμενο της γήρανσης και της διάτρησης των στερεών μονωτικών υλικών.

Καταλήγοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη βοήθειά τους στην περάτωση της διπλωματικής εργασίας τους καθηγητές Κ. Γ. Καραγιαννόπουλο και Π. Δ. Μπούρκα.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
1. <u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	14
1.1 Φαινόμενα προ και κατά την διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών	14
1.1.1 Η θερμική διάτρηση	15
1.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση	17
1.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης)	21
1.1.3.1 Γενικά περί μερικών εκκενώσεων	21
1.1.3.2 Η τεχνητή γήρανση	22
1.1.3.3 Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων	23
1.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση	25
1.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης	26
1.1.5.1 Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης	26
1.1.5.2 Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης	30
1.1.5.2-1 Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule	30
1.1.5.2-2 Η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων	32
1.1.5.2-3 Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις	32
1.1.5.2-4 Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες joule και τις δυνάμεις Coulomb)	32
1.1.5.3 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης	39

1.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων	42	
1.1.7 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης μερικών εκκενώσεων	49	
1.1.7.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών	50	
1.1.7.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση	56	
1.1.7.3 Θεωρητική προσέγγιση ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών	57	
1.1.7.4 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση	59	
1.1.8 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών	62	θεωρίας
1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	64	
<b>2. ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b>	69	
2.1-1 Κρουστικής τάση +1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 1mm	69	
2.1-2 Κρουστικής τάση +1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 1mm τυπικές αποκλίσεις μεγεθών	70	
2.2-1 Κρουστικής τάσης -1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 1mm	78	
2.2-2 Κρουστικής τάσης -1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 1mm τυπικές αποκλίσεις μεγεθών	79	
2.3-1 Κρουστικής τάση +1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 2mm	87	
2.3-2 Κρουστικής τάση +1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 2mm τυπικές αποκλίσεις μεγεθών	88	
2.4-1 Κρουστικής τάση -1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 2mm	95	
2.4-2 Κρουστικής τάση -1,2/100μs πάχος δοκιμίου d = 2mm	96	

τυπικές αποκλίσεις μεγεθών

3. <u>ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ</u>	104
3.1 Κρουστική τάση +1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου d = 1mm	105
3.2 Κρουστική τάση -1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου d = 1mm	115
3.3 Κρουστική τάση +1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου d = 2mm	123
3.4 Κρουστική τάση -1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου d = 2mm	131
4. <u>ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u>	139

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Κωνσταντίνου Καραγιαννόπουλου και αφορά στις κρούσεις ρεύματος σε δοκίμια του στερεού ηλεκτρομονωτικού Pertinax εντός μονωτικού ελαίου αναλόγως της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων υπό κρουστικές τάσεις  $\pm 1,2/100\mu\text{s}$ .

Η διπλωματική εργασία συνίσταται από τέσσερα μέρη. Στο πρώτο παρουσιάζεται εκτενώς το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών καθώς η διαδικασία στατιστικής ανάλυσης των μερικών εκκενώσεων. Επίσης παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας και οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών μεγεθών.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται όλες οι χαρακτηριστικές των μετρούμενων και των υπολογισθέντων μεγεθών ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω μελέτη και έρευνα.

Στο τρίτο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται όλες οι χαρακτηριστικές των μετρούμενων και υπολογισθέντων μεγεθών συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους και γίνεται σχολιασμός επί των χαρακτηριστικών

Στο τέταρτο μέρος παρουσιάζεται η συμβολή της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό και πειραματικό επίπεδο.

Τα στοιχεία για το θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αντλήθηκαν από το βιβλίο << Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά >> του ομότιμου καθηγητή Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Π.Δ. Μπούρκα. Άλλες πηγές αναφέρονται συνοπτικά στο τέλος της διπλωματικής εργασίας.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μερικές εκκενώσεις, Στατιστική Ανάλυση, Ιονισμός, Αγωγήμη συμπεριφορά, Διάτρηση, Μονωτικά Υλικά, Pertinax, Απώλειες Joule, Δυνάμεις Coulomb

## **SUMMARY**

This thesis was conducted at the Department of Industrial Electric Devices and Decision Systems of National Technical University of Athens under the supervision of Professor Constantine Karagiannopoulos and pertains to the study of current impacts of Pertinax solid electrical insulation inside conductive oil under impact voltages  $\pm 1,2/100\mu\text{s}$ .

This thesis is primarily divided into four main parts. The first part is a theoretical one and refers to the events before and during the decomposition of solid insulating materials and contains a brief analysis of them. Also the process of statistical analysis of partial discharges is briefly presented. The formulas that are used to calculate the given electrical quantities are also included in this part.

The second part of this thesis involves all the diagrams of measured and calculated quantities, so they can be used for further study and research.

The third fragment presents all the diagrams of measured and calculated quantities along with their mathematical approach and their corresponding commentary.

The fourth section consists of the interference of the present thesis on a scientific level.

The data for the theoretical part of this work, was drawn primarily from the book of Professor P.D. Bourkas and K.G. Karagianopoulos << Industrial Electrical Devices and Materials>>. Other sources are summarized at the end of the final chapter.

## **KEY WORDS**

Partial discharges, Statistical Analysis, Ionization, Conductive Behavior, electric breakdown, Insulating materials, Pertinax, Joule's losses, Coulomb's forces







# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## **1.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών**

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν επεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και προ πάντων των στερεών μονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο μετά τη διάσπαση (ή την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων) στην αρχική του κατάσταση. Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κλπ). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης της διάσπασής τους.

Από τις διάφορες έρευνες, που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους, που εφαρμόζονται, σε δύο βασικές θεωρίες :

- 1) Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, και
- 2) Τη κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

Σύμφωνα με την "μακροσκοπική θεωρία", τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυσή τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο συνδυασμός τους. Επίσης, για λόγους ευκολότερης κατανόησης των περιεχομένων, εξετάζεται ξεχωριστά η διάτρηση από ,την επιφανειακή διάσπαση και την υπερπήδηση.

Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών (προ και κατά τη διάτρηση), οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων, που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής, που προκαλείται στα υλικά αυτά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους :

α) οι απώλειες Joule,

β) οι δυνάμεις Coulomb,

γ) οι μερικές εκκενώσεις, και

δ) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες θεωρητικές μορφές της διάτρησης είναι :

α) η θερμική διάτρηση,

β) η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη **δενδροειδή** και την **ηλεκτρομηχανική**),

γ) η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση), και

δ) η θερμοχημική διάτρηση.

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται οι παράγοντες αυτοί και υποβοηθούνται από διάφορες ειδικές συνθήκες που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, περιβάλλον μέσο κλπ), έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

### 1.1.1 Η θερμική διάτρηση.

Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule (π.χ. κακή απαγωγή θερμότητας από τη μόνωση ενός καλωδίου λόγω σκόνης και υγρανσης). Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η απανθράκωση και η τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες.

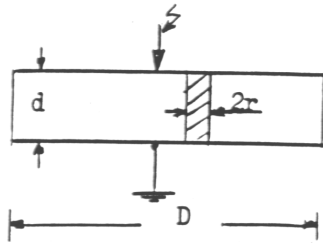
Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή  $\sigma_1$ , οπότε έχουμε :

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.1.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του σχετού διάτρησης (σχήμα 1.1.1-1) και ειδική αγωγιμότητα  $\sigma_1$ , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (1.1.1-2)$$

όπου U η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.



**Σχήμα 1.1.1-1 :** Απλοποιημένη παράσταση του οχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού .

$D$  : διάμετρος δοκιμίου

$d$  : πάχος του μονωτικού

$2r$ : διάμετρος του οχετού διάτρησης.

Αν  $P_a$  είναι η τιμή της απαγόμενης θερμικής ισχύος,  $C_0$  η θερμοχωρητικότητα και  $t$  ο χρόνος, ισχύει γενικά ότι:

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \quad (1.1.1-3)$$

Η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι (για  $d \gg r$ ) :

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.1.1-4)$$

όπου  $\kappa$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Στην περίπτωση όμως της θερμικής διάτρησης ισχύει, ότι η θερμική ισχύς, που παράγεται, είναι ίση με εκείνη που απάγεται, δηλαδή ότι:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (1.1.1-5)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ( $P=f(\theta)$  και  $P_a=f(\theta)$ ). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση ( $U_\theta$ ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι από τη διαφόριση ως προς  $\theta$ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης 1.1.1-5, έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (1.1.1-6)$$

Από τις σχέσεις 1.1.1-5 και 1.1.1-6 φαίνεται ότι:

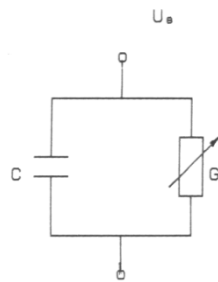
$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (1.1.1-7)$$

$$\text{και} \quad U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.1-8)$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή  $U_\theta$  μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο

κύκλωμα, κατά το σχήμα 1.1.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα  $G$ .

Η διάτρηση στην τιμή  $U_{\theta}$  συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής



αγωγιμότητας από  $\sigma_0$  στην τιμή  $\sigma_1$ : σχέση 2.1-1), μία οριστική τιμή  $G_{\max}$ .

**Σχήμα 1.1.1-2 :** Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

$$G = G_0 \dots G_{\max}$$

$G_0$  : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή

$G_{\max}$ : αγωγιμότητα για τη διάτρηση

$C$  : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή

### 1.1.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.

Όταν η σταθερή ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη και επομένως μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

Από μία τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Θεωρείται, ότι η διάτρηση οφείλεται σε :

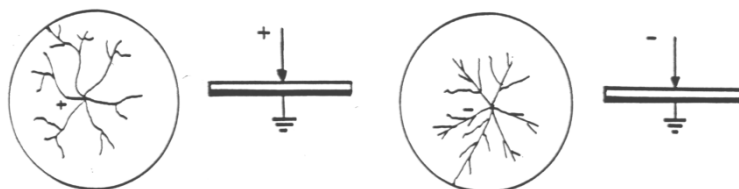
- α) αυτοσυντηρούμενο ιονισμό με κρούσεις (όπως στα αέρια μονωτικά), ή
- β) μηχανική τάνυση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, από την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου), ή
- γ) συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται, ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση, στη δενδροειδή (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) και εκείνη υπό μορφή οχetőυ κατά τη διεύθυνση του πεδίου (ηλεκτρομηχανική).

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί, λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσης και επομένως της πεδιακής έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 1.1.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη (ανάλογα με την πολικότητα της τάσης) για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (ηλεκτρόδια ακίδα-πλάκα).

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) κατά την κίνηση τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις (κατά κανόνα μη ευθύγραμμες).

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του. Έχουμε δηλαδή, ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών.



**Σχήμα 1.1.2-1:** Προς επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη

Η διάτρηση υπό μορφή οχetőυ (ή ηλεκτρομηχανική διάτρηση) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά  $\mu\text{s}$ . Η εικόνα, που παρουσιάζει το υλικό ότι είναι κυρίως το αποτέλεσμα μίας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάση, υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης  $U_{\text{κρίσιμ}}$ , που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχetőυ, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση

καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκεντρώνονται στο πλέγμα των μορίων.

Λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας για την ηλεκτρική διάτρηση και επειδή τα στερεά μονωτικά είναι και μονωτές θερμότητας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμότητα που απάγεται μόλις πριν από τη διάτρηση είναι αμελητέα. Κατά τη σχέση επομένως 1.1.2-1 και για έναν οχετό διατομής  $A=\pi r^2$  (κατά το Σχήμα 1.1.2-1) ισχύει μόλις προ της διάτρησης ότι:

$$U_n^2 \sigma_2 \frac{A}{d} = \sigma_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.2-1)$$

όπου:  $\sigma_2$  η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια ανομοιογένεια (λόγω της οποίας η πεδιακή ένταση έγινε ιδιαίτερα μεγάλη στην περιοχή εκείνη του υλικού) και  $U_n$  η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης για την ηλεκτρική διάσπαση του υλικού στην παραπάνω περιοχή.

Αν υποθέσουμε ότι, λόγω του μικρού διατιθέμενου χρόνου είναι  $d\theta/dt = \theta/T_\delta$ , όπου  $T_\delta$  ο χρόνος για την ηλεκτρική διάτρηση, τότε από τη σχέση 1.1.2-1 έχουμε :

$$U_n = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_\delta}} \quad (1.1.2-2)$$

d [mm]	κρουστική τάση		$\hat{U}_k$ 50% [kV]	περιοχή τιμών $U_k$ για τη διάσπαση [kV]
	Μορφή [μs]	πολικότητα		
1	1,2/50	θετική	80	78...90
	1,2/50	αρνητική	86	81...95
	10/200	θετική	74	69...78
	10/200	αρνητική	77	71...79
	250/2500	θετική	66	63...69
	250/2500	αρνητική	68	65...70

2	1,2/50	θετική	135	126...151
	1,2/50	αρνητική	148	132...165
	10/200	θετική	74	69...80
	10/200	αρνητική	70	67,5...71

**Πίνακας 1.1.2-1:** Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1mm και 2mm) κατά την καταπόνησή του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών.

Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα

Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας:  $R=0,9$  mm

Για τη διάτρηση στη μέγιστη τιμή  $\hat{U}_{kn}$  μιας κρουστικής τάσης ισχύει αντίστοιχα:

$$\hat{U}_{kn} = \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma_2 A T_s}} \quad (1.1.2-3)$$

όπου  $T_s$  η διάρκεια του μετώπου της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

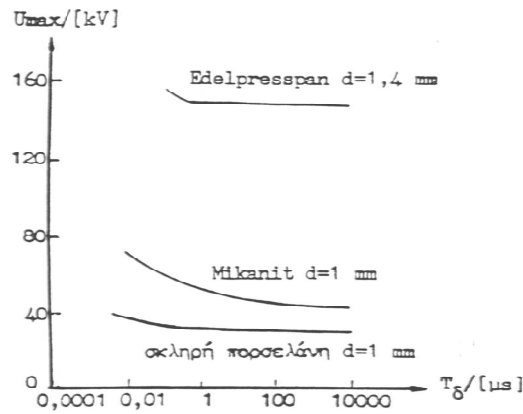
Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μία ικανοποιητική ερμηνεία σε πειράματα, που έχουν γίνει.

Πράγματι, όσο αυξάνει ο χρόνος  $T_s$  μίας κρουστικής τάσης, τόσο μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.

Κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση ισχύει περίπου η αναλογία  $U_n = f(1/\sqrt{T_s})$

(βλέπετε σχήμα 1.1.2-2).



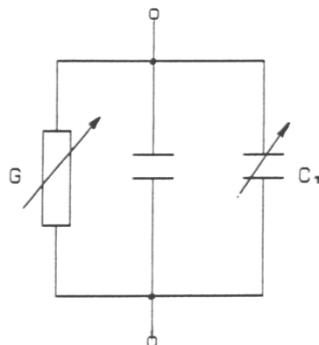


**Σχήμα 1.1.2-2:** Διάσπασης διαφόρων στερεών μονωτικών σε σχέση με το χρόνο καταπόνησης.

Για πολύ μικρούς χρόνους ισχύει η αναλογία:  $U_{\max} = f(1/\sqrt{T_{\delta}})$

$U_{\max}$ : η τιμή της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος,



μπορεί να δοθεί ως ακολούθως :

**Σχήμα 1.1.2-3:** Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

$C$  : ιδανική χωρητικότητα

$C_r=0...C_{\max}$  : χωρητικότητα, που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση θα συμβεί η διάτρηση.

$G=0...G_{\max}$  : αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση

Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή  $\sigma_2$ , η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα

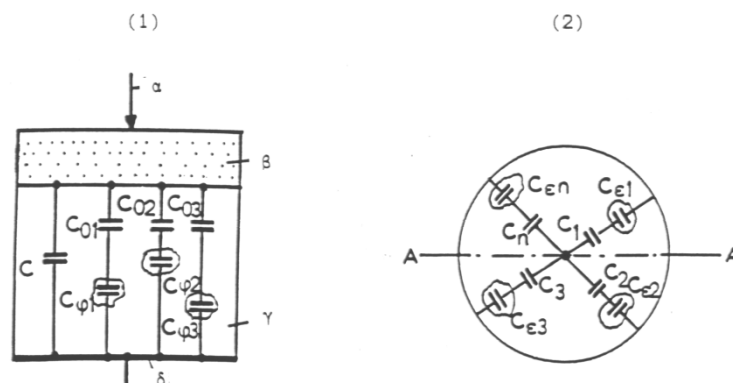
(σχήματος 1.1.2-3), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή  $C_{\pi}$  (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα  $C$ .

Όταν η αγωγιμότητα  $G$  και ο πυκνωτής  $C_{\pi}$  έχουν αποκτήσει μόλις προ της διάτρησης τις τιμές  $G_{\max}$  και  $C_{\max}$  (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα  $\sigma_2$ , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

### 1.1.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση της μόνωσης).

#### 1.1.3.1 Γενικά περί μερικών εκκενώσεων.

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνεια του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα 1.1.3.1-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές  $C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$  και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές  $C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$ . Οι πυκνωτές  $C_1 \dots C_n$  και  $C_{01} \dots C_{0n}$  παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



**Σχήμα 1.1.3.1-1 :** Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα

β: επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου και επιφάνεια του στερεού μονωτικού.

γ : στερεό μονωτικό

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

$C_1 \dots C_n$ : πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου

$C_{\varepsilon 1} \dots C_{\varepsilon n}$  : πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

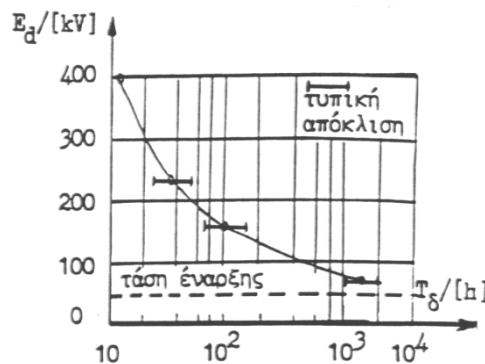
$C$  : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_{\varphi 1} \dots C_{\varphi n}$  : πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων)

$C_{o1} \dots C_{o n}$  : πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος του στερεού μονωτικού

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγώγιμες. Πρόκειται για ένα **ηλεκτροχημικό φαινόμενο**, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί **βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής**, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και **γήρανση** του μονωτικού υλικού. Στο Σχήμα 1.1.3.1-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



**Σχήμα 1.1.3.1-2** : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.

$T_d$  : χρόνος διάσπασης.

### 1.1.3.2 Η τεχνητή γήρανση.

Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχής), διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται **τεχνητή γήρανση**. Η τεχνητή αυτή γήρανση του στερεού μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως τη δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

Ένα κριτήριο αξιολόγησης που έχει προταθεί, βασισμένο στην έναρξη της τεχνητής γήρανσης, είναι ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών. Ο συντελεστής αυτός έχει ορισθεί ως το πηλίκο της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων προς την τάση της διηλεκτρικής δοκιμής που προβλέπεται στις προδιαγραφές, ανάλογα με την ονομαστική τάση και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

Στην περίπτωση της καταπόνησης με εναλλασσόμενη τάση η τιμή του συντελεστή είναι:

$$\mu_{\varepsilon} = U_{\varepsilon} / U \quad (1.1.3.2-1)$$

όπου  $U$  η προβλεπόμενη τάση δοκιμής (π.χ.: 55kV επί 1 min για ονομαστική τάση 20kV) και  $U_{\varepsilon}$  εκείνη κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση.

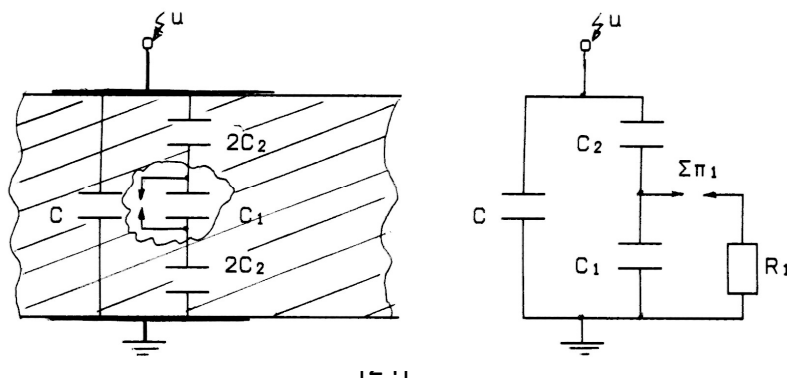
Κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις ισχύει αντίστοιχα :

$$\mu_0 = \hat{U}_{κε} / \hat{U}_{κ} \quad (1.1.3.2-2)$$

όπου  $\hat{U}_{κε}$  η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, κατά την οποία μόλις εμφανίζεται η πρώτη μερική εκκένωση και  $\hat{U}_{κ}$  η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που προβλέπεται από τις προδιαγραφές για τη διηλεκτρική δοκιμή υπό κρουσική τάση 1,2/50μs.

### 1.1.3.3 Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων.

Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μετρά κανείς το σύνολο των απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνης λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Όταν άρχισε να γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών εμφανίστηκε η πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων. Πρόκειται για τη μέθοδο Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των παράσιτων χωρητικοτήτων του κυκλώματος μέτρησης κατά το διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες



λόγω μερικών εκκενώσεων.

**Σχήμα 1.1.3.3-1** : Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff).

$\alpha$  : σχηματική παράσταση

$\beta$  : ισοδύναμο κύκλωμα

$C$  : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_1$ : χωρητικότητα της φυσαλίδας

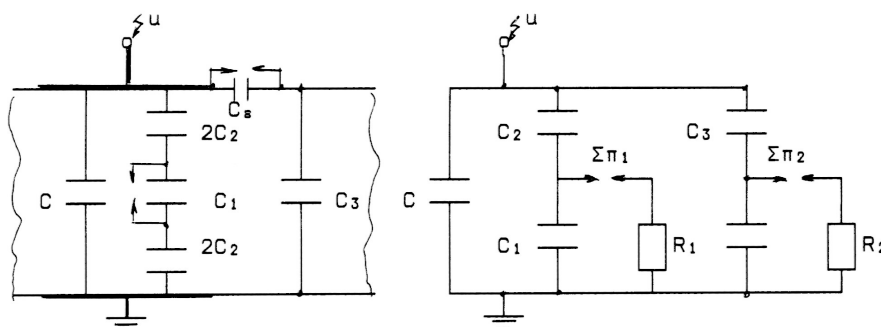
$C_2$ : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

$R_1$ : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_1$

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα 1.1.3.3-1), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.

Στο σχήμα 1.1.3.3-2 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας ( $C_1$ ) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων ( $C_\epsilon$ ). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού ( $C_2$  και  $C_3$  αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα  $C$ . Οι σπινθήρες  $\Sigma\pi_1$  και  $\Sigma\pi_2$  στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται ( $R_1, R_2$ ) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής ( $C_1, C_\epsilon$ ).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα



1.1.3.3-3.

**Σχήμα 1.1.3.3-2 :** Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

$\alpha$  : σχηματική παράσταση

$\beta$  : ισοδύναμο κύκλωμα

$C$  : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

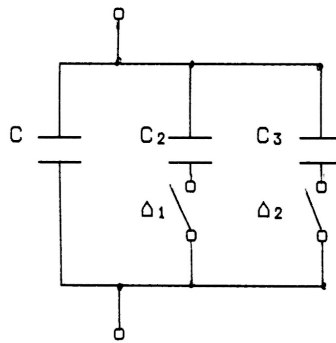
$C_1$ : χωρητικότητα της φυσαλίδας

$C_\epsilon$ : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

$C_2$ : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

$C_3$ : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

$R_1$ : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_1$



$R_2$ : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_2$

**Σχήμα 1.1.3.3-3 :** Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

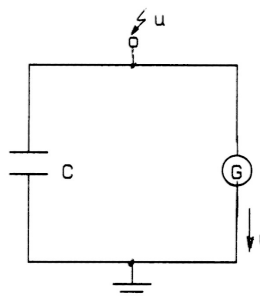
$C$  : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_2$ : χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

$C_3$ : χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

$\Delta_1$  και  $\Delta_2$  : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της



αγωγιμότητας στις πλευρές της φουσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κλπ. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα 1.1.3.3-4). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G. Έτσι, όταν διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.

**Σχήμα 1.1.3.3-4 :** Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

#### 1.1.4 Η θερμοχημική διάτρηση.

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, μετά από μία τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης.

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής και δίνεται από τη σχέση :

$$U_a = \sqrt{a \frac{\kappa \cdot \theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.4-1)$$

όπου  $a$  σταθερά του υλικού που εξαρτάται από τη μορφή της τάσης. Η σταθερά  $a$  έχει την τιμή 2,83 για καταπόνηση με συνεχή τάση, ενώ για εναλλασσόμενη τάση είναι 1,88.

Η θερμική τάση ανατροπής αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κλπ). Η τιμή είναι για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50Hz, της τάξης του 1MV.

Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης απ' ότι σε κανονική θερμοκρασία (20°C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C.

## Σημείωση

Τα παραπάνω ερευνητικά αποτελέσματα οδηγούν στο πρακτικό συμπέρασμα ότι, οι διηλεκτρικές δοκιμές τύπου θα πρέπει να διεξάγονται ακριβώς μετά τη δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας (εφ' όσον βέβαια προβλέπεται η δοκιμή υπερθέρμανσης σε μία κατασκευή). Κατά τον τρόπο δηλαδή αυτόν, εξετάζεται ουσιαστικά η εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων εντός των παραδεκτών ορίων υπερθέρμανσης μίας κατασκευής. Αν υποθέσουμε, ως παράδειγμα, ότι πρόκειται να γίνουν οι δοκιμές τύπου κατά τον ποιοτικό έλεγχο κάποιων μετασχηματιστών διανομής, τότε κρίνεται σκόπιμο να διεξάγονται οι διηλεκτρικές δοκιμές (δοκιμή υπό κρουστική τάση και δοκιμή με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας) ακριβώς μετά το πέρας της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας, όπου η θερμοκρασία στο λάδι είναι της τάξης των 70°C.

### **1.1.5 Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.**

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

#### **1.1.5.1 Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.**

Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης των 40÷50°C στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των 80÷90°C. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί :

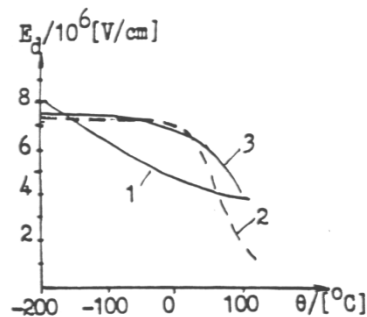
- 1) Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα.
- 2) Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- 3) Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου.

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η  $tg\delta$  και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση, που υφίσταται το στερεό μονωτικό, ανάλογα με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητάς του. Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση, μπορούμε να υποθέσουμε ότι μια σχέση εδώ ανάλογη με οτι ισχύει



για τα αέρια, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μείωση του μέσου ελεύθερου μήκους ( $\lambda$ ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Γι' αυτό, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση.

Στο σχήμα 1.1.5.1-1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευθεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμότητας του περιβάλλοντος με τους υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης.



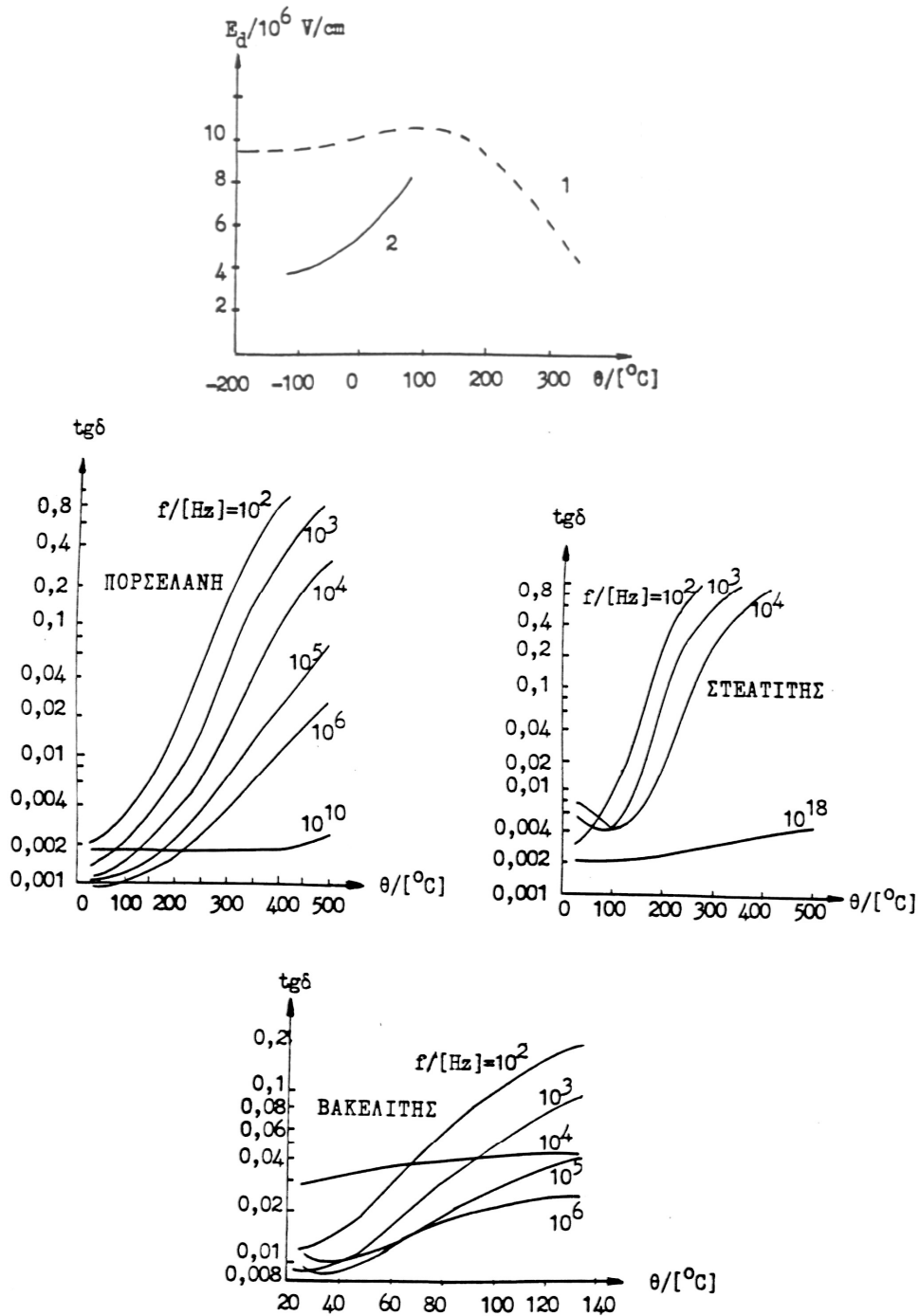
**Σχήμα 1.1.5.1-1 :** Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στερεά μονωτικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου.

1 : Βακελίτης, 2 : Πολυαιθυλένιο, 3 : Πολυστετυρόλη

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Στο σχήμα 1.1.5.1-2 φαίνονται δύο παραδείγματα που ανήκουν στην περίπτωση αυτή. Μία ερμηνεία, για τη διαφορετική αυτή ανασύνδεση της μίκας (Glimmer) και του χαλαζία (Quarz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλοεξουδετέρωση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Αποτέλεσμα της παραπάνω εξουδετέρωσης φαίνεται ότι είναι η μείωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής. Στη μίκα παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό μεταξύ  $-200$  έως  $100^{\circ}\text{C}$ , ενώ στο χαλαζία εκδηλώνεται μόνο αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής για τις θερμοκρασίες που δίνονται στο σχήμα.

Οι χαρακτηριστικές  $tg\delta=f(\theta)$  διαφόρων στερεών μονωτικών (σχήμα 1.1.5.1-3), κατά τη βιβλιογραφία, δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.

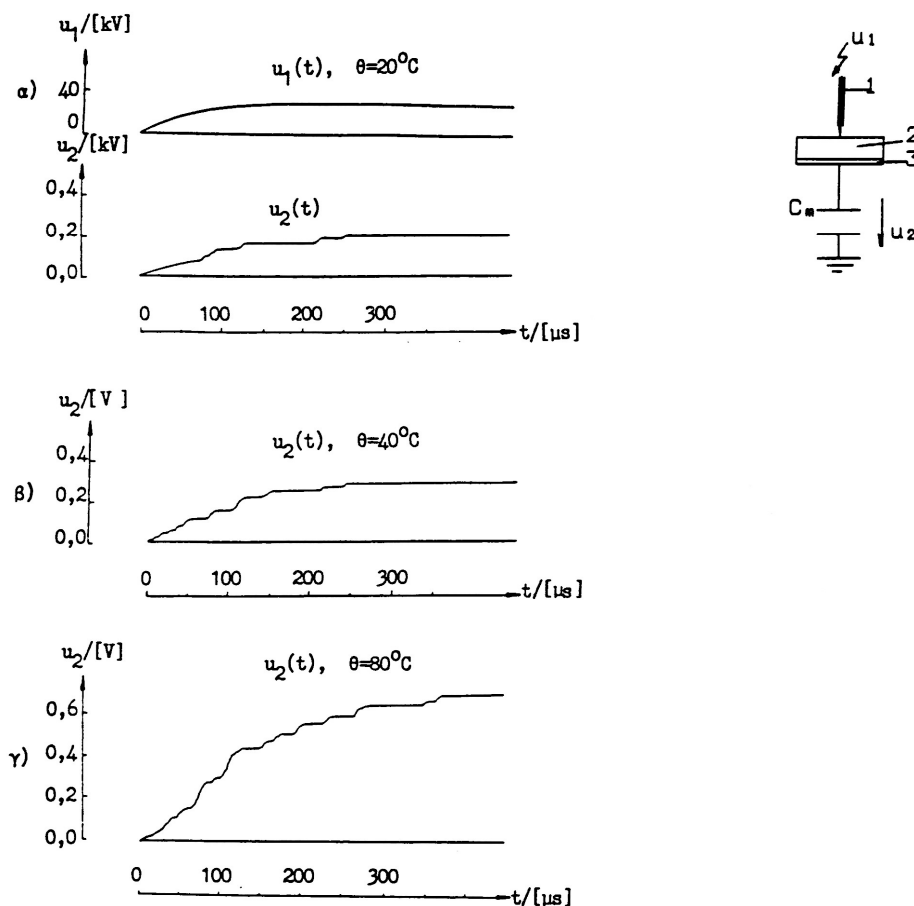


**Σχήμα 1.1.5.1-2 :** Διηλεκτρική αντοχή της μίκας (1) και του κρυστάλλου χαλαζία (2) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

**Σχήμα 1.1.5.1-3 :**  $tg\delta=f(\theta)$  σε διάφορα στερεά μονωτικά.

Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 1.1.5.1-3, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων.

Πρόσφατες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνηση τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C, 40°C και 80°C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό φαίνεται πολύ παραστατικά στα παλμογραφήματα του σχήματος 1.1.5.1-4, όπου οι μερικές εκκενώσεις γίνονται ισχυρότερες όταν αυξάνει η θερμοκρασία



του περιβάλλοντος.

**Σχήμα 1.1.5.1-4 :** Αύξηση των μερικών εκκενώσεων λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο. α)  $\vartheta=20^\circ\text{C}$ , β)  $\vartheta=40^\circ\text{C}$  και γ)  $\vartheta=80^\circ\text{C}$ .

1: Ηλεκτρόδιο ακίδα (ακτίνα καμπυλότητας  $R=0,9\text{mm}$ ).

2: Δοκίμιο: Pertinax (πάχους 1mm και διαμέτρου 150mm).

3: Ηλεκτρόδιο πλάκα (διαμέτρου 150mm).

Μορφή της κρουστικής τάσης: 250/2500 $\mu\text{s}$ .

Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης:  $\hat{U}_k=28,8\text{kV}$ .

$u_1$ : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης.

$u_2$ : άλματα δυναμικού σε έναν πυκνωτή μέτρησης

$C_m=1000\mu\text{F}$  σε σειρά με το δοκίμιο (συγκρίνατε με τη διάσπαση των θέσεων διαταραχής κατά το σχήμα 6.1.3-4 ή το σχήμα 6.1.3-5).

### **1.1.5.2 Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης**

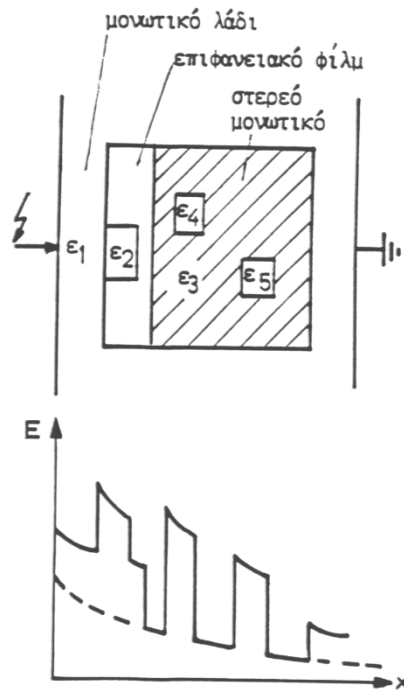
Οι μερικές εκκενώσεις θεωρείται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων στην πράξη. Μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών μερικών εκκενώσεων, προεξέχοντα ρόλο έχουν οι τελευταίες, γιατί σχετίζονται με χημικές μεταβολές στον όγκο του υλικού (οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις από ξένες επικαθίσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης). Λόγω της μεγάλης σπουδαιότητας των μερικών εκκενώσεων, εξετάζονται παρακάτω διάφορες περιπτώσεις συνεργασίας τους με τους άλλους παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής.

#### **1.1.5.2-1 Ο συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule.**

Στην παράγραφο 1.1.1 θεωρήθηκε ότι η θερμική διάτρηση αρχίζει σε μία θέση του μονωτικού υλικού, όπου αρχικά, λόγω κάποιας ανομοιογένειας, υπάρχει η αιτία για τοπική αύξηση της αγωγιμότητας. Για να μελετηθεί ειδικά η θερμική διάτρηση, δεν πάρθηκε υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις, που εμφανίζονται λόγω της μικρότερης διηλεκτρικής αντοχής, στην ανομοιογένεια του υλικού.

Προς κατανόηση της συμμετοχής των θέσεων διαταραχής, στον όγκο και την επιφάνεια του στερεού μονωτικού, έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 1.1.5.2-1 η χαρακτηριστική  $E=f(x)$  του στερεού μονωτικού, όταν αυτό καταλαμβάνει όλο το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει ανομοιογένειες στον όγκο του, συγκριτικά με εκείνη του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού με περιβάλλον μέσο το μονωτικό λάδι. Παρατηρούμε ότι στις θέσεις ανομοιογένειας, όπου η αγωγιμότητα είναι αυξημένη έναντι του υπόλοιπου "υγιούς" τμήματος του συνδυασμού των δύο μονωτικών (στερεό μονωτικό-μονωτικό λάδι), η πεδιακή ένταση έχει μεγαλύτερες τιμές από ότι αν δεν υπάρχουν ανομοιογένειες.

Τη συμμετοχή αυτή των ανομοιογενειών στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορεί να λάβει κανείς υπ' όψη σαν να πρόκειται για αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού από την πεδιακή ένταση.



**Σχήμα 1.1.5.2-1 :** Αύξηση της πεδιακής έντασης στις θέσεις ανομοιογενειών του στερεού μονωτικού.

$\epsilon_1$  έως  $\epsilon_5$ : διηλεκτρικές σταθερές

$\epsilon_1$ : Μονωτικό λάδι

$\epsilon_2$ : Ανομοιογένειες στο επιφανειακό φιλμ ( $\epsilon_1 < \epsilon_2$ ).

$\epsilon_3$ : Στερεό μονωτικό ( $\epsilon_3 > \epsilon_1$ ).

$\epsilon_4, \epsilon_5$ : ανομοιογένειες στον όγκο του στερεού μονωτικού ( $\epsilon_3 > \epsilon_4$  και  $\epsilon_3 > \epsilon_5$ ).

---: Χαρακτηριστική του στερεού μονωτικού όταν δεν καταλαμβάνει όλο τον χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και δεν έχει θέσεις διαταραχής στον όγκο του.

—: Χαρακτηριστική με θέσεις διαταραχής και περιβάλλον το μονωτικό λάδι.

Για το ανομοιογενές στερεό μονωτικό έχουμε επομένως κατά τη σχέση 2.1-3 :

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = 2\pi r k d \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.5.2-1)$$

και στην περίπτωση της διάτρησης (στην τιμή  $U_{\theta e}$ ):

$$\frac{U_{\theta e}^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2} = 2\pi r k d \theta \quad (1.1.5.2-2)$$

$$\eta: \theta = \frac{U_{\theta c}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta \theta} A}{2\pi r^2 \kappa d (1 - \delta E)^2} \quad (1.1.5.2-3)$$

Η οριακή τιμή δίνεται από τη διαφόριση του αριστερού και του δεξιού τμήματος της παραπάνω σχέσης ως προς  $\theta$  :

$$1 = \frac{U_{\theta c}^2 \sigma_0 \beta e^{\beta \theta} A}{2\pi r^2 \kappa d (1 - \delta E)^2} \quad (1.1.5.2-4)$$

Από τις σχέσεις 1.15..2-3 και 1.1.5.2-4 φαίνεται ότι  $\beta\theta=1$  και επομένως η οριακή τιμή της τάσης διάσπασης είναι :

$$U_{\theta c} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.5.2-5)$$

Η μείωση της τάσης για τη θερμική διάτρηση ( $\Delta U_1$ ), λόγω συμμετοχής των μερικών εκκενώσεων είναι:

$$\Delta U_1 = U_{\theta} - U_{\theta c} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (1.1.5.2-6)$$

### 1.1.5.2-2 Η μείωση της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση, λόγω εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων.

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 1.1.5.2-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις στην θέση όπου εκδηλώνεται η μερική εκκένωση , τότε, με την παραδοχή ότι η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι πρακτικά μηδενική ισχύει :

$$\frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.5.2-7)$$

και για τη διάτρηση στην τιμή  $U_{\eta c}$  (λόγω συνδυασμού μεταξύ των δυνάμεων Coulomb και των μερικών εκκενώσεων) :

$$U_{\eta c} = (1 - \delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (1.1.5.2-8)$$

Η τάση διάτρησης μειώνεται δηλαδή κατά την τιμή  $\Delta U_2$  :

$$\Delta U_2 = U_{\eta} - U_{\eta c} = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_{\delta}}} \quad (1.1.5.2-9)$$

### 1.1.5.2-3 Η μείωση της θερμικής τάσης ανατροπής από τις μερικές εκκενώσεις.

Αν πάρει κανείς υπ' όψη στη σχέση 3.6-1 την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων, τότε η θερμική τάση ανατροπής  $U_{\kappa c}$  (λόγω του συνδυασμού της θερμότητας του περιβάλλοντος με τις μερικές εκκενώσεις) θα είναι :

$$U_{xe} = (1 - \delta E) \sqrt{\frac{ak\theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.5.2-10)$$

Για τη μείωση της τιμής της θερμικής τάσης ανατροπής λόγω μερικών εκκενώσεων ισχύει επομένως :

$$\Delta U_3 = U_x - U_{xe} = \delta E \sqrt{\frac{ak\theta}{\sigma_0}} \quad (1.1.5.2-11)$$

#### 1.1.5.2-4 Η διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (συνδυασμός των μερικών εκκενώσεων με τις απώλειες Joule και τις δυνάμεις Coulomb).

Ο συνδυασμός αυτός των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών πολυμερών μονωτικών υλικών (εντός μονωτικού ελαίου) με ένα αριθμό κρούσεων  $m$  (της μορφής 1,2/50μs, ή 10/200μs, ή 250/2500μs), που έχουν αρκετά μικρότερη μέγιστη τιμή από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση, έχει αποδοθεί σε δύο φαινόμενα :

- I) Το θερμικό φαινόμενο (μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από τις μερικές εκκενώσεις).
- II) Την ηλεκτρομηχανική διάτρηση κατά την τελευταία κρούση ( $m$ ) στην τιμή  $\hat{U}_\kappa$  ή πολύ πλησίον αυτής.

Το θερμικό φαινόμενο θεωρείται ότι είναι μία τεχνητή γήρανση, μέχρι προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, λόγω του οποίου το υλικό απέκτησε σε μία περιοχή του (όπου εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις) την ειδική αγωγιμότητα :

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta_m \theta_m} \quad (1.1.5.2-12)$$

(όπου :  $\theta_m$  η θερμοκρασία και  $\beta_m$  ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτώνται από την τιμή  $\hat{U}_\kappa$ , τη συχνότητα των κρούσεων (χρόνος μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων) και τη μορφή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης).

Στην περιοχή δηλαδή, όπου συμβαίνουν οι μερικές εκκενώσεις, το υλικό άλλαξε, λόγω των χημικών διεργασιών, τις φυσικές του ιδιότητες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής του, ώστε τελικά να πρόκειται για ένα "άλλο" μονωτικό, το οποίο πλέον διασπάται ηλεκτρομηχανικά στη  $m^{\text{η}}$  κρούση (όπως στην περίπτωση β, που αναφέρθηκε παραπάνω). Κατά αντιστοιχία επομένως προς την σχέση 1.1.5.2-1 ισχύει :

$$u^2 \frac{\sigma_0 e^{\beta_m \theta_m}}{(1 - \delta E)^2} \frac{A}{d} = C_m \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.5.2-13)$$

(όπου  $C_m$  η θερμοχωρητικότητα, μόλις προ της εφαρμογής της τελευταίας κρούσης, η οποία εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν για τις τιμές  $\beta_m$  και  $\theta_m$ ). Έτσι, για τη διάσπαση στην τιμή  $U_\kappa$  έχουμε (αντίστοιχα με τη σχέση 1.1.5.2-8) :

$$\hat{U}_\kappa = (1 - \delta E) \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.1.5.2-14)$$

όπου  $T_s$  ο χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης.

Επομένως, η μείωση της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης για τη διάτρηση (συγκριτικά προς εκείνη κατά τη διάτρηση χωρίς προηγούμενη τεχνητή γήρανση) είναι :

$$\Delta u = \delta E \sqrt{d \frac{C_m \theta_m}{\sigma A T_s}} \quad (1.1.5.2-15)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη θεωρία φαίνεται, ότι μέχρι τη m-1 κρούση η ενέργεια, που παρέχεται στο στερεό μονωτικό, μετατρέπεται στη θερμότητα που παραμένει στη θέση της προσεχούς διάτρησης και σε εκείνη που μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό (ανάλογα με τη συχνότητα των κρούσεων). Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι κατά την εφαρμογή της τελευταίας κρούσης (m) η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη θέση του υλικού έχει αποκτήσει την κρίσιμη για τη διάτρηση τιμή της. Για το μέρος της ενέργειας επομένως, που παρέχεται επί m φορές στο στερεό μονωτικό ισχύει :

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 + \gamma\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 \quad (1.1.5.2-16)$$

όπου:

$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2$  : το μέρος της ενέργειας, που παρέχεται στο υλικό μέχρι τη m-1 κρούση,

$\gamma\hat{U}_\kappa^2$  : το μέρος της ενέργειας που παρέχεται στο μονωτικό μόλις προ της διάτρησης κατά τη m<sup>η</sup> κρούση,

$\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i}$  : η θερμότητα, που μεταδίδεται μέχρι προ της εφαρμογής της m<sub>ης</sub> κρούσης,

$\sum_{i=1}^{i=m} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2}$  : η θερμότητα, που έχει παραμείνει στη συγκεκριμένη θέση προ της διάτρησης, και

$\beta\hat{U}_\kappa^2$  : η ενέργεια κατά τη διάτρηση.

Επειδή κατά τη διάτρηση είναι :

$$\frac{W_{\theta_m}}{(1-\delta E)^2} + \beta\hat{U}_\kappa^2 = \gamma\hat{U}_\kappa^2 \quad (1.1.5.2-17)$$

από την σχέση 1.1.5.2-16 έπεται ότι :

$$(m-1)a\hat{U}_\kappa^2 = \sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i} + \sum_{i=1}^{i=m-1} \frac{W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2} \quad (1.1.5.2-18)$$

$$\text{ή} \quad m = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{a_i}}{a\hat{U}_\kappa^2} + \frac{\sum_{i=1}^{i=m-1} W_{\theta_i}}{(1-\delta E)^2 a\hat{U}_\kappa^2}$$

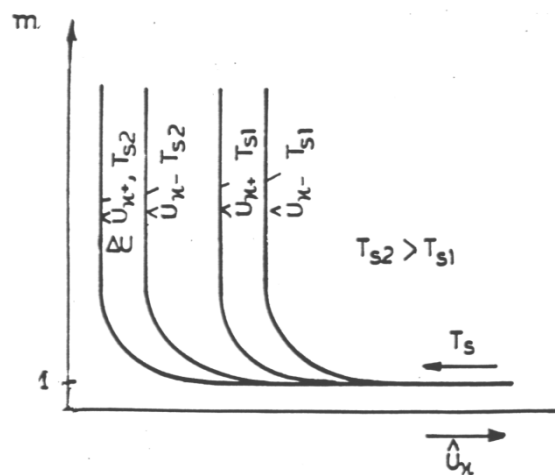
δηλαδή :



$$m = 1 + \frac{a_1}{\hat{U}_\kappa^2} + \frac{a_2}{\hat{U}_\kappa^2} = 1 + \frac{a_3}{\hat{U}_\kappa^2} \quad (1.1.5.2-19)$$

όπου  $a_1$ ,  $a_2$  και  $a_3$  συντελεστές, που εξαρτώνται από την τιμή  $\hat{U}_\kappa$ , τη συχνότητα των κρούσεων, τη μορφή της τάσης και το πάχος του υλικού (το οποίο είναι καθοριστικό για την τιμή της πεδιακής έντασης). Αν λάβει κανείς υπ' όψη τη σημασία της πολικότητας της ακίδας και τη μείωση του χρόνου διάσπασης με την αύξηση της

διάρκειας του μετώπου της κρουστικής τάσης, τότε οι χαρακτηριστικές  $m = f(\hat{U}_\kappa | T_s)$  έχουν τη μορφή, που δίνεται στο σχήμα 1.1.5.2-4-1.



**Σχήμα 1.1.5.2-4-1** : Χαρακτηριστικές  $m = f(\hat{U}_\kappa | T_s)$ .

$m$  : Αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

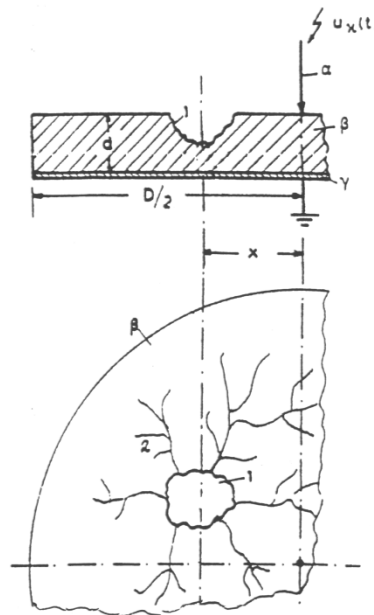
$T_s$ : Χρόνος μετώπου της κρουστικής τάσης

$\hat{U}_\kappa$  : Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

Κατά την καταπόνηση του στερεού μονωτικού, που αναλύθηκε προηγουμένως θεωρήθηκε, ότι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για τη διάτρηση με μία κρούση. Από πειράματα, που έχουν γίνει με κρουστικές τάσεις της μορφής  $1,2/50\mu\text{s}$  και  $10/200\mu\text{s}$ , σε τιμές  $\hat{U}_\kappa$  πλησίον της περιοχής διάτρησης (πίνακας.2-1), έχει διαπιστωθεί ότι, εκτός από τη θερμική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρά θραύσματα στη θέση προσεχούς διάσπασης. Μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στην περίπτωση αυτή συμμετέχουν στην τεχνητή γήρανση του υλικού (από κρούση σε κρούση) και οι δυνάμεις Coulomb. Η εικόνα, την οποία παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη γήρανση δίνεται στο σχήμα 1.1.5.2-4-2 και ονομάζεται **εικόνα επιφανειακών διαταραχών**. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη) , που παρατηρεί κανείς κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, γιατί φαίνεται ότι είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του

υλικού στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα, που προαναφέρθηκαν, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί η διάτρηση. Πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εικόνα επιφανειακών διαταραχών συρρικνώνεται όσο αυξάνει η διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης (υπό σταθερή τιμή  $\hat{U}_κ$  η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών είναι π.χ. μεγαλύτερη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs, ως προς εκείνη με κρουστική τάση 10/200μs. Έχει επίσης διαπιστωθεί, ότι η εικόνα των επιφανειακών διαταραχών περιορίζεται, όσο μειώνεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων.

Όταν τελικά συμβεί η διάτρηση μετά από  $m$  κρούσεις, τότε παρατηρεί κανείς μία μικρή τρύπα διάτρησης (με διάμετρο μικρότερη από 0,1mm), ως προέκταση του κρατήρα (σχήμα 1.1.5.2-4-3).



**Σχήμα 1.1.5.2-4-2** : Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs για τιμή  $\hat{U}_κ$  πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση

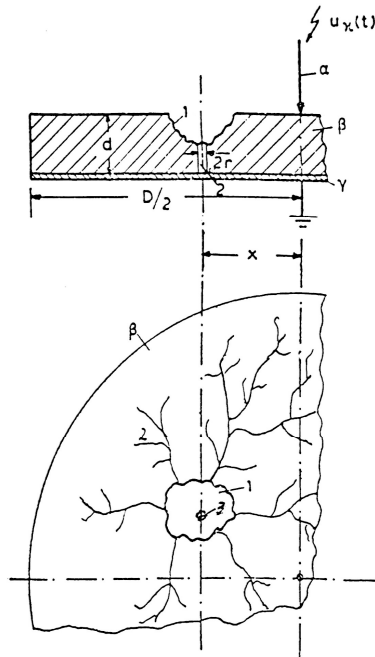
α : ακίδα ( $R \approx 1\text{mm}$ )

β : στερεό μονωτικό

γ : πλάκα

1 : κρατήρας

2 : σπήλαια



**Σχήμα 1.1.5.2-4-3 :** Παράδειγμα της εικόνας διάτρησης μετά από την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs για τιμή  $\hat{U}_k$  πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση

α : ακίδα ( $R \approx 1\text{mm}$ )

β : στερεό μονωτικό

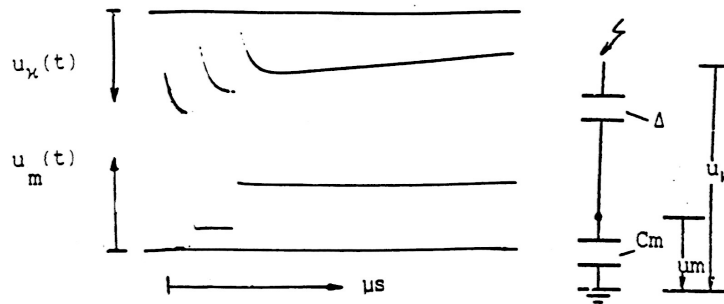
γ : πλάκα

1 : κρατήρας

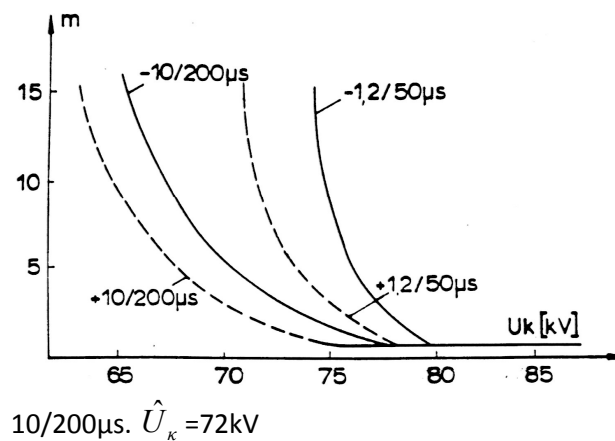
2 : σπήλαια

3 : οπή διάτρησης

Στο σχήμα 1.1.5.2-4-3 δίνεται ένα παράδειγμα διάτρησης του βακελίτη (πάχος 1mm) σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό διάταξη "ακίδα-πλάκα", κατά την καταπόνησή του με κρουστική τάση της μορφής 10/200μs, με μέγιστη τιμή πλησίον της περιοχής τιμών για τη διάτρηση (πίνακας 2-1). Επίσης, οι πειραματικές χαρακτηριστικές του σχήματος 1.1.5.2-4-4 (για το στερεό μονωτικό peritinax πάχους 1mm) εξηγούνται ικανοποιητικά από τις θεωρητικές του σχήματος 1.1.5.2-4-1.



**Σχήμα 1.1.5.2-4-3 :** Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1mm) με κρουστική τάση της μορφής



**Σχήμα 1.1.5.2-4-4 :**  $m = f(\hat{U}_k, T_s)$  για το στερεό μονωτικό Pertinax.

Ηλεκτρόδια : ακίδα- πλάκα

Δοκίμιο : pertinax πάχους 1 mm εντός μονωτικού ελαίου

m : αριθμός κρούσεων για τη διάτρηση

+ : θετική πολικότητα της ακίδας

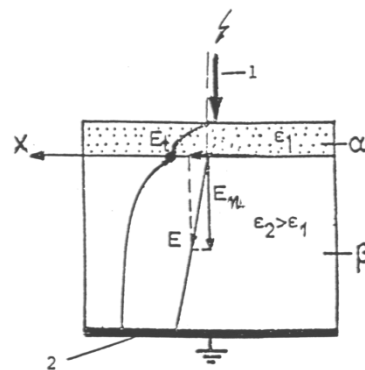
- : αρνητική πολικότητα της ακίδας

Όπως δείχνεται στο σχήματα 1.1.5.2-4-2 και 1.1.5.2-4-3 ο κρατήρας και η τρύπα διάτρησης σχηματίζονται σε μία απόσταση x από την ακίδα (συνήθως μερικά mm), αν και η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι στην κορυφή της ακίδας. Η ίδια παρατήρηση ισχύει για την τρύπα διάτρησης, όταν η διάτρηση συμβαίνει με μία μόνο κρούση. Αυτό φαίνεται ότι οφείλεται :

α) στην στατιστικότητα του φαινομένου (είναι στατιστικά αδύνατο να βρισκεται ακριβώς κάτω από την ακίδα η επικρατέστερη θέση διαταραχής, και

β) σε πολύ μικρή απόσταση από την ακίδα μετακινούνται, υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης οι ετερώνυμοι προς αυτήν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς του επιφανειακού φιλμ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρακτικά επέκταση του ίχνους της ακίδας (σχήμα 1.1.5.2-4-4).

Η παραπάνω παρατήρηση για τη θέση της τρύπας διάτρησης ισχύει επίσης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή κρουστικής τάσης 250/2500μs), καθώς και εκείνη με εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση. Από έρευνες, που έχουν γίνει με τις παραπάνω μορφές τάσης (με ακτίνα καμπυλότητα της ακίδας 0,9mm ή 1mm) δεν έχει διαπιστωθεί κατά την τεχνητή γήρανση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) η εκδήλωση κρατήρα ή σπηλαίων, ούτε έχει παρατηρηθεί η εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (ανεξαρτήτως της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης). Η διαφορά αυτή ως προς την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, που παρουσιάζεται κατά την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs και 10/200μs, είναι μία σημαντική παρατήρηση, που έχει οδηγήσει (σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών) στο διαχωρισμό μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης στο στερεό μονωτικό τάσης.



**Σχήμα 1.1.5.2-4-5 :** Επεξήγηση της σημασίας της επιφανειακής συνιστώσας της πεδιακής έντασης στον καθορισμό του κρατήρα και γενικότερα της θέσης διάτρησης, κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs και 10/200μs.

1 : ακίδα, 2 : πλάκα

α) επιφανειακό φιλμ  
β) στερεό μονωτικό

• : θέση όπου εκδηλώνεται ο κρατήρας (και γενικότερα η διάτρηση)

### 1.1.5.3 Ο συνδυασμός των τεσσάρων βασικών παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των τεσσάρων παραγόντων γήρανσης και διάτρησης (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος) εξαρτάται από το πώς αυτοί εκδηλώνονται διαχρονικά.

Αν θεωρηθεί π.χ., ότι πρόκειται για γήρανση του υλικού, τότε η καταπόνηση είναι

κυρίως θερμική, οπότε από τη σχέση 1.1.1-3 έχουμε :

$$\frac{u^2 A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} = 2\pi r \cdot d \cdot \kappa + C_0 \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.5.3-1)$$

όπου  $u$  η στιγμιαία τιμή της τάσης για τη διάτρηση και  $\theta$  η διαφορά θερμοκρασίας ως προς το περιβάλλον. Από την παραπάνω σχέση και την σχέση 1.1.1-8 ο χρόνος διάτρησης είναι:

$$t = \frac{C_0 \beta}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa} \int \frac{d\theta}{\left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta} - \beta\theta} \quad (1.1.5.3-2)$$

Αν θεωρηθεί, ότι λόγω προηγούμενης γήρανσης, συμβαίνει τελικά η διάτρηση για  $U > U_\theta$  (ηλεκτρική διάτρηση) και ότι :

$$\beta\theta \ll \left(\frac{U}{U_\theta}\right)^2 e^{\beta\theta-1}$$

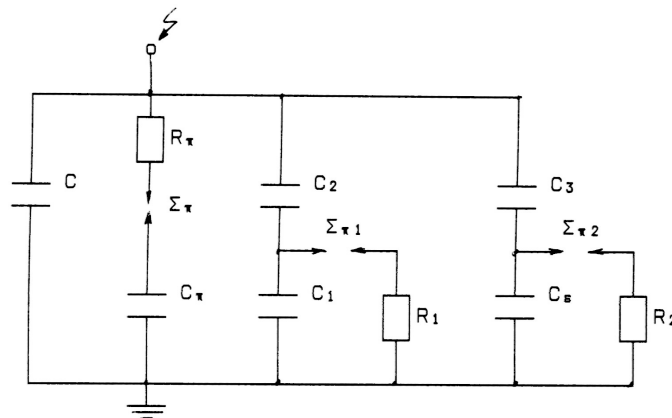
τότε, από την σχέση 1.1.5.3-2 έχουμε :

$$t \approx \frac{C_0 e}{2\pi r \cdot d \cdot \kappa \cdot \beta} \cdot \left(\frac{U_\theta}{U}\right)^2 \quad (1.1.5.3-3)$$

$$\text{ή : } t \approx \frac{a}{U^2} \quad (1.1.5.3-4)$$

όπου  $a$  ένας συντελεστής του υλικού.

Η παραπάνω σχέση δίνει μία πιθανή ερμηνεία για τη διάτρηση των στερεών μονωτικών, σε καταπονήσεις μικρής χρονικής διάρκειας. Πράγματι, η σχέση 1.1.5.2-10 για τη διάτρηση μετά από έναν αριθμό κρούσεων (βλέπετε χαρακτηριστικές των σχημάτων 1.1.5.2-4-1 και 1.1.5.2-4-4) φαίνεται ότι εναρμονίζεται με την σχέση 1.1.5.3-4, γιατί ο αριθμός των κρούσεων ( $m$ ) σχετίζεται με τον χρόνο καταπόνησης.



**Σχήμα 1.1.5.3-1 :** Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

$C$  : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

$C_1$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

$C_2$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.

$C_\varepsilon$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

$C_3$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.

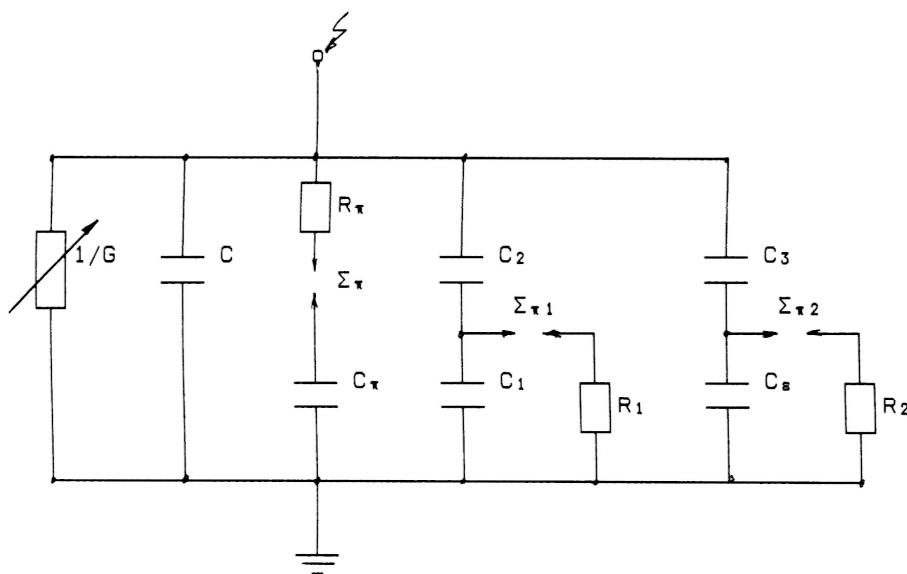
$C_\pi$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

$R_1$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_1$ .

$R_2$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_2$ .

$R_\pi, \Sigma\pi$ : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του  $C_\pi$  ( $R_\pi$  αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi$ ).

Από πρόσφατες πειραματικές έρευνες έχει προταθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που αποδίδει ικανοποιητικά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση και τις μερικές εκκενώσεις (σχήμα 1.1.5.3-1). Όπως φαίνεται πρόκειται ουσιαστικά για μία παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή  $C_\pi$ , προς το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff. Ο πυκνωτής αυτός εκφράζει την πόλωση του υλικού, λόγω της οποίας συμβαίνει η μηχανική τάνυσή του από τις δυνάμεις του πεδίου. Η διαδρομή εκκένωσης εκφράζεται στην περίπτωση αυτή με τον σπινθηριστή  $\Sigma\pi$  και την αντίσταση του τόξου  $R_\pi$  (υποτίθεται ότι ο  $\Sigma\pi$  διασπάται ταυτόχρονα με τον πυκνωτή  $C_\pi$ ). Για να αποδίδει το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα το συνδυασμό όλων των παραγόντων γήρανσης και διάσπασης (κατά τη μακροσκοπική θεωρία), φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει η παράλληλη σύνδεση μίας μεταβλητής αγωγιμότητας, που θα εκφράζει τις θερμικές απώλειες (απώλειες Joule και ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις) και την καταπόνηση του υλικού από τη θερμότητα του περιβάλλοντος (σχήμα 1.1.5.3-2).



**Σχήμα 1.1.5.3-2 :** Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού όλων των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης.

$C$  : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

$C_1$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

$C_2$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.

$C_ε$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.

$C_3$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.

$C_π$ : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.

$R_1$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma_{π1}$ .

$R_2$ : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma_{π2}$ .

$R_π, \Sigma_π$ : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του  $C_π$  ( $R_π$  αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma_π$ ).

$G$  : αγωγιμότητα λόγω των απωλειών του διηλεκτρικού καθώς και την ενίσχυσή τους από τις μερικές εκκενώσεις και τη θερμότητα του περιβάλλοντος.

Στον πίνακα 1.1.5.3-1 δίνονται συνοπτικά οι βασικές περιπτώσεις συνδυασμού των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης, που εξετάστηκαν στην παράγραφο αυτή. Οι



θεωρητικές σχέσεις του πίνακα 1.1.5.3-1 δεν δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της τάσης διάτρησης (γιατί περιλαμβάνουν αρκετές άγνωστες τιμές, που πρέπει να βρεθούν με μετρήσεις), δίνουν όμως τη δυνατότητα κατανόησης των φαινομένων, όταν οι μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών συνδυάζονται με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής.

α/α	Παράγοντες που συμμετέχουν στην αλλαγή της μοριακής δομής	Θεμελιώδεις σχέσεις	Οριακή τιμή της τάσης για τη διάτρηση
1	Συνδυασμός της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος με τους άλλους παράγοντες διάτρησης	Η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως όλους τους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης.	
2	Μερικές εκκενώσεις και απώλειες Joule	$1) \sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2$ $2) \frac{\sigma_0 e^{\beta\theta} A}{(1 - \delta E)^2 d} = \kappa 2\pi d \theta$	$u_{\theta\varepsilon} = d(1 - \delta E) \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση :</p> $\Delta u_1 = u_\theta - u_{\theta\varepsilon} = \delta E d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0}})$
3	Μερικές εκκενώσεις και δυνάμεις Coulomb	$1) \sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2$ $2) \frac{u^2 \sigma A}{(1 - \delta E)^2 d} = C_0 \frac{d\theta}{dt}$	$U_{\eta\varepsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_s}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη διάτρηση :</p> $\Delta u_3 = \delta E \sqrt{d} \sqrt{\frac{C_0 \theta}{\sigma A T_s}})$
4	Μερικές εκκενώσεις και θερμοκρασία περιβάλλοντος	$1) u_a = \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma}}$ $2) \sigma = \sigma_0 e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2$	$U_{a\varepsilon} = (1 - \delta E) \sqrt{a \frac{\kappa\theta}{\sigma_0}}$ <p>(μείωση της τάσης για τη</p>

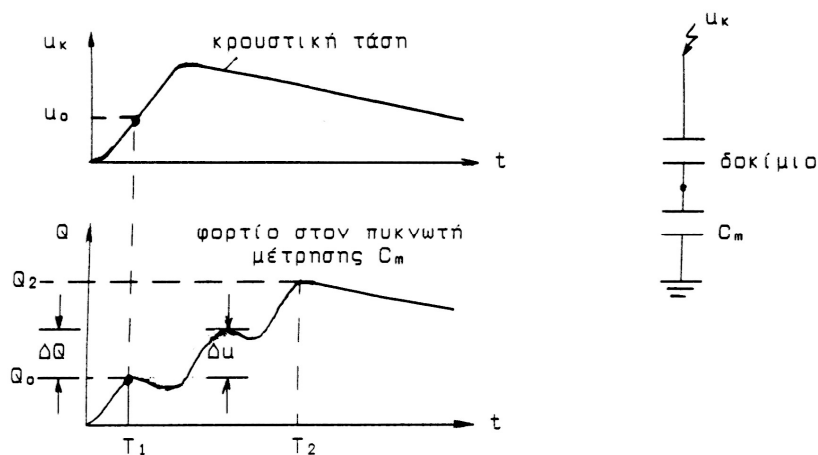
			διάτρηση : $\Delta u_4 = u_a - u_{a\varepsilon} = \delta E \sqrt{\frac{\kappa\theta}{\sigma_0}}$
5	Συνδυασμός των τεσσάρων* βασικών παραγόντων διάτρησης	$u^2 \frac{A}{d} \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} =$ $= 2\pi r d \kappa \theta + C_0 \frac{d\theta}{dt}$	Εξαρτάται από τον παράγοντα που υπερισχύει κατά τη διάτρηση

**Πίνακας 1.1.5.3-1 :** Βασικές σχέσεις μίας θεωρητικής ερμηνείας για τη γήρανση και διάτρηση των στερεών μονωτικών.

\* : μερικές εκκενώσεις, απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### 1.1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως π.χ. στο σχήμα 1.1.6.-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 5-2). Στο σχήμα π.χ. 5-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



**Σχήμα 1.1.6-1 :** Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

$T_1$  : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$T_2$  : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

$Q_0$  : Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$Q_2$  : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

$u_k$  : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης.

$u_0$  : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

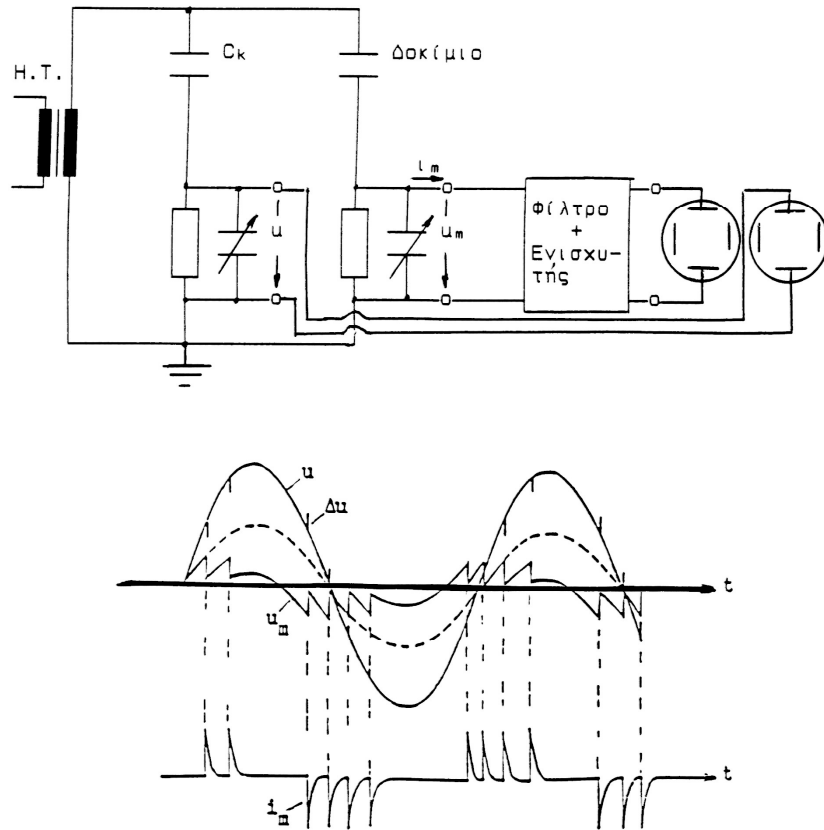
$\Delta u$  : Άλμα δυναμικού.

$\Delta Q$  : Αύξηση φορτίου.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική  $Q=f(|\hat{U}_k|)$ , η χαρακτηριστική  $u_0=f(|\hat{U}_k|)$ , ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική  $Q=f(\hat{U}_k)$ , η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.1.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.1.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90<sup>η</sup> κρούση, ως προς την 60<sup>η</sup>. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου  $Q$  στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ερευνών του είδους αυτού είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης στο στερεό μονωτικό. Έχει διαπιστωθεί ότι:

- 1) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.
- 2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η τάση.



**Σχήμα 1.1.6-2 :** Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού-χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T.: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

$C_k$  : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

$u$  : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).

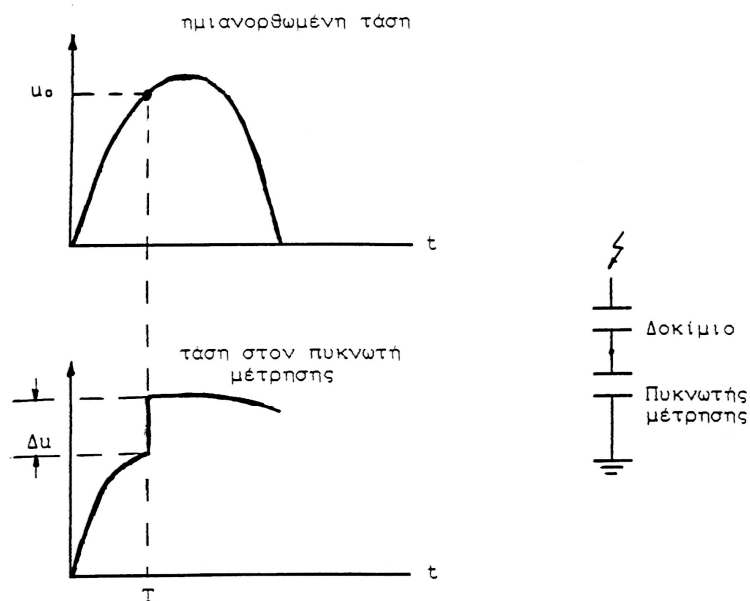
$u_m$  : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό-χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων.

$I_m$  : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.

$\Delta u$  : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

Τα παραπάνω σημαίνουν π.χ. για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις, ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.

Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών. Στον πίνακα 1.1.6-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με  $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$ , από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, που προαναφέρθηκε. Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

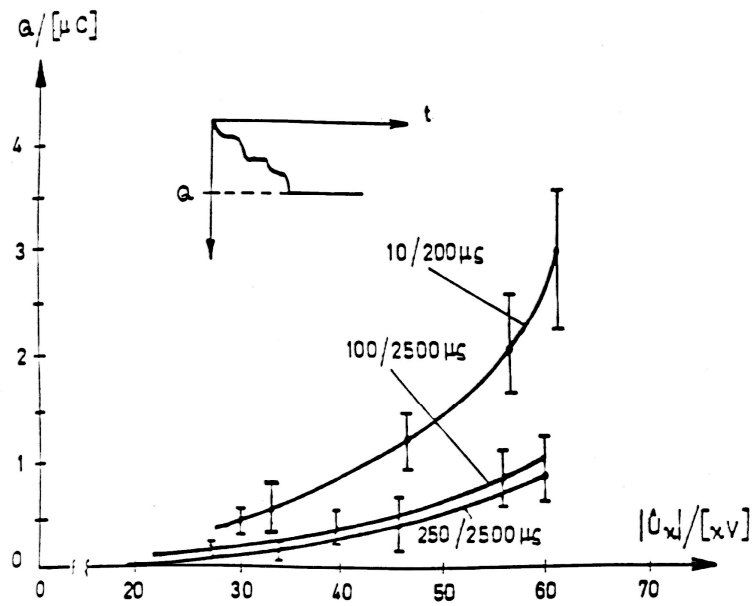


**Σχήμα 1.1.6-3 :** Παράδειγμα Καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

$T_1$  : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$U_0$  : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

$\Delta u$  : άλμα δυναμικού

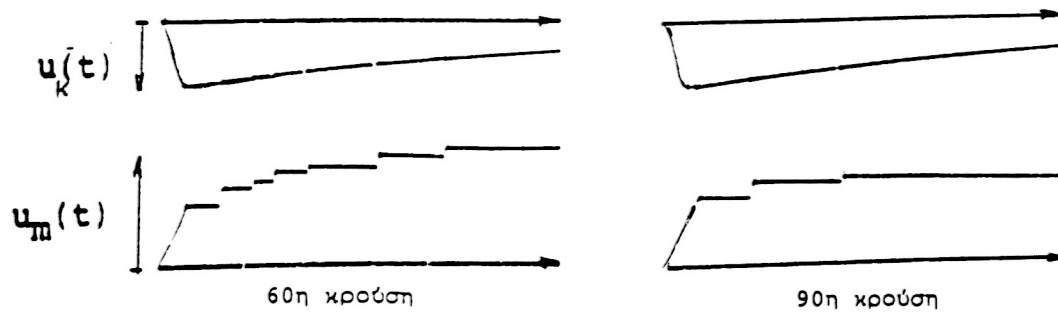


**Σχήμα 1.1.6-4 :** Χαρακτηριστική  $Q_2=f(\hat{U}_κ)$  για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα

$C_m$ : 1000nF



**Σχήμα 1.1.6-5 :** Άλματα δυναμικού κατά την 60<sup>η</sup> και την 90<sup>η</sup> κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).

Μορφή τάσης : 1,2/50μs ( $\hat{U}_κ = 99,7kV$ ).

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

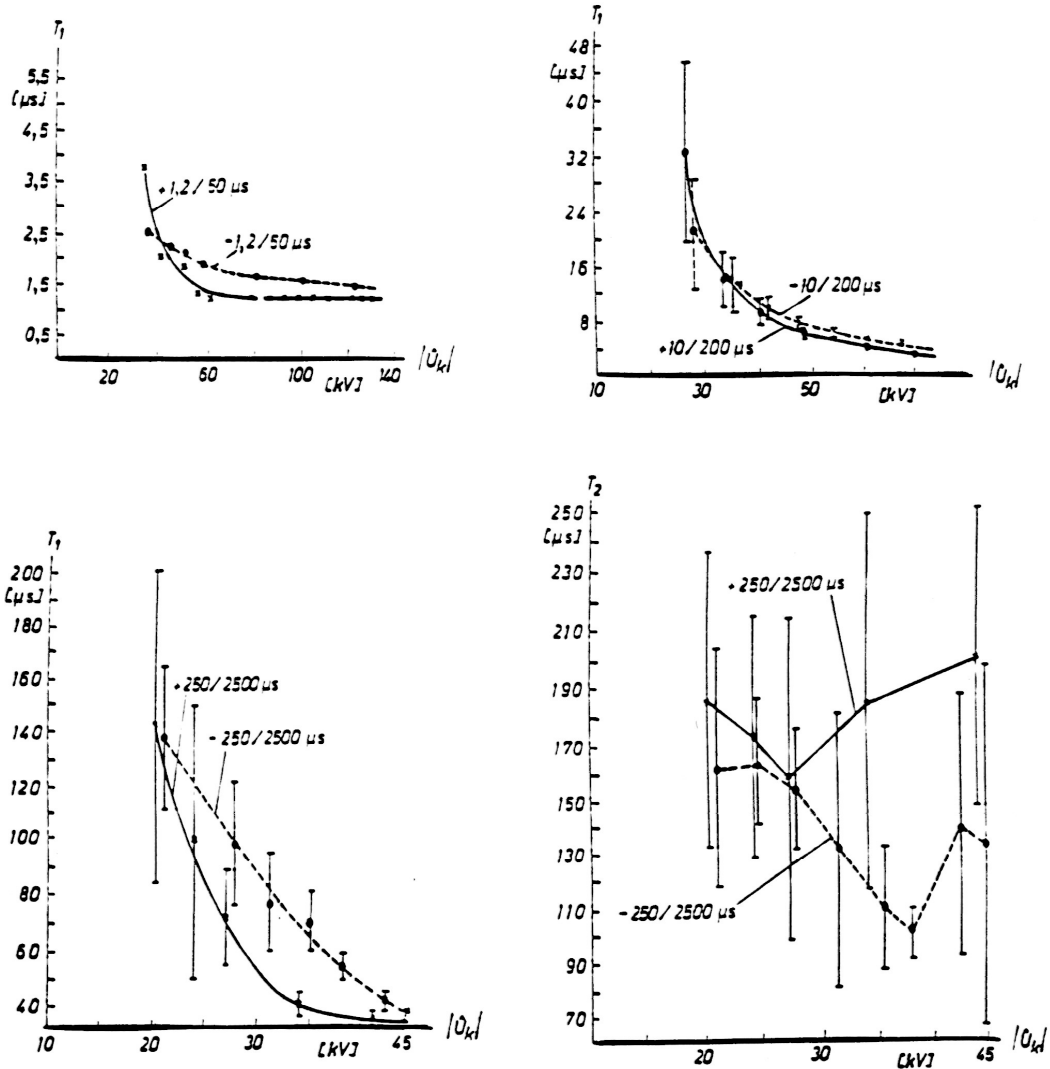
$$C_m : 210nF.$$

Μορφή τάσης σε $\mu s$	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Άλματα Δυναμικού	Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις
1,2/50	ΝΑΙ	ΝΑΙ	στην ουρά	εξωτερικές μερικές εκκενώσεις
10/200	ΝΑΙ (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 $\mu s$ )	ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 $\mu s$ )	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250/2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

**Πίνακας 1.1.6-1 :** Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές  $T_1=f(|\hat{U}_κ|)$  και  $T_2=f(|\hat{U}_κ|)$  σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης ( $T_1$ ) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της

καταπόνησης, που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων ( $T_2$ ), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 1.1.6-1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



**Σχήμα 1.1.6-6 :** 1) Χαρακτηριστική  $T_1=f(U_{κ})$  κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και  $\epsilon_r \approx 2,5 \div 4,5$ ) με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, 10/200μs και 250/2500μs.

2) Χαρακτηριστική  $T_2=f(U_{κ})$  κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

I : 2 φορές η τυπική απόκλιση.



### 1.1.7 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.1.3, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (**απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb, και θερμότητα του περιβάλλοντος**). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν όμως στοιχεία για φαινόμενα, που δεν μπορεί κανείς να ακούσει, ή να παρατηρήσει, όπως :

- **ο ιονισμός με κρούσεις**, που πιστεύεται ότι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά, και
- **το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας** και η συσχέτισή του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές, ή μηχανικές, ή και τα δύο : π.χ. κατά τα σχήματα 1.1.5.2-4-2 και 1.1.5.2-4-3), που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

Οι πληροφορίες αυτές, καθώς και άλλες, δόθηκαν με κβαντομηχανική ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, η οποία βασίζεται κυρίως :

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις,
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση, αντί του πυκνωτή μέτρησης),
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η **ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι :

- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι :
  - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
  - β) Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση (

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT).$$

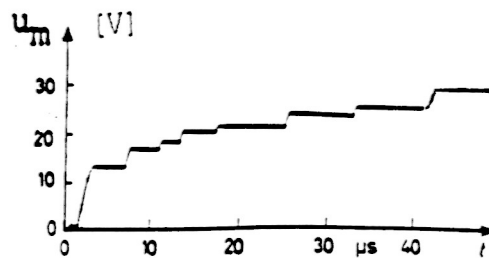
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγούμενως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$ . Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι **ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό**. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά τα προαναφερόμενα, με βάση τυπικά παραδείγματα, τα περισσότερα των οποίων είναι ήδη γνωστά από τη βιβλιογραφία.

### 1.1.7.1 Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών.

Ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών είναι το παρακάτω :

Στο σχήμα 1.1.7-1÷7-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 1.1.7-4 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.1.7-5. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι :



**Σχήμα1.1.7-1** : Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

$$\hat{U}_κ : 100kV.$$

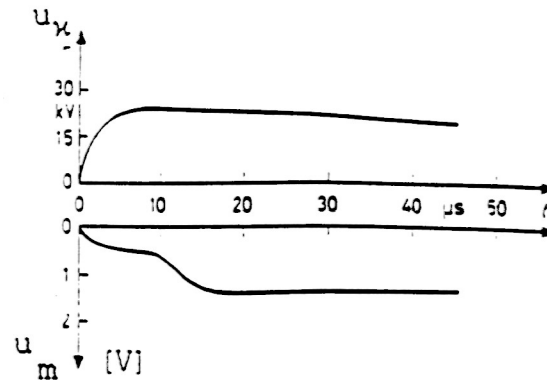
$$E : 0,8 MV/cm.$$

$$C_m : 210nF.$$

- α) μετά από μία τιμή  $\hat{U}_κ \approx 45kV$ , κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs ή 10/200μs, εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.1.7-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο δενδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις

β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω δενδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής

Για λόγους σύγκρισης των συμπερασμάτων, μεταξύ μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης στα στερεά μονωτικά, εξετάζονται (με τα παραπάνω

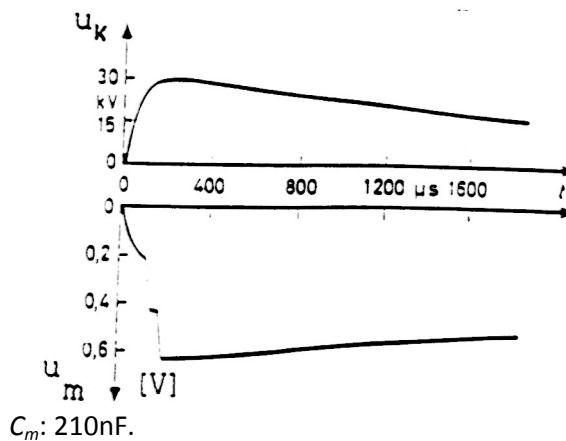


δεδομένα) και οι δύο αυτές περιπτώσεις :

**Σχήμα 1.1.7-2 :** Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs.

$$\hat{U}_k : 26,6\text{kV.}$$

$$E: 0,38\text{MV/cm.}$$



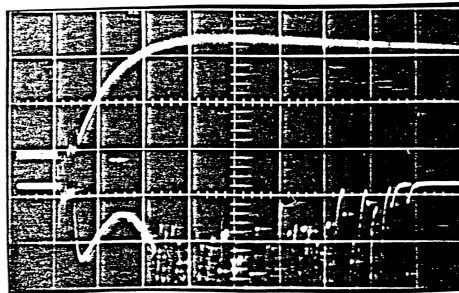
$$C_m: 210\text{nF.}$$

**Σχήμα 1.1.7-3 :** Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs.

$$\hat{U}_k : 32\text{ kV.}$$

$$E: 0,31\text{ MV/cm.}$$

$$C_m: 1000\text{nF.}$$



**Σχήμα 1.1.7-4 :** Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs.

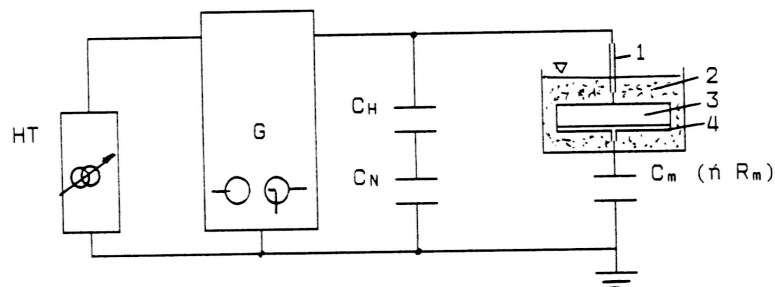
Κλίμακα χρόνου : 5 μs/div.

Κλίμακα ρεύματος : 1,3 A/div.

$\hat{U}_κ$  : 81kV,  $E$  : 0,86 MV/cm.

### α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, όπως έγινε στο παράδειγμα της παραγράφου 6.1.3,4, τότε καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 1.1.6-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών



εκκενώσεων (σχήματα 1.1.3.3-2 έως 1.1.3.3-4).

**Σχήμα 1.1.7-5 :** Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.

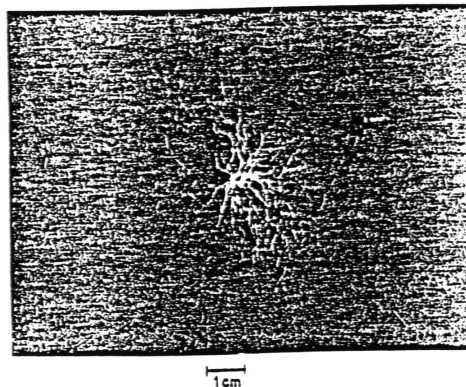
$C_H$  και  $C_N$  : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.

1 : Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2 : Μονωτικό λάδι, 3 : Δοκίμιο (πάχος 2mm),

4 : Ηλεκτρόδιο πλάκα.

$C_m$ : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού

$R_m$ : αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος).



**Σχήμα 1.1.7-6** : Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs

$$\hat{U}_κ : 85kV, E : 0,8MV/cm.$$

### β) Κβαντομηχανική ερμηνεία :

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης  $C_m$  ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση  $W = 0,5q_e \Delta u$ , όπου :  $q_e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $\Delta u$  το άλμα δυναμικού. Η σχέση αυτή ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης  $R$  από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για  $R > 0$  θα πρέπει να πάρει κανείς υπ' όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου :

$$\tau = R \cdot C_m \quad (1.1.7.1-1)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση :

$$W = (0,5\Delta u) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV} \quad (1.1.7.1-2)$$

όπου :  $\Delta u$  σε V και  $t$  ο χρόνος φόρτισης του  $C_m$  κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης (κατά τη βιβλιογραφία περίπου 100ns).

Για μία αντίσταση  $R=0,5\Omega$ , ο συντελεστής :

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(RC_m)}) \quad (1.1.7.1-3)$$

δίνεται στον πίνακα 1.1.7-1, για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για  $R=0,5\Omega$ , ισχύει επομένως :

$C_m$ σε nF	10	20	210	1000	1835
$f$	1	1	1,62	5,51	9,6

**Πίνακας 1.1.7-1 :** Τιμές του συντελεστή  $f$  για  $R=0,5\Omega$

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (1.1.7.1-4)$$

όπου  $\Delta u$  σε V.

Στον πίνακα 1.1.7-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας  $W$  για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 1.1.7-1, 1.1.7-2 και 1.1.7-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι :

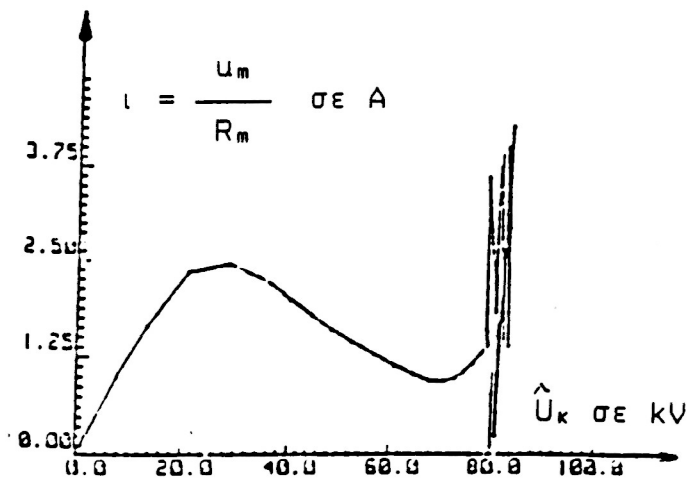
- 1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 1.1.7-2,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας  $W$  εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 1.1.7-1), και
- 3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις,

μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι : από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

Μορφή τάσης	Σχήμα	$W$ σε eV
1,2/50 $\mu$ s	6.3.1-1	$\cong 10,50$
10/200 $\mu$ s	6.3.1-2	$\cong 1,60$
250/2500 $\mu$ s	6.3.1-4	$\cong 0,16$

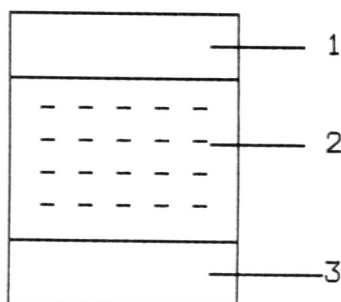
**Πίνακας 1.1.7-2 :** Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού.

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογραφήματα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 1.1.7-5 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμά της ενέργειάς τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (πίνακας 1.1.7-2). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 1.1.7-5) φαίνεται επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος-τάσης" του σχήματος 1.1.7-7.



**Σχήμα 1.1.7-7 :** Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 1.1.7-4

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μία διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες **ενεργειακές στάθμες διαταραχής** μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.1.7-8). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.1.3.3-2). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



**Σχήμα 1.1. 7-8 :** Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

- 1 : ζώνη αγωγιμότητας
- 2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
- 3: ζώνη σθένους

Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 1.1.7.1-2.

### 1.1.7.2 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.

Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,5÷4,5 (διάφορα χαρτιά μετασηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, pectinax, πανίτης, κλπ). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs, κλπ). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

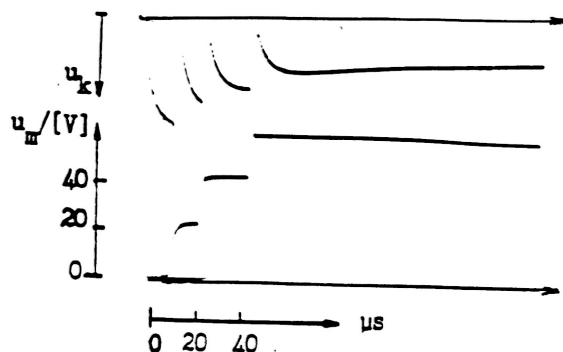


Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 1.1.7-5. Τυπικά παλμογραφήματα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 1.1.7-9 και 1.1.7-10. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ( $W$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 1.1.7.1-2, όπως και κατά την γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και  $R=0,5\Omega$  (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή  $W$  υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι **η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων Χ**.

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά (συγκρίνατε με το παλμογράφημα του σχήματος 1.1.7-3). Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα στερεά μονωτικά κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων της γήρανσης και της διάτρησης εξαρτάται σημαντικά από τον συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης

των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της παραπάνω ακτινοβολίας. Όταν ακίδα έχει π.χ. ακτίνα καμπυλότητας 0,3mm (αντί του  $\approx 1\text{mm}$ ), τότε (όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά) η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι



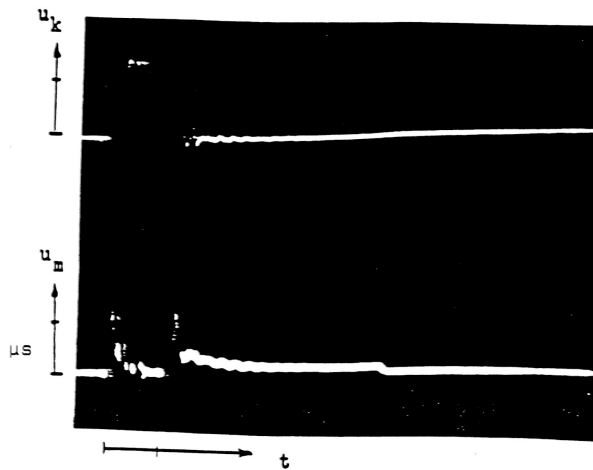
το ορατό τμήμα της.

**Σχήμα 1.1.7-9 :** Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.  
Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

$R$  της ακίδας  $\approx 1\text{mm}$ .

$\hat{U}_k$  : 85kV.

$E$  : 1,2 MV/cm.



**Σχήμα 1.1. 7-10 :** Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση.

R της ακίδας  $\approx 1$  mm.

Μορφή τάσης 1,2/50μs.

$$\hat{U}_k = 85\text{kV}$$

$$E = 1,2\text{MV/cm}$$

$$R_m = 150\Omega$$

$$u_m : 20\text{V/div}$$

$$t : 2 \mu\text{s/div}$$

### 1.1.7.3 Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών.

Ένα σημαντικότερο συμπέρασμα, από την θεωρητική μελέτη του ιονισμού με κρούσεις στα στερεά μονωτικά δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2} \quad (1.1.7.3-1)$$

όπου (κατά το σχήμα 1.1.6-1) :

- $E_0$  η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ( $E > 0,2\text{MV/cm}$ ) και  $Q_0$  το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
- $E$  η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή  $Q$ .

– Α ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

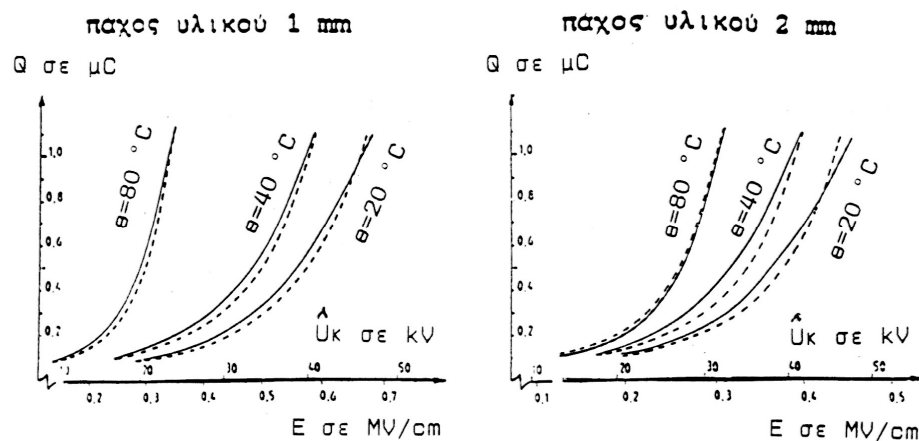
Με βάση την σχέση αυτή έχει γίνει μία προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών  $Q=f(\hat{U}_κ)$  κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία (ως γνωστό από τον πίνακα 1.1.6-1) προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Η διάταξη, που έγιναν τα πειράματα, έχει δοθεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.1.7-5. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20°C, 40°C και 80°C), ώστε :

α) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και

β) να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά την σχέση 1.1.7.3-1, (με προσδιορισμό του συντελεστή  $A$  για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι :

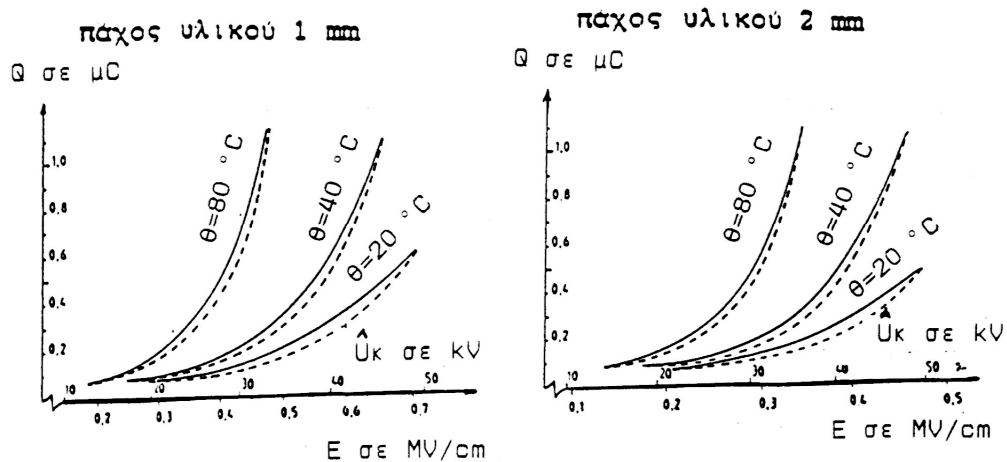
- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου  $E=0,2\text{MV/cm}$ .
- 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι  $0,5\text{ MV/cm}$  ισχύει για την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$ .
- 3) για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως ισχύει η σχέση 1.1.7.3-1, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται ότι η σχέση, που διέπει τον συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είναι η 1.1.7.3-1.



**Σχήμα 1.1. 7-11** : Χαρακτηριστικές  $Q=f(\hat{U}_κ)$  για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου, υπο κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.  $A=0,48$ .

Από την μεγάλη αύξηση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων με τη θερμοκρασία του μονωτικού ελαίου, που στη πράξη γίνεται αντιληπτή σε συνδυασμούς "στερεό-υγρό μονωτικό"

με την αρκετά μεγάλη  $tg\delta$ , φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει μία βελτίωση των προδιαγραφών ως προς τη δοκιμή υπερθέρμανσης. Με τυπικό παράδειγμα τους μετασχηματιστές ελαίου (και ιδιαίτερα τους μετασχηματιστές έντασης του δικτύου μεταφοράς, που ως γνωστό από την πράξη παρουσιάζουν προβλήματα κατά την αύξηση της  $tg\delta$ ), κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιούνται οι διηλεκτρικές δοκιμές, αμέσως μετά το πέρας της δοκιμής υπερθέρμανσης (ή δοκιμής ανύψωσης της θερμοκρασίας). Κατά τον τρόπον αυτόν θα συνεξετάζεται δηλαδή η πιθανή εκδήλωση φαινομένων ιονισμού στα ανεκτά όρια της θερμοκρασιακής κατάστασης του μετασχηματιστή ( $\approx 80^\circ\text{C}$ ).



**Σχήμα 1.1.7-12** : Χαρακτηριστικές  $Q=f(\hat{U}_κ)$  για τον βακελίτη εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.  $A=0,44$ .

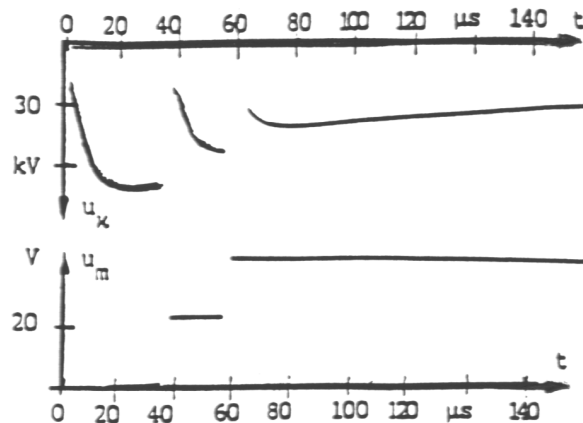
#### 1.1.7.4 Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (βλέπετε σχήμα 1.1.7-5). Δεν θα γίνει αναφορά στα παλμογράφημα της γήρανσης, γιατί είναι προφανές ότι τα φαινόμενα δεν εξαρτώνται, με το αν θα ακολουθήσει η διάτρηση ή η επιφανειακή διάσπαση.

Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 1.1.7-13 υπολογίζεται με την σχέση 1.1.7.1-2 η ενέργεια  $W$  των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων  $X$ .

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων  $X$  κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται

αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στα σχήματα 1.1.7-14, 1.1.7-15 και 1.1.7-16 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στα σχήματα 1.1.7-16 και 1.1.7-17 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες στο σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.



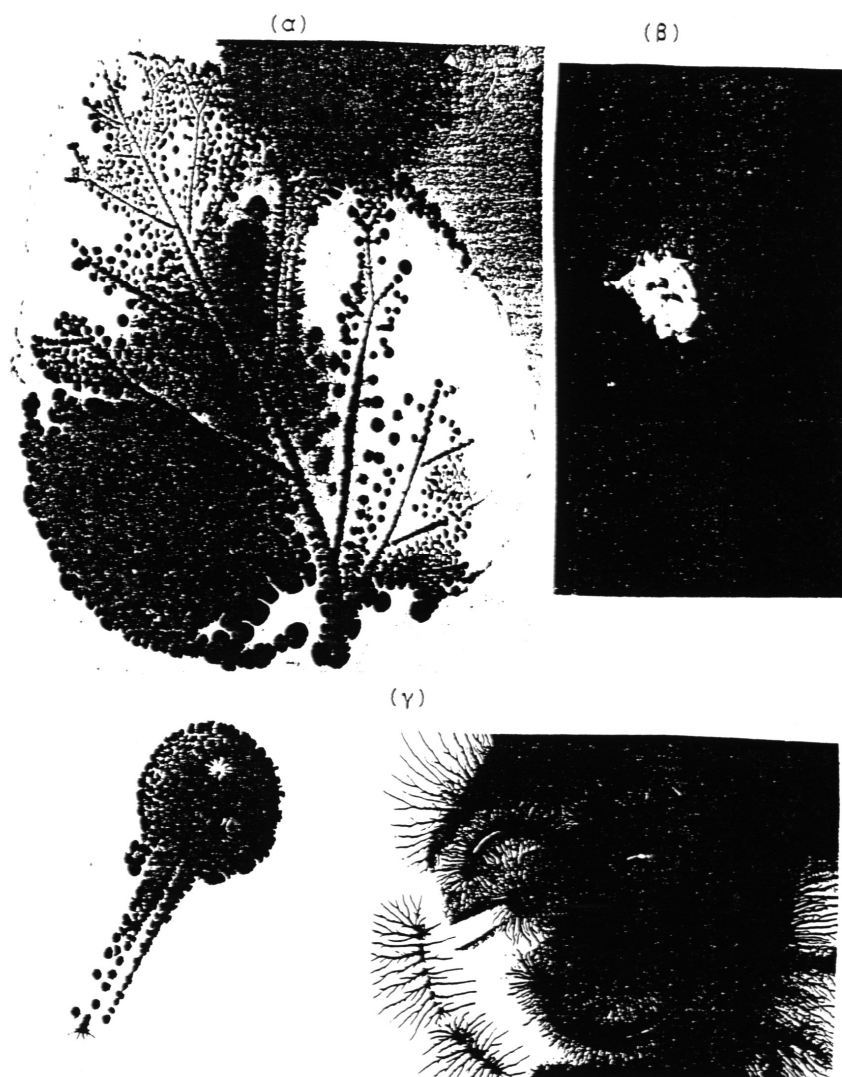
**Σχήμα 1.1.7-13 :** Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.



Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : "ακίδα-πλάκα".

**Σχήμα 1.1.7-14 :** Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση πολυμερούς στερεού μονωτικού πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs. (φωτογράφιση ενός φύλλου δένδρου)

Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ μπορούμε να υποθέσουμε, ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία του σχήματος 1.1.7-16 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 1.1.7-17 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες Χ. Κατά τον τρόπο αυτό δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της



ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

**Σχήμα 1.1.7-15 :** Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

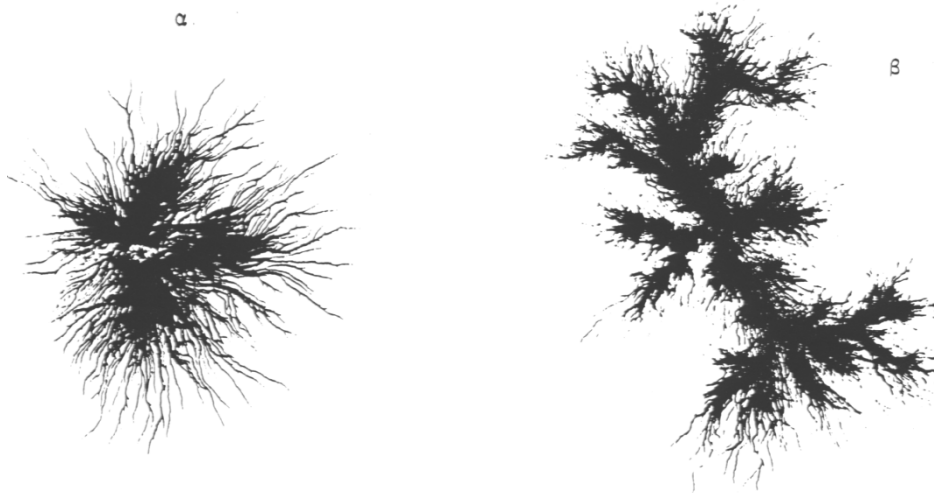
α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου

β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).



γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.

**Σχήμα 1.1.7-16 :** Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).



**Σχήμα 1.1.7-17 :** Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα).

α) Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση).

β) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

### 1.1.8 Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών.

Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.1.7 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που (όπως θα δούμε ακολούθως στο παράδειγμα 2) ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής  $A$  στην σχέση 1.1.7.3-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κανείς τα πειράματα της παραγράφου 1.1.7.3 με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs (ή με 10/200μs) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές  $Q=f(\hat{U}_κ)$  με την σχέση 1.1.7.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής  $A$  έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή  $A$  (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, ή 10/200μs) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσής του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνειά του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στον διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από το παραπάνω φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.1.8-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 1.1.3.3-2), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής  $E_0$  (περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.1.8-1 ως ακολούθως :

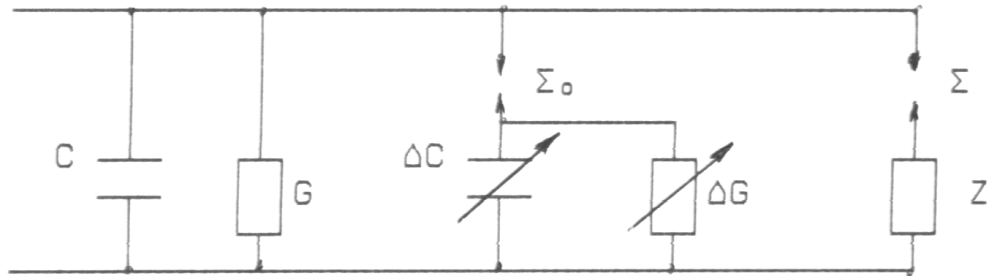
- 1) Για  $E < E_0$  : Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές  $\Sigma_0$  και  $\Sigma$ ).
- 2) Για  $E > E_0$  : Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο  $\Sigma_0$ ) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση :  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$ .
- 3) Για  $E \gg E_0$  : Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT)$ , αλλά η σχέση :



$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$$

Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή

$E$ . Για τιμές  $W > 20\text{eV}$  συμβαίνει η διάτρηση.



**Σχήμα 1.1.8-1 :** Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

$C$  : ιδανική χωρητικότητα

$G$  : ιδανική αγωγιμότητα

$\Delta C$  : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

$\Delta G$  : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

$Z$  : αρνητική διαφορική αντίσταση

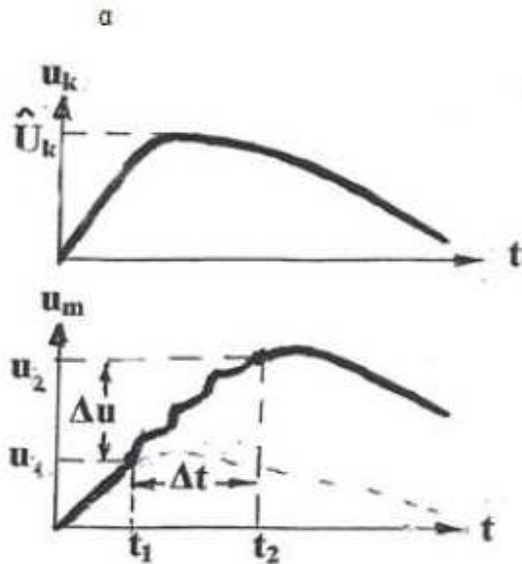
$\Sigma_0$  : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

## 2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην μελέτη και στην στατιστική ανάλυση των κρούσεων ρεύματος σε δοκίμια Pertinax εντός μονωτικού ελαίου αναλόγως της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων υπό κρουστική τάση. Το πάχος του δοκιμίου Pertinax που χρησιμοποιήθηκε ήταν και

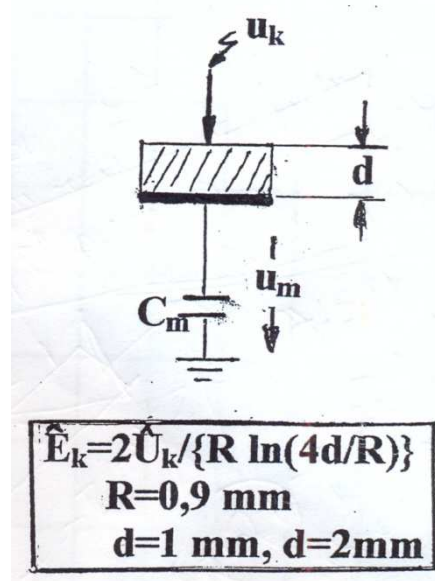
Η συμπεριφορά του ανωτέρου μονωτικού σε διαβαθμισμένη κλίμακα έντασης κρουστικών τάσεων είναι υψίστης σημασίας όπως και τα φαινόμενα τα οποία εκδηλώνονται κατά την συγκεκριμένη διαδικασία. Συγκεκριμένα ενδιαφέρει να σχηματισθεί μια εμπειριστατωμένη άποψη για τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου μονωτικού υλικού βάσει ορισμένων ηλεκτρικών μεγεθών που επιβλήθηκαν (όπως η κρουστική τάση) είτε που υπολογίστηκαν όπως η στιγμιαία ενέργεια κατά την έναρξη και το πέρας των μερικών εκκενώσεων, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, η μετρούμενη τιμή του ρεύματος επίσης κατά την έναρξη και το πέρας των εκκενώσεων και η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την διάρκεια των φαινομένων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι χαρακτηριστικές της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης συναρτήσει του χρόνου και της στιγμιαίας τιμής της, στην έναρξη και το πέρας του φαινομένου, επίσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 2-1.α :  $\hat{U}_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

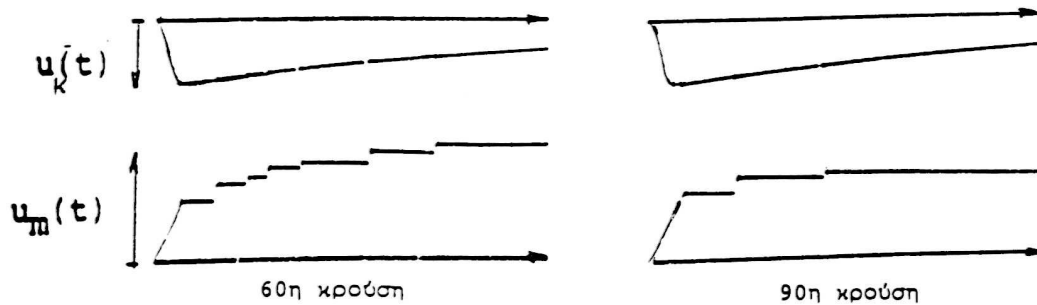
Σχήμα 2-1.β :  $u_1$ : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων  
 $u_2$ : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων  
 $\Delta u$ :  $u_2 - u_1$   
 $t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων  
 $t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων  
 $\Delta t$ :  $t_1 - t_2$



Σχήμα 2-2 :  $u_k$ : στιγμιαία τιμή της  $u_m$   
 $C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$d$  :πάχος δοκιμίου.  
 $R$ : ακτίνα καμπυλότητας.

Η μέτρηση των αλμάτων δυναμικού σε στερεά μονωτικά υλικά υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών τάσεων παρέχει την δυνατότητα μελέτης των υλικών αυτών μέσω στατιστικών μετρήσεων. Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει ενδεικτικά τα προαναφερθέντα άλματα σε δοκίμιο Pertinax πάχους 2mm.



**Σχήμα 2-3** : Άλματα δυναμικού κατά την 60η και την 90η κρούση στο pertinax πάχους 2mm.

Μορφή τάσης : 1,2/50μs.

Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.

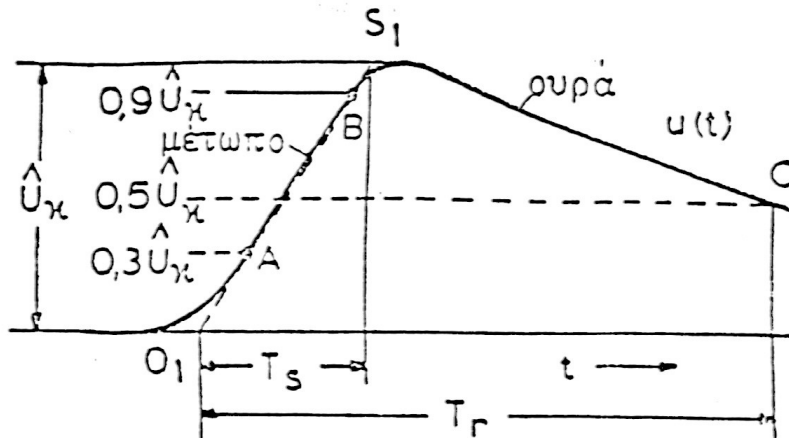
Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.

$C_m$  : 210nF.

Κατά την καταπόνηση οργανικών υλικών υπό κρουστικές τάσεις έχει παρατηρηθεί εκθετική σχέση μεταξύ του φορτίου και της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης με ορισμένες αποκλίσεις οι οποίες οφείλονται στην ανομοιογένεια του υλικού καθώς και σε άλλους παράγοντες μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τις δυνάμεις Coulomb. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ερευνών του είδους αυτού είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης στο στερεό μονωτικό. Έχει διαπιστωθεί ότι:

1) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.

2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η



τάση.

**Σχήμα 2-4:** Χαρακτηρισμός των μεγεθών της κρουστικής τάσης.

$\hat{U}_k$ : Μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης.

$T_s$ : διάρκεια μετώπου.

$T_r$ : διάρκεια ημίσεως εύρου.

Η συνήθης κεραυνική τάση είναι μια κρουστική τάση της μορφής  $1,2/50\mu s$  το οποίο ερμηνεύεται ως  $T_s = 1,2\mu s$  και  $T_r = 100\mu s$ . Κατά κανόνα οι κρουστικές τάσεις παράγονται μέσω της εκφόρτισης πυκνωτών υψηλής τάσης, διαμέσου σπινθηριστών έναρξης, σε ένα κύκλωμα αντιστάσεων και χωρητικότητας. Η μέγιστη τιμή των κρουστικών τάσεων είναι δυνατό να μετρηθεί με τη βοήθεια σπινθηριστών μέτρησης και οργάνων μέτρησης σε συνδυασμό με καταμεριστές τάσης. Η χρονική μεταβολή μιας κρουστικής τάσης λαμβάνεται μέσω ηλεκτρονικού παλμογράφου ή αναλογικού ψηφιακού μετατροπέα, συνδυαζομένων πάντα με καταμεριστή τάσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος της μέτρησης των αλμάτων δυναμικού. Η βασική σχέση από την οποία πηγάζει ολόκληρη η ανάλυση και η ερμηνεία των φαινομένων είναι η ακόλουθη :

$$Q = Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right) \quad (2-1)$$

**Σχέση 2-1:**  $Q_0$ : το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$A$ : σταθερά χαρακτηριστική του ηλεκτρικού μονωτικού Pertinax.

$\hat{E}_{k0}$ : Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

Η σχέση (2-1) θα χρησιμοποιηθεί για να αποδοθούν και να προσεγγιστούν μαθηματικά, στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, όλες οι ζητούμενες χαρακτηριστικές οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων και υψηλών τάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων.

$$\hat{E}_k = \frac{2 \cdot \hat{U}_k}{\{R \cdot \ln(4d/R)\}} \quad (2-2)$$

**Σχέση 2-2 :**  $\hat{U}_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης.

$\hat{E}_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_k$ .

$R$ : ακτίνα καμπυλότητας 0,9mm.

$d$ : πάχος δοκιμίου 1mm ή 2mm.

$$u_1 = \frac{Q_1}{C_m} \quad (2-3)$$

**Σχέση 2-3 :**  $u_1$ : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$C_m$ : πυκνωτής μέτρησης.

$Q_1$ : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$$u_2 = \frac{Q_2}{C_m} \quad (2-4)$$

**Σχέση 2-4 :**  $u_2$ : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$C_m$ : πυκνωτής μέτρησης.

$Q_2$ : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$$i_1 = \frac{Q_1}{t_1} = \frac{C_m \cdot u_1}{t_1} \quad (2-5)$$

**Σχέση 2-5 :**  $u_1$ : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$C_m$ : πυκνωτής μέτρησης.

$Q_1$ : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$t_1$ : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$$i_2 = \frac{Q_2}{t_2} = \frac{C_m \cdot u_2}{t_2} \quad (2-6)$$

**Σχέση 2-6 :**  $u_2$ : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$C_m$ : πυκνωτής μέτρησης.

$Q_2$ : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$t_2$ : χρόνος πέρατος των μερικών εκκενώσεων.

$$\Delta i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{C_m \cdot \Delta u}{\Delta t} \quad (2-7)$$

**Σχέση 2-7 :**  $\Delta i$  : αναπτυσσόμενο ρεύμα κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta q$  : αναπτυσσόμενο φορτίο κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta t$  : διάρκεια των μερικών εκκενώσεων.

$C_m$ : πυκνωτής μέτρησης.

$\Delta u$ : αναπτυσσόμενη τάση κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων.

$$\Delta W_e = 0,5 * \Delta u \quad (2-8)$$

**Σχέση 2-8 :**  $\Delta W_e$  : Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta u$ : αναπτυσσόμενη τάση κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων.

---

## 2. ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.

### 2.1-1. ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ + 1,2/100 $\mu$ s ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ $d = 1mm$ .

$\hat{U}_k$ (kV)	$\hat{E}_k$ (kV)	$\hat{E}_k$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$U_{εν}$ (kV)	$E_{εν}$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$t_1$ ( $\mu$ s)	$t_2$ ( $\mu$ s)	$\Delta t$ ( $\mu$ s)	$C_m$ (nF)
2,3	865,10	0,8651	0	0,6117	0	0	0	0
40,27	1081,24	1,081241	38,12	0,7645	4,52	13,5	8,98	210
48,33	1297,65	1,29765	44,31	0,9175	3,23	20,38	17,15	210
56,38	1513,79	1,513791	52,23	1,0704	2,6	25,5	22,9	1000
64,44	1730,20	1,7302	60,44	1,2234	1,63	27,5	25,87	1000
72,5	1946,61	1,94661	69,48	1,3764	1,28	33,75	32,47	1000

**Πίνακας 2.1-1: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων στο στερεό μονωτικό Pertinax πάχους 1 mm. εντός μονωτικού ελαίου διάταξης ηλεκτροδίων <<ακίδα ακτίνας καμπυλότητας  $R = 0,9mm$ .-πλάκα>> υπό κρουστική τάση +1,2/100 $\mu$ s.**

$\hat{U}_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης.

$\hat{E}_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_k$ .

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta t$  :  $t_1 - t_2$ .

$U_{εν}$  : ενεργός τιμή της κρουστικής τάσης.

$E_{εν}$  : ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_k$ .

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$q_1(\mu C)$	$q_2(\mu C)$	$u_1(V)$	$u_2(V)$	$i_1(A)$	$i_2(A)$	$\Delta i(A)$	$\Delta u(V)$	$\Delta We(eV)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,97	2,13	0,004619	0,010143	0,214602	0,157778	0,05682	0,005524	0,002762
1,26	4,75	0,006	0,022619	0,390093	0,233072	0,15702	0,016619	0,00831
1,45	6,8	0,00145	0,0068	0,557692	0,266667	0,29103	0,00535	0,002675
1,79	9,06	0,00179	0,00906	1,09816	0,329455	0,7687	0,00727	0,003635
2,12	12,87	0,00212	0,01287	1,65625	0,381333	1,27492	0,01075	0,005375

**Πίνακας 2.1-2: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων στο στερεό μονωτικό Pertinax πάχους 1mm εντός μονωτικού ελαίου διάταξης ηλεκτροδίων <<ακίδα ακτίνας καμπυλότητας  $R = 0,9mm$ .-πλάκα>> υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.**

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$u_1$  : στιγμιαία τιμές της  $u_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_2$  : στιγμιαία τιμές της  $u_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta u$  :  $u_2 - u_1$ .

$\Delta i$  :  $i_2 - i_1$ .

$\Delta We$ : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

### 2.1-2. ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ + 1, 2/100μs ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ $d = 1mm$ - ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΜΕΓΕΘΩΝ.

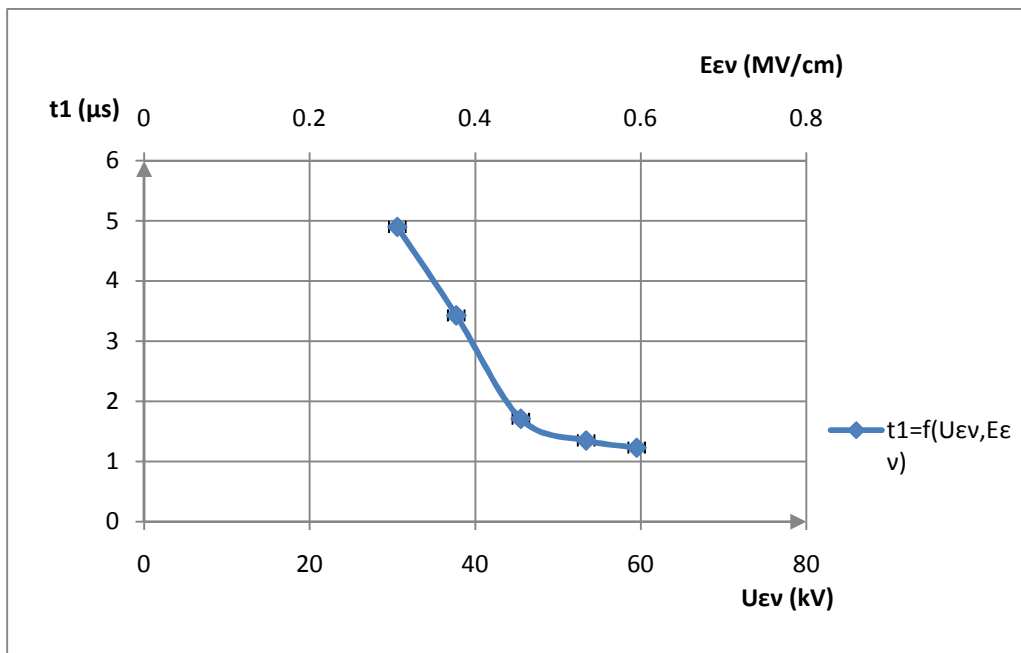
$t_1(\mu s)$	$t_2(\mu s)$	$q_1(\mu C)$	$q_2(\mu C)$	$u_1(V)$	$u_2(V)$
0,08	1,42	0,03	0,14	0,142857	0,00066667
0,06	1,64	0,02	0,08	0,095238	0,00038095



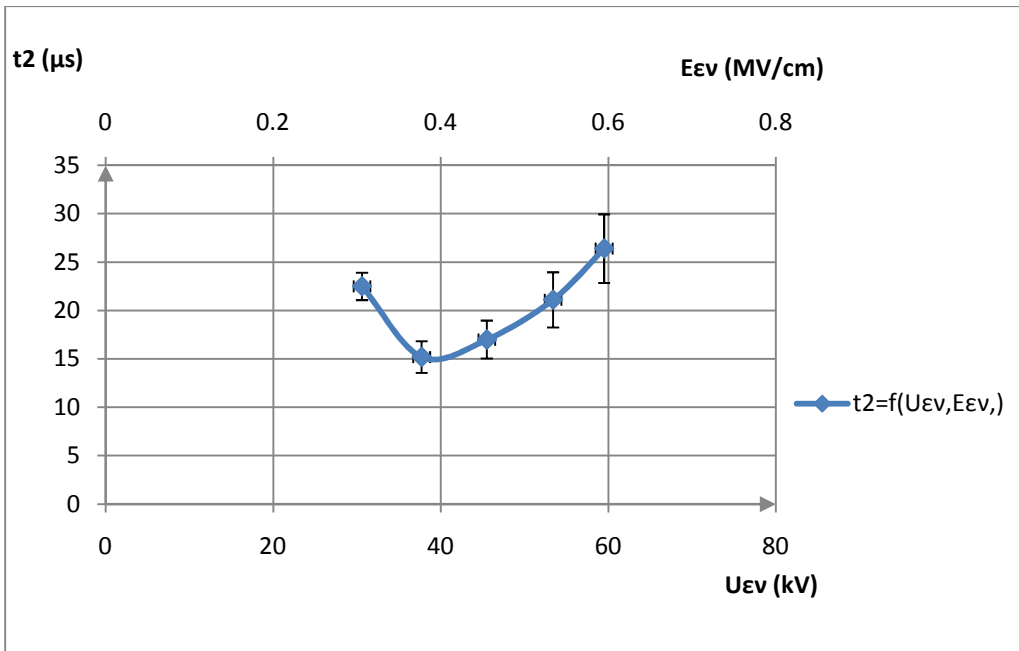
0,05	1,96	0,01	0,04	0,047619	0,00019048
0,02	2,85	0,01	0,02	0,01	0,00002
0,01	3,54	0,08	0	0,08	0

$i_1(A)$	$i_2(A)$	$\Delta t (\mu s)$	$\Delta u(V)$	$\Delta i(A)$	$\Delta W_e(eV)$
0,006389	0,008823	1,65	1,422252	0,010893145	0,825
0,0061369	0,035178	0,84	1,641097	0,035709101	0,42
0,0067029	0,035345	0,54	1,960638	0,03597481	0,27
0,0076269	0,040302	0,24	2,85007	0,041017537	0,12
0,0651067	0,068569	0,44	3,540014	0,094554883	0,22

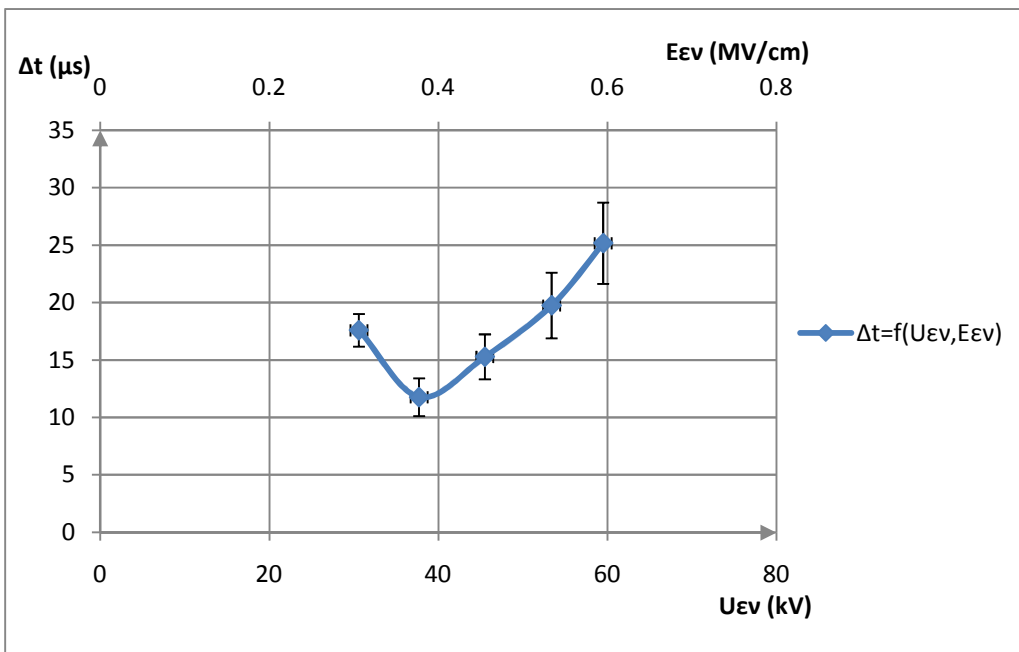
**Πίνακας 2.1-3 :Τυπικές αποκλίσεις ανά επίπεδο τάσης  $d = 1mm +$ .**



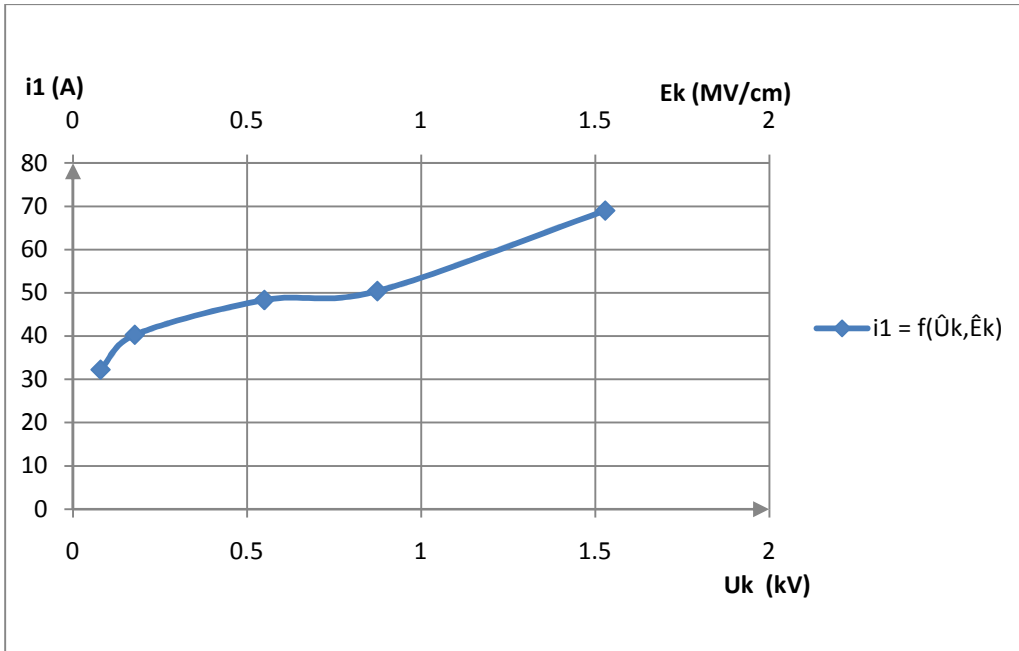
**Σχήμα 2.1-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



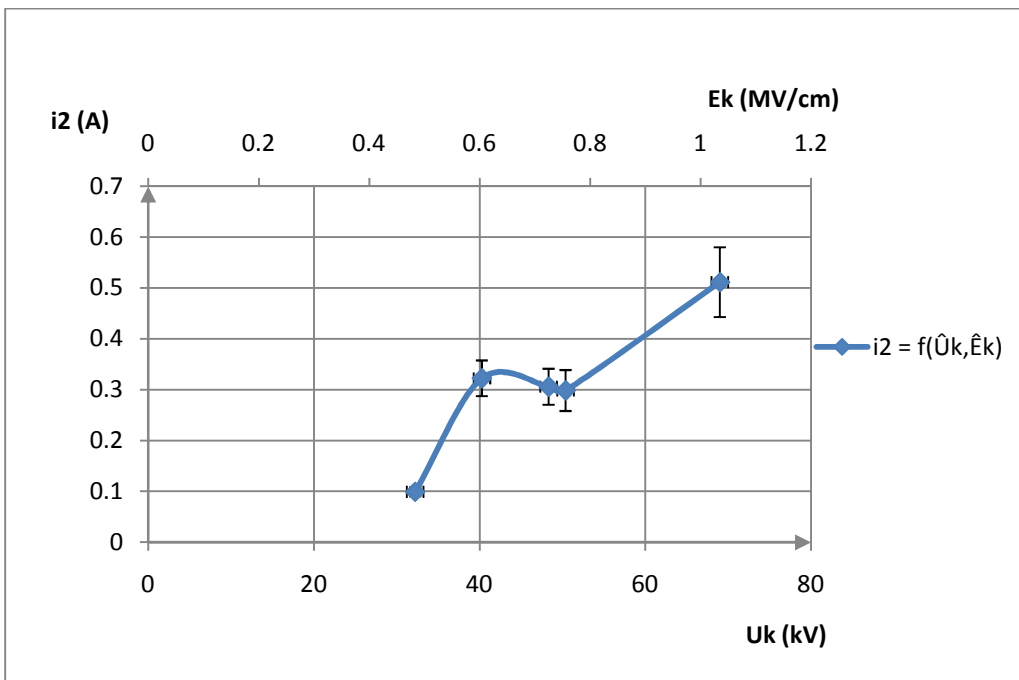
**Σχήμα 2.1-2 :** Χααρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



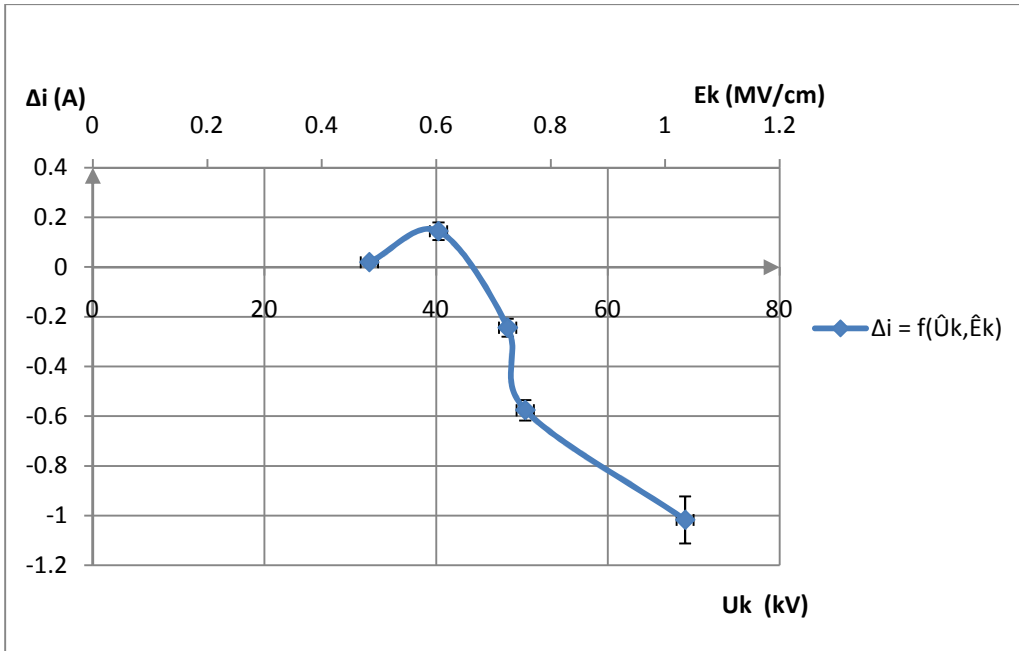
**Σχήμα 2.1-3 :** Χααρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



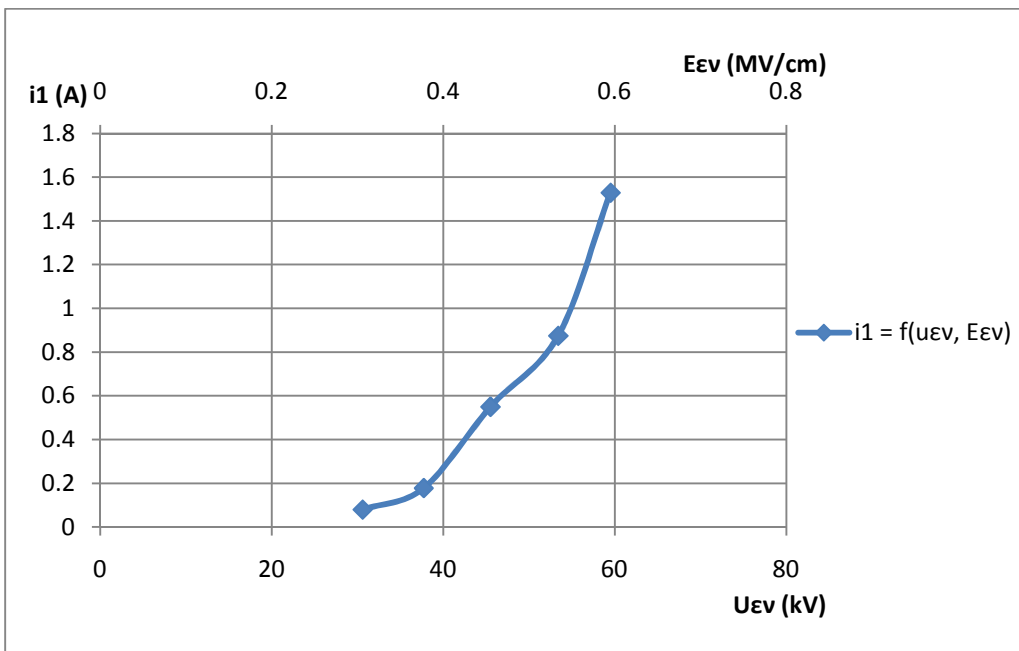
**Σχήμα 2.1-4 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



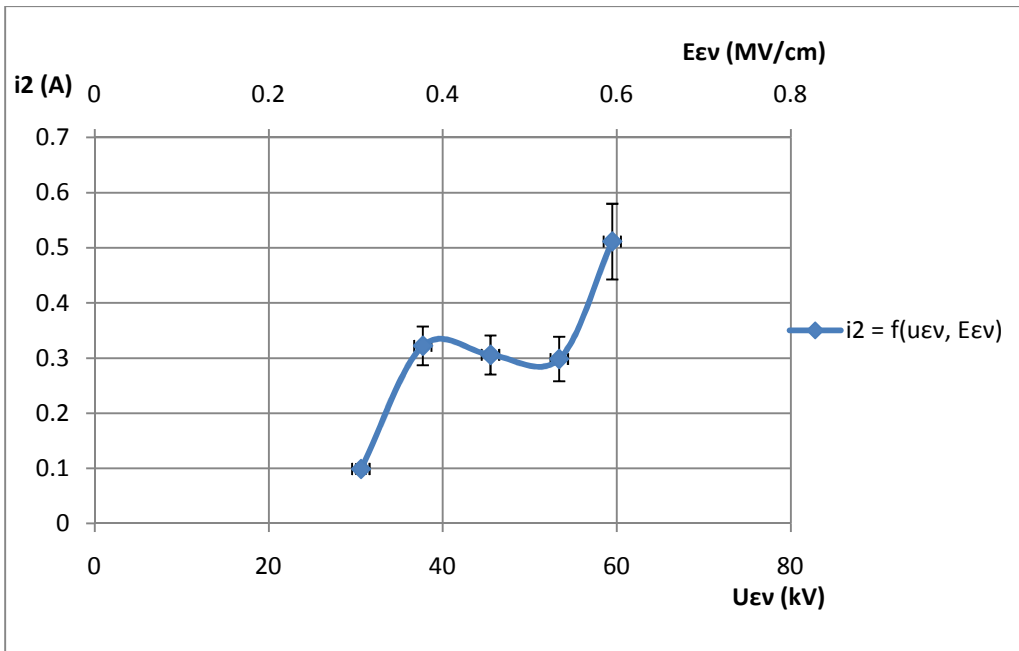
**Σχήμα 2.1-5:** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



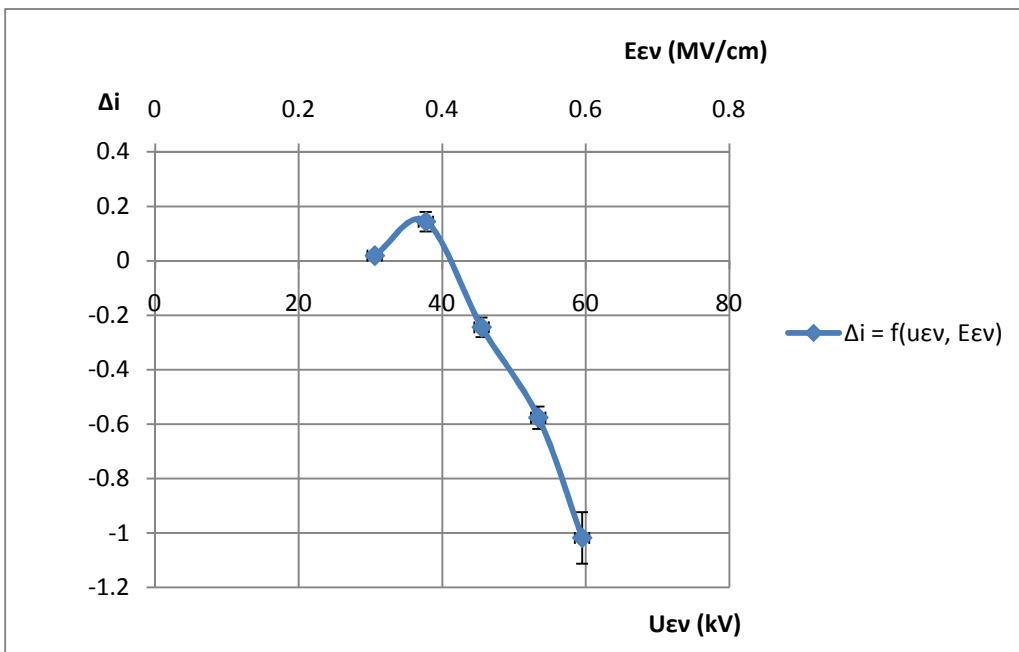
**Σχήμα 2.1-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



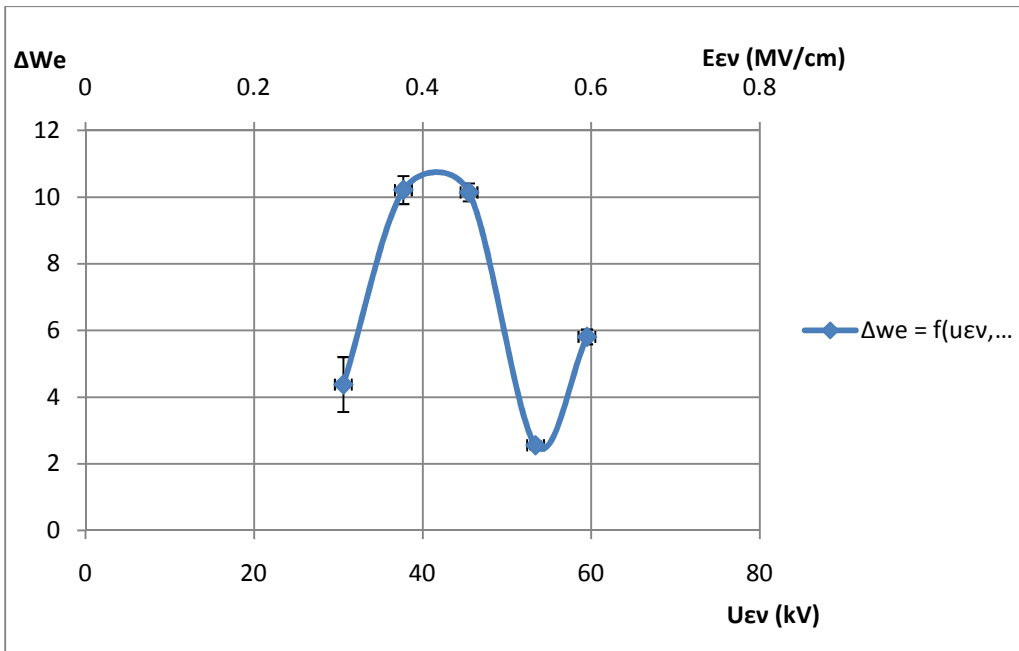
**Σχήμα 2.1-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



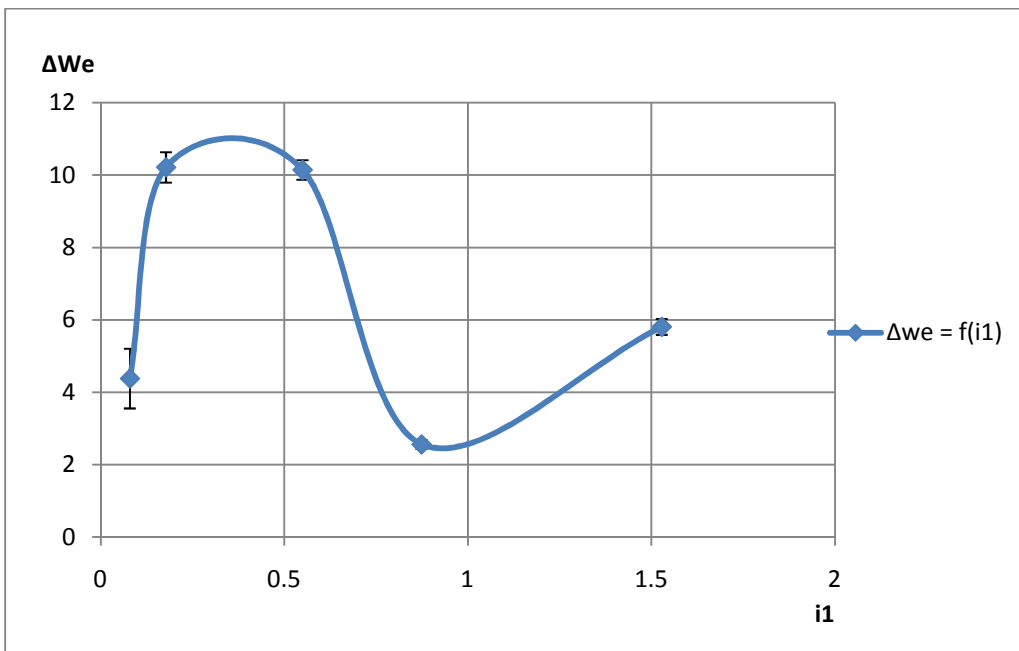
**Σχήμα 2.1-8 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



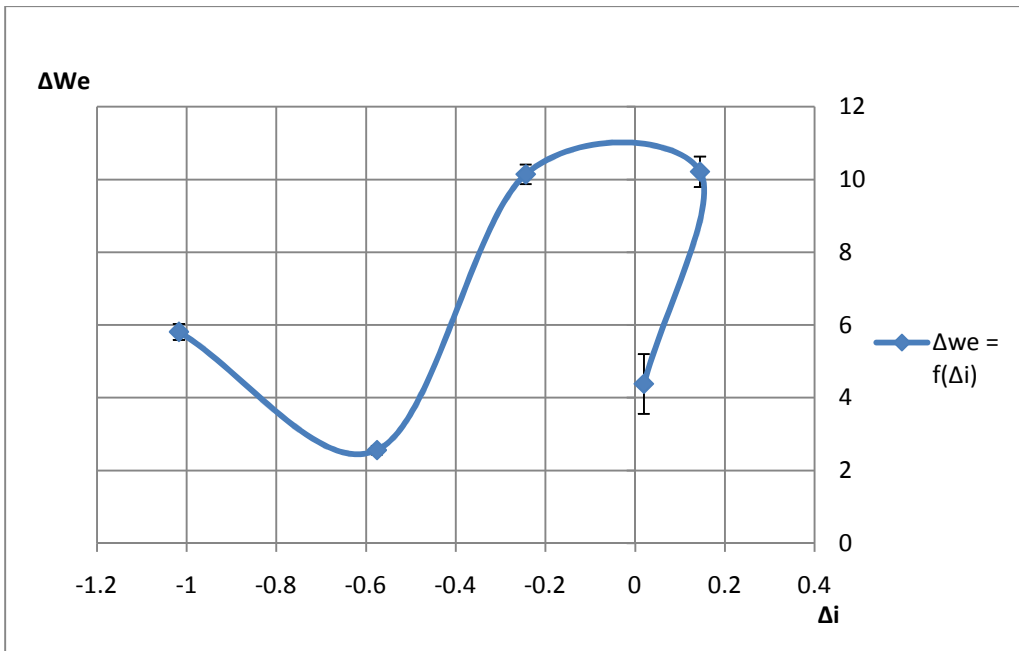
**Σχήμα 2.1-9 :** Χααρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



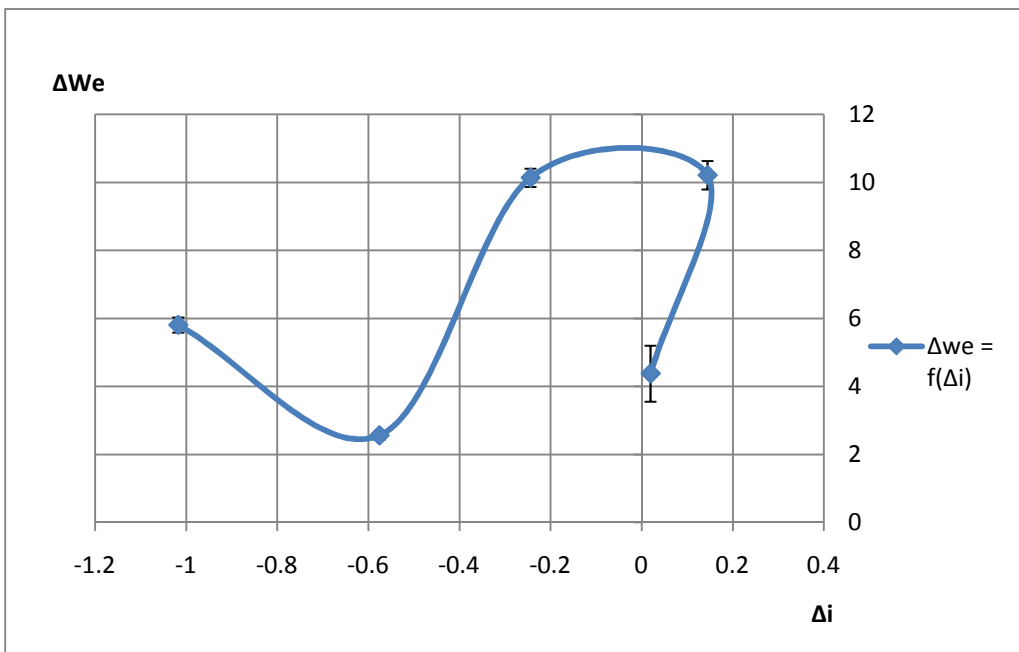
**Σχήμα 2.1-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_κ$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_κ$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 2.1-11 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 2.1-12 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 2.1-13 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

**2.2-1. ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ – 1,2/100μs  
ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d = 1mm$ .**

$\hat{U}_κ$ (kV)	$\hat{E}_κ$ (kV)	$\hat{E}_κ$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$U_{εν}$ (kV)	$E_{εν}$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$t_1$ (μs)	$t_2$ (μs)	$\Delta t$ (μs)	$C_m$ (nF)
32,22	480,0038	0,480004	31,11	0,339414	4,39	14,22	9,83	210
40,27	599,9303	0,599993	38,84	0,424215	3,04	34,5	31,46	210
48,33	720,0057	0,720006	45,48	0,509121	2,61	22,5	19,89	210
56,38	839,9322	0,839932	51,25	0,593922	1,88	27	25,12	1000
64,44	960,0076	0,960008	62,76	0,678828	1,6	34,88	33,28	1000
72,5	1080,083	1,080083	70,45	0,763734	1,24	42,5	41,26	1000

**Πίνακας 2.2-1: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων στο στερεό μονωτικό Pertinax πάχους 1 mm. εντός μονωτικού ελαίου διάταξης ηλεκτροδίων <<ακίδα ακτίνας καμπυλότητας  $R = 0,9mm$ .-πλάκα>> υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.**

$\hat{U}_κ$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης.

$\hat{E}_κ$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_κ$ .

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta t$  :  $t_1 - t_2$ .

$U_{εν}$  : ενεργός τιμή της κρουστικής τάσης.

$E_{εν}$  : ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$q_1$ (μC)	$q_2$ (μC)	$u_1$ (V)	$u_2$ (V)	$i_1$ (A)	$i_2$ (A)	$\Delta i$ (A)	$\Delta u$ (V)	$\Delta We$ (eV)
0,19	1,8	0,904762	8,571429	0,04328	0,126582	0,083302	7,666667	3,833333
1,3	5,81	6,190476	27,66667	0,427632	0,168406	-0,25923	21,47619	10,7381
1,68	10,66	8	50,7619	0,643678	0,473778	-0,1699	42,7619	21,38095
2,12	12,75	2,12	12,75	1,12766	0,472222	-0,65544	10,63	5,315



3,13	19,87	3,13	19,87	1,95625	0,569667	-1,38658	16,74	8,37
3,75	42,08	3,75	42,08	3,024194	0,990118	-2,03408	38,33	19,165

**Πίνακας 2.2-2: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων στο στερεό μονωτικό Pertinax πάχους 1 mm. εντός μονωτικού ελαίου διάταξης ηλεκτροδίων <<ακίδα ακτίνας καμπυλότητας  $R = 0,9mm$ .-πλάκα>> υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .**

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$u_1$  : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_2$  : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta u$  :  $u_2 - u_1$ .

$\Delta i$  :  $i_2 - i_1$ .

$\Delta W_e$ : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

## 2.2-2. ΑΡΝΗΤΙΚΗ – 1, 2/100 $\mu s$ ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ $d = 1mm$ - ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΜΕΓΕΘΩΝ.

$t_1$ ( $\mu s$ )	$t_2$ ( $\mu s$ )	$q_1$ ( $\mu C$ )	$q_2$ ( $\mu C$ )	$u_1$ (V)	$u_2$ (V)
0,07	0,52	0,05	0,07	0,000238	0,000333
0,83	0,73	0,06	0,5	0,000286	0,002381
2,61	1,77	0,13	0,27	0,000619	0,001286
0,05	1,74	0,12	0,64	0,00012	0,00064
,01	1,4	0,4	1,21	0,0004	0,00121

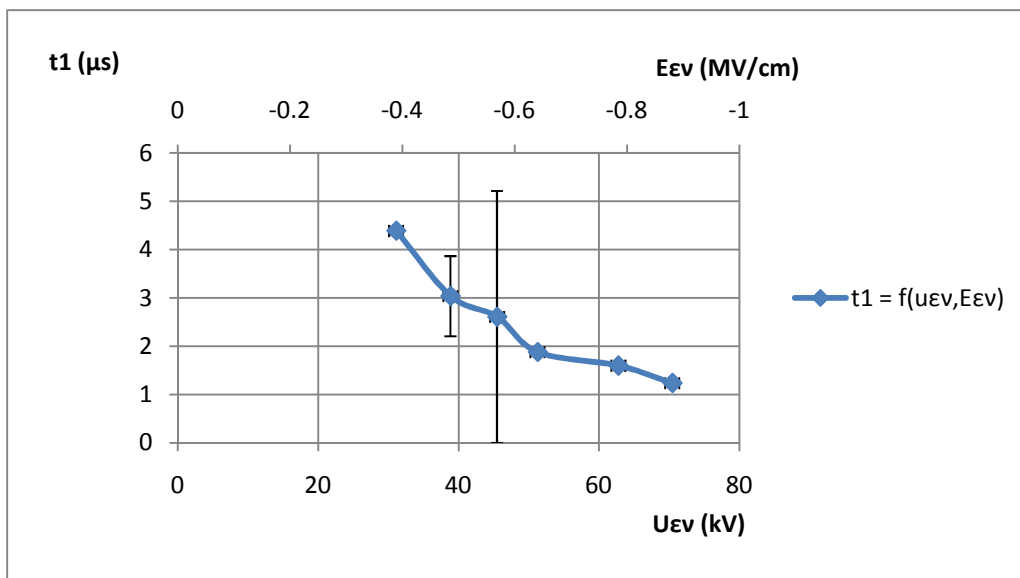
  

$i_1$ (A)	$i_2$ (A)	$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$\Delta u$ (V)	$\Delta i$ (A)	$\Delta W_e$ (eV)
-----------	-----------	------------------------	----------------	----------------	-------------------

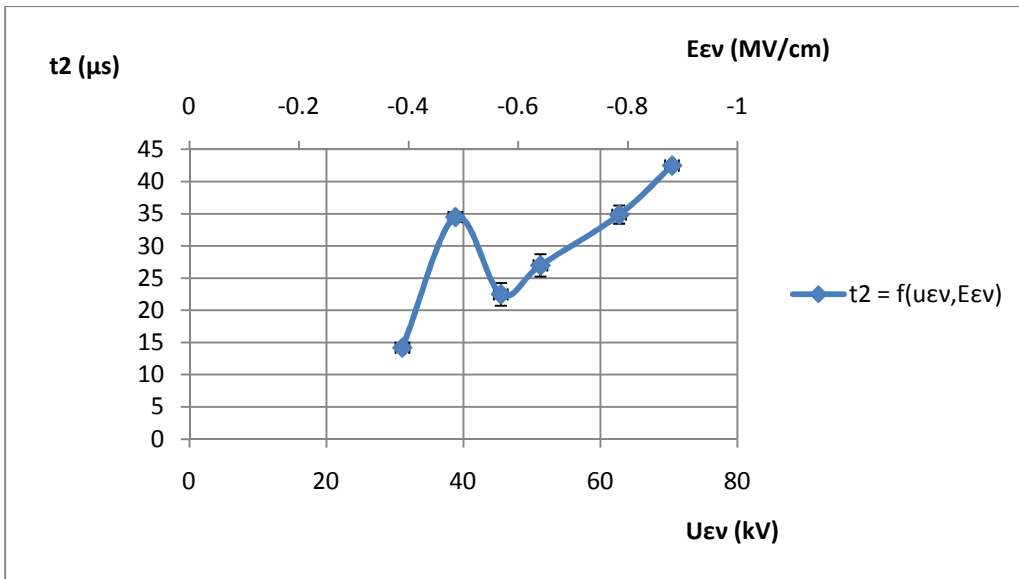
0,01141	0,006757	0,013261	0,52469	0,00041	0,000205
0,118411	0,014924	0,119348	1,105351	0,002398	0,001199
0,645602	0,039155	0,646789	3,153569	0,001427	0,000713
0,070524	0,038574	0,080385	1,740718	0,000651	0,000326
0,250299	0,041548	0,253724	1,400036	0,001274	0,000637

**Πίνακας 2.2-3 :Τυπικές αποκλίσεις ανά επίπεδο τάσης  $d = 1mm$  -.**

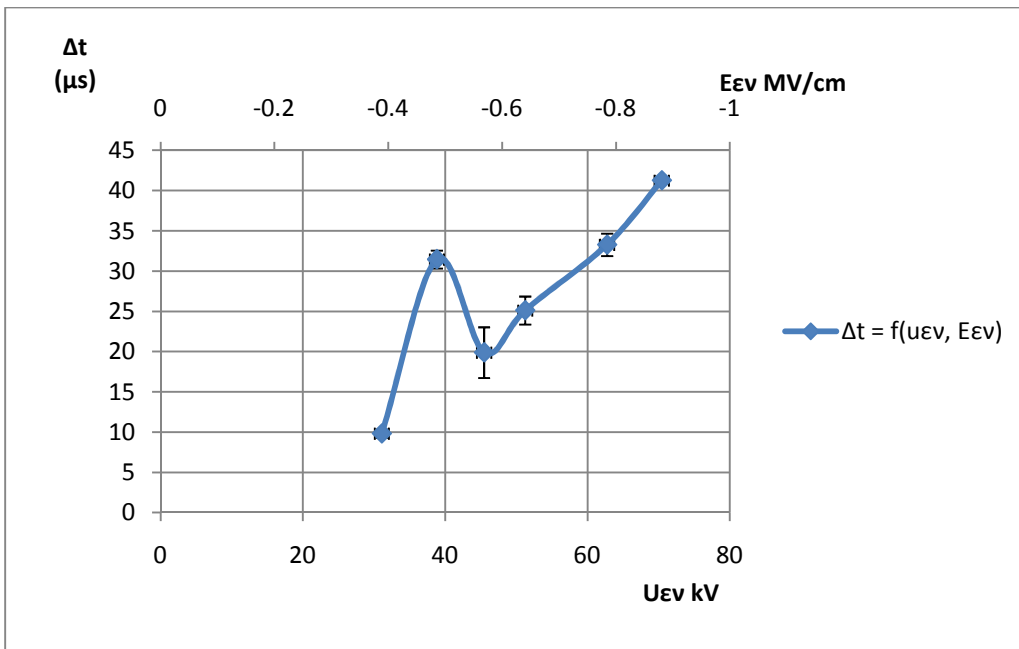
Χαρακτηριστικές για  $d = 1mm$  υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$  συμπεριλαμβανομένων των τυπικών αποκλίσεων των μετρήσεων.



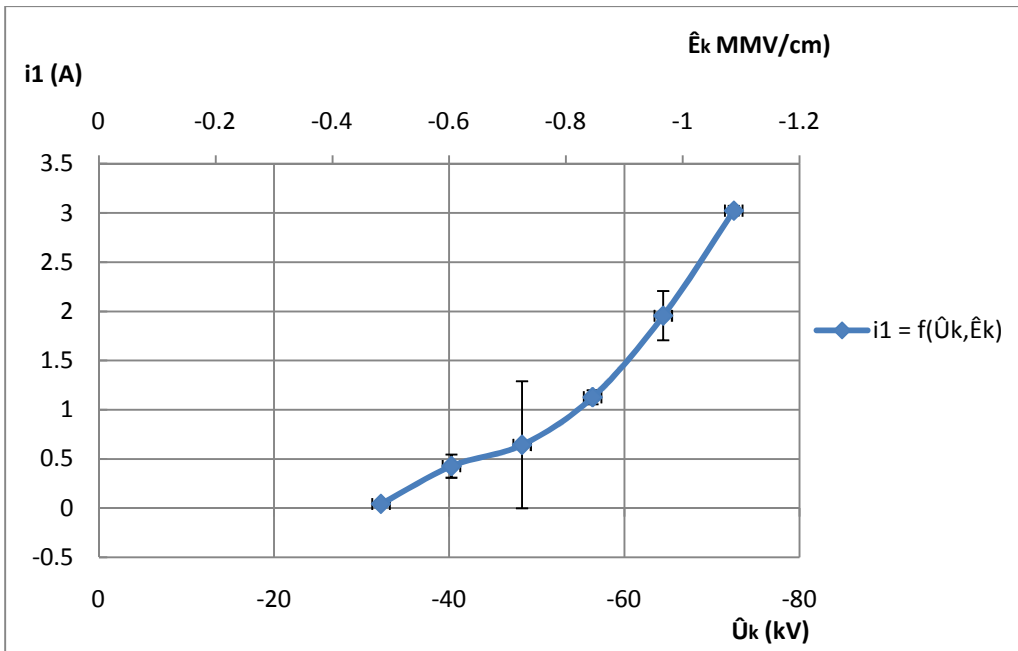
**Σχήμα 2.2-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .



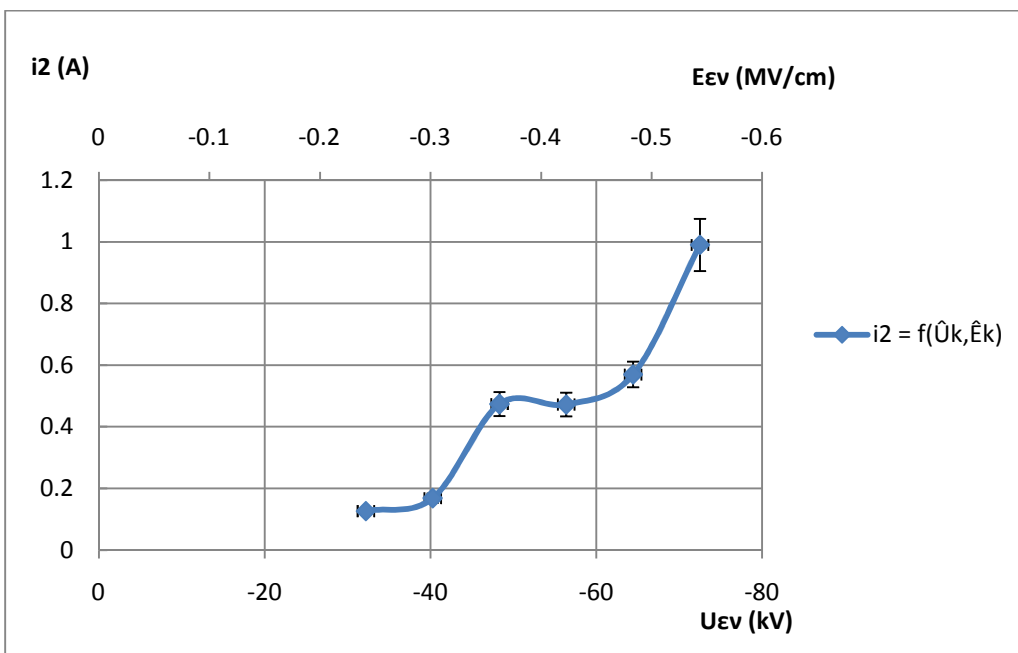
**Σχήμα 2.2-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu$ s.



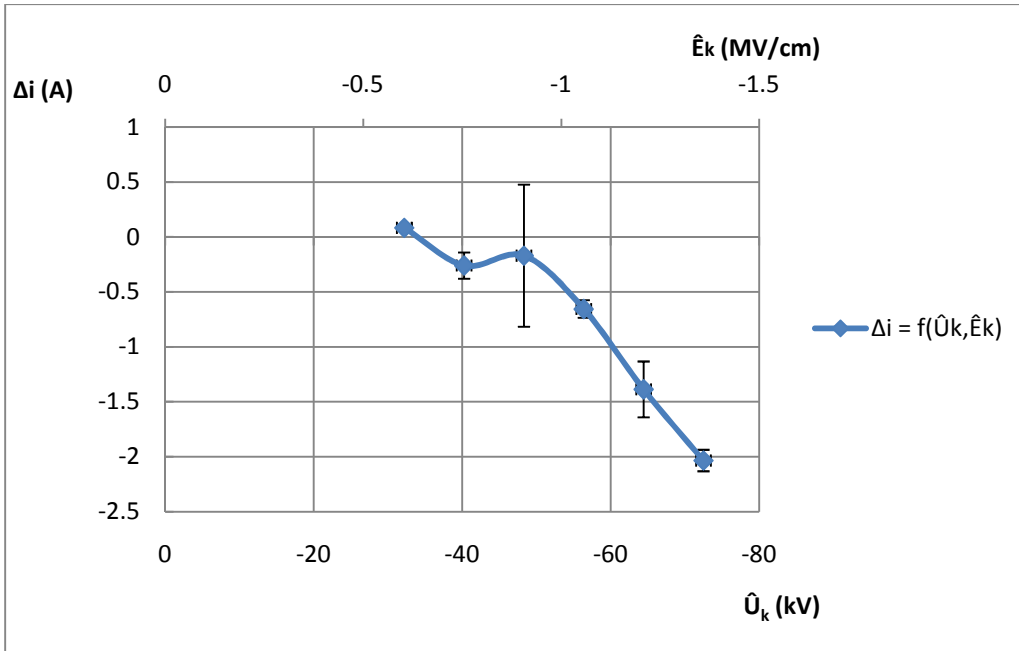
**Σχήμα 2.2-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu$ s.



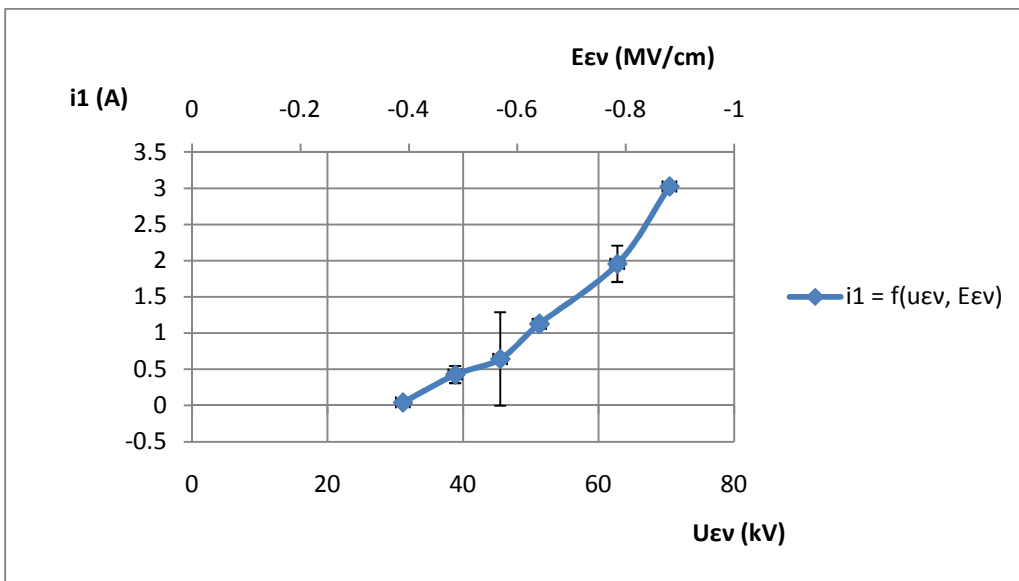
**Σχήμα 2.2-4 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



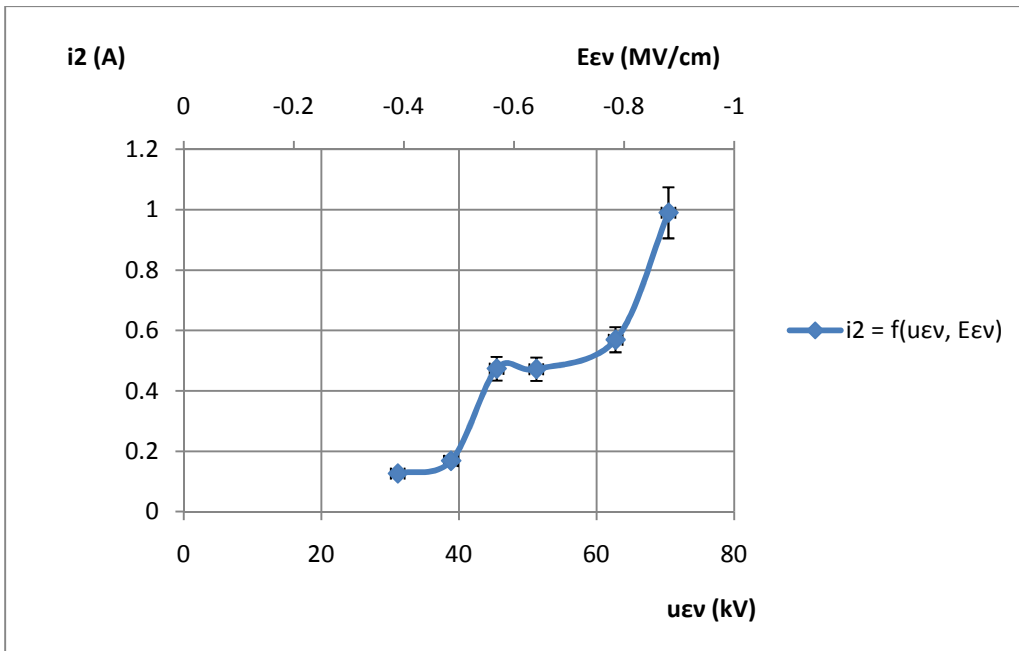
**Σχήμα 2.2-5:** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



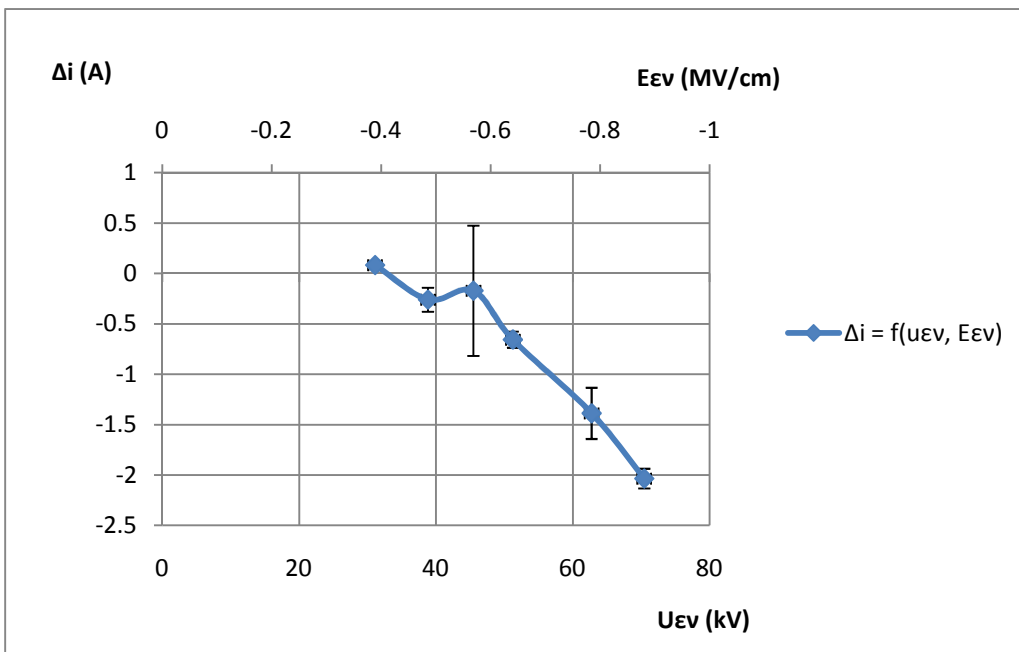
**Σχήμα 2.2-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



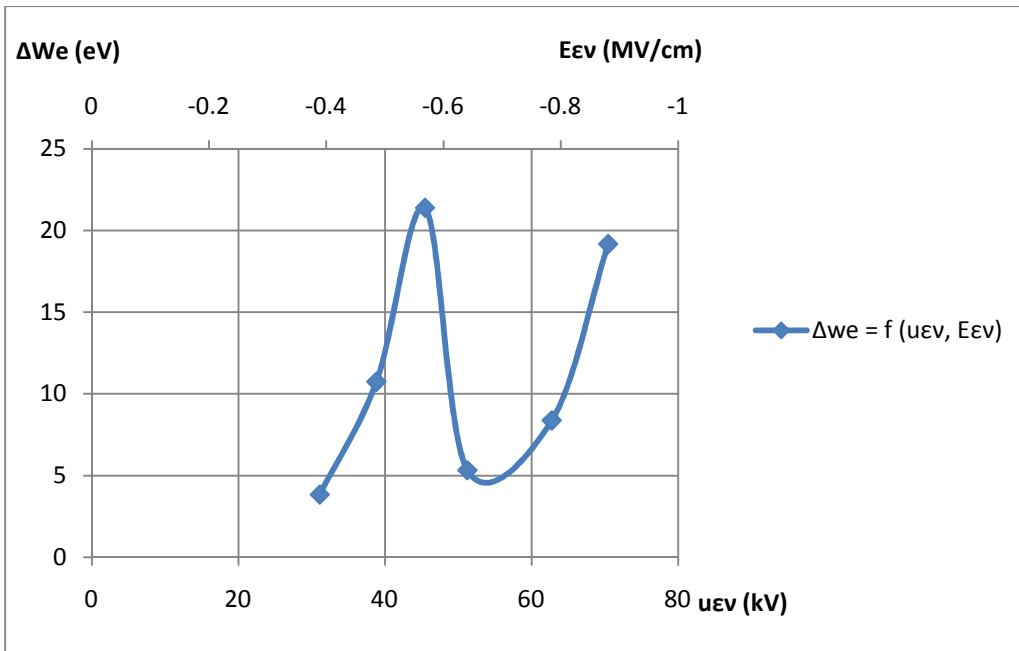
**Σχήμα 2.2-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



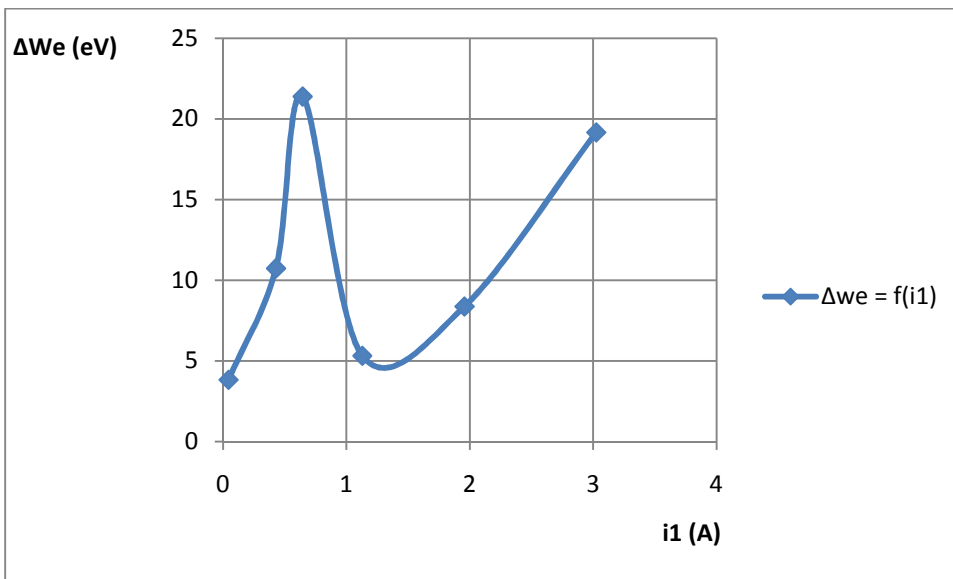
**Σχήμα 2.2-8 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



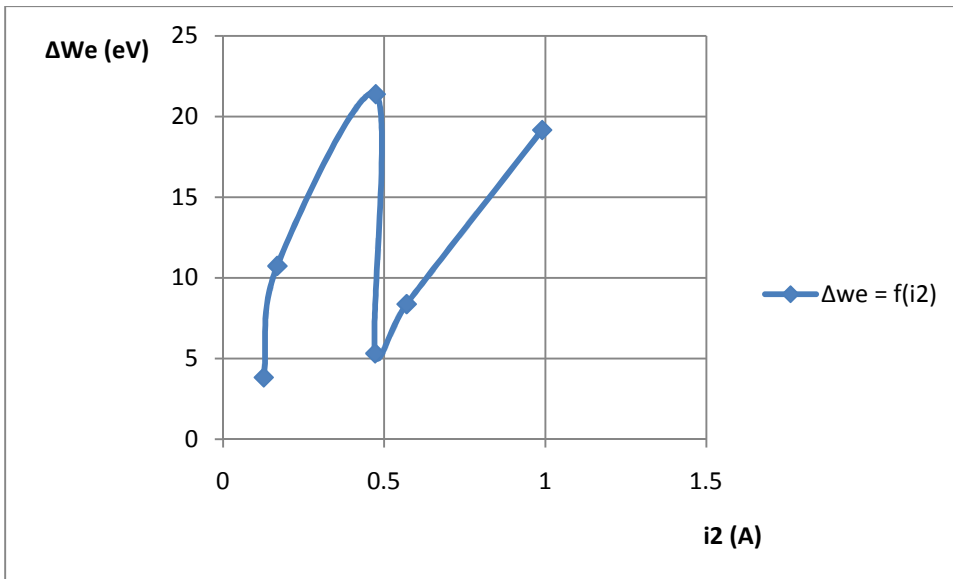
**Σχήμα 2.2-9 :** Χααρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



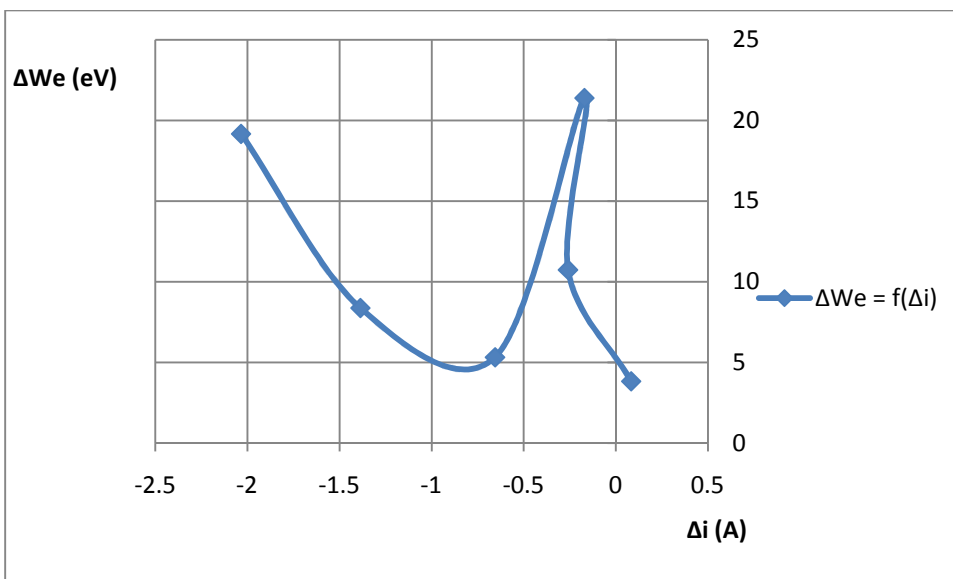
**Σχήμα 2.2-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



**Σχήμα 2.2-11 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



**Σχήμα 2.2-12 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



**Σχήμα 2.2-13 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



**2.3-1 ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ + 1, 2/100 $\mu$ s ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d = 2mm$ .**

$\hat{U}_k$ (kV)	$\hat{E}_k$ (kV)	$\hat{E}_k$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$U_{\varepsilon v}$ (kV)	$E_{\varepsilon v}$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$t_1$ ( $\mu s$ )	$t_2$ ( $\mu s$ )	$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$C_m$ (nF)
40,27	1081,241	1,081241	36,23	0,764553	4,23	7,29	3,06	210
44,3	1189,446	1,189446	43,05	0,841065	3,11	8,17	5,06	210
48,33	1297,65	1,29765	46,35	0,917577	2,5	8,97	6,47	210
56,38	1513,791	1,513791	53,68	1,070412	2,2	13,05	10,85	1000
64,44	1730,2	1,7302	58,3	1,223436	1,63	13,6	11,97	1000
72,5	1946,61	1,94661	68,25	1,376461	1,25	13,1	11,85	1000

**Πίνακας 2.3-1: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων στο στερεό μονωτικό Pertinax πάχους 2 mm. εντός μονωτικού ελαίου διάταξης ηλεκτροδίων <<ακίδα ακτίνας καμπυλότητας  $R = 0,9mm$ -πλάκα>> υπό κρουστική τάση +1,2/100 $\mu$ s.**

$\hat{U}_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης.

$\hat{E}_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_k$ .

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta t$  :  $t_1 - t_2$ .

$U_{\varepsilon v}$  : ενεργός τιμή της κρουστικής τάσης.

$E_{\varepsilon v}$  : ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_k$ .

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$q_1$ ( $\mu C$ )	$q_2$ ( $\mu C$ )	$u_1$ (V)	$u_2$ (V)	$i_1$ (A)	$i_2$ (A)	$\Delta i$ (A)	$\Delta u$ (V)	$\Delta We$ (eV)
0,12	0,21	0,000571	0,001	0,028369	0,028807	0,000438	0,000429	0,000214
0,13	0,3	0,000619	0,001429	0,041801	0,03672	-0,00508	0,00081	0,000405
0,13	0,41	0,000619	0,001952	0,052	0,045708	-0,00629	0,001333	0,000667
0,18	0,5	0,00018	0,0005	0,081818	0,038314	-0,0435	0,00032	0,00016

0,23	0,57	0,00023	0,00057	0,141104	0,041912	-0,09919	0,00034	0,00017
0,29	0,67	0,00029	0,00067	0,232	0,051145	-0,18085	0,00038	0,00019

**Πίνακας 2.3-2: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων στο στερεό μονωτικό Pertinax πάχους 2 mm. εντός μονωτικού ελαίου διάταξης ηλεκτροδίων <<ακίδα ακτίνας καμπυλότητας  $R = 0,9mm$ .-πλάκα>> υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.**

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$u_1$  : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_2$  : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta u$  :  $u_2 - u_1$ .

$\Delta i$  :  $i_2 - i_1$ .

$\Delta W_e$ : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών

### 2.3-2. ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ +1, 2/100μs ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ $d = 2mm$ - ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΜΕΓΕΘΩΝ.

$t_1$ (μs)	$t_2$ (μs)	$q_1$ (μC)	$q_2$ (μC)	$u_1$ (V)	$u_2$ (V)
0,05	0,44	0	0,01	0	4,76E-05
0,06	1,5	0	0,04	0	0,00019
0,02	1,44	0	0,03	0	0,000143
0,06	1,16	0,02	0,09	0,00002	0,00009
0,03	0,18	0,02	0,07	0,00002	0,00007

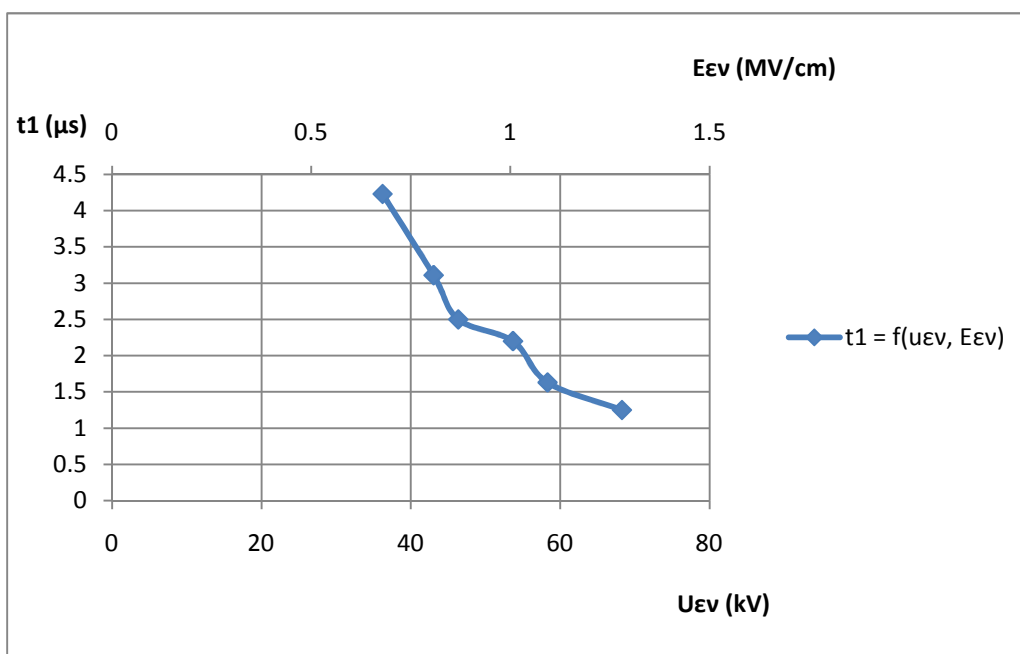
  

$i_1$ (A)	$i_2$ (A)	$\Delta t$ (μs)	$\Delta u$ (V)	$\Delta i$ (A)	$\Delta W_e$ (eV)
-----------	-----------	-----------------	----------------	----------------	-------------------

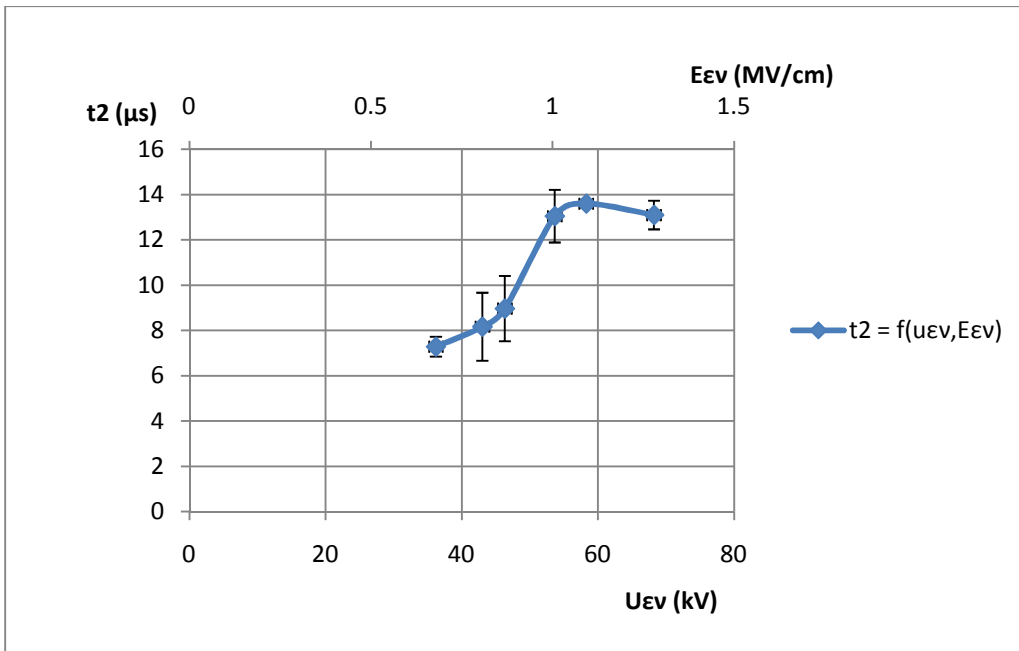
0,000335	0,002215	0,00224	0,442832	4,76E-05	2,38E-05
0,000806	0,008332	0,008371	1,5012	0,00019	9,52E-05
0,000416	0,008064	0,008075	1,440139	0,000143	7,14E-05
0,009361	0,007692	0,012115	1,161551	9,22E-05	4,61E-05
0,012542	0,005177	0,013568	0,182483	7,28E-05	3,64E-05

**Πίνακας 2.3-3 :**Τυπικές αποκλίσεις ανά επίπεδο τάσης  $d = 2mm +$ .

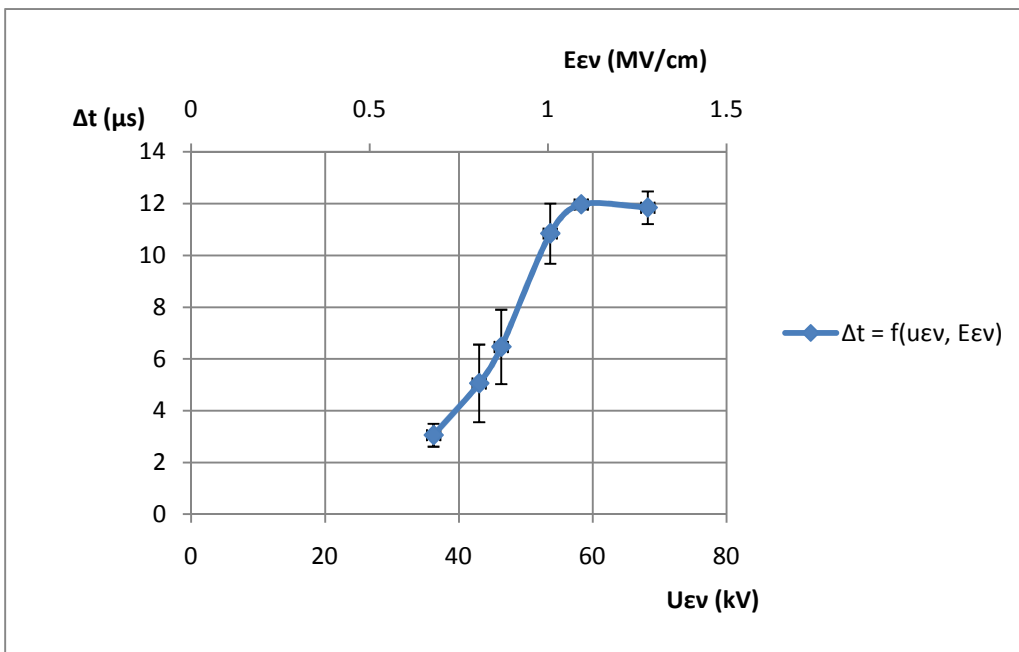
Χαρακτηριστικές για  $d = 2mm$  υπό κρουστική τάση  $+ 1,2/100\mu s$  συμπεριλαμβανομένων των τυπικών αποκλίσεων των μετρήσεων.



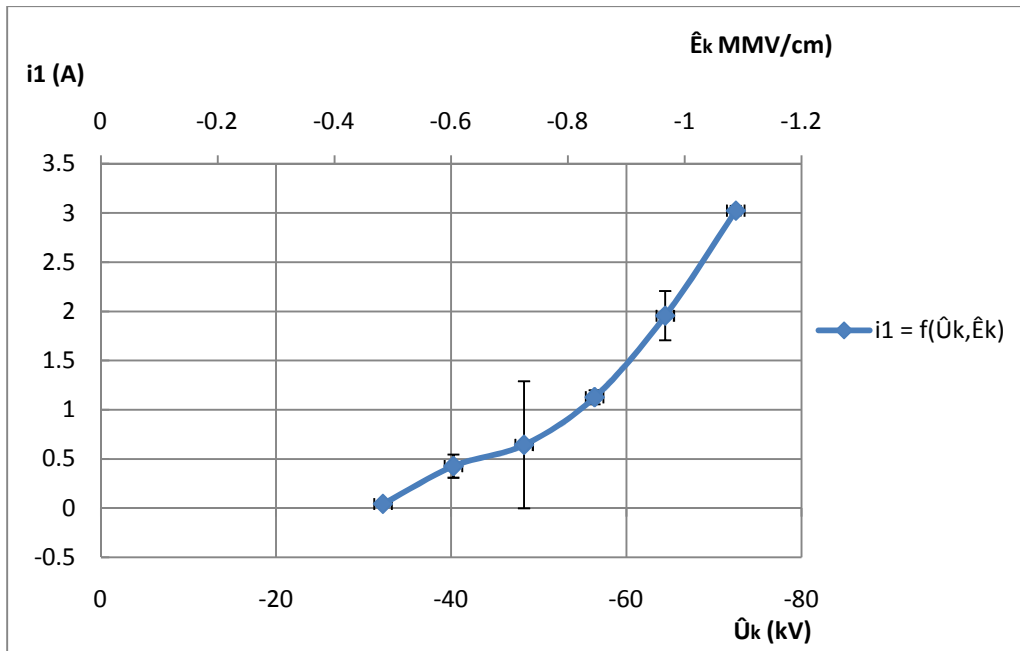
**Σχήμα 2.3-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .



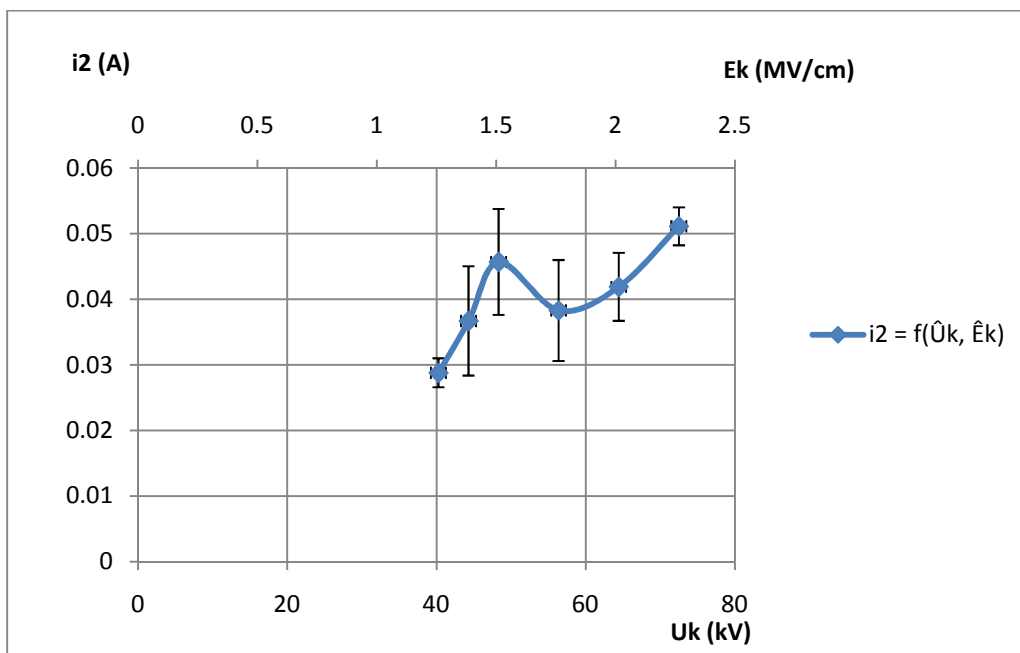
**Σχήμα 2.3-2 :** Χααρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu$ s.



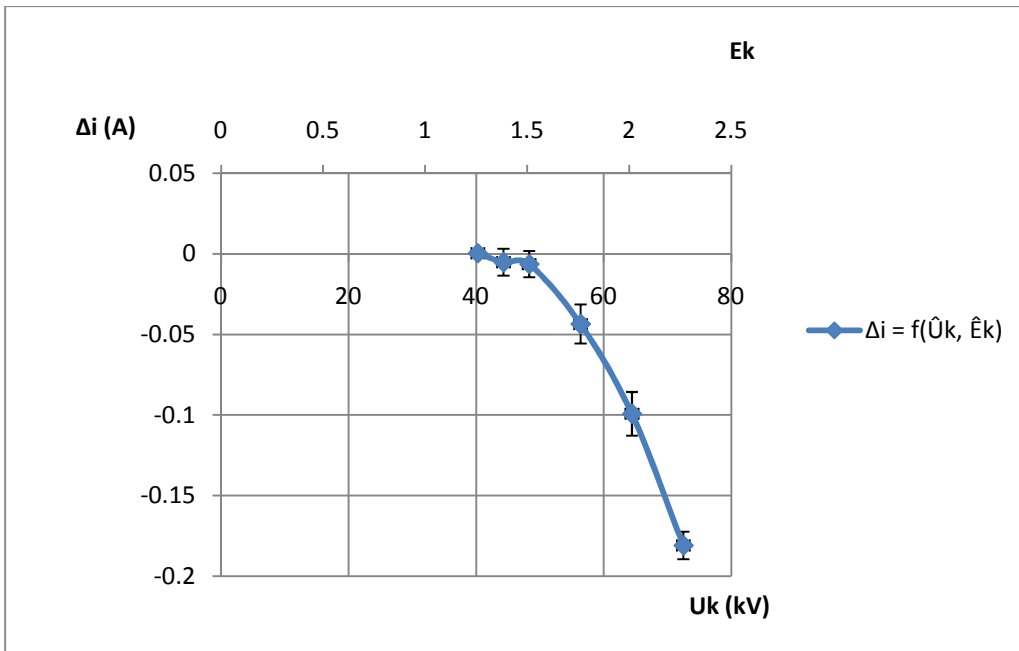
**Σχήμα 2.3-3 :** Χααρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu$ s.



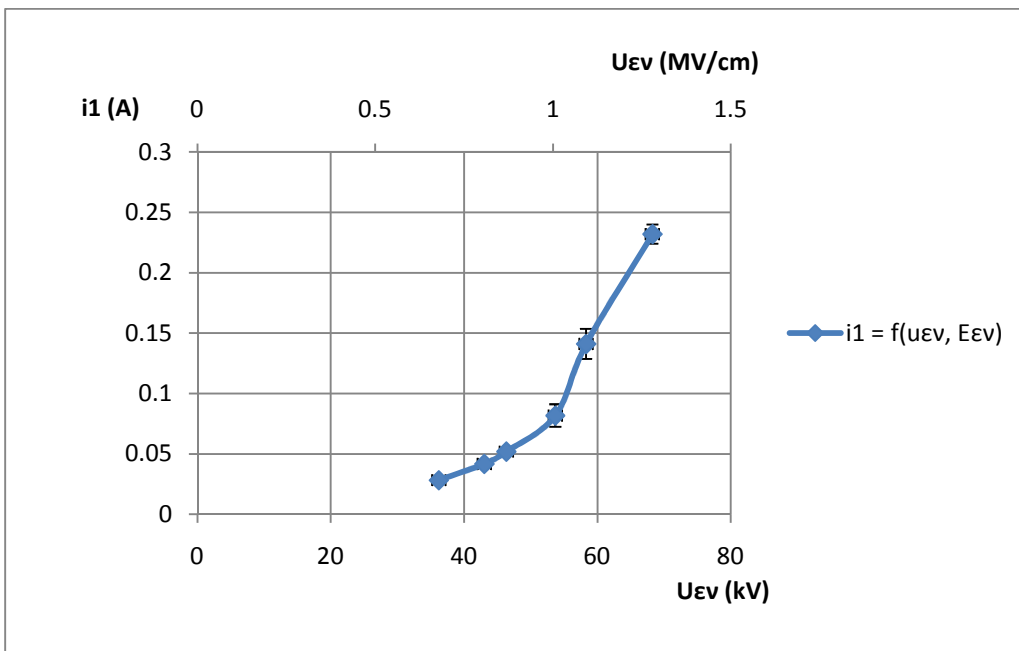
**Σχήμα 2.3-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



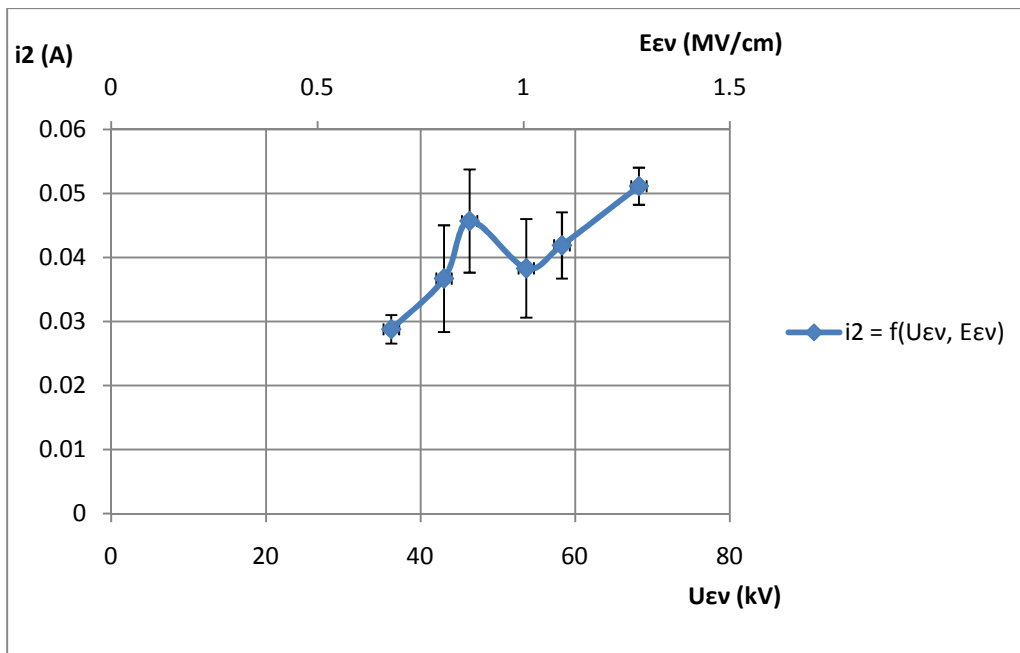
**Σχήμα 2.3-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



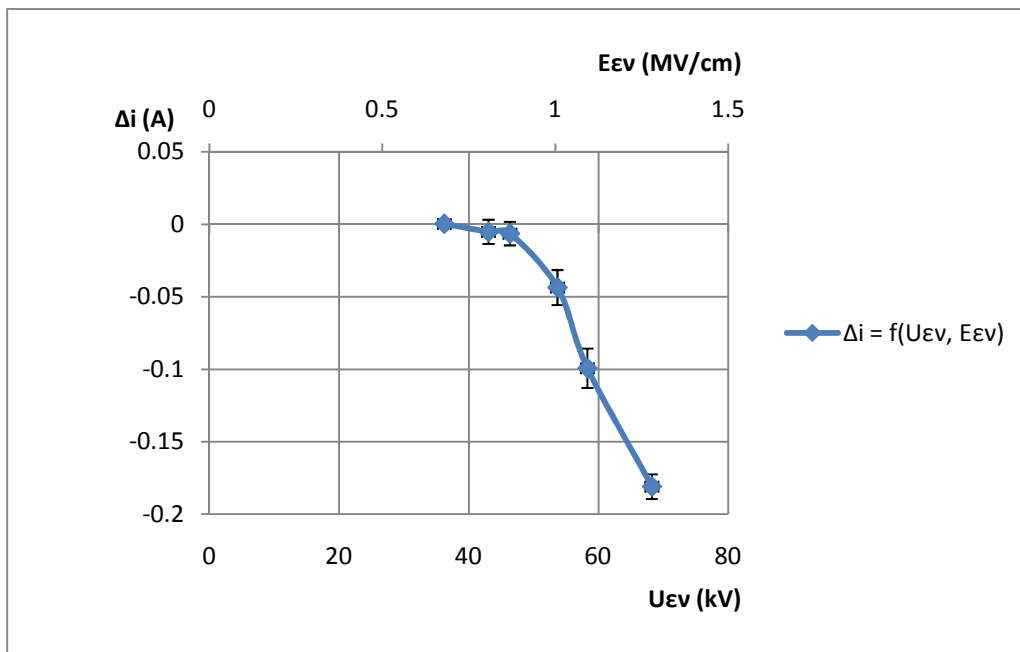
**Σχήμα 2.3-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



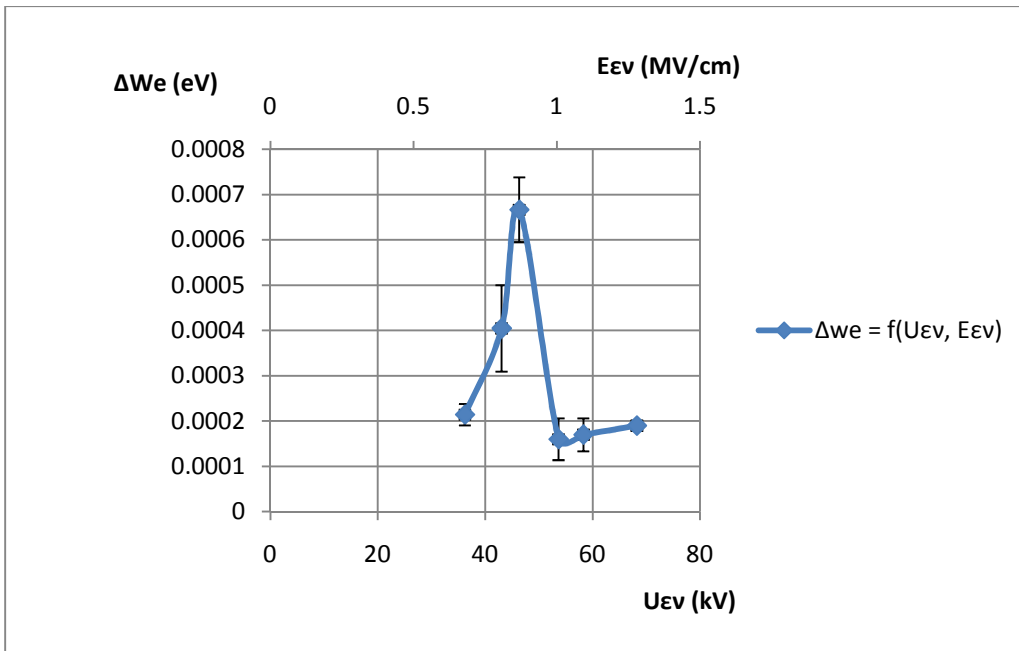
**Σχήμα 2.3-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



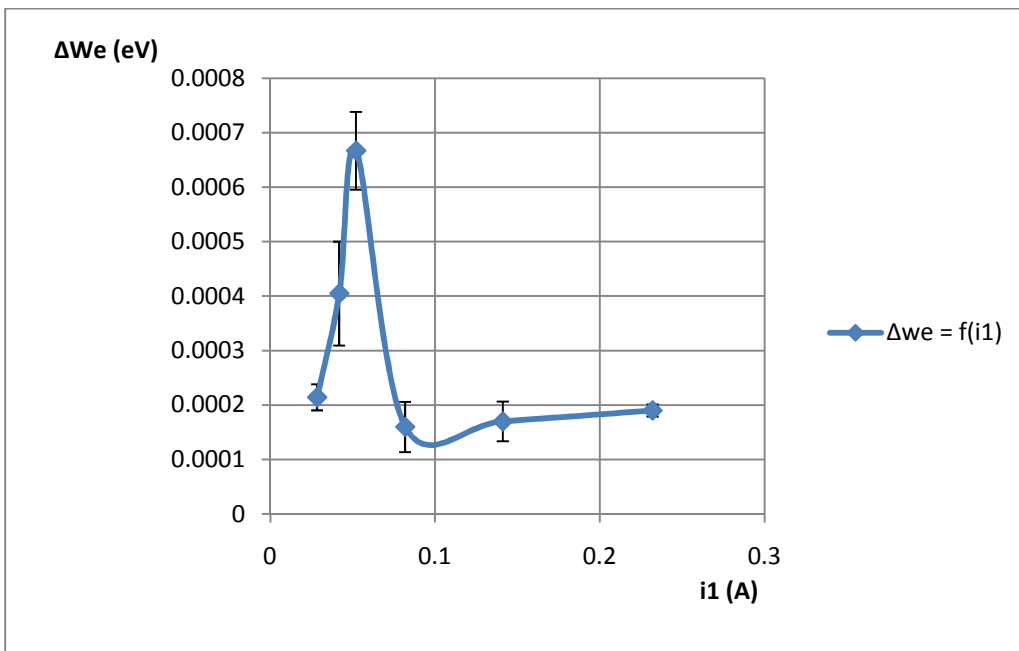
**Σχήμα 2.3-8 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 2.3-9 :** Χααρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

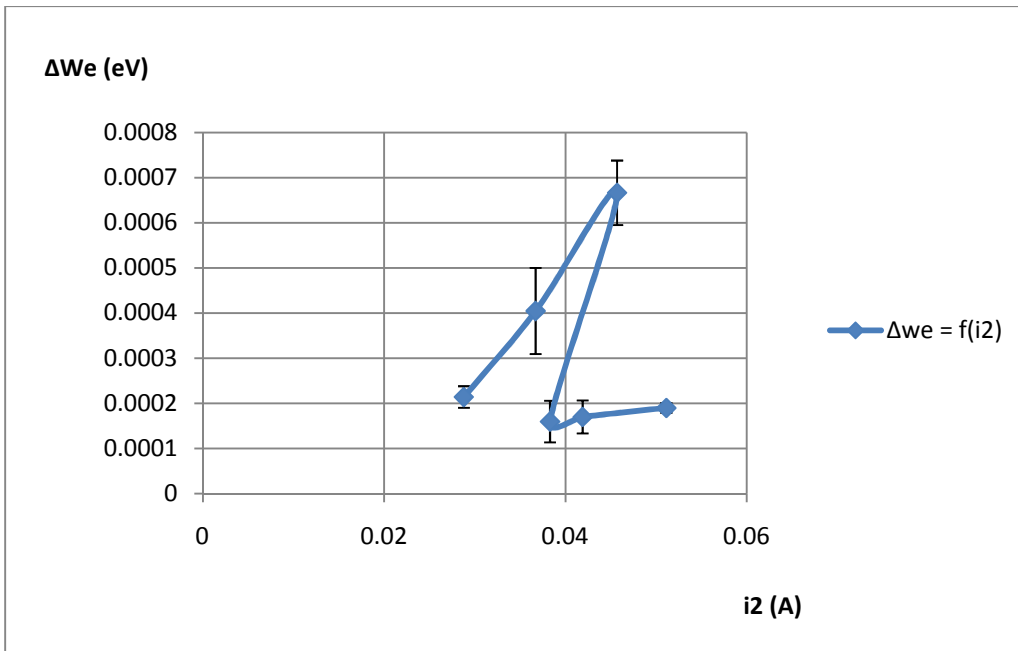


**Σχήμα 2.3-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_κ$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_κ$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 2.3-11 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.





**Σχήμα 2.3-12 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

#### 2.4-2. ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ –1,2/100μs ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ $d = 2mm$

**Πίνακας 2.4-1: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα.**

$\hat{U}_k$  : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης.

$\hat{E}_k$  : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_k$ .

$\hat{U}_k$ (kV)	$\hat{E}_k$ (kV)	$\hat{E}_k$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$U_{εν}$ (kV)	$E_{εν}$ ( $\frac{MV}{cm}$ )	$t_1$ ( $\mu s$ )	$t_2$ ( $\mu s$ )	$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$C_m$ (nF)
-32,22	-865,1	-0,8651	0	-0,61172	0,000001	0	-1E-06	0,1
-40,27	-1081,24	-1,08124	38,12	-0,76455	4,52	13,5	8,98	210
-48,33	-1297,65	-1,29765	44,31	-0,91758	3,23	20,38	17,15	210
-56,38	-1513,79	-1,51379	52,23	-1,07041	2,6	25,5	22,9	1000
-64,44	-1730,2	-1,7302	60,44	-1,22344	1,63	27,5	25,87	1000
-72,5	-1946,61	-1,94661	69,48	-1,37646	1,28	33,75	32,47	1000

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης.

$t_1$  : χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

$t_2$  : χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta t$  :  $t_1 - t_2$ .

$U_{εν}$  : ενεργός τιμή της κρουστικής τάσης.

$E_{εν}$  : ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που αντιστοιχεί στην  $\hat{U}_k$ .

$q_1$ ( $\mu C$ )	$q_2$ ( $\mu C$ )	$u_1$ (V)	$u_2$ (V)	$i_1$ (A)	$i_2$ (A)	$\Delta i$ (A)	$\Delta u$ (V)	$\Delta We$ (eV)
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-
0,97	2,13	0,004619	0,010143	0,214602	0,157778	-0,05682	0,005524	0,002762
1,26	4,75	0,006	0,022619	0,390093	0,233072	-0,15702	0,016619	0,00831
1,45	6,8	0,00145	0,0068	0,557692	0,266667	-0,29103	0,00535	0,002675
1,79	9,06	0,00179	0,00906	1,09816	0,329455	-0,7687	0,00727	0,003635
2,12	12,87	0,00212	0,01287	1,65625	0,381333	-1,27492	0,01075	0,005375

**Πίνακας 2.4-2: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα.**

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$u_1$  : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_2$  : στιγμιαία τιμή της  $u_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta u$  :  $u_2 - u_1$ .

$\Delta i$  :  $i_2 - i_1$ .

$\Delta W_e$ : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

#### 2.4-2. ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ $-1, 2/100\mu s$ ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ $d = 2mm$ - ΤΥΠΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

$t_1 (\mu s)$	$t_2 (\mu s)$	$q_1 (\mu C)$	$q_2 (\mu C)$	$u_1 (V)$	$u_2 (V)$
0,06	1,42	0,05	0,17	0,000238	0,00081
0,02	1,22	0,64	0,28	0,003048	0,001333
0,02	1,21	0,06	0,29	0,00006	0,00029
0,01	1,77	0,16	0,22	0,00016	0,00022
0	1,58	0,12	0,23	0,00012	0,00023

$i_1 (A)$	$i_2 (A)$	$\Delta t (\mu s)$	$\Delta u (V)$	$\Delta i (A)$	$\Delta W_e (eV)$
0,011423	0,020833	0,023759	1,421267	0,001354	0,000677
0,198157	0,019581	0,199122	1,220164	0,003061	0,001531
0,023472	0,017013	0,02899	1,210165	0,000228	0,000114
0,09839	0,022664	0,100967	1,770028	0,00028	0,00014
0,09375	0,019109	0,095678	1,58	0,00012	0,00006

**Πίνακας 2.4-3: Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων με βάση τα μεγέθη που ορίστηκαν στο σχήμα.**

$q_1$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$q_2$  : στιγμιαία τιμή του φορτίου στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$u_1$  : στιγμιαία τιμές της  $u_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

$u_2$  : στιγμιαία τιμές της  $u_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$i_1$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.

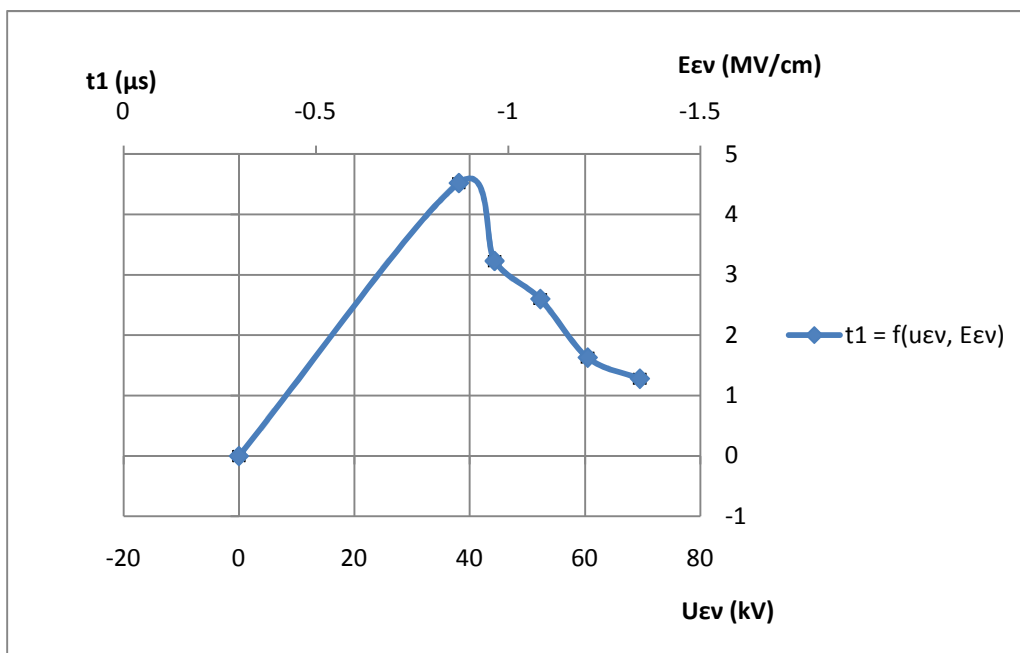
$i_2$  : στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο  $C_m$  κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων.

$\Delta u$  :  $u_2 - u_1$ .

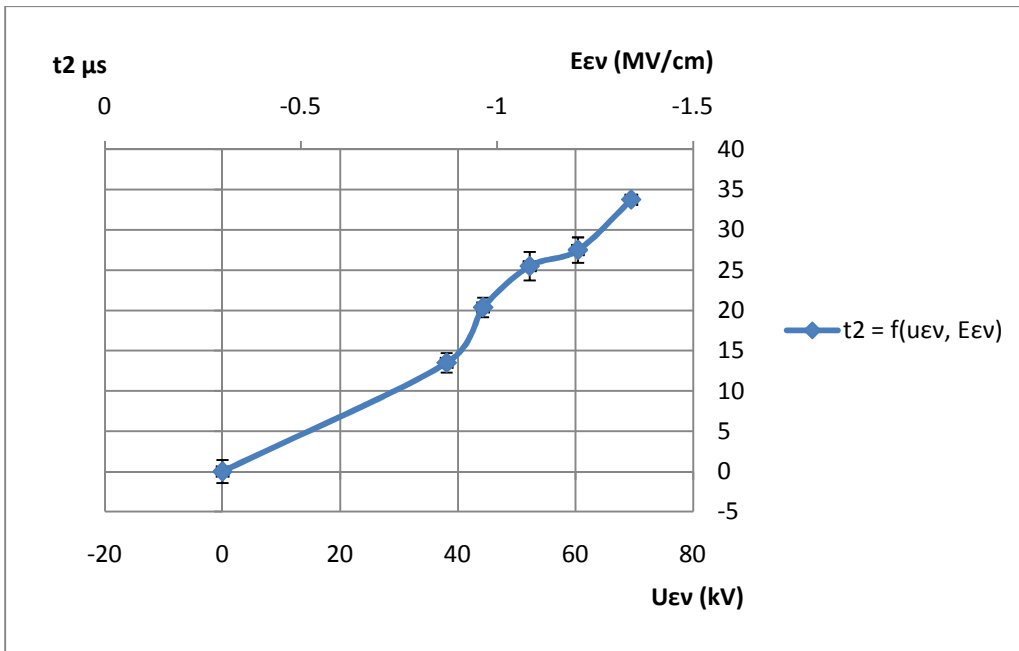
$\Delta i$  :  $i_2 - i_1$ .

$\Delta W_e$ : ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων

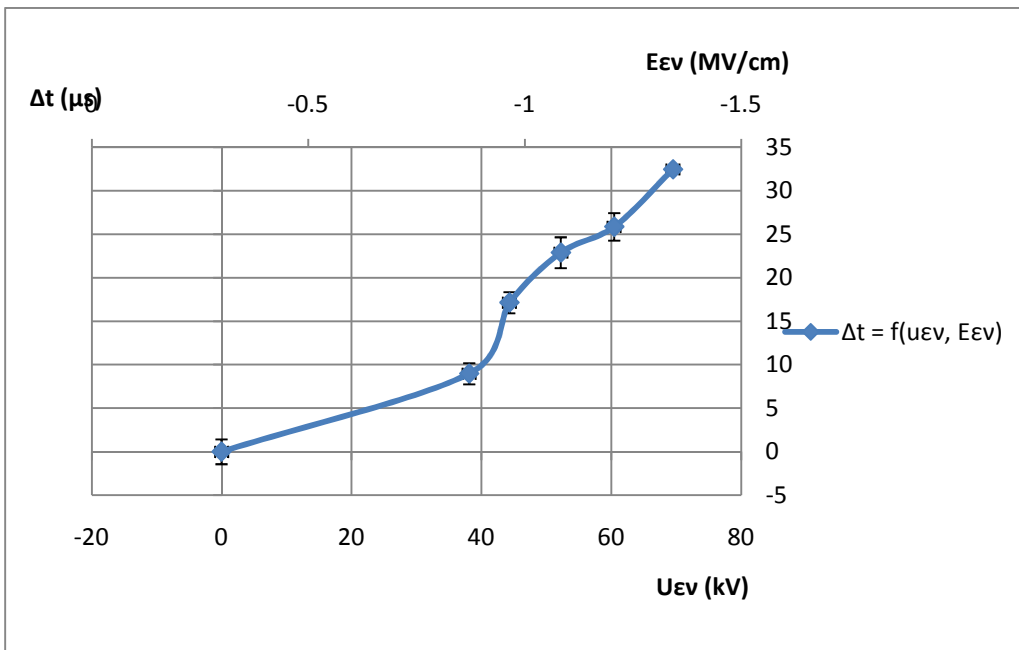
Χαρακτηριστικές για  $d = 2mm$  υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$  συμπεριλαμβανομένων των τυπικών αποκλίσεων των μετρήσεων.



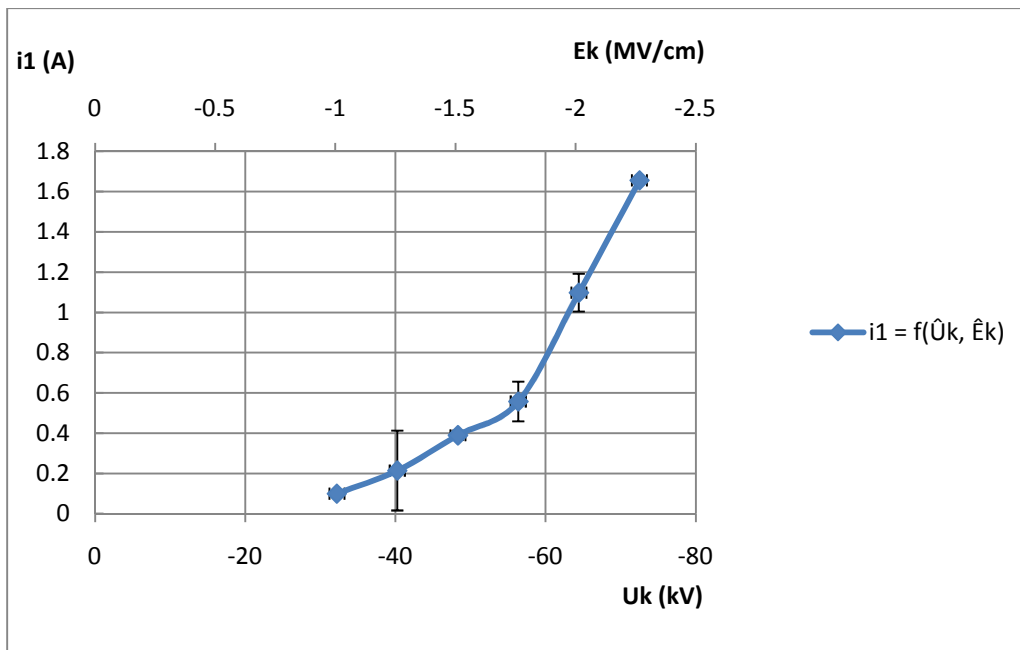
**Σχήμα 2.4-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .



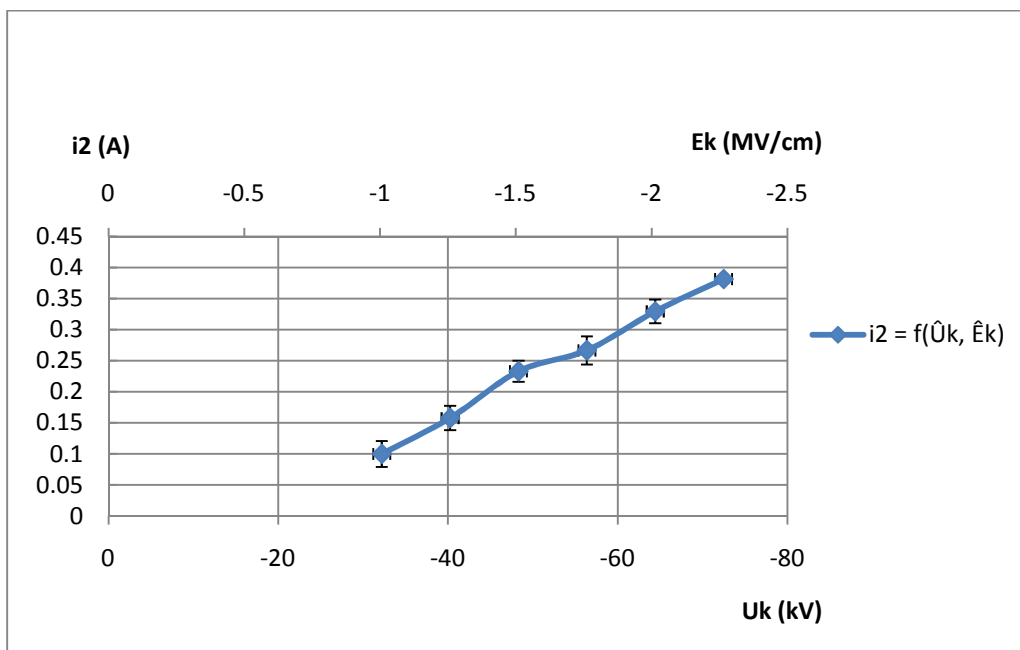
**Σχήμα 2.4-2 :** Χααρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



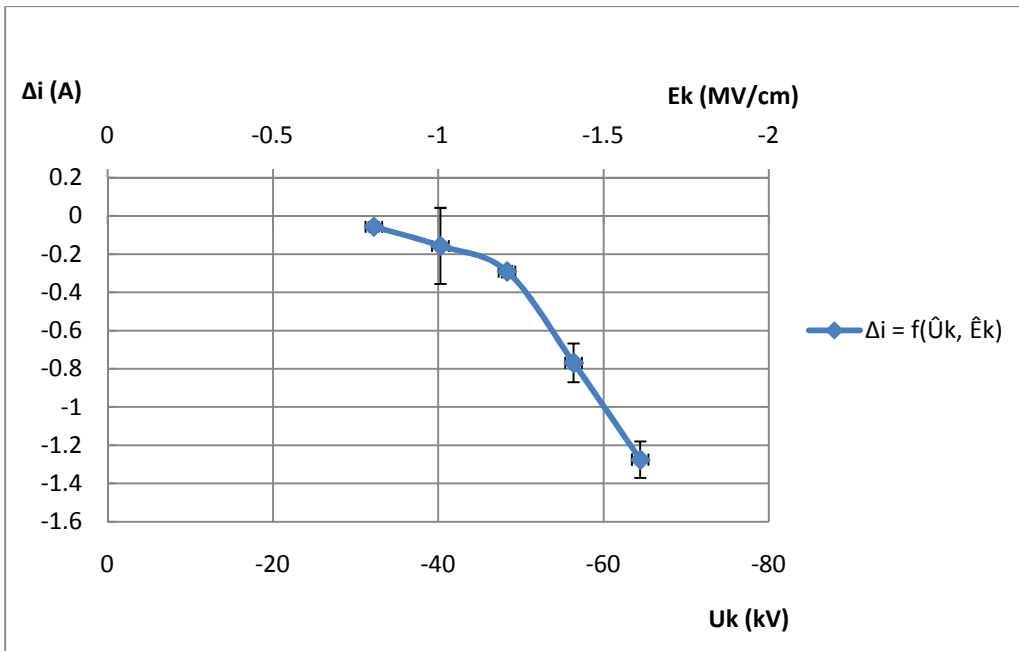
**Σχήμα 2.4-3 :** Χααρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



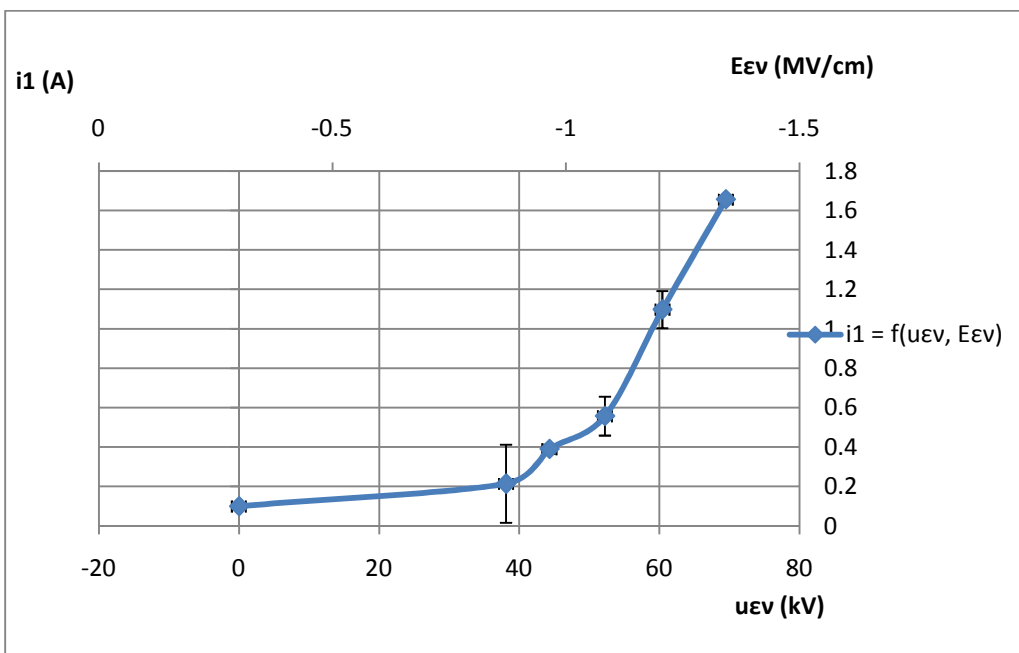
**Σχήμα 2.4-4 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεσι του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



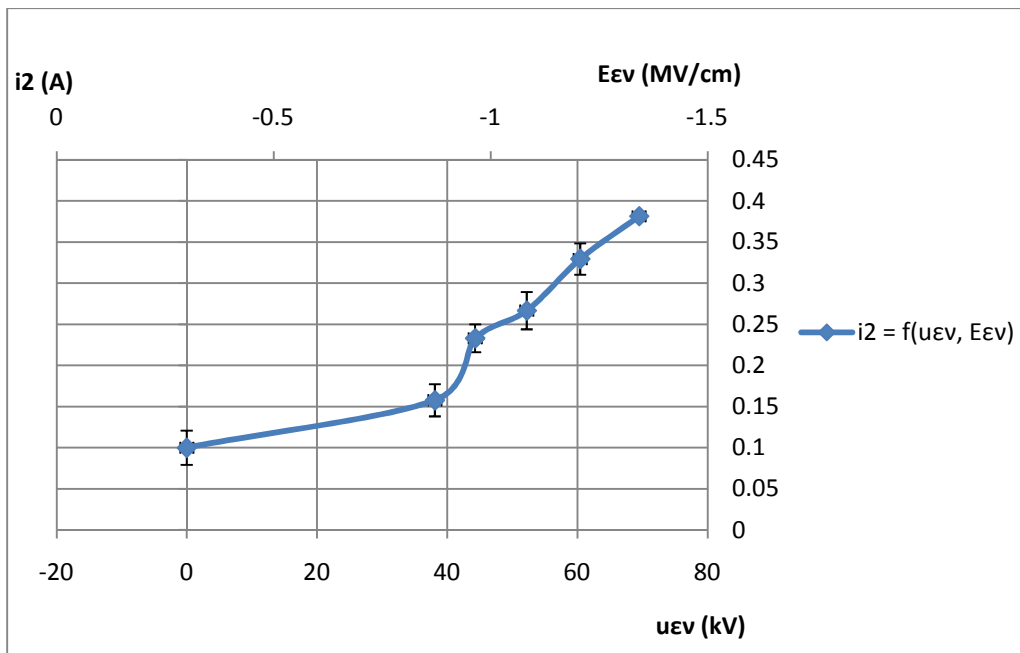
**Σχήμα 2.4-5:** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεσι του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.



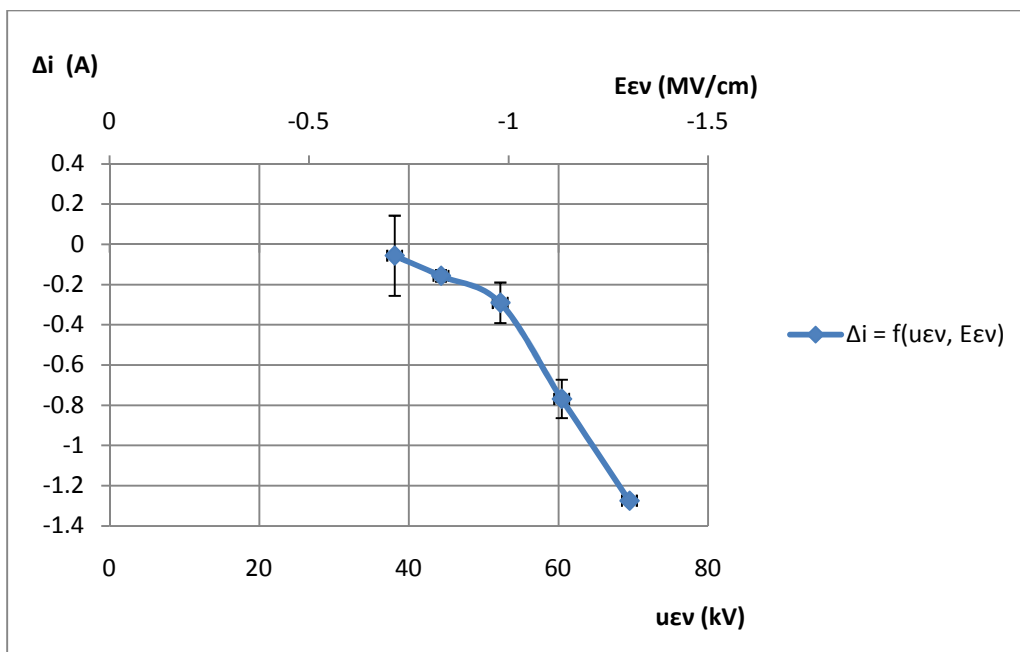
**Σχήμα 2.4-6:** Χααρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .



**Σχήμα 2.4-7 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$

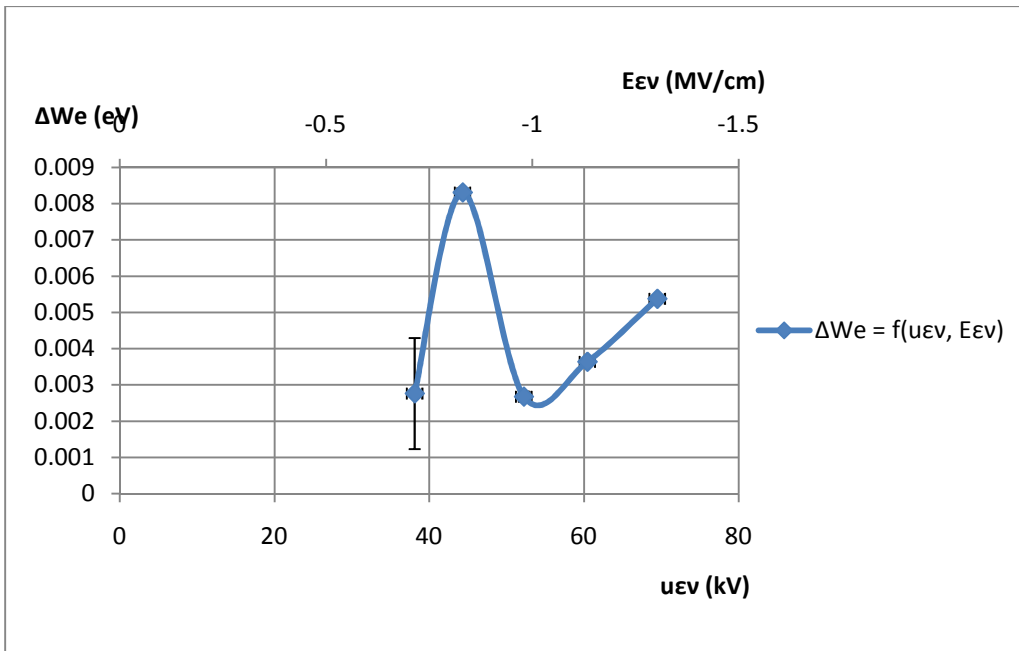


**Σχήμα 2.4-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

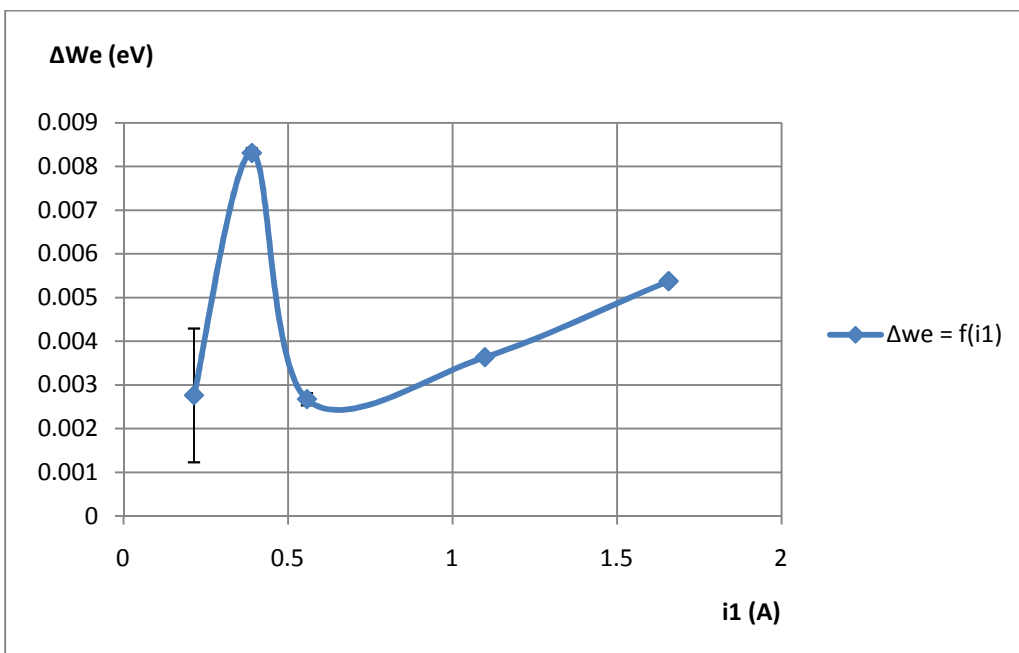


**Σχήμα 2.4-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

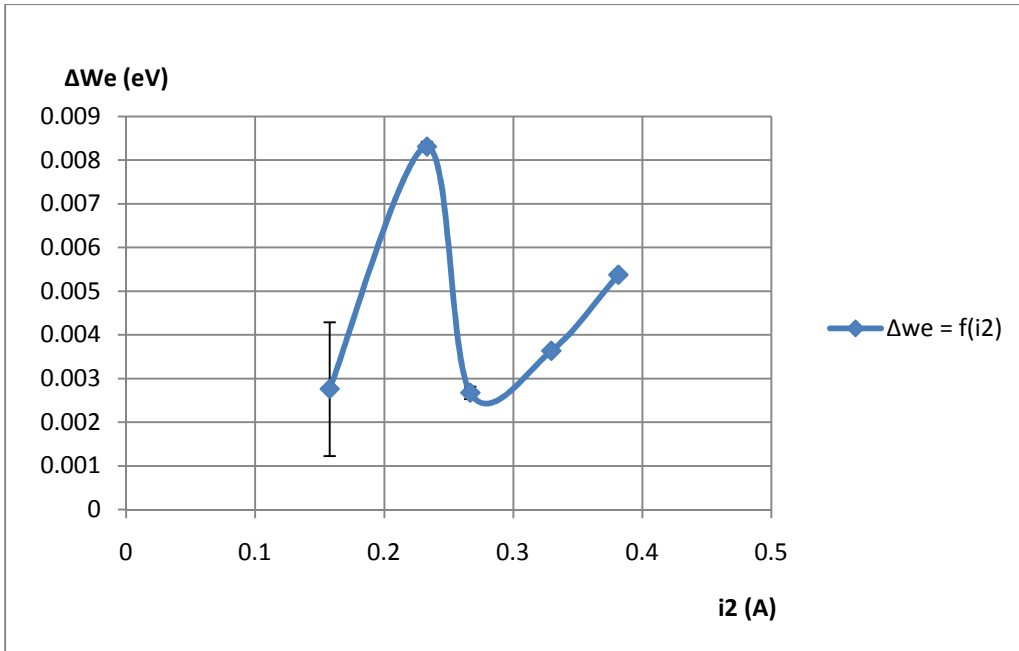




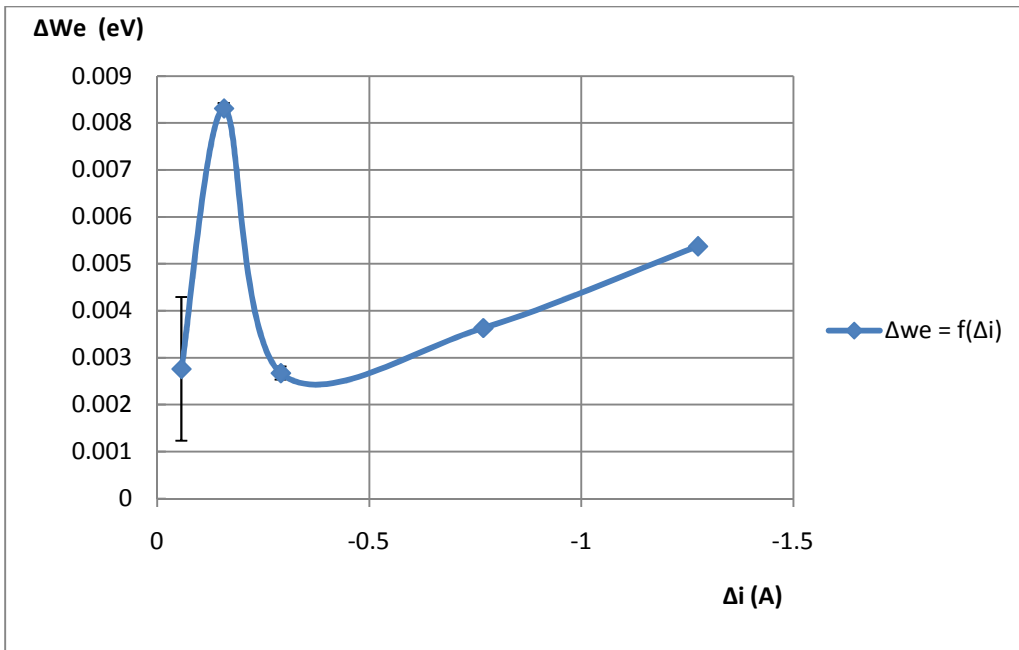
**Σχήμα 2.4-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .



**Σχήμα 2.4-11 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .



**Σχήμα 2.4-13 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση - 1,2/100μs.



**Σχήμα 2.4-12 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση - 1,2/100μs.

### 3. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.

---

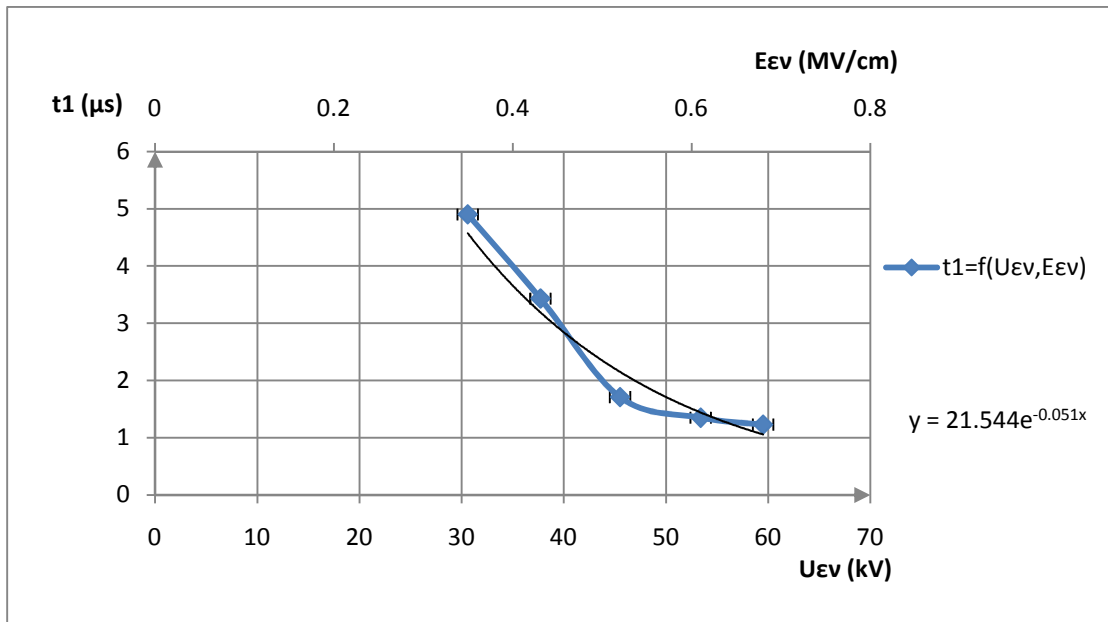
Παρατίθενται παρακάτω τα διαγράμματα με την μαθηματική τους προσέγγιση και τον σχολιασμό των χαρακτηριστικών. Στα πλαίσια της προσπάθειας επεξήγησης της συμπεριφοράς του βιομηχανικού μονωτικού Pertinax υπό καταπόνηση διαβαθμισμένων αυξανόμενων κρουστικών τάσεων θα πρέπει να αναφερθούν ορισμένες βασικές παραδοχές που αφορούν τις συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεων. Κατά πρώτον, ακριβής και απόλυτη μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού δεν είναι δυνατή καθώς το ίδιο το μονωτικό αλλά και η διάταξη επηρεάζονται από συγκεκριμένους εξωγενείς παράγοντες μη υπολογίσιμους. Αυτοί είναι :

- Μεταβολή της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων.
- Υγρασία.
- Σκόνη.
- Ανομοιογένεια του υλικού.
- Απρόβλεπτα σφάλματα στην διεξαγωγή των μετρήσεων που απορρέουν από τις ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν όπως ο παλμογράφος.
- Η μορφολογία της γεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των κρουστικών τάσεων η οποία και δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα ακριβής λόγω της κατασκευής της και της λειτουργίας της κι αυτό διότι μετατρέπει εσωτερικά DC τάση σε κρουστική.

Από τους 4 βασικούς παράγοντες γήρανσης και διάτρησης, που έχουν αναφερθεί(απώλειες Joule ,δυνάμεις Coulomb, θερμοκρασία περιβάλλοντος και μερικές εκκενώσεις), πρέπει να μην συμπεριλάβουμε τη θερμοκρασία, γιατί η θερμοκρασία ήταν σχεδόν σταθερή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Επίσης δεν επιδρούν οι απώλειες Joule, διότι η χρονική διάρκεια της διάσπασης είναι μικρή και δεν προλαβαίνει να υπάρξει θερμική καταπόνηση. Επομένως οι παράγοντες με βάση τους οποίους θα ερμηνεύσουμε τις γραφικές παραστάσεις είναι οι δυνάμεις Coulomb που σχετίζονται με την μείωση του φορτίου και οι ηλεκτρικές εκκενώσεις που είναι υπεύθυνες για την αύξηση του φορτίου.

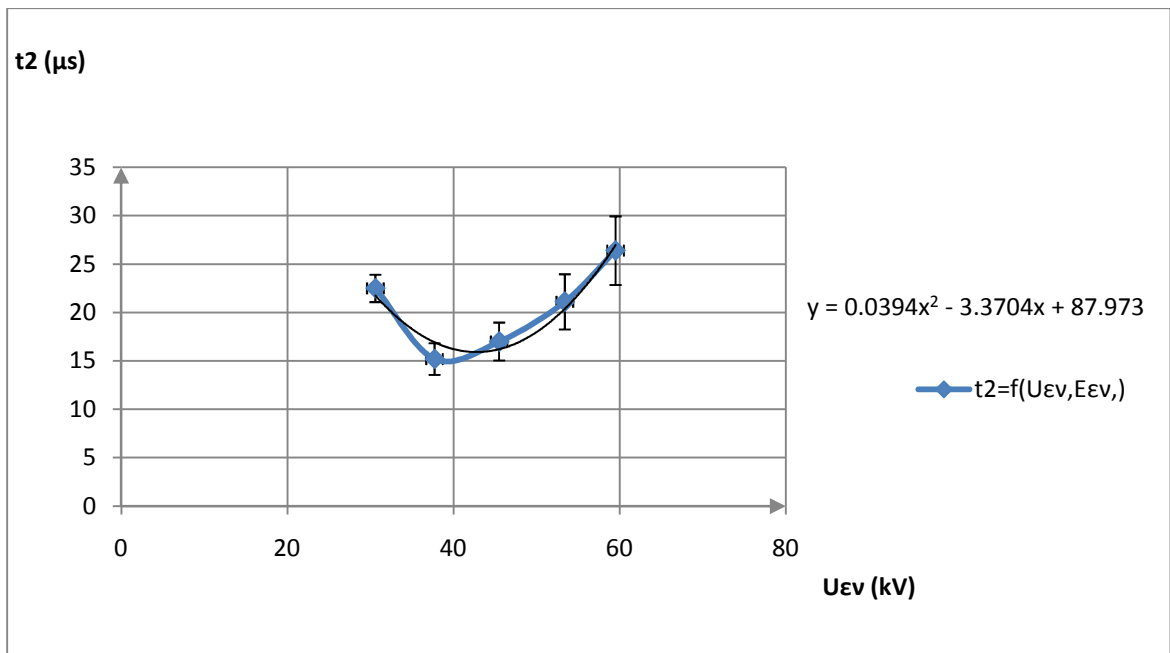
Τα δύο αυτά σημεία έρχονται να συμπληρώσουν οι δύο θεωρίες η μακροσκοπική και η κβαντομηχανική. Με την κβαντική θεωρία εξηγείται η αύξηση των φορτίων. Σύμφωνα με αυτήν η αύξηση της τάσης δημιουργεί πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ιονισμός με κρούσεις. Οι κρούσεις αυτές εξηγούν τις μεγάλες ταχύτητες των ελεύθερων ηλεκτρονίων που υπολογίστηκαν κάθε φορά και συμπεριλαμβάνονται στους προηγούμενους πίνακες. Με τον ίδιο τρόπο συνεπώς θα αυξάνονται και όλα τα μεγέθη, τα οποία είναι ανάλογα με τα μεγέθη των φορτίων. Στην επόμενη σελίδα παρατίθενται τα αποτελέσματα για κρουστική τάση:

**Κρουστική τάση + 1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .**



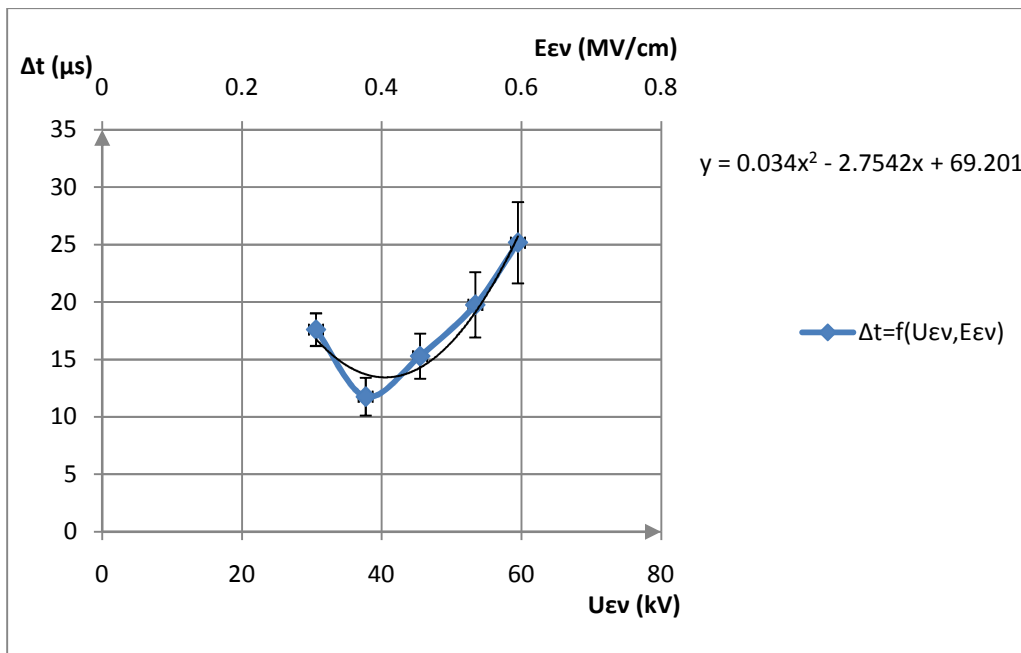
**Σχήμα 3.1-1 :** Χααρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax* 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και συνεπώς της τάσης του πεδίου η οποία αντιστοιχεί σε αυτήν ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μειώνεται εκθετικά. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



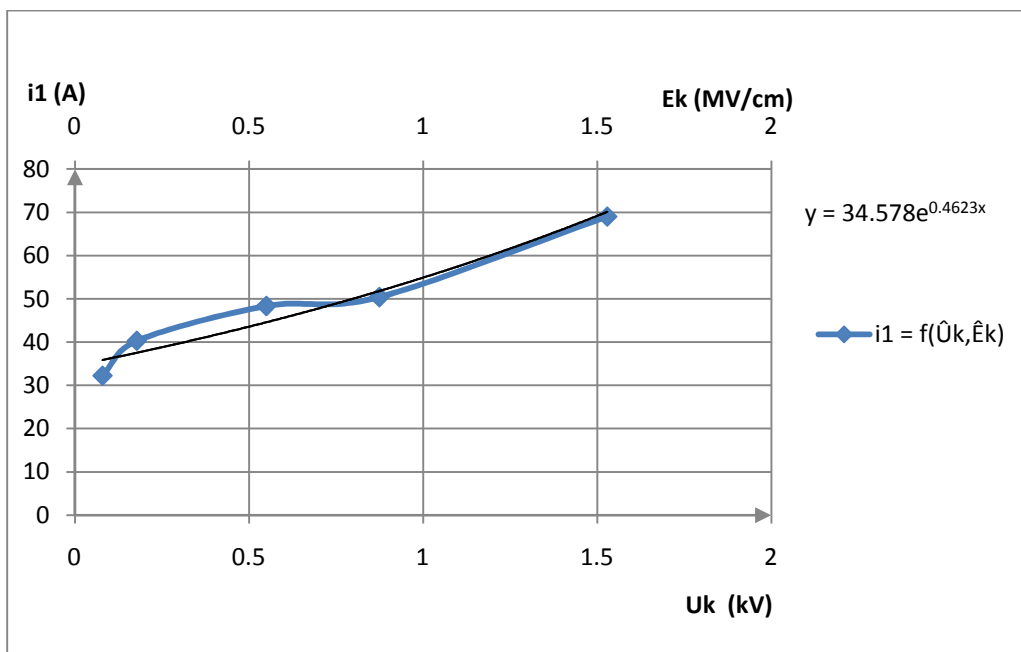
**Σχήμα 3.1-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{\text{εν}}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{\text{εν}}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100 $\mu\text{s}$ .

Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης των εκκενώσεων ο χρόνος πέρατος αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδα – πλάκα >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται. Η ανομοιομορφία που παρατηρείται για κρουστικές τάσεις κοντά στην περιοχή των 40kV οφείλεται στις δυνάμεις Coulomb που αντιτίθενται στην διάσπαση του Pertinax.



**Σχήμα 3.1-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.



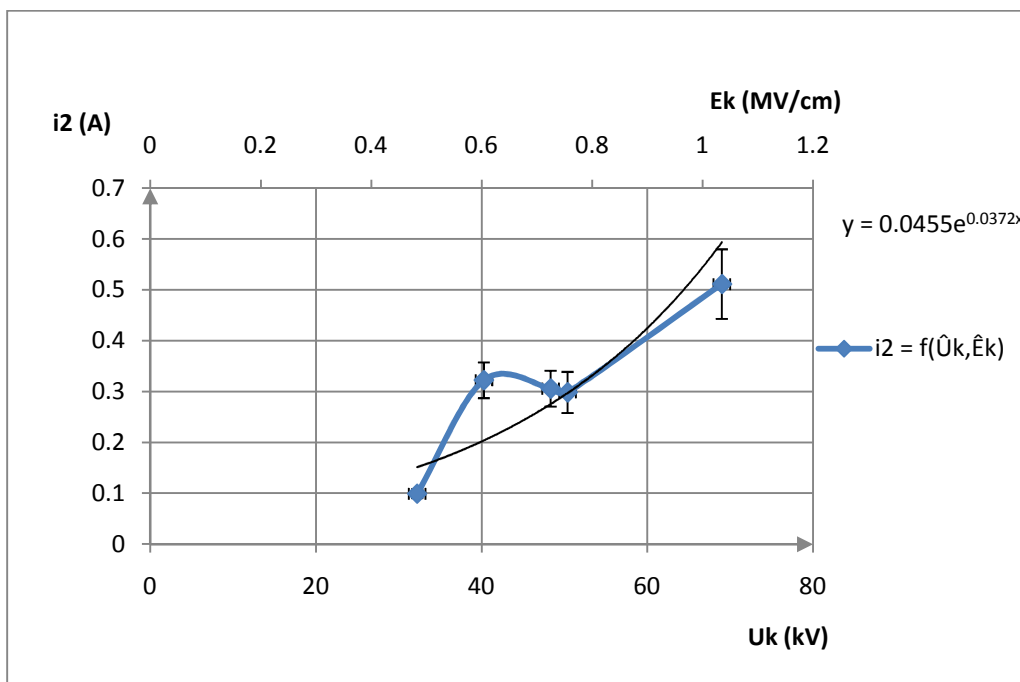
**Σχήμα 3.1-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της

αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2 στο σκοπό της εργασίας η βασική σχέση με βάση την οποία έγινε η προσέγγιση των χαρακτηριστικών και η μαθηματική τους ερμηνεία είναι η ακόλουθη :

$$Q = Q_0 \exp \left( \frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2} \right)$$

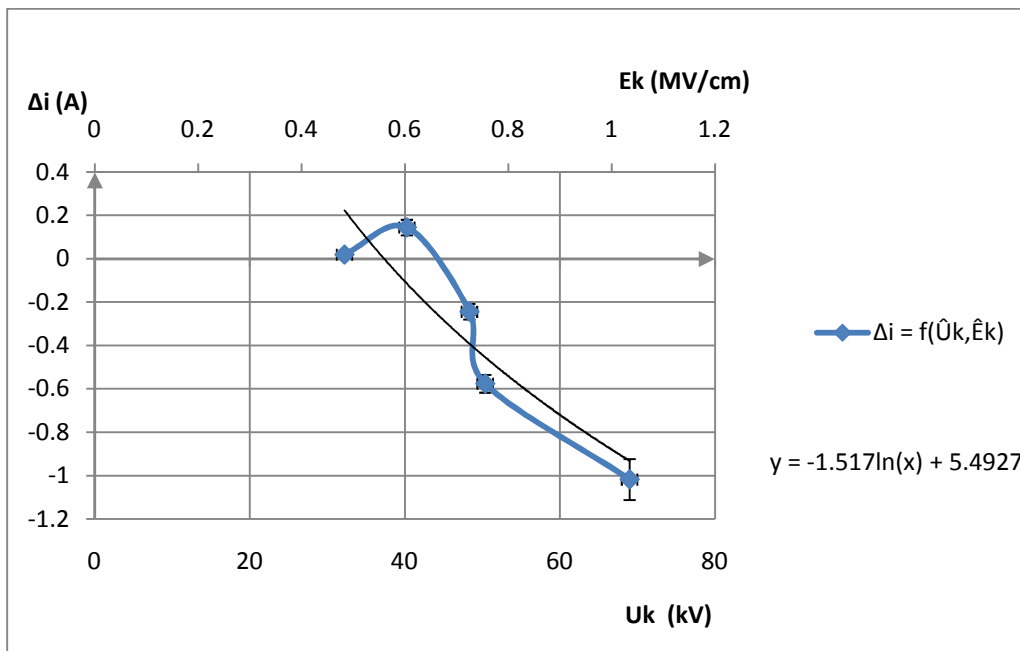
Το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο συνεπώς η αναμενόμενη μορφή της χαρακτηριστικής του θα είναι η εκθετική. Η σταθερά A της άνωθεν σχέσης αφορά το βιομηχανικό μονωτικό Pertinax και είναι χαρακτηριστική για το κάθε μονωτικό. Η παρέκκλιση της χαρακτηριστικής για κρουστικές τάσεις της κλίμακας 0,3-1 kV. πιθανότατα να οφείλεται σε ανομοιογένεια του μονωτικού ή στους άλλους εξωγενείς παράγοντες που αναφέρονται στην εισαγωγή του κεφαλαίου.



**Σχήμα 3.1-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με την στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την εκκίνηση των μερικών εκκενώσεων το ρεύμα κατά το πέρασ των εκκενώσεων παρουσιάζει επίσης εκθετική μορφή όπως και το φορτίο. Για κρουστικές τάσεις ανάμεσα στα 40-50 kV όπου το ρεύμα πέρατος μειώνεται γίνεται φανερή η επίδραση των δυνάμεων

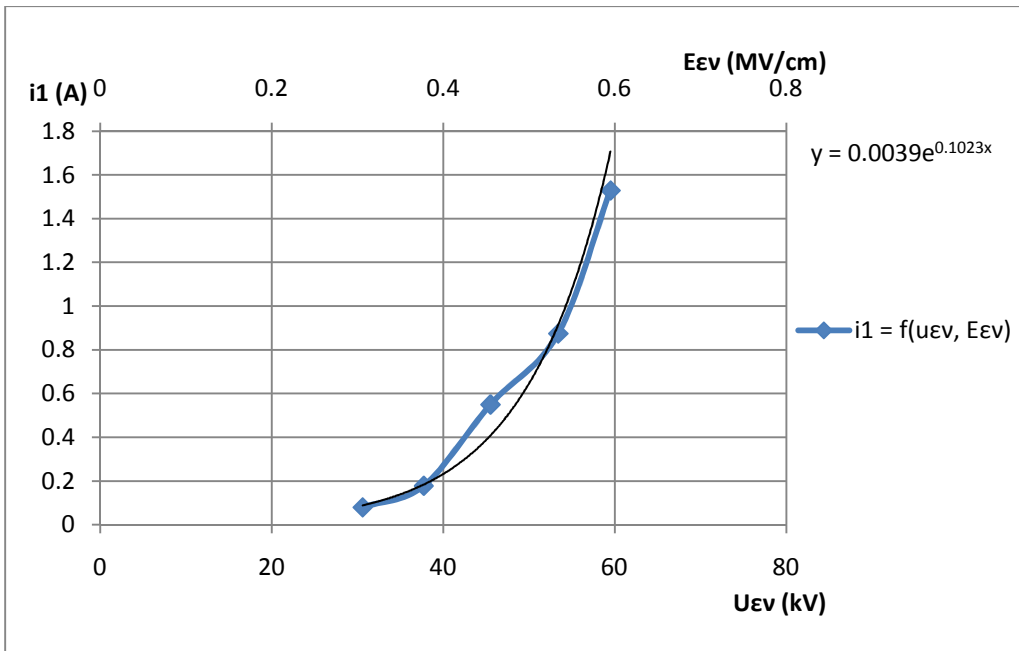
Coulomb καθώς τότε η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται σε αυτές και όχι στην αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται η ένταση του ρεύματος.



**Σχήμα 3.1-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Η παράλληλη αύξηση των στιγμιαίων τιμών των ρευμάτων έναρξης και πέρατος των μερικών εκκενώσεων οδηγεί στην λογαριθμική αύξηση του ρεύματος κατά την διάρκεια του φαινομένου. Προφανώς το ρεύμα έναρξης αυξάνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς από το ρεύμα πέρατος με αποτέλεσμα την αρνητική πολικότητα. Εμφανής είναι επίσης η επίδραση των δυνάμεων Coulomb στην άνωθεν χαρακτηριστική για τιμές πεδίου κοντά στα 40kV.

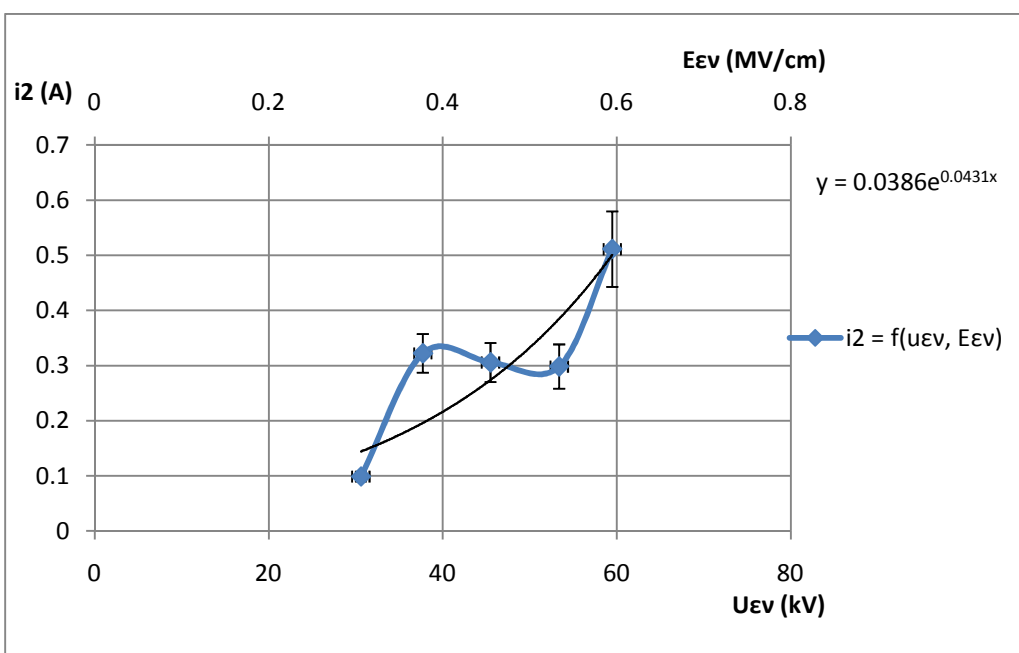




**Σχήμα 3.1-7 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

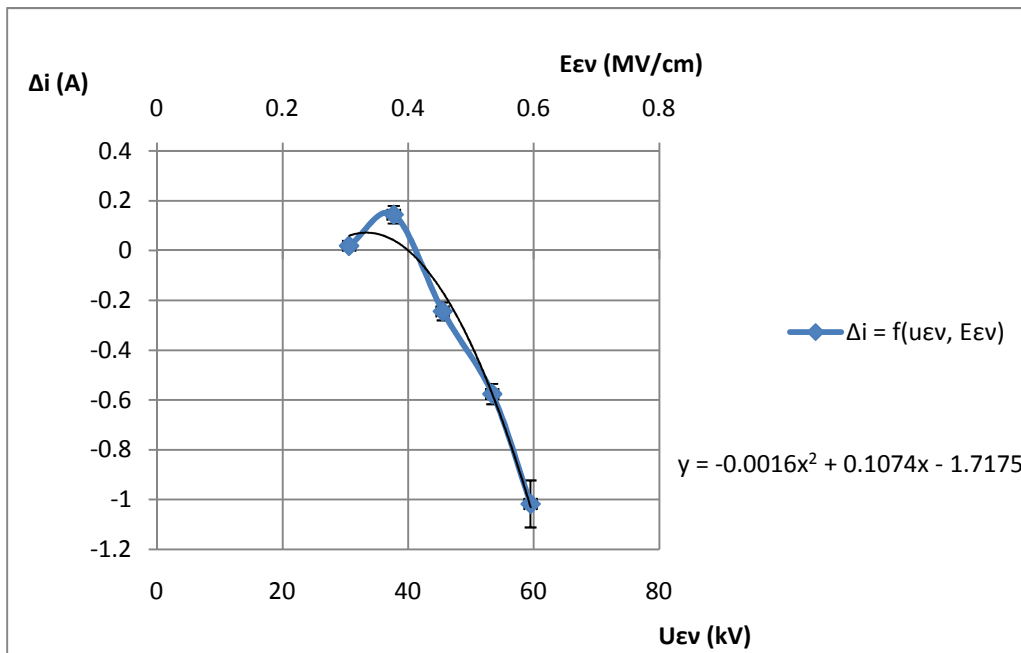
Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά το πέρας των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$



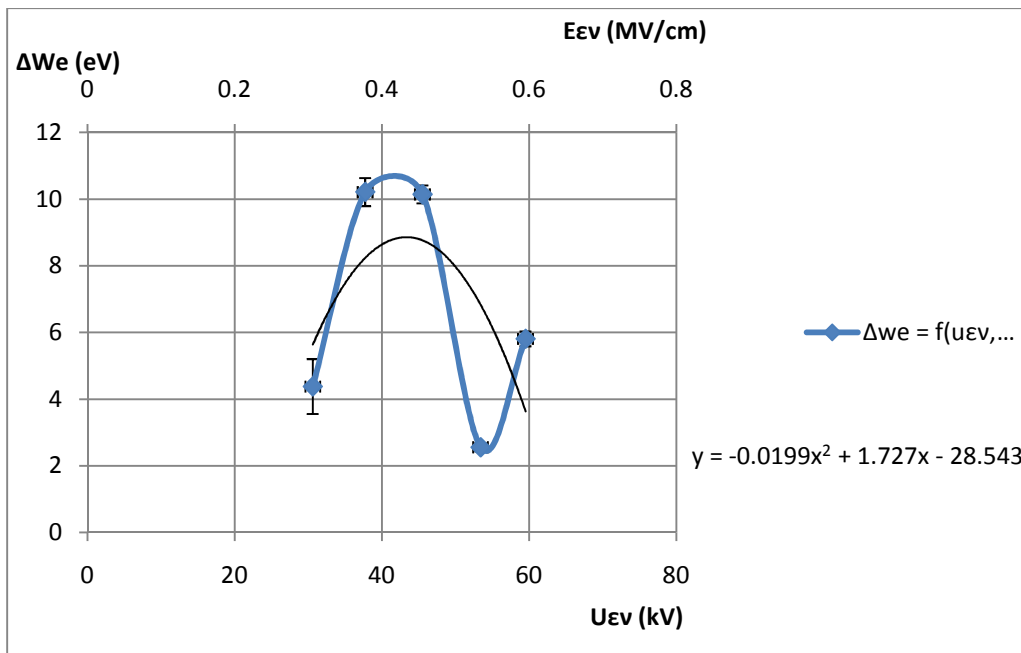
**Σχήμα 3.1-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασμα των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εV}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εV}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Τα ίδια ισχύουν και για το ρεύμα πέρατος των εκκενώσεων το οποίο αυξάνει εκθετικά. Για ενεργούς τιμές κρουστικών τάσεων κοντά στα 40 kV γίνεται φανερό το αποτέλεσμα των δυνάμεων Coulomb οι οποίες μειώνουν την πρόσκαιρα την χρονική διάρκεια των εκκενώσεων. Για πολύ υψηλές τιμές τάσεων το υλικό καταπονείται τόσο που επέρχεται ολοσχερής διάλυση του.



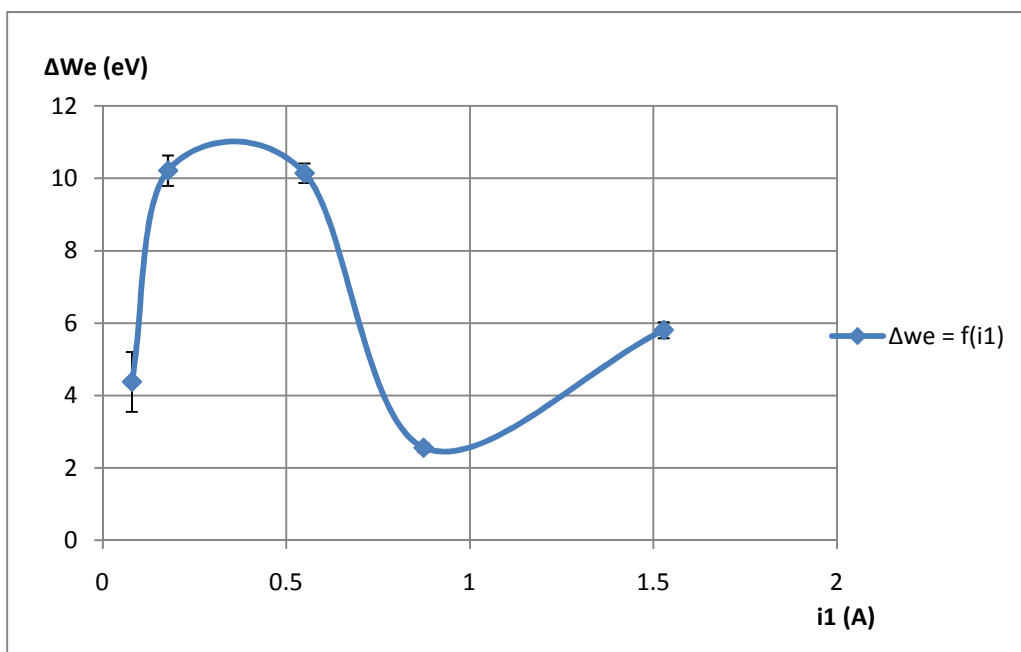
**Σχήμα 3.1-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εV}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εV}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Η παράλληλη αύξηση των στιγμιαίων τιμών των ρευμάτων έναρξης και πέρατος των μερικών εκκενώσεων οδηγεί και στην αύξηση του ρεύματος κατά την διεξαγωγή του φαινομένου πολυωνμικά. Εμφανής είναι επίσης η επίδραση των δυνάμεων Coulomb στην άνωθεν χαρακτηριστική για  $U_{εV} = 40kV$ .

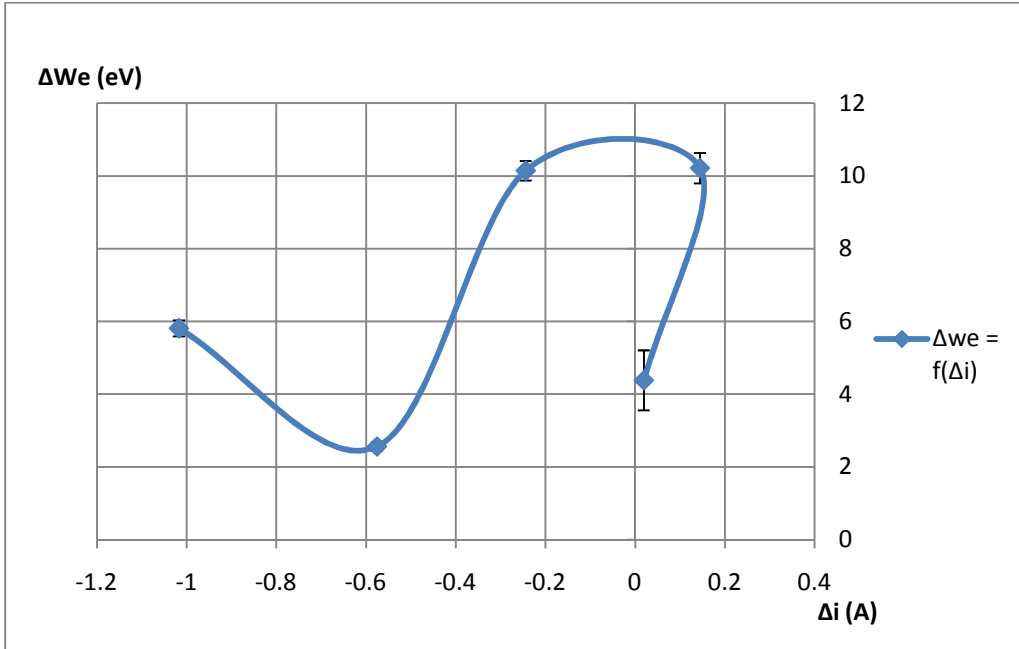


**Σχήμα 3.1-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

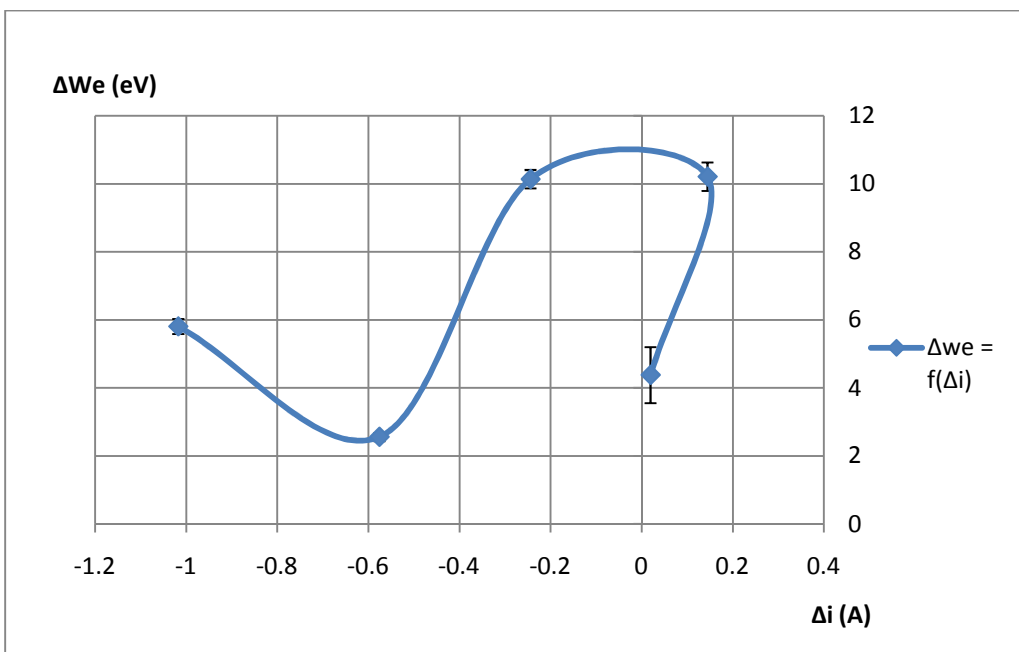
Για τιμές τάσης έως 40kV έχουμε αύξηση της ενέργειας της έναρξης των εκκενώσεων καθώς μειώνεται και ο διαθέσιμος χρόνος έναρξης της διάσπασης του μονωτικού. Από τα 40kV και μετά επιδρούν δυνάμεις Coulomb και έτσι η ενέργεια που καταναλώνεται στην διάσπαση του μονωτικού μειώνεται. Για πολύ υψηλές τιμές των τάσεων επέρχεται ολοσχερής διάλυση του Pertinax.



**Σχήμα 3.1-11 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 3.1-12 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



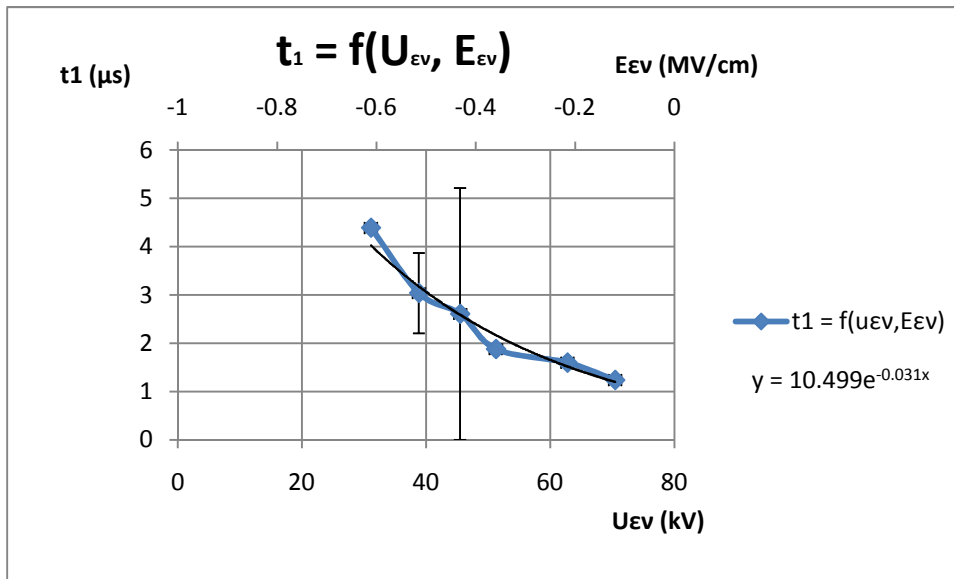
**Σχήμα 3.1-13 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την

διάρκεια των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm  
υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 21,544e^{-0,051x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0394x^2 - 3,3704x + 87,973$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,034x^2 - 2,7542x + 69,201$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 34,578e^{0,4623x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0455e^{0,0372x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = -1,517\ln(x) + 5,4927$
$i_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0039e^{0,1023x}$
$i_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0386e^{0,0431x}$
$\Delta i = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0016x^2 + 0,1074x - 1,7175$
$\Delta We = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0199x^2 + 1,727x - 28,543$

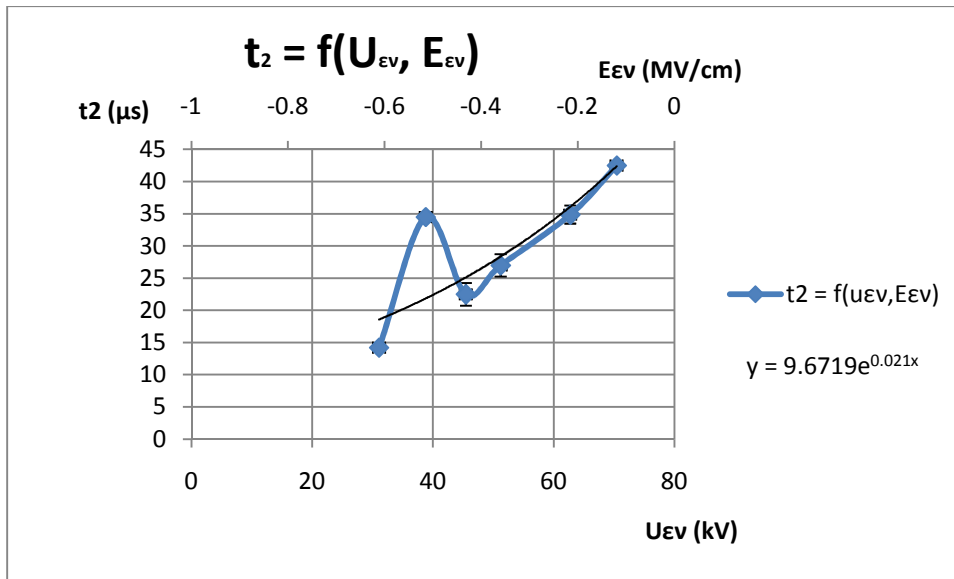
**Πίνακας 3.1.1:** Χαρακτηριστικές διάφορων μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.

### 3.2 Κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$ και πλάτος δοκιμίου $d = 1mm$ .



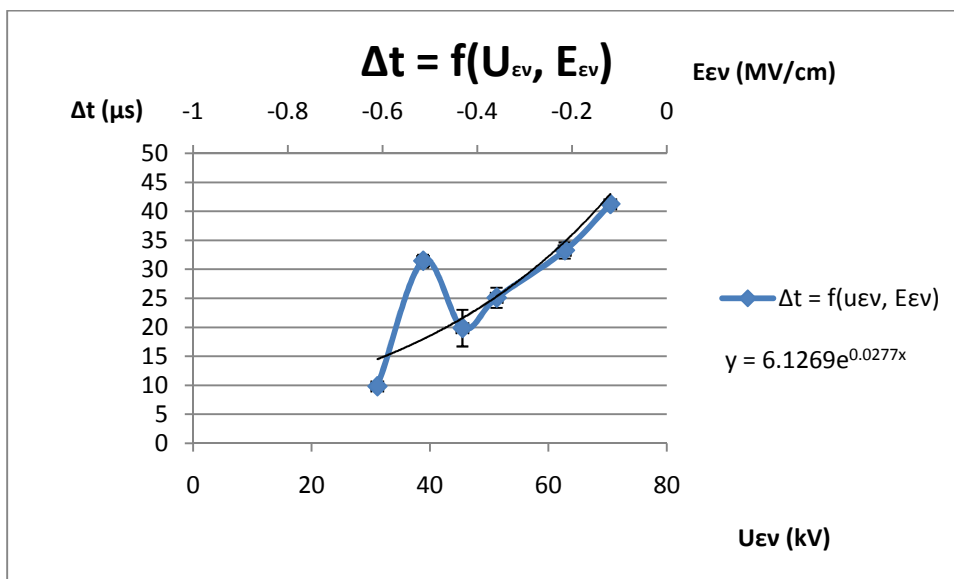
**Σχήμα 3.2-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{EV}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{EV}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax* 1mm υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Η αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και η συνακόλουθη αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου επιφέρουν εκθετική μείωση του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



**Σχήμα 3.2-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

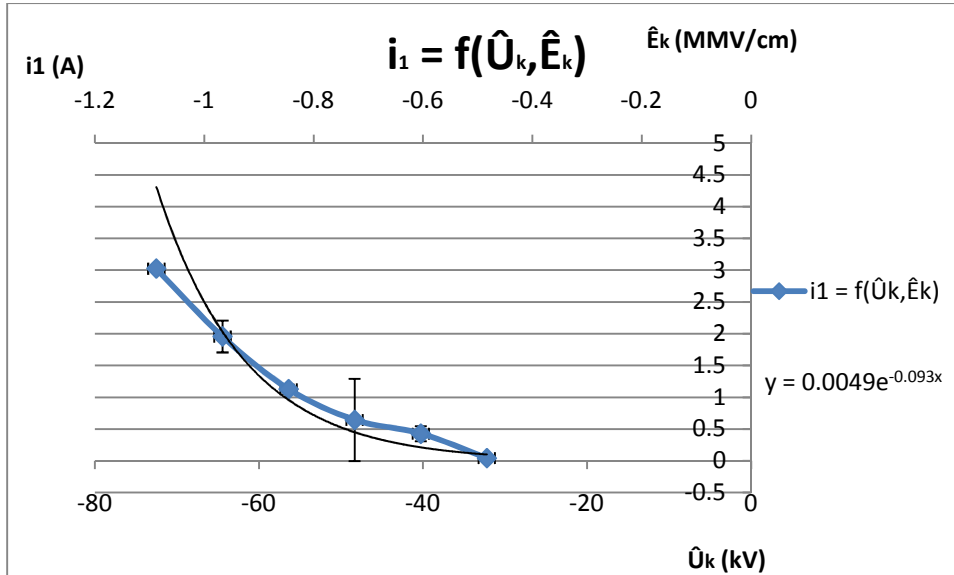
Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης ο χρόνος πέρατος των εκκενώσεων αυξάνεται εκθετικά. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδας – πλάκας >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται. Η ραγδαία αύξηση στα 40kV πιθανότατα να οφείλεται σε ανομοιομορφία του υλικού ή στην παλαίωση του λόγω της καταπόνησής του.



**Σχήμα 3.2-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της

αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

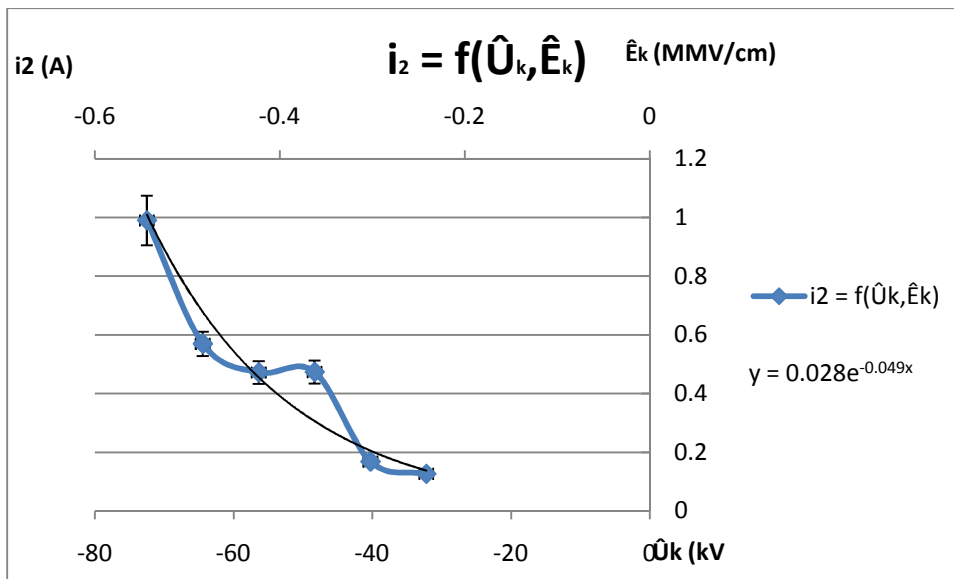
Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.



**Σχήμα 3.2-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

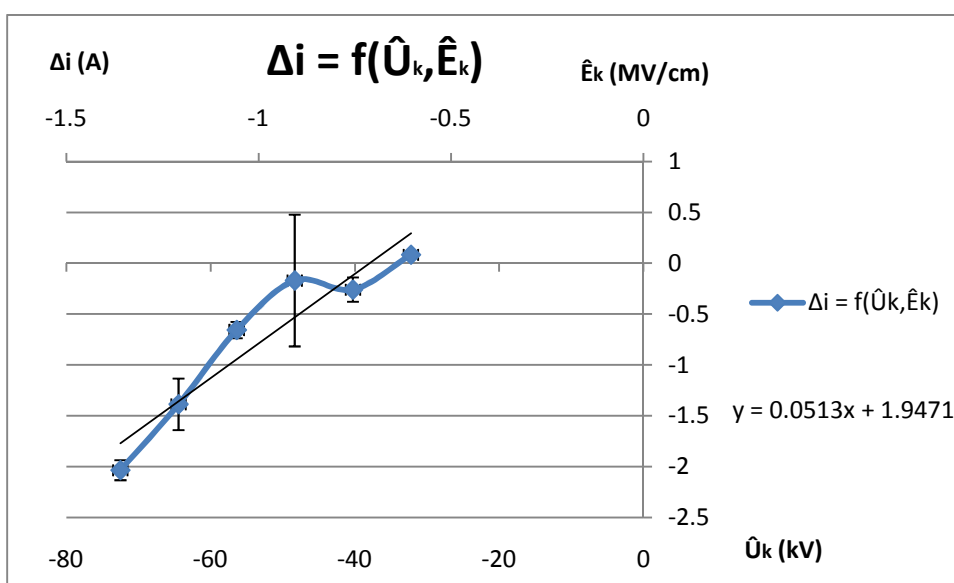
Με βάση την σχέση προσέγγισης  $Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$  καθώς και το ότι το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου προς το χρόνο αναμένουμε εκθετική αύξηση ρεύματος με την σταδιακή αύξηση της πεδιακής έντασης. Μεγαλύτερη τάση συνεπάγεται ταχύτερη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερους χρόνους και συνεπώς υψηλότερες τιμές ρευμάτων.





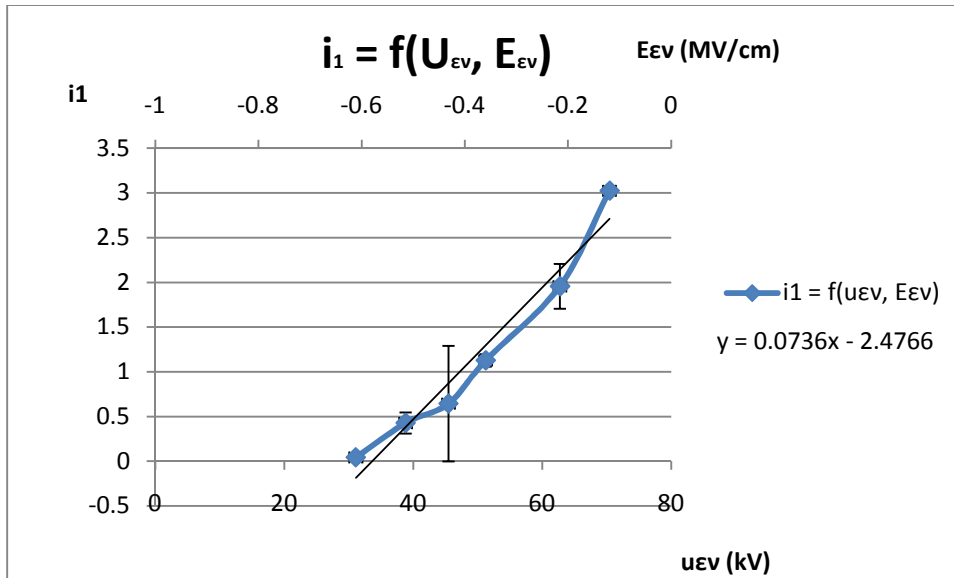
**Σχήμα 3.2-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Όπως και στα ρεύματα εκκινήσεως έτσι και για τα ρεύματα πέρατος και με βάση την σχέση  $Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$  καθώς και το ότι το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου προς το χρόνο αναμένουμε εκθετική αύξηση ρεύματος με την σταδιακή αύξηση της πεδιακής έντασης. Μεγαλύτερη τάση συνεπάγεται ταχύτερη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερους χρόνους και συνεπώς υψηλότερες τιμές ρευμάτων. Στις τιμές 50-60 kV παρατηρείται μια ελαφριά μείωση της τιμής του ρεύματος η οποία οφείλεται στις αντιτιθέμενες δυνάμεις Coulomb.



**Σχήμα 3.2-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

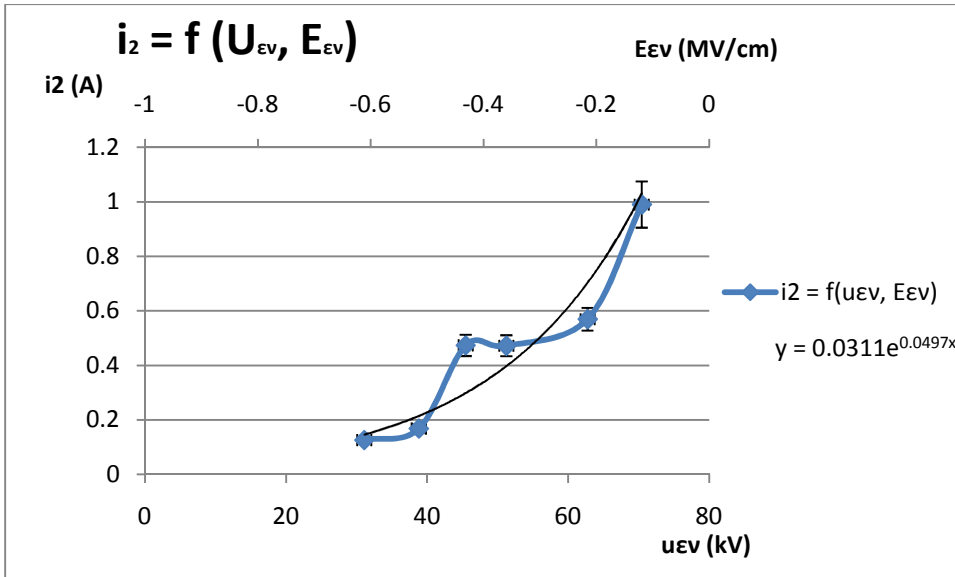
Η γραμμική αύξηση του ρεύματος υποδηλώνει την ταχύτερη αύξηση των ρευμάτων εκκινήσεως σε σχέση με τα ρεύματα πέρατος με αποτέλεσμα το ρεύμα να έχει αρνητική πολικότητα.



**Σχήμα 3.2-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά την έναρξη των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

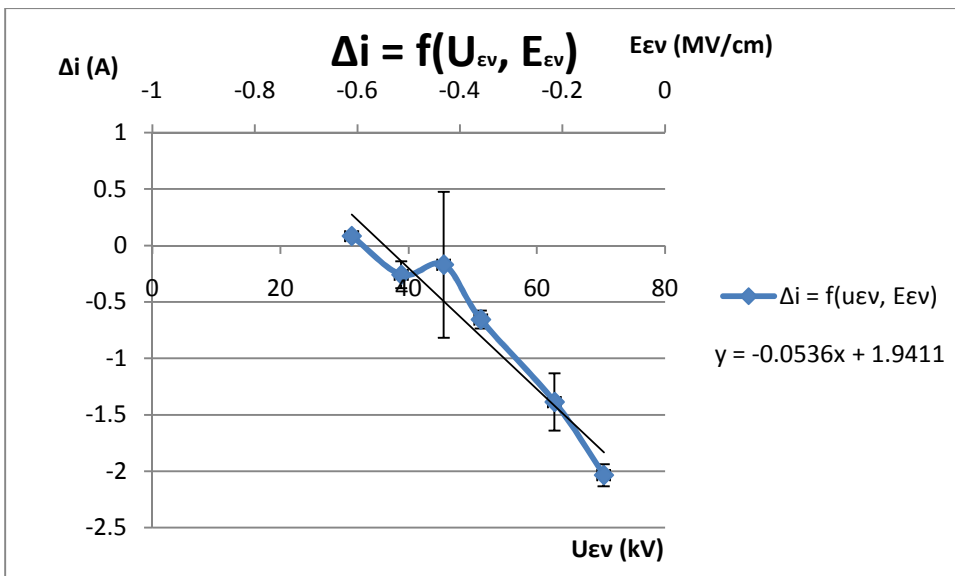
$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$



**Σχήμα 4.2-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά το πέρασ των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

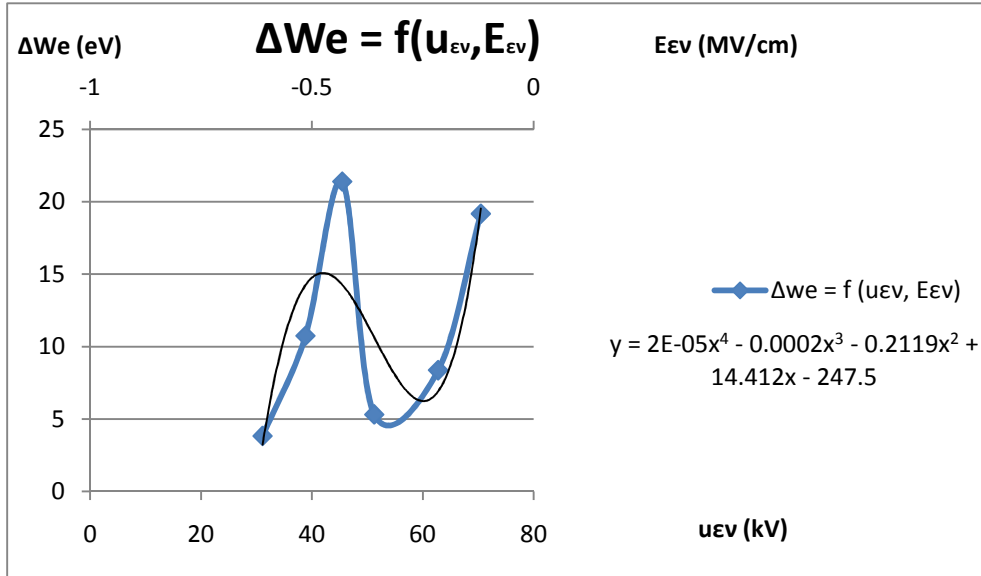
$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$ . Εμφανής είναι και η επίδραση των δυνάμεων Coulomb για ενεργούς τιμές τάσης 45-50kV.



**Σχήμα 3.2-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης

( $U_{\varepsilon V}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{\varepsilon V}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Παρατηρούμε αύξηση του ρεύματος με την ταυτόχρονη αύξηση της έντασης του πεδίου. Το ρεύμα έχει αρνητική πολικότητα κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι το ρεύμα έναρξης του φαινομένου αυξάνεται με γρηγορότερο ρυθμό από το ρεύμα πέρατος.



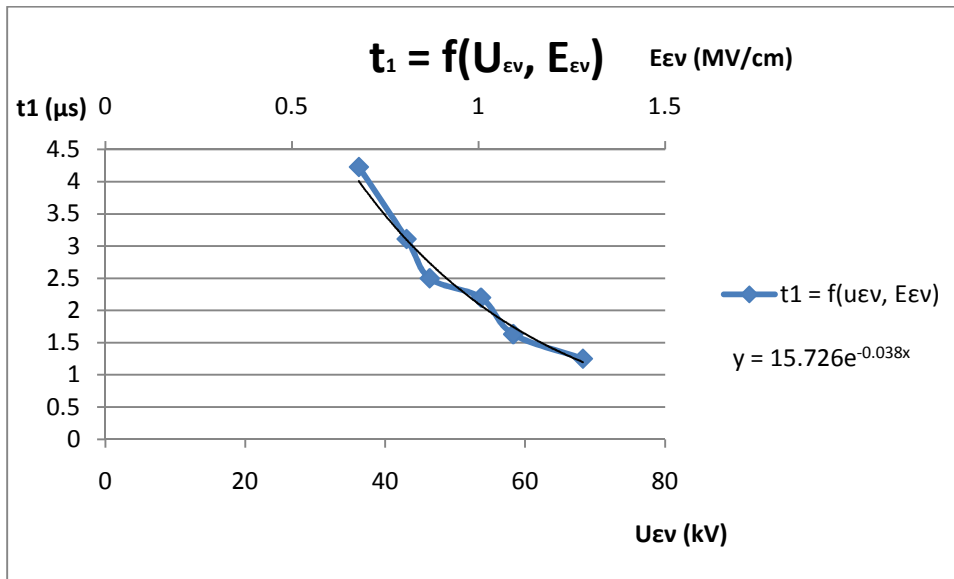
**Σχήμα 3.2-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 10,499e^{-0,031x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 9,6719e^{0,021x}$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 6,1269e^{0,0277x}$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0049e^{-0,093x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,028e^{-0,049x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0513x + 1,9471$
$i_1 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 0,0736x - 2,4766$
$i_2 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 0,0311e^{0,0497x}$

$\Delta i = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0536x + 1,9411$
$\Delta We = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 2E-05x^4 - 0,0002x^3 - 0,2119x^2 + 14,412x - 247,5$

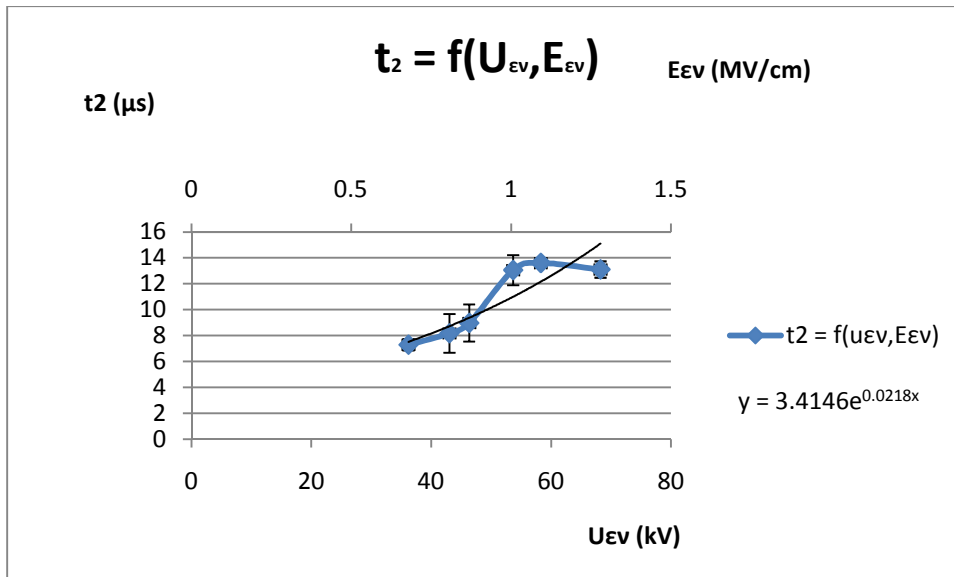
**Πίνακας 3.2.1:** Χαρακτηριστικές διαφορών μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.

### 3.3 Κρουστική τάση + 1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου $d = 2mm$ .



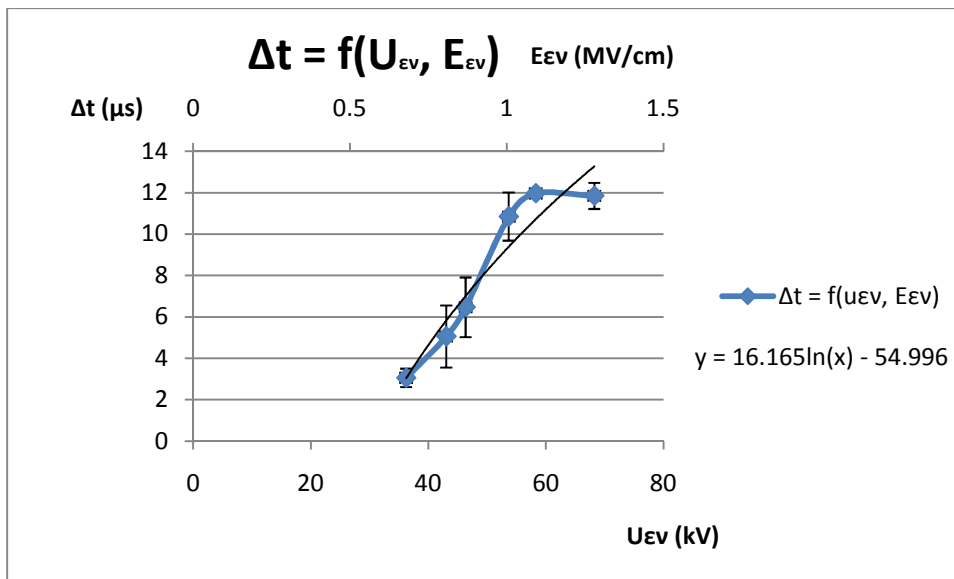
**Σχήμα 3.3-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και συνεπώς της τάσης του πεδίου η οποία αντιστοιχεί σε αυτήν ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μειώνεται εκθετικά. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



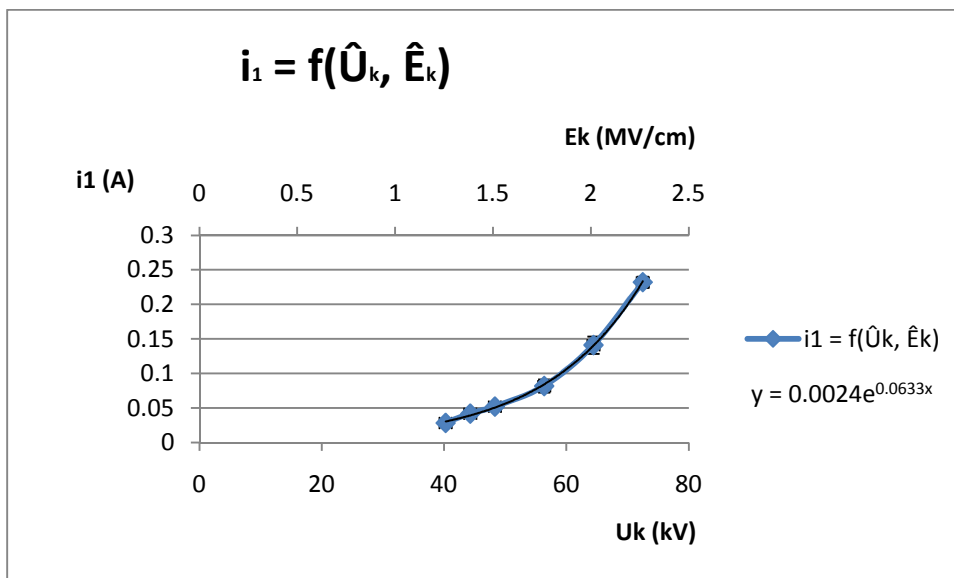
**Σχήμα 3.3-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu\text{s}$ .

Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης των εκκενώσεων ο χρόνος πέρατος αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδας – πλάκας >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται. Η ανομοιομορφία που παρατηρείται για κρουστικές τάσεις κοντά στην περιοχή των 50-70kV οφείλεται στις δυνάμεις Coulomb που αντιτίθενται στην διάσπαση του *Pertinax*.



**Σχήμα 3.3-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{EV}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{EV}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.



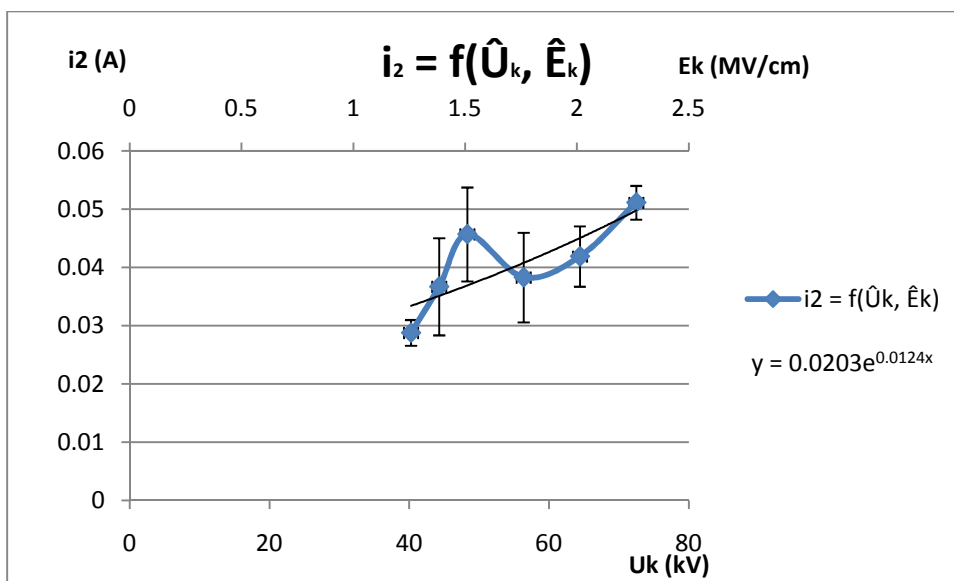
**Σχήμα 3.3-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .



Η βασική σχέση με βάση την οποία έγινε η προσέγγιση των χαρακτηριστικών και η μαθηματική τους ερμηνεία είναι η ακόλουθη :

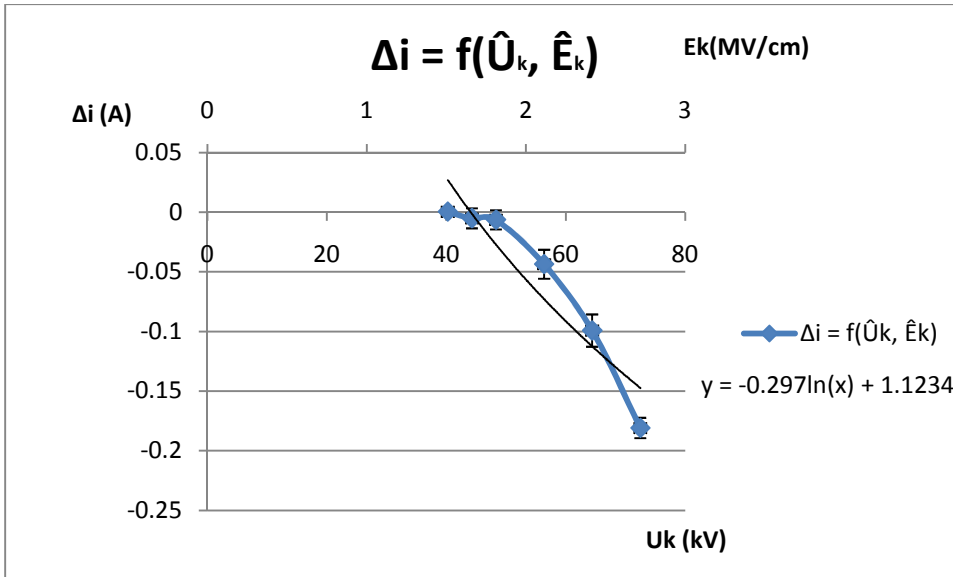
$$Q = Q_0 \exp \left( \frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2} \right)$$

Το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο συνεπώς η αναμενόμενη μορφή της χαρακτηριστικής του θα είναι η εκθετική. Η σταθερά A της άνωθεν σχέσης αφορά το βιομηχανικό μονωτικό Pertinax και είναι χαρακτηριστική για το κάθε μονωτικό. Αύξηση των τιμών των κρουστικών τάσεων οδηγεί σε εντονότερη και πιο γρήγορη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερο χρόνο. Το ρεύμα συνεπώς, το οποίο ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο, θα αυξάνεται.



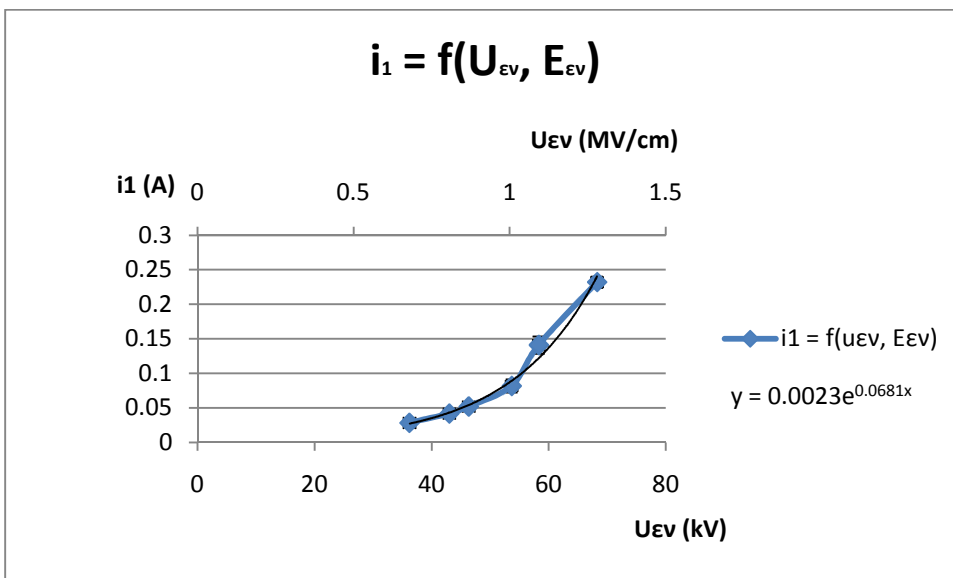
**Σχήμα 3.3-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασμα των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με την στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την εκκίνηση των μερικών εκκενώσεων το ρεύμα κατά το πέρασμα των εκκενώσεων παρουσιάζει επίσης εκθετική μορφή όπως και το φορτίο. Για κρουστικές τάσεις ανάμεσα στα 40-50 kV όπου το ρεύμα πέρατος μειώνεται γίνεται φανερό η επίδραση των δυνάμεων Coulomb καθώς τότε η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται σε αυτές και όχι στην αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται η ένταση του ρεύματος.



**Σχήμα 3.3-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσεως του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Παρόλη την παράλληλη αύξηση των στιγμιαίων τιμών των ρευμάτων έναρξης και πέρατος των μερικών εκκενώσεων η συνολική διάρκεια του ρεύματος κατά την διεξαγωγή του φαινομένου μειώνεται λογαριθμικά. Προφανώς το ρεύμα έναρξης αυξάνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς από το ρεύμα πέρατος. Εμφανής είναι επίσης η επίδραση των δυνάμεων Coulomb στην άνωθεν χαρακτηριστική.

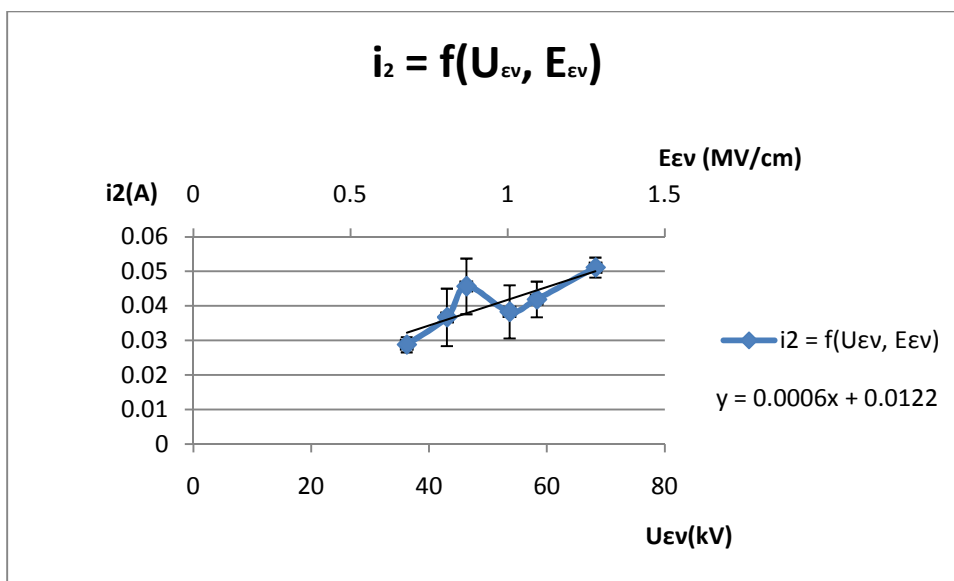


**Σχήμα 3.3-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Η βασική σχέση με βάση την οποία έγινε η προσέγγιση των χαρακτηριστικών και η μαθηματική τους ερμηνεία είναι η ακόλουθη :

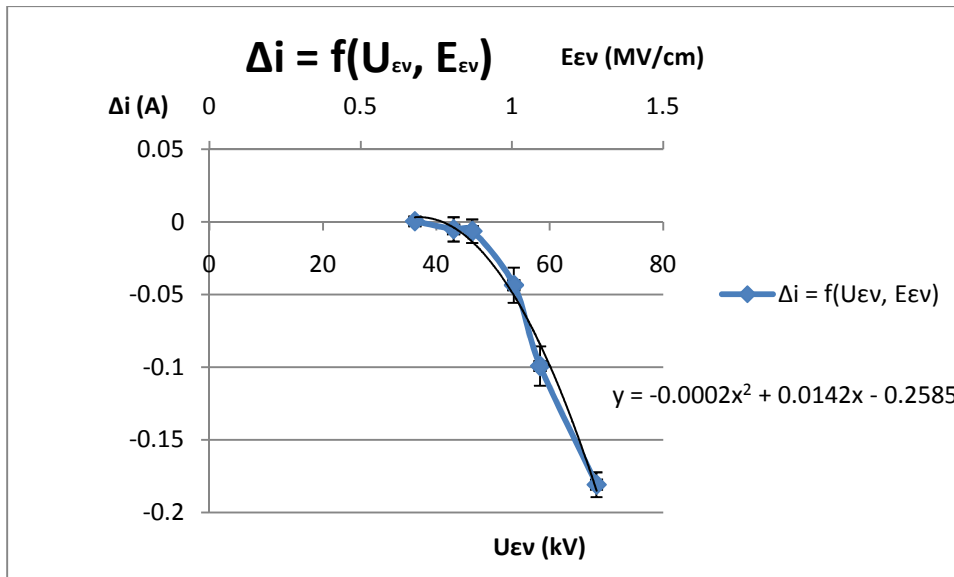
$$Q = Q_0 \exp \left( \frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2} \right)$$

Το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο συνεπώς η αναμενόμενη μορφή της χαρακτηριστικής του θα είναι η εκθετική. Η σταθερά A της άνωθεν σχέσης αφορά το βιομηχανικό μονωτικό Pertinax και είναι χαρακτηριστική για το κάθε μονωτικό. Αύξηση των τιμών των κρουστικών τάσεων οδηγεί σε εντονότερη και πιο γρήγορη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερο χρόνο. Το ρεύμα συνεπώς, το οποίο ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο, θα αυξάνεται.



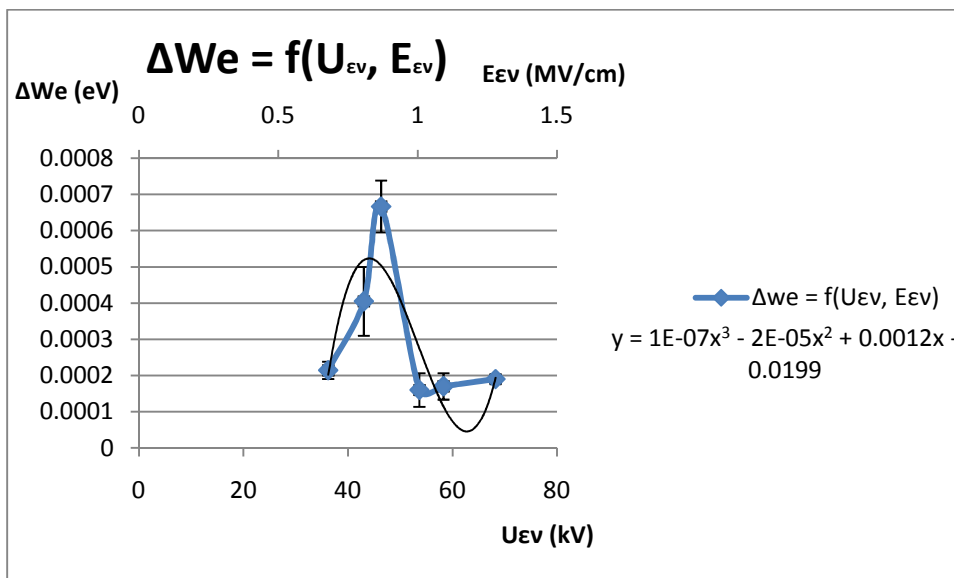
**Σχήμα 3.3-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Τα ίδια ισχύουν και για το ρεύμα πέρατος των εκκενώσεων το οποίο αυξάνει εκθετικά. Για ενεργούς τιμές κρουστικών τάσεων κοντά στα 50 kV γίνεται φανερό το αποτέλεσμα των δυνάμεων Coulomb οι οποίες μειώνουν την πρόσκαιρα το ρεύμα πέρατος των εκκενώσεων. Για πολύ υψηλές τιμές τάσεων το υλικό καταπονείται τόσο που επέρχεται ολοσχερής διάλυση του.



**Σχήμα 3.3-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Η τιμή του ρεύματος κατά την διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης και παρουσιάζεται αρνητική πολικότητα ρεύματος.

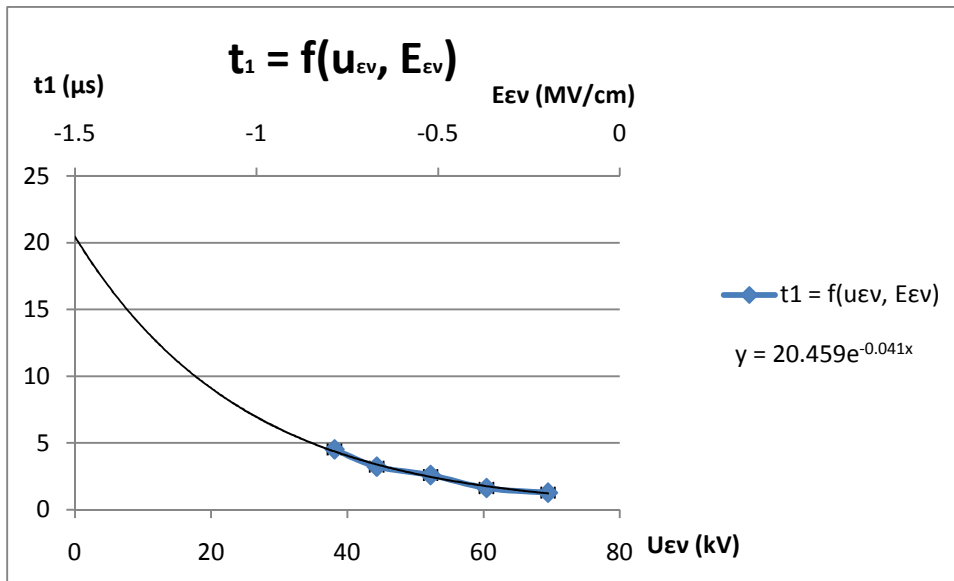


**Σχήμα 3.3-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 15,726e^{-0,038x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 3,4146e^{0,0218x}$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 16,165\ln(x) - 54,996$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0024e^{0,0633x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0203e^{0,0124x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = -0,297\ln(x) + 1,1234$
$i_1 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 0,0023e^{0,0681x}$
$i_2 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 0,0006x + 0,0122$
$\Delta i = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = -0,0002x^2 + 0,0142x - 0,2585$
$\Delta We = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 1E-07x^3 - 2E-05x^2 + 0,0012x - 0,0199$

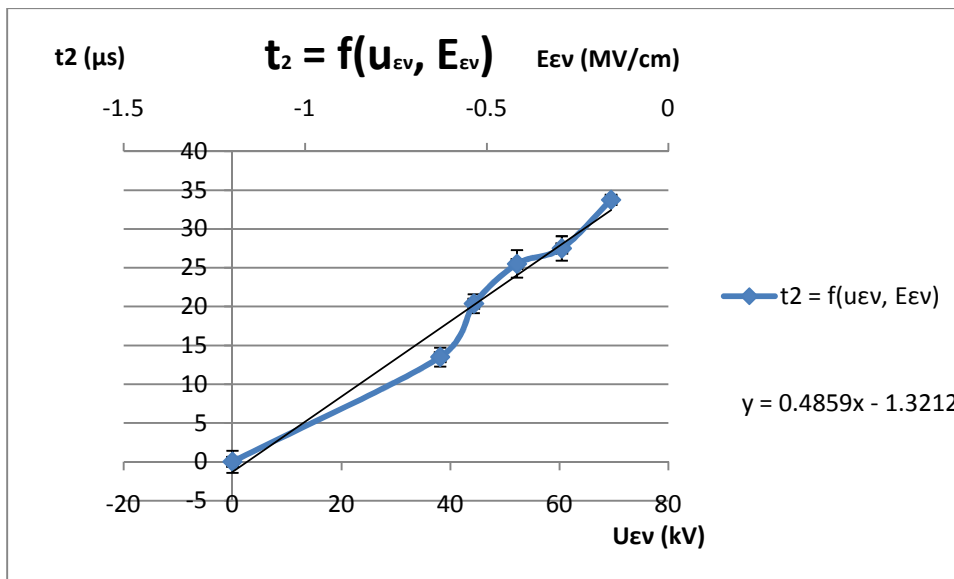
**Πίνακας 3.3.1:** Χαρακτηριστικές διάφορων μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.

### 3.4 Κρουστική τάση – 1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου $d = 2mm$ .



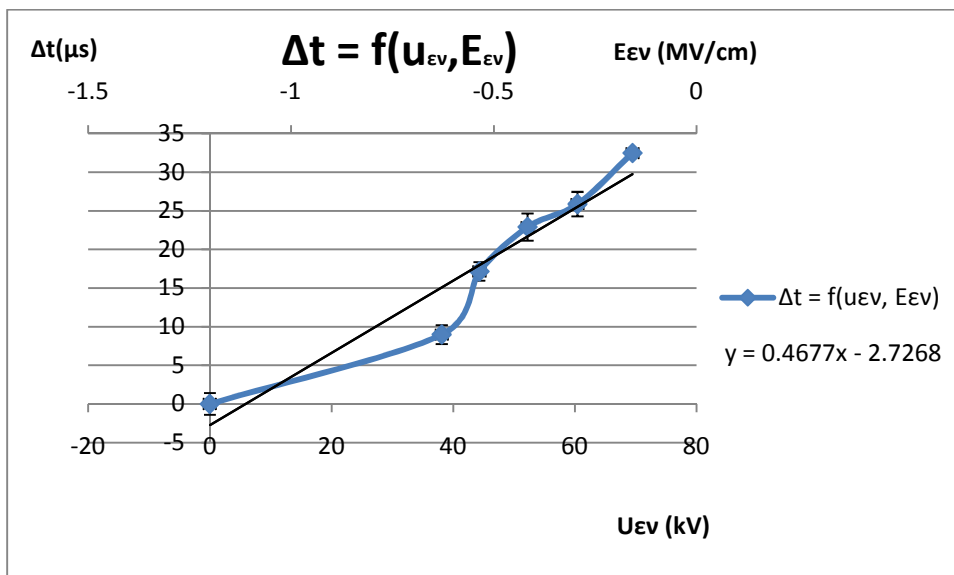
**Σχήμα 3.4-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{\epsilon\nu}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{\epsilon\nu}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και συνεπώς της τάσης του πεδίου η οποία αντιστοιχεί σε αυτήν ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μειώνεται εκθετικά. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



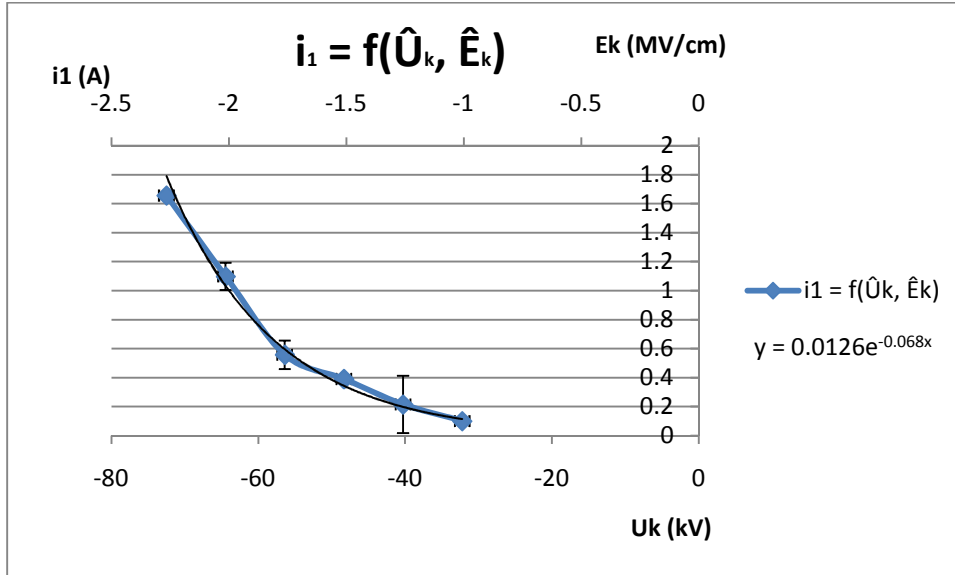
**Σχήμα 3.4-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης των εκκενώσεων ο χρόνος πέρατος αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδας – πλάκας >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται



**Σχήμα 3.4-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

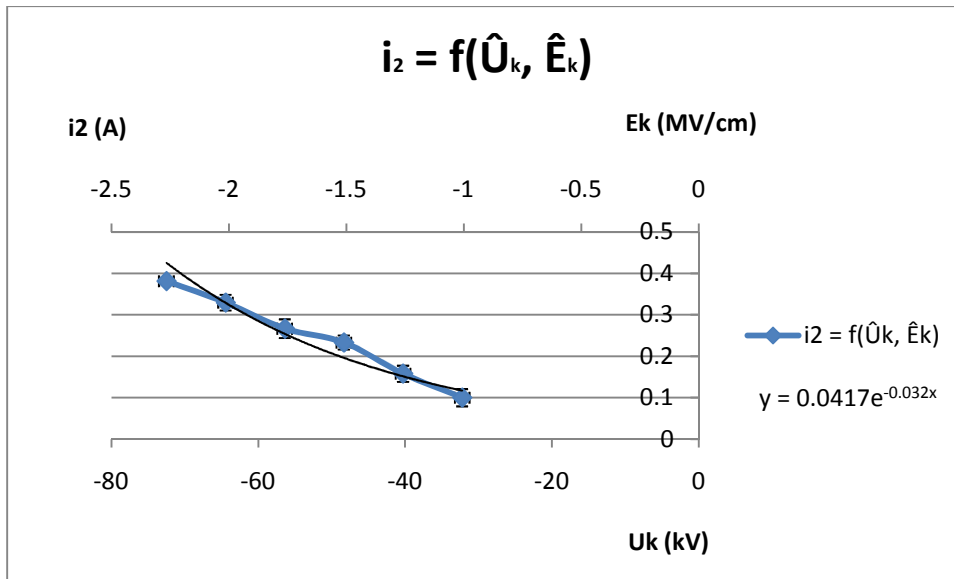
Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.



**Σχήμα 3.4-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

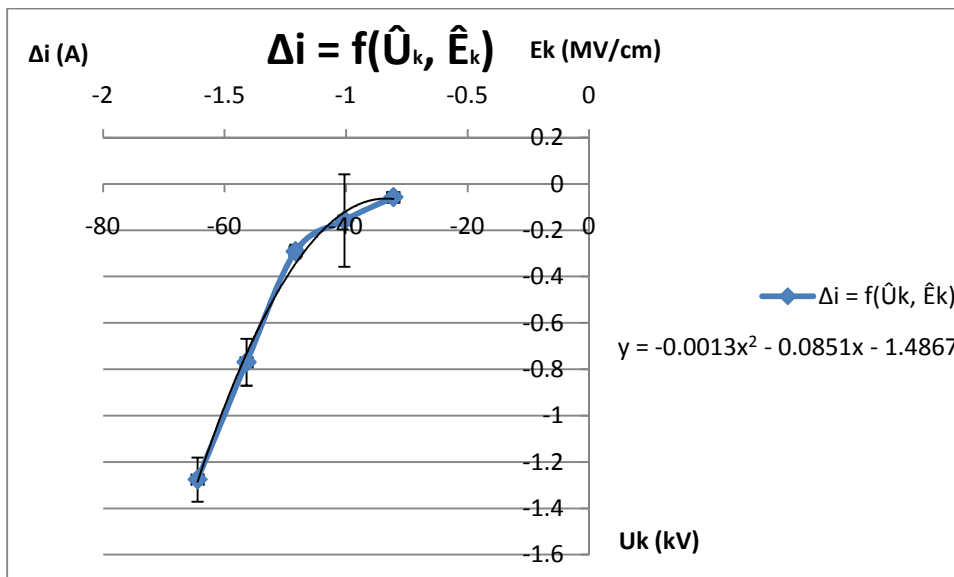
Με βάση την σχέση προσέγγισης  $Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$  καθώς και το ότι το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου προς το χρόνο αναμένουμε εκθετική αύξηση ρεύματος με την σταδιακή αύξηση της πεδιακής έντασης. Μεγαλύτερη τάση συνεπάγεται ταχύτερη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερους χρόνους και συνεπώς υψηλότερες τιμές ρευμάτων. Λόγω της αρνητικής πολικότητας της τάσης προκύπτουν και αρνητικά ρεύματα.





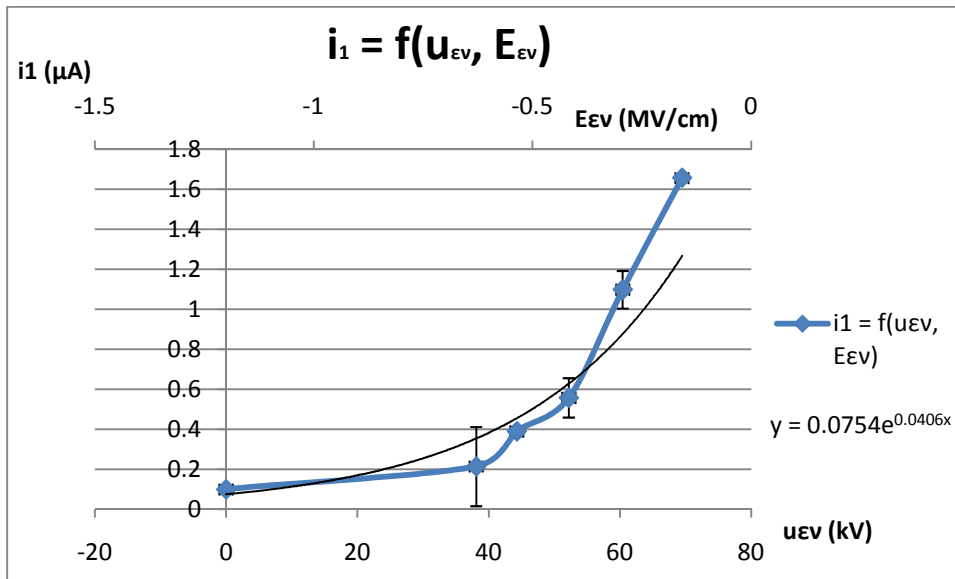
**Σχήμα 3.4-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασμα των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με την στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την εκκίνηση των μερικών εκκενώσεων το ρεύμα κατά το πέρασμα των εκκενώσεων παρουσιάζει επίσης εκθετική μορφή όπως και το φορτίο.



**Σχήμα 3.4-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

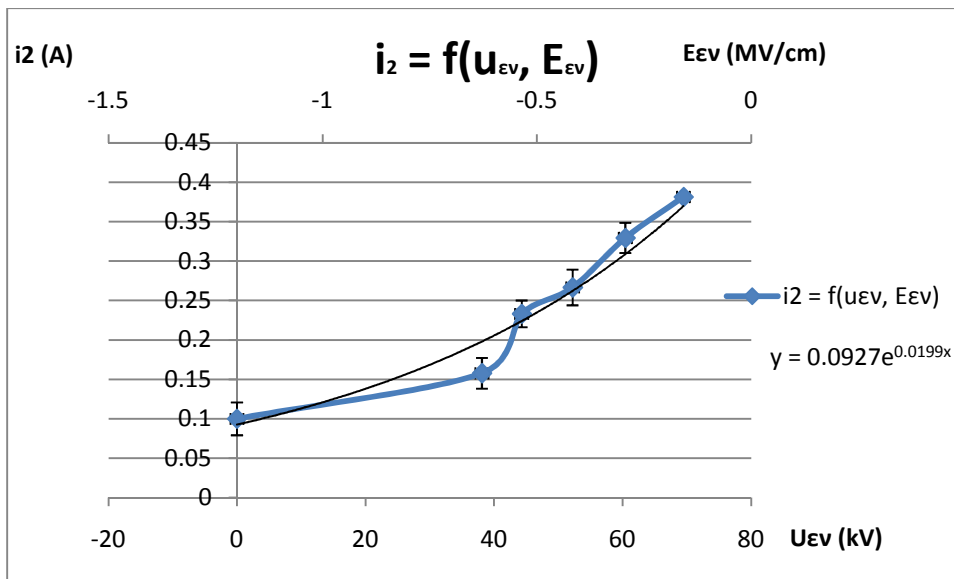
Η γραμμική αύξηση του ρεύματος υποδηλώνει την ταχύτερη αύξηση των ρευμάτων εκκινήσεως σε σχέση με τα ρεύματα πέρατος με αποτέλεσμα το ρεύμα να έχει αρνητική πολικότητα.



**Σχήμα 3.4-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά την έναρξη των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$



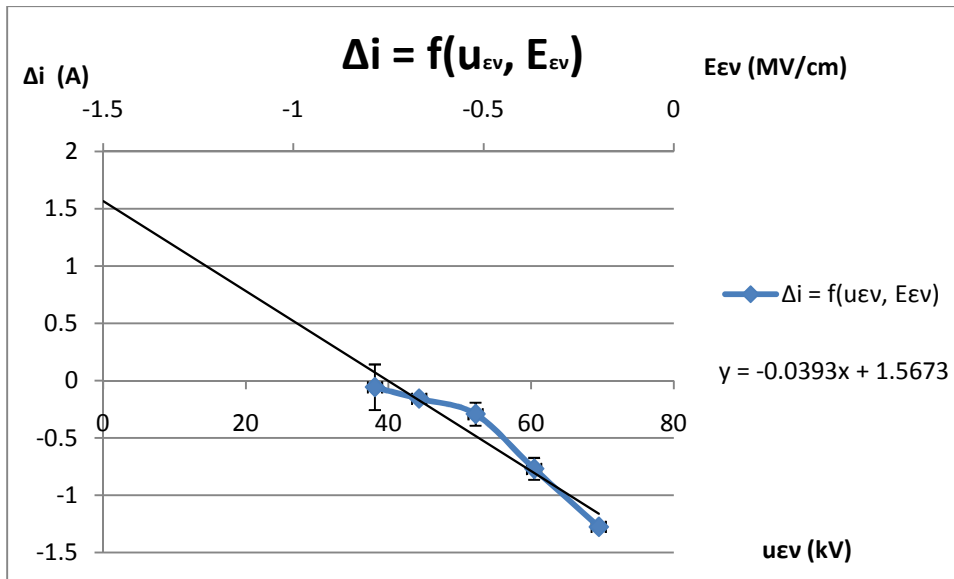
**Σχήμα 3.4-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά το πέρασ των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$

Η προκύπτουσα ανομοιομορφία στην περιοχή των 40-50kV

πιθανότατα οφείλεται σε ανομοιογένεια του μονωτικού *Pertinax* η στην καταπόνηση του από τις επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις.



**Σχήμα 3.4-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Παρατηρούμε αύξηση του ρεύματος με την ταυτόχρονη αύξηση της έντασης του πεδίου. Το ρεύμα έχει αρνητική πολικότητα κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι το ρεύμα έναρξης του φαινομένου αυξάνεται με γρηγορότερο ρυθμό από το ρεύμα πέρατος.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 20,459e^{-0,041x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,4859x - 1,3212$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,4677x - 2,7268$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0126e^{-0,068x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0417e^{-0,032x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = -0,0013x^2 - 0,0851x - 1,4867$
$i_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0754e^{0,0406x}$
$i_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0927e^{0,0199x}$
$\Delta i = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0393x + 1,5673$

**Πίνακας 3.4.1:** Χαρακτηριστικές διαφορών μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.

### 3. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.

---

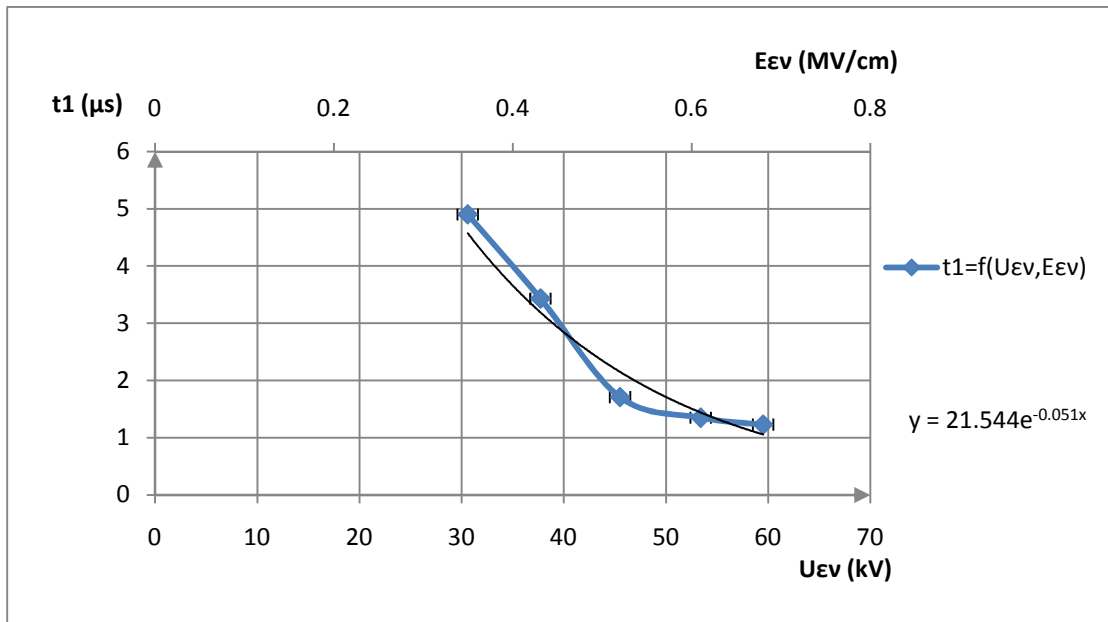
Παρατίθενται παρακάτω τα διαγράμματα με την μαθηματική τους προσέγγιση και τον σχολιασμό των χαρακτηριστικών. Στα πλαίσια της προσπάθειας επεξήγησης της συμπεριφοράς του βιομηχανικού μονωτικού Pertinax υπό καταπόνηση διαβαθμισμένων αυξανόμενων κρουστικών τάσεων θα πρέπει να αναφερθούν ορισμένες βασικές παραδοχές που αφορούν τις συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεων. Κατά πρώτον, ακριβής και απόλυτη μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού δεν είναι δυνατή καθώς το ίδιο το μονωτικό αλλά και η διάταξη επηρεάζονται από συγκεκριμένους εξωγενείς παράγοντες μη υπολογίσιμους. Αυτοί είναι :

- Μεταβολή της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των μετρήσεων.
- Υγρασία.
- Σκόνη.
- Ανομοιογένεια του υλικού.
- Απρόβλεπτα σφάλματα στην διεξαγωγή των μετρήσεων που απορρέουν από τις ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν όπως ο παλμογράφος.
- Η μορφολογία της γεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των κρουστικών τάσεων η οποία και δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα ακριβής λόγω της κατασκευής της και της λειτουργίας της κι αυτό διότι μετατρέπει εσωτερικά DC τάση σε κρουστική.

Από τους 4 βασικούς παράγοντες γήρανσης και διάτρησης, που έχουν αναφερθεί(απώλειες Joule ,δυνάμεις Coulomb, θερμοκρασία περιβάλλοντος και μερικές εκκενώσεις), πρέπει να μην συμπεριλάβουμε τη θερμοκρασία, γιατί η θερμοκρασία ήταν σχεδόν σταθερή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Επίσης δεν επιδρούν οι απώλειες Joule, διότι η χρονική διάρκεια της διάσπασης είναι μικρή και δεν προλαβαίνει να υπάρξει θερμική καταπόνηση. Επομένως οι παράγοντες με βάση τους οποίους θα ερμηνεύσουμε τις γραφικές παραστάσεις είναι οι δυνάμεις Coulomb που σχετίζονται με την μείωση του φορτίου και οι ηλεκτρικές εκκενώσεις που είναι υπεύθυνες για την αύξηση του φορτίου.

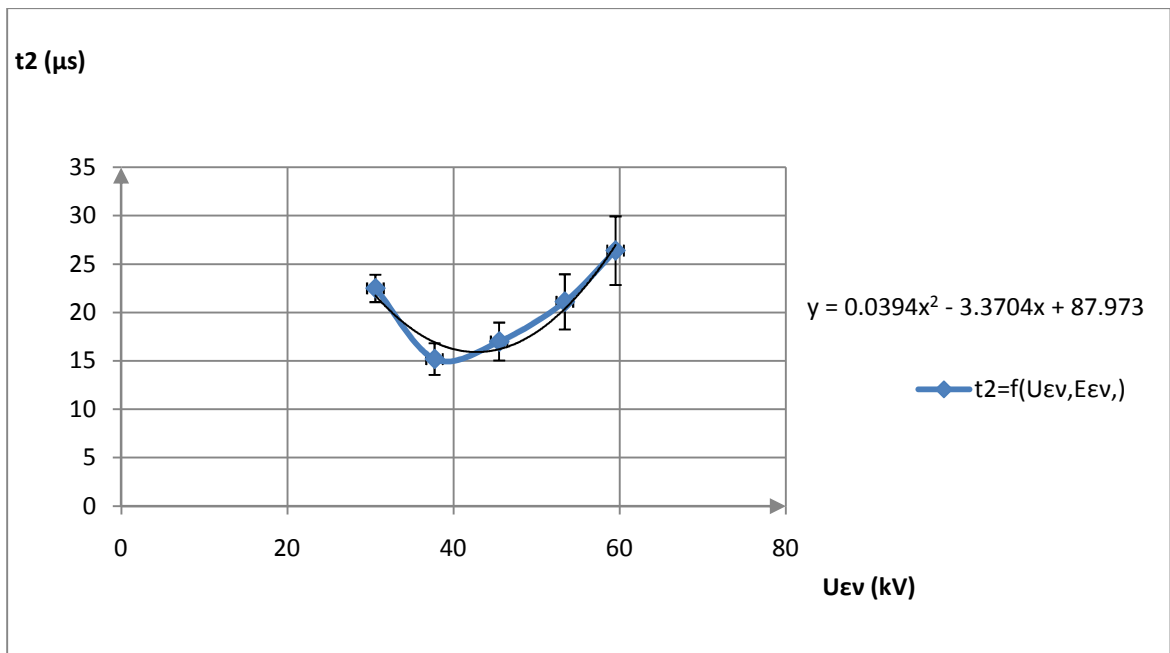
Τα δύο αυτά σημεία έρχονται να συμπληρώσουν οι δύο θεωρίες η μακροσκοπική και η κβαντομηχανική. Με την κβαντική θεωρία εξηγείται η αύξηση των φορτίων. Σύμφωνα με αυτήν η αύξηση της τάσης δημιουργεί πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ιονισμός με κρούσεις. Οι κρούσεις αυτές εξηγούν τις μεγάλες ταχύτητες των ελεύθερων ηλεκτρονίων που υπολογίστηκαν κάθε φορά και συμπεριλαμβάνονται στους προηγούμενους πίνακες. Με τον ίδιο τρόπο συνεπώς θα αυξάνονται και όλα τα μεγέθη, τα οποία είναι ανάλογα με τα μεγέθη των φορτίων. Στην επόμενη σελίδα παρατίθενται τα αποτελέσματα για κρουστική τάση:

**Κρουστική τάση + 1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .**



**Σχήμα 3.1-1 :** Χααρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax* 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

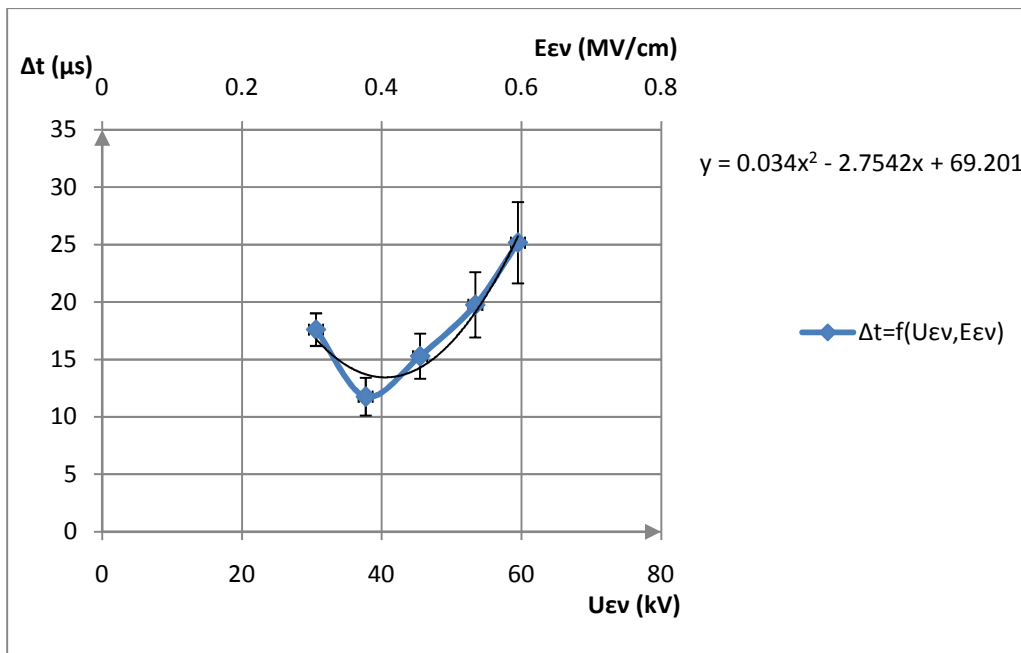
Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και συνεπώς της τάσης του πεδίου η οποία αντιστοιχεί σε αυτήν ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μειώνεται εκθετικά. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



**Σχήμα 3.1-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax* 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

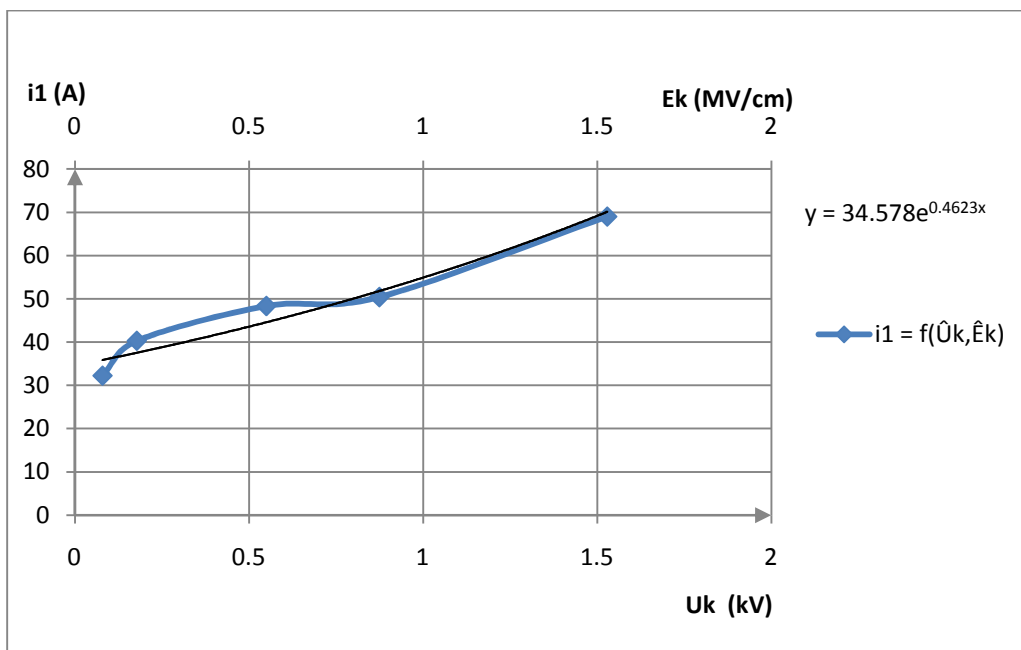
Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης των εκκενώσεων ο χρόνος πέρατος αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδα – πλάκας >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται. Η ανομοιομορφία που παρατηρείται για κρουστικές τάσεις κοντά στην περιοχή των 40kV οφείλεται στις δυνάμεις Coulomb που αντιτίθενται στην διάσπαση του *Pertinax*.





**Σχήμα 3.1-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.



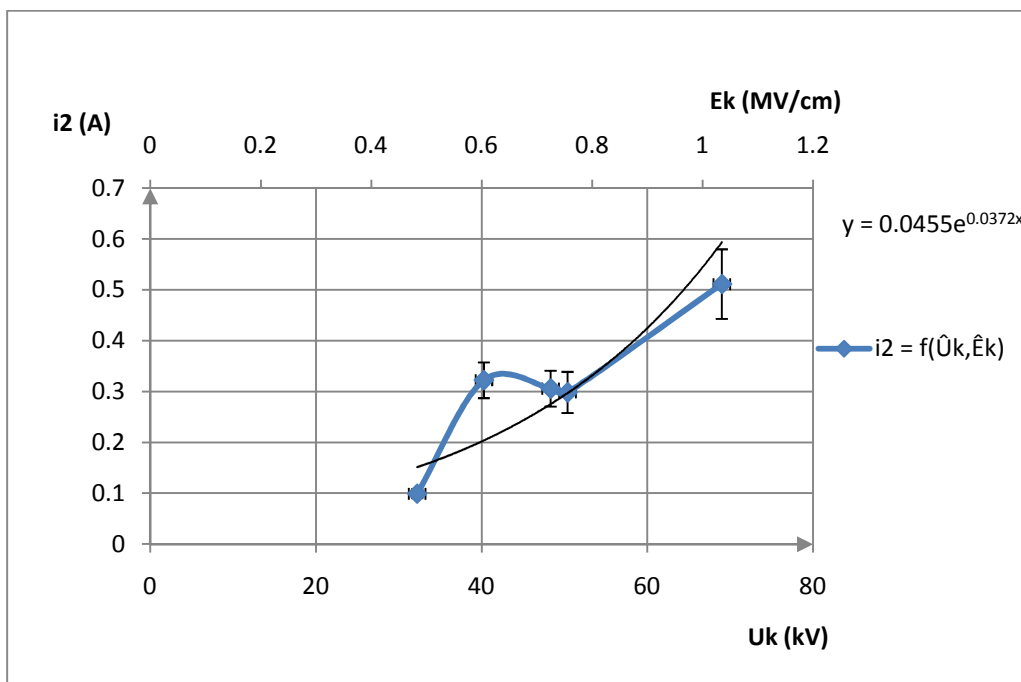
**Σχήμα 3.1-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της

αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 2 στο σκοπό της εργασίας η βασική σχέση με βάση την οποία έγινε η προσέγγιση των χαρακτηριστικών και η μαθηματική τους ερμηνεία είναι η ακόλουθη :

$$Q = Q_0 \exp \left( \frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2} \right)$$

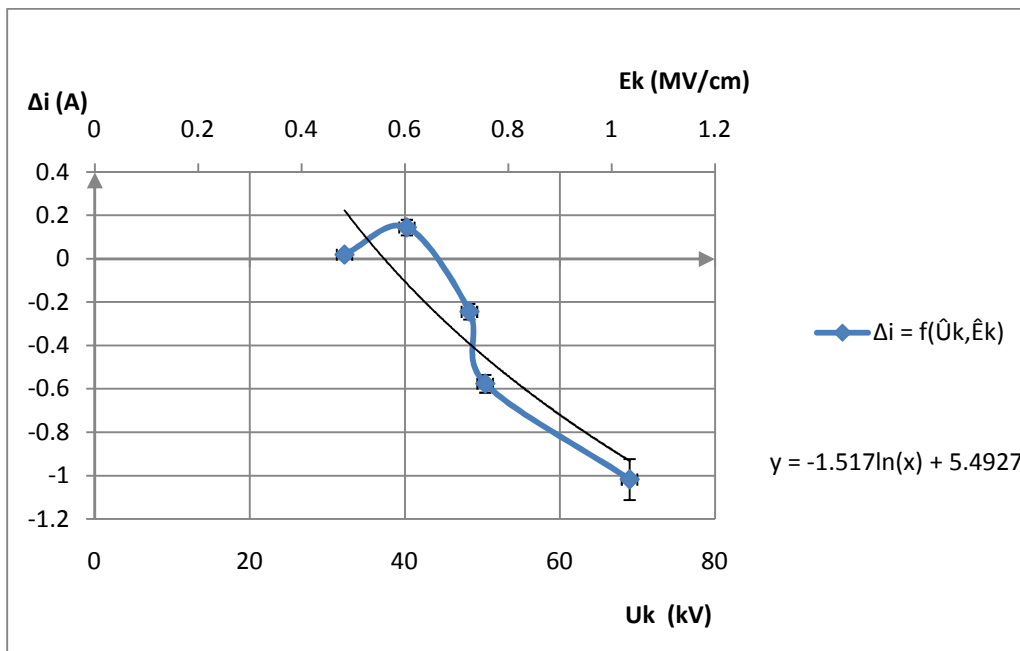
Το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο συνεπώς η αναμενόμενη μορφή της χαρακτηριστικής του θα είναι η εκθετική. Η σταθερά A της άνωθεν σχέσης αφορά το βιομηχανικό μονωτικό Pertinax και είναι χαρακτηριστική για το κάθε μονωτικό. Η παρέκκλιση της χαρακτηριστικής για κρουστικές τάσεις της κλίμακας 0,3-1 kV. πιθανότατα να οφείλεται σε ανομοιογένεια του μονωτικού ή στους άλλους εξωγενείς παράγοντες που αναφέρονται στην εισαγωγή του κεφαλαίου.



**Σχήμα 3.1-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

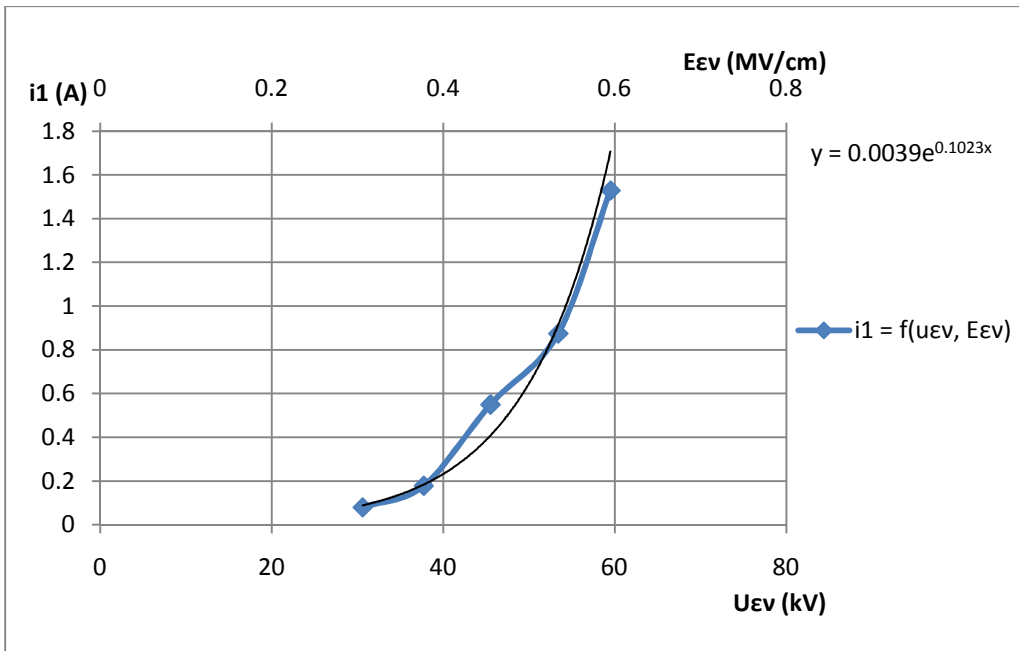
Σε αντιστοιχία με την στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την εκκίνηση των μερικών εκκενώσεων το ρεύμα κατά το πέρασ των εκκενώσεων παρουσιάζει επίσης εκθετική μορφή όπως και το φορτίο. Για κρουστικές τάσεις ανάμεσα στα 40-50 kV όπου το ρεύμα πέρατος μειώνεται γίνεται φανερή η επίδραση των δυνάμεων

Coulomb καθώς τότε η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται σε αυτές και όχι στην αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται η ένταση του ρεύματος.



**Σχήμα 3.1-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

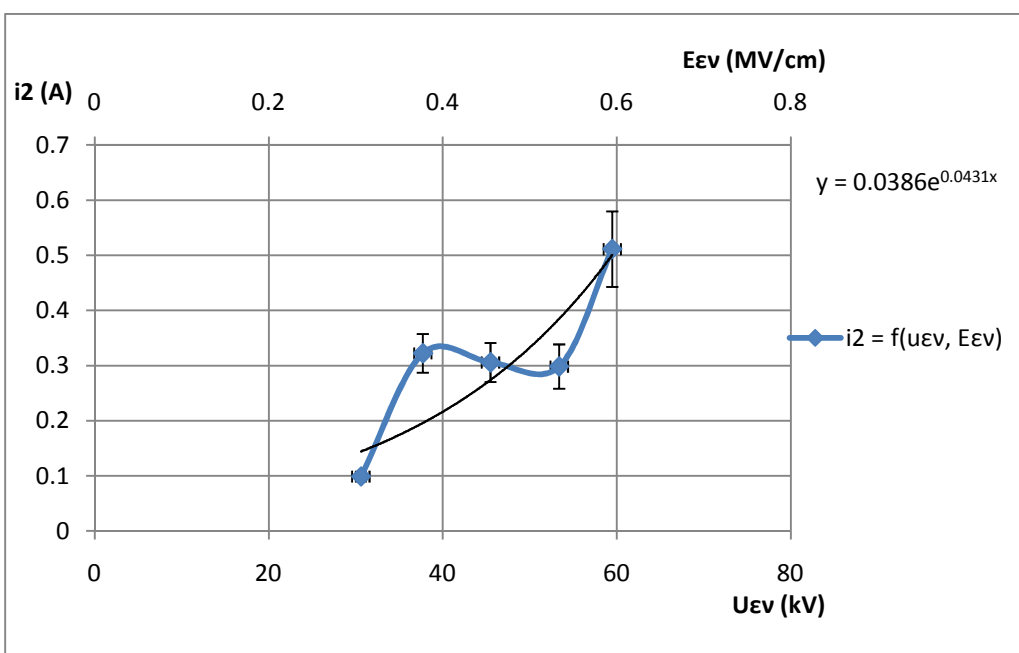
Η παράλληλη αύξηση των στιγμιαίων τιμών των ρευμάτων έναρξης και πέρατος των μερικών εκκενώσεων οδηγεί στην λογαριθμική αύξηση του ρεύματος κατά την διάρκεια του φαινομένου. Προφανώς το ρεύμα έναρξης αυξάνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς από το ρεύμα πέρατος με αποτέλεσμα την αρνητική πολικότητα. Εμφανής είναι επίσης η επίδραση των δυνάμεων Coulomb στην άνωθεν χαρακτηριστική για τιμές πεδίου κοντά στα 40kV.



**Σχήμα 3.1-7 :** Χααρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

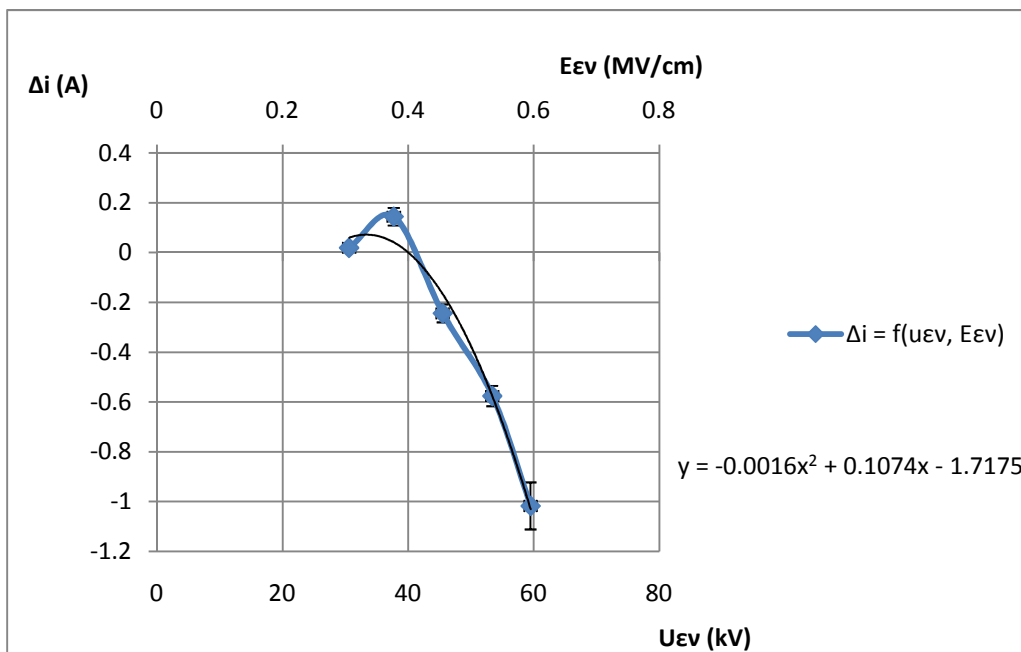
Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά το πέρας των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$



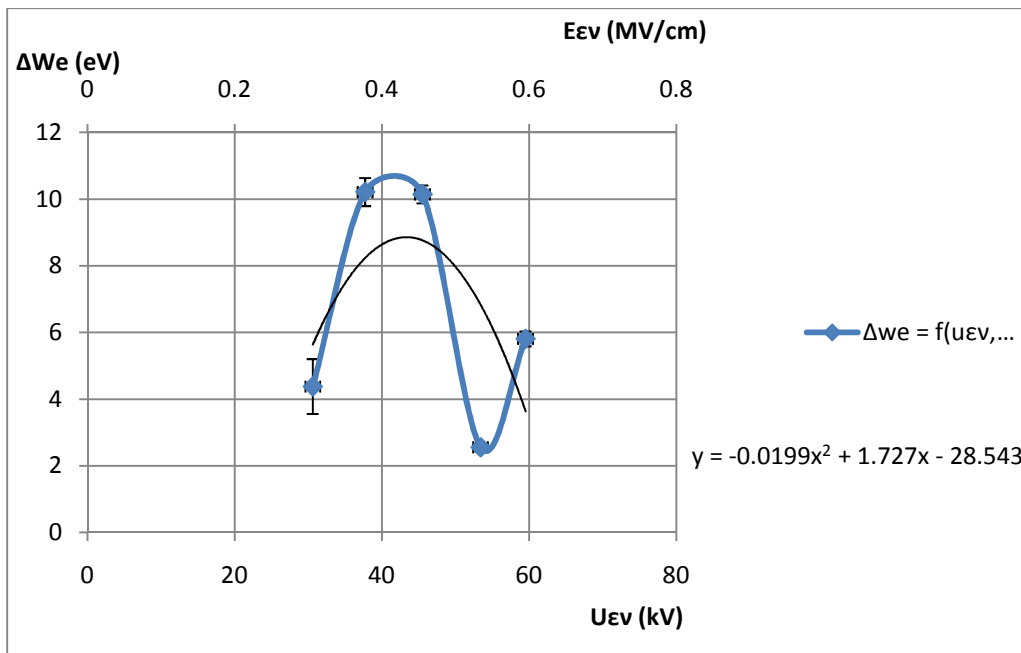
**Σχήμα 3.1-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασμα των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Τα ίδια ισχύουν και για το ρεύμα πέρατος των εκκενώσεων το οποίο αυξάνει εκθετικά. Για ενεργούς τιμές κρουστικών τάσεων κοντά στα 40 kV γίνεται φανερό το αποτέλεσμα των δυνάμεων Coulomb οι οποίες μειώνουν την πρόσκαιρα την χρονική διάρκεια των εκκενώσεων. Για πολύ υψηλές τιμές τάσεων το υλικό καταπονείται τόσο που επέρχεται ολοσχερής διάλυση του.



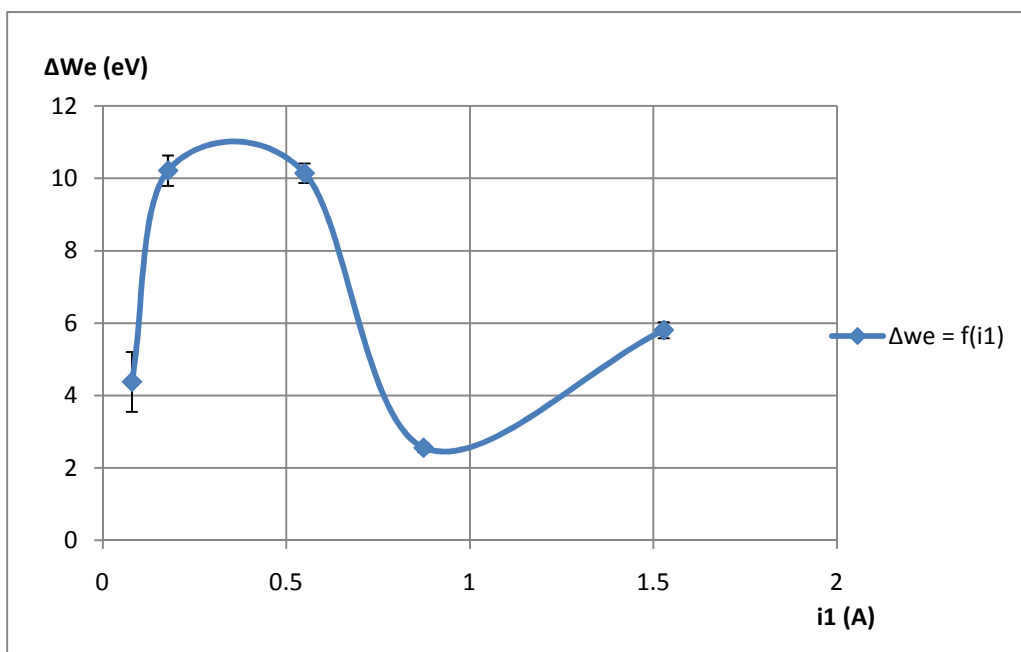
**Σχήμα 3.1-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Η παράλληλη αύξηση των στιγμιαίων τιμών των ρευμάτων έναρξης και πέρατος των μερικών εκκενώσεων οδηγεί και στην αύξηση του ρεύματος κατά την διεξαγωγή του φαινομένου πολυωνμικά. Εμφανής είναι επίσης η επίδραση των δυνάμεων Coulomb στην άνωθεν χαρακτηριστική για  $U_{εν} = 40kV$ .

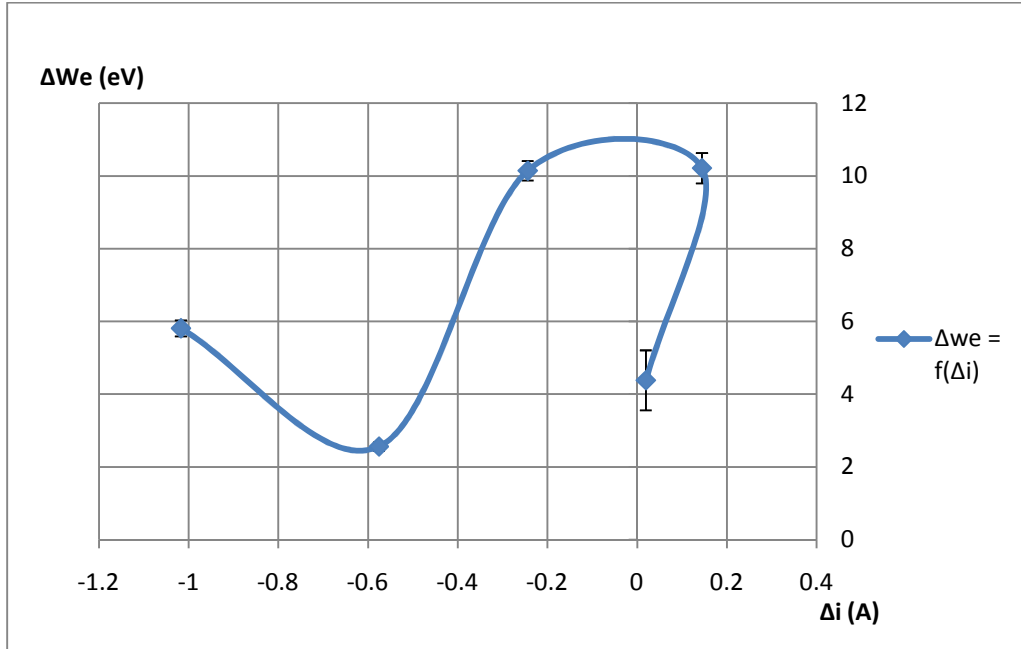


**Σχήμα 3.1-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_κ$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_κ$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

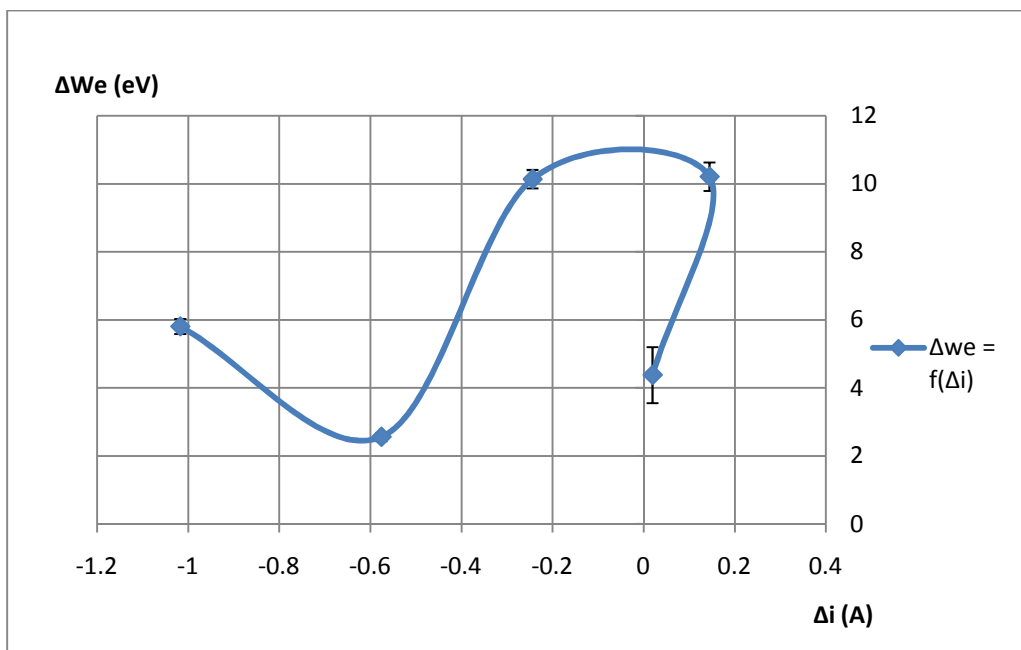
Για τιμές τάσης έως 40kV έχουμε αύξηση της ενέργειας της έναρξης των εκκενώσεων καθώς μειώνεται και ο διαθέσιμος χρόνος έναρξης της διάσπασης του μονωτικού. Από τα 40kV και μετά επιδρούν δυνάμεις Coulomb και έτσι η ενέργεια που καταναλώνεται στην διάσπαση του μονωτικού μειώνεται. Για πολύ υψηλές τιμές των τάσεων επέρχεται ολοσχερής διάλυση του Pertinax.



**Σχήμα 3.1-11 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 3.1-12 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.



**Σχήμα 3.1-13 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της τιμής του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την

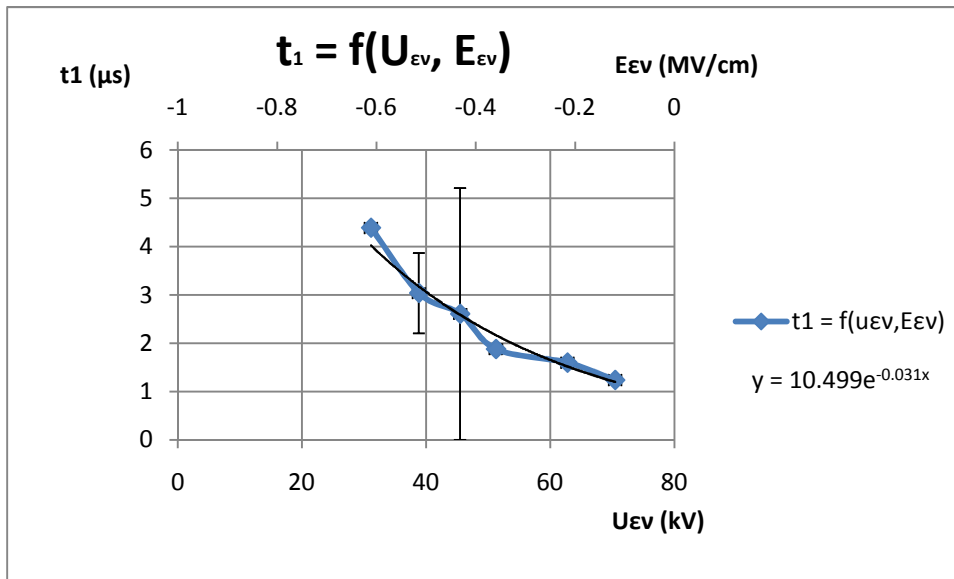
διάρκεια των μερικών εκκενώσεων, με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm  
υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 21,544e^{-0,051x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0394x^2 - 3,3704x + 87,973$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,034x^2 - 2,7542x + 69,201$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 34,578e^{0,4623x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0455e^{0,0372x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = -1,517\ln(x) + 5,4927$
$i_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0039e^{0,1023x}$
$i_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0386e^{0,0431x}$
$\Delta i = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0016x^2 + 0,1074x - 1,7175$
$\Delta We = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0199x^2 + 1,727x - 28,543$

**Πίνακας 3.1.1:** Χαρακτηριστικές διάφορων μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.

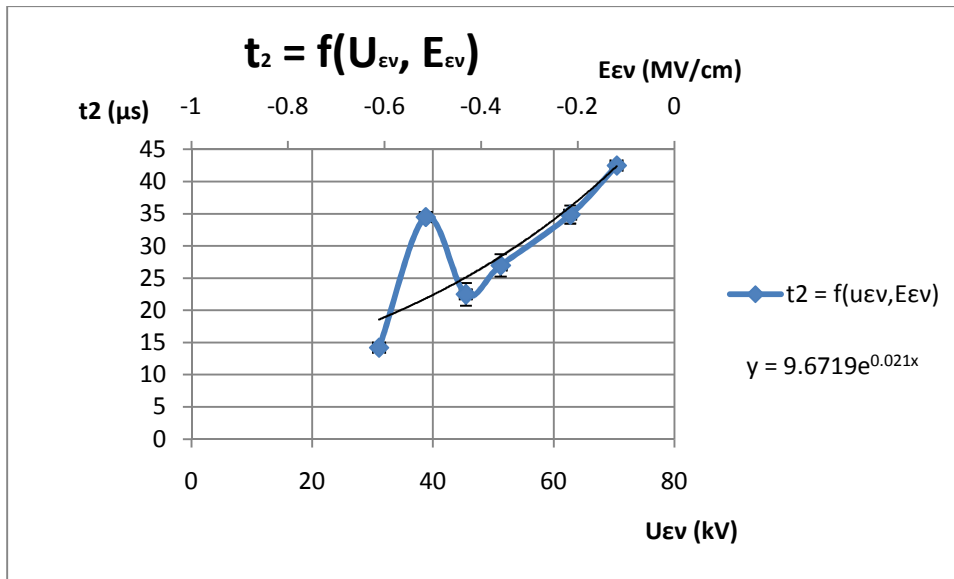


### 3.2 Κρουστική τάση $-1,2/100\mu s$ και πλάτος δοκιμίου $d = 1mm$ .



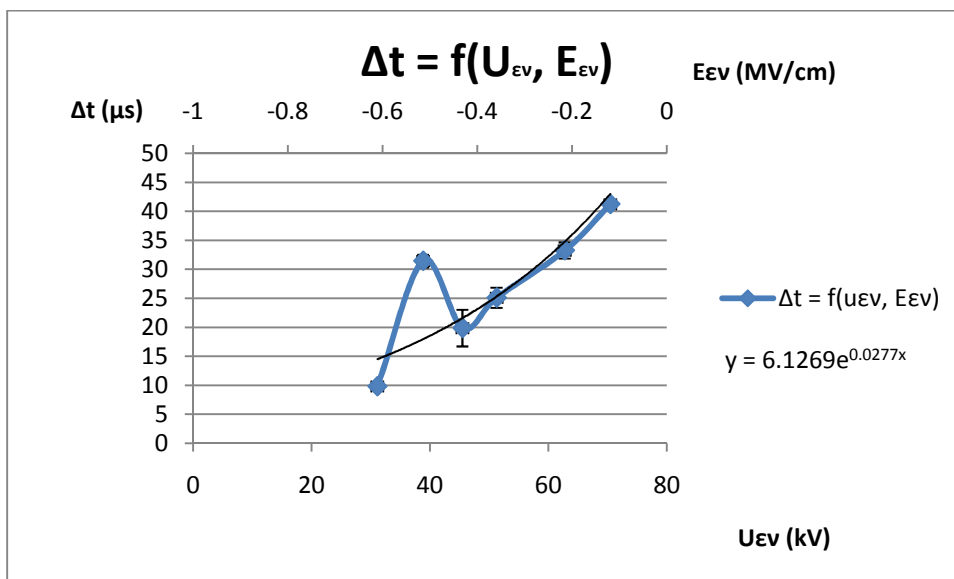
**Σχήμα 3.2-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{\epsilon\nu}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{\epsilon\nu}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax* 1mm υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Η αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και η συνακόλουθη αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου επιφέρουν εκθετική μείωση του ρεύματος έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



**Σχήμα 3.2-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

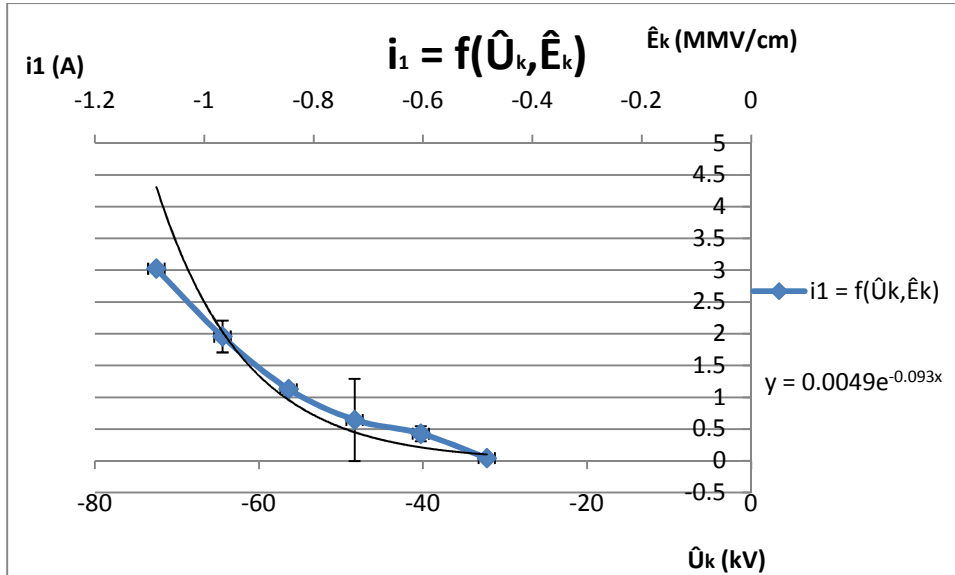
Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης ο χρόνος πέρατος των εκκενώσεων αυξάνεται εκθετικά. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδας – πλάκας >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται. Η ραγδαία αύξηση στα 40kV πιθανότατα να οφείλεται σε ανομοιομορφία του υλικού ή στην παλαίωση του λόγω της καταπόνησής του.



**Σχήμα 3.2-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της

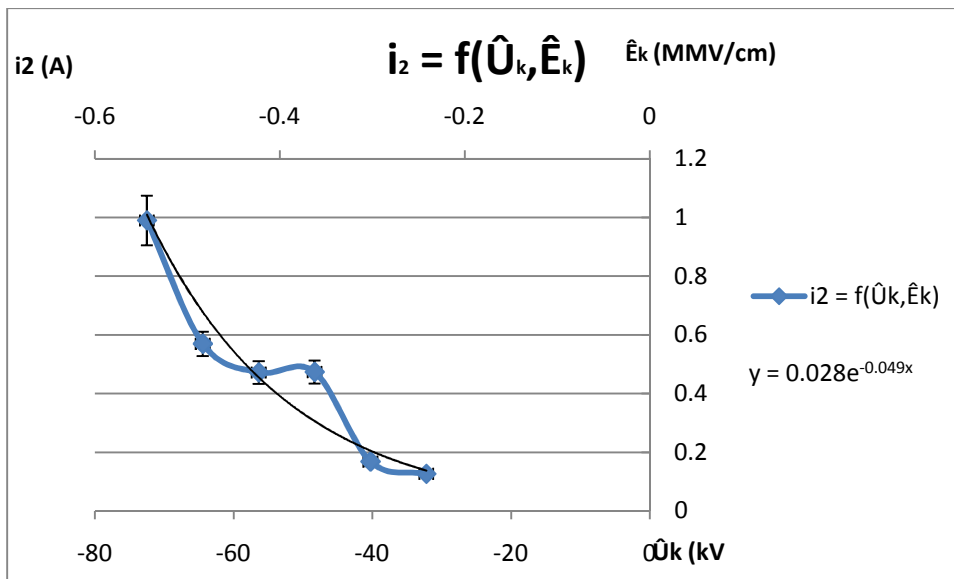
αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.



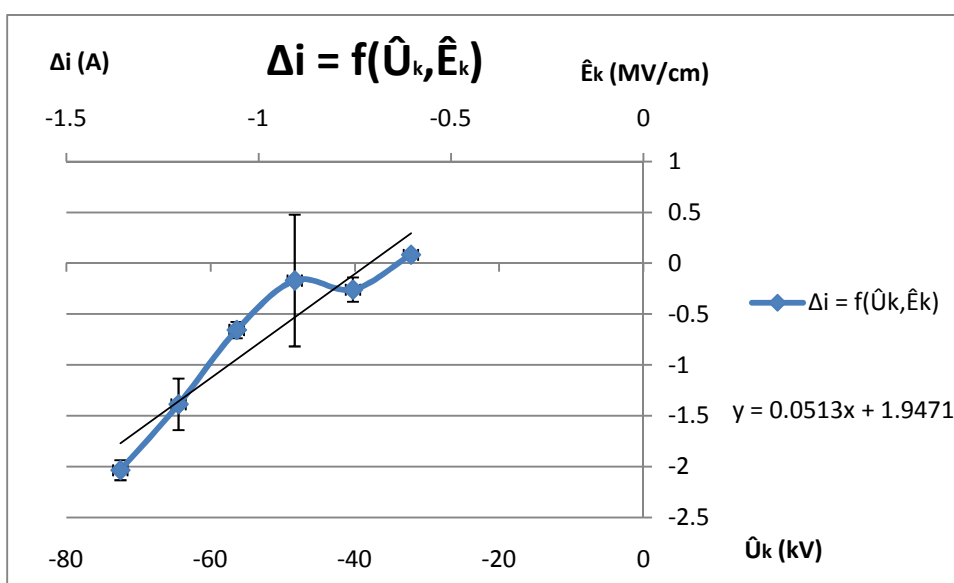
**Σχήμα 3.2-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 1mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Με βάση την σχέση προσέγγισης  $Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$  καθώς και το ότι το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου προς το χρόνο αναμένουμε εκθετική αύξηση ρεύματος με την σταδιακή αύξηση της πεδιακής έντασης. Μεγαλύτερη τάση συνεπάγεται ταχύτερη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερους χρόνους και συνεπώς υψηλότερες τιμές ρευμάτων.



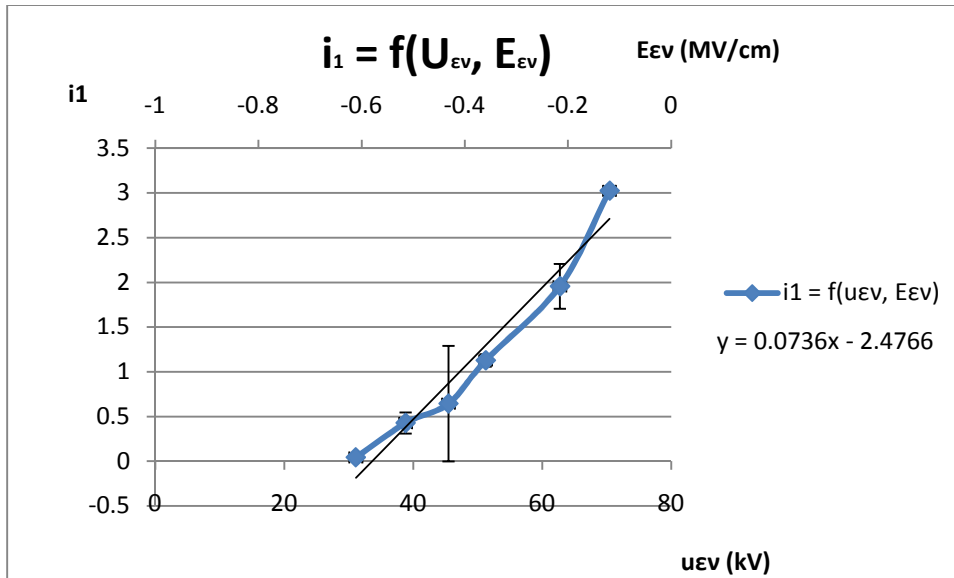
**Σχήμα 3.2-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Όπως και στα ρεύματα εκκινήσεως έτσι και για τα ρεύματα πέρατος και με βάση την σχέση  $Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$  καθώς και το ότι το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου προς το χρόνο αναμένουμε εκθετική αύξηση ρεύματος με την σταδιακή αύξηση της πεδιακής έντασης. Μεγαλύτερη τάση συνεπάγεται ταχύτερη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερους χρόνους και συνεπώς υψηλότερες τιμές ρευμάτων. Στις τιμές 50-60 kV παρατηρείται μια ελαφριά μείωση της τιμής του ρεύματος η οποία οφείλεται στις αντιτιθέμενες δυνάμεις Coulomb.



**Σχήμα 3.2-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

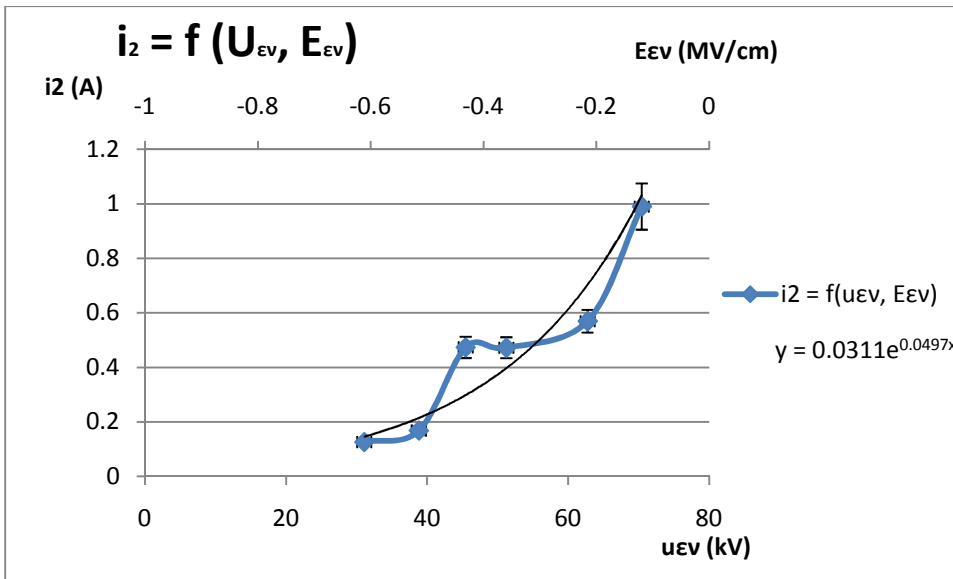
Η γραμμική αύξηση του ρεύματος υποδηλώνει την ταχύτερη αύξηση των ρευμάτων εκκινήσεως σε σχέση με τα ρεύματα πέρατος με αποτέλεσμα το ρεύμα να έχει αρνητική πολικότητα.



**Σχήμα 3.2-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά την έναρξη των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

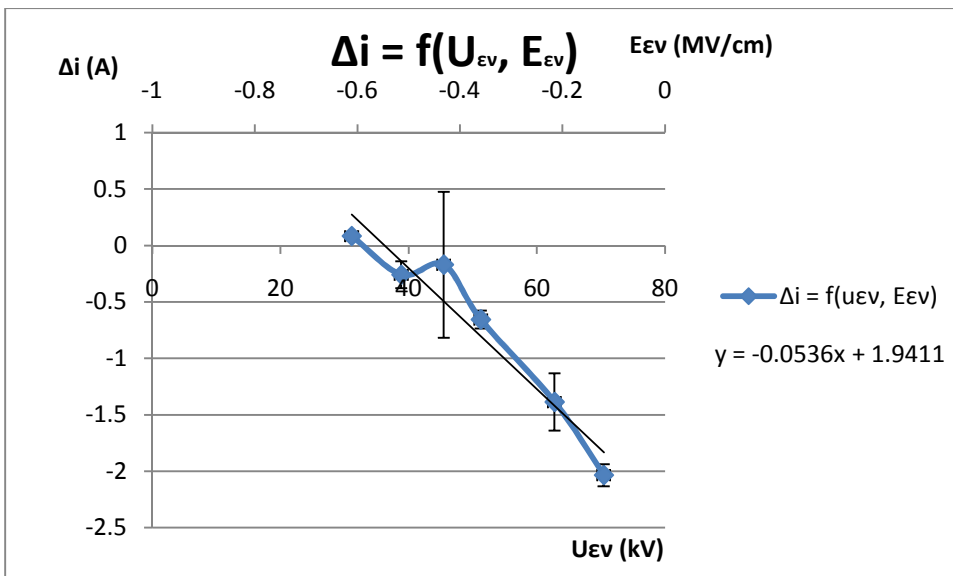
$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$



**Σχήμα 4.2-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά το πέρασ των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

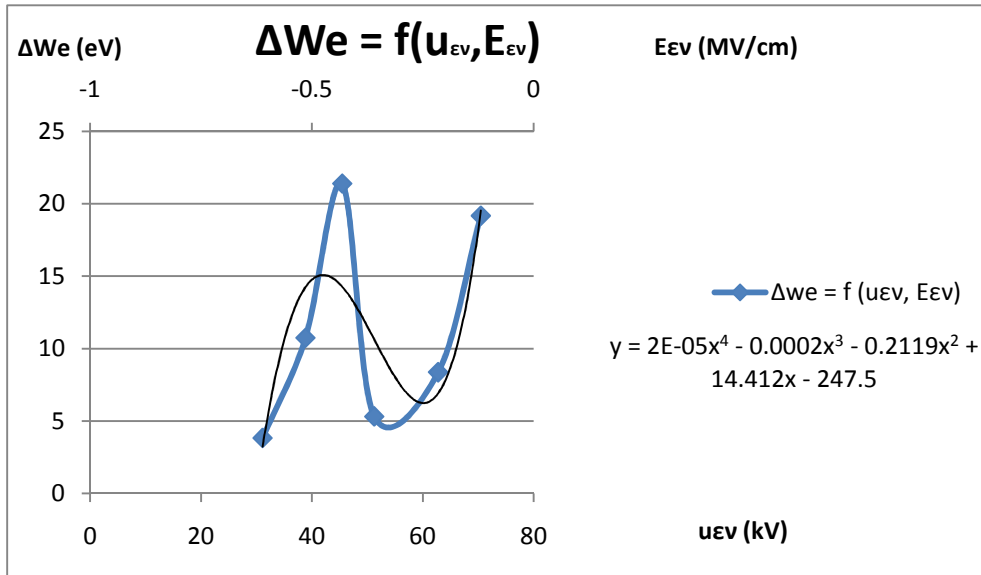
$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$ . Εμφανής είναι και η επίδραση των δυνάμεων Coulomb για ενεργούς τιμές τάσης 45-50kV.



**Σχήμα 3.2-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης

( $U_{\varepsilon\nu}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{\varepsilon\nu}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Παρατηρούμε αύξηση του ρεύματος με την ταυτόχρονη αύξηση της έντασης του πεδίου. Το ρεύμα έχει αρνητική πολικότητα κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι το ρεύμα έναρξης του φαινομένου αυξάνεται με γρηγορότερο ρυθμό από το ρεύμα πέρατος.



**Σχήμα 3.2-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 1mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

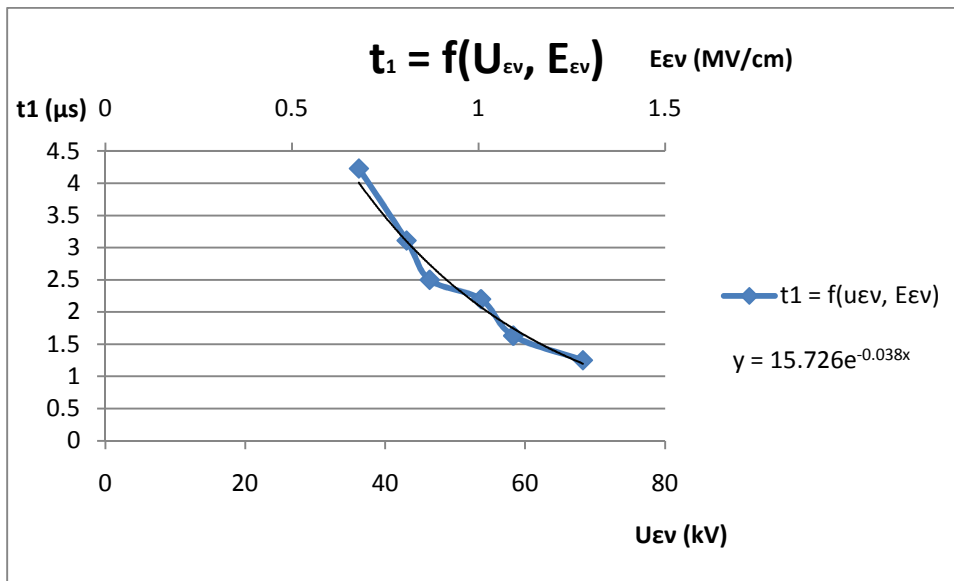
Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 10,499e^{-0,031x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 9,6719e^{0,021x}$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 6,1269e^{0,0277x}$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0049e^{-0,093x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,028e^{-0,049x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0513x + 1,9471$
$i_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0736x - 2,4766$
$i_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0311e^{0,0497x}$
$\Delta i = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0536x + 1,9411$

$\Delta We = f(U_{\varepsilon v}, E_{\varepsilon v})$	$y = 2E-05x^4 - 0,0002x^3 - 0,2119x^2 + 14,412x - 247,5$

**Πίνακας 3.2.1:** Χαρακτηριστικές διαφορών μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.

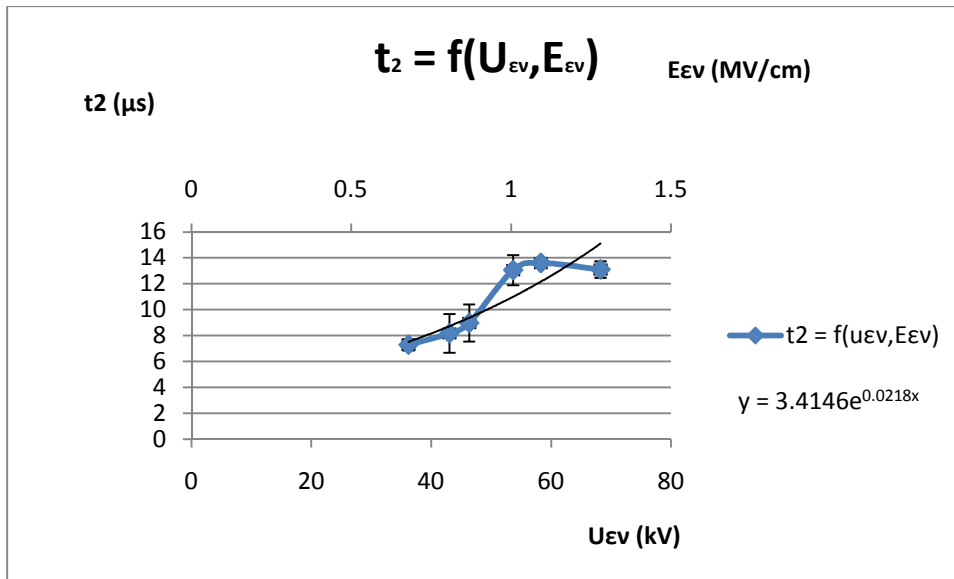
### 3.3 Κρουστική τάση + 1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου $d = 2mm$ .





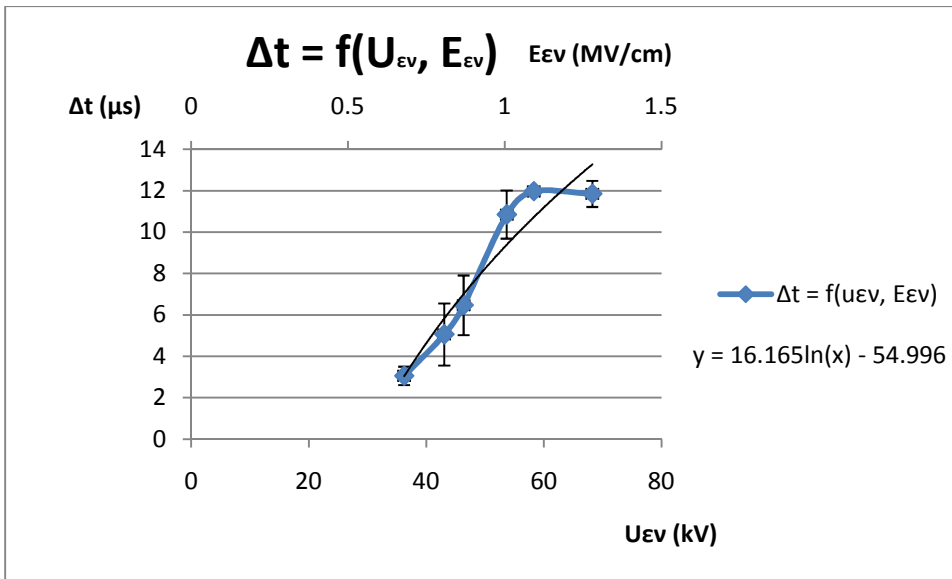
**Σχήμα 3.3-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{\epsilon\nu}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{\epsilon\nu}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και συνεπώς της τάσης του πεδίου η οποία αντιστοιχεί σε αυτήν ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μειώνεται εκθετικά. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



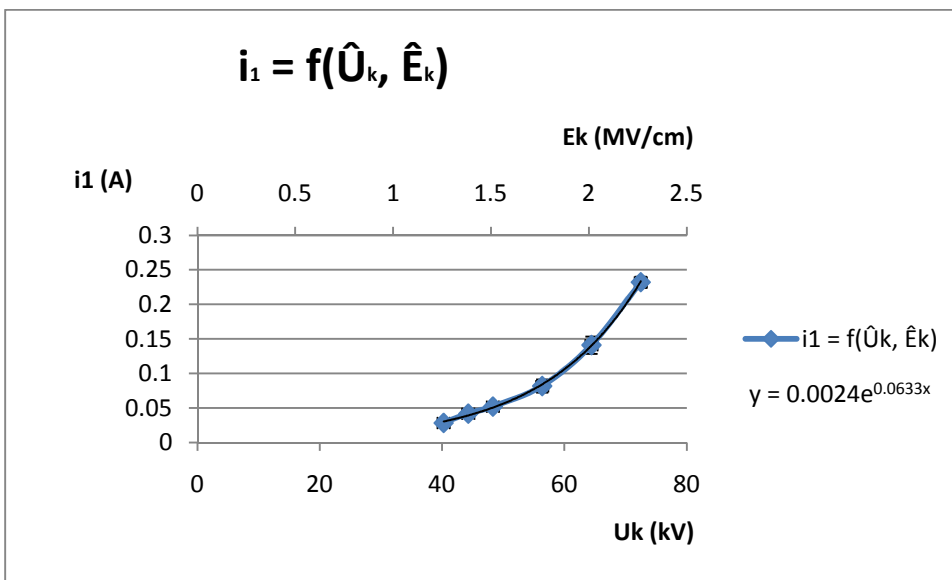
**Σχήμα 3.3-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu\text{s}$ .

Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης των εκκενώσεων ο χρόνος πέρατος αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδας – πλάκας >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται. Η ανομοιομορφία που παρατηρείται για κρουστικές τάσεις κοντά στην περιοχή των 50-70kV οφείλεται στις δυνάμεις Coulomb που αντιτίθενται στην διάσπαση του *Pertinax*.



**Σχήμα 3.3-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{EV}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{EV}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.

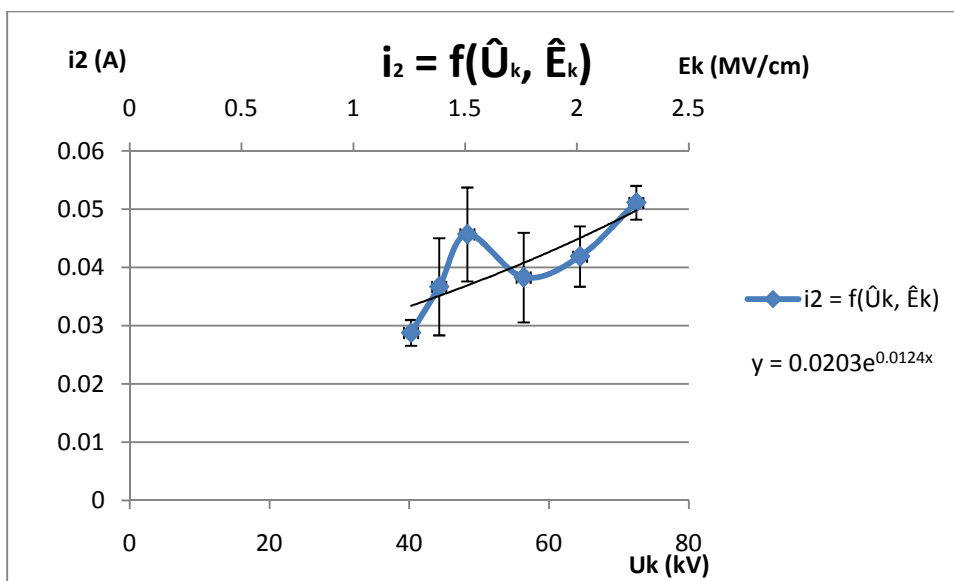


**Σχήμα 3.3-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $+1,2/100\mu s$ .

Η βασική σχέση με βάση την οποία έγινε η προσέγγιση των χαρακτηριστικών και η μαθηματική τους ερμηνεία είναι η ακόλουθη :

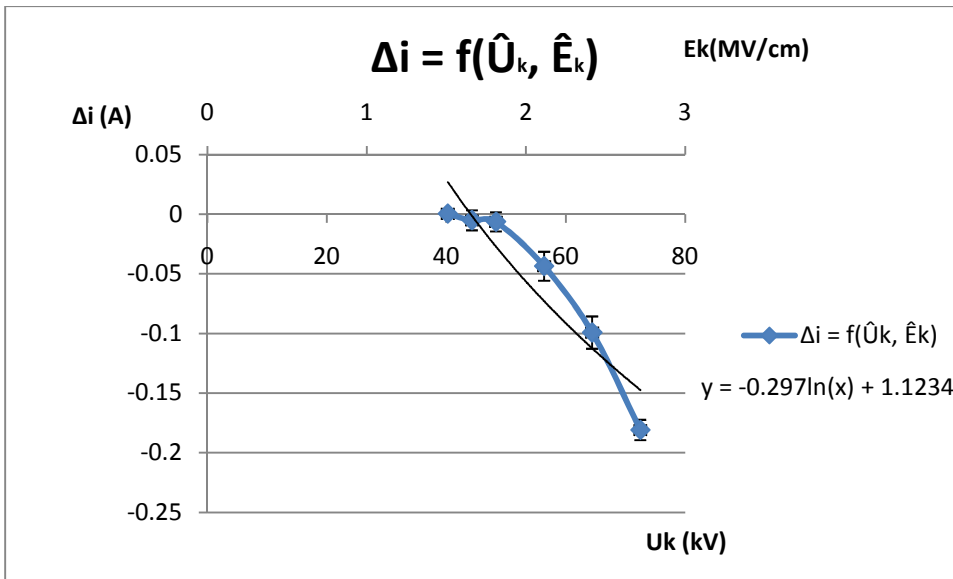
$$Q = Q_0 \exp \left( \frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2} \right)$$

Το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο συνεπώς η αναμενόμενη μορφή της χαρακτηριστικής του θα είναι η εκθετική. Η σταθερά A της άνωθεν σχέσης αφορά το βιομηχανικό μονωτικό Pertinax και είναι χαρακτηριστική για το κάθε μονωτικό. Αύξηση των τιμών των κρουστικών τάσεων οδηγεί σε εντονότερη και πιο γρήγορη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερο χρόνο. Το ρεύμα συνεπώς, το οποίο ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο, θα αυξάνεται.



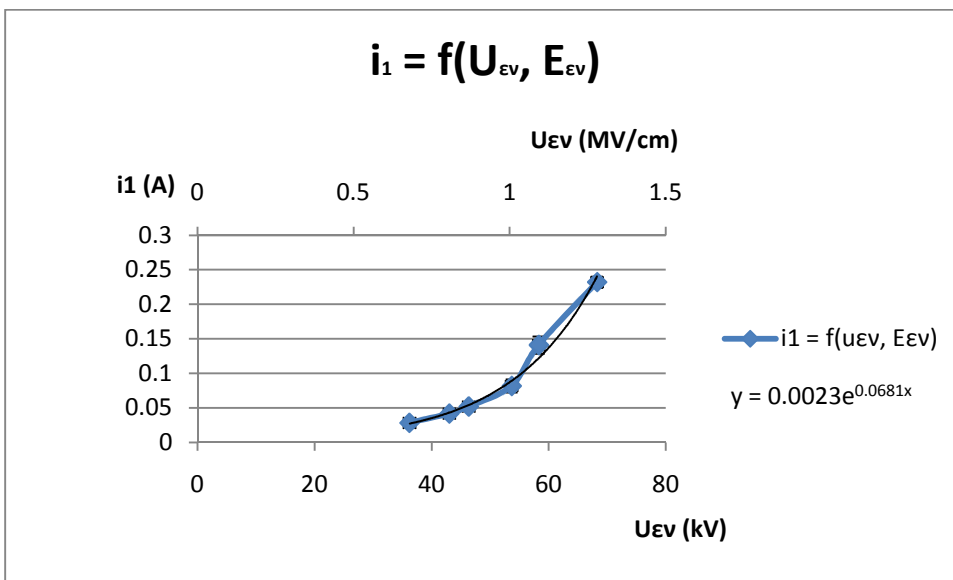
**Σχήμα 3.3-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασμα των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με την στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την εκκίνηση των μερικών εκκενώσεων το ρεύμα κατά το πέρασμα των εκκενώσεων παρουσιάζει επίσης εκθετική μορφή όπως και το φορτίο. Για κρουστικές τάσεις ανάμεσα στα 40-50 kV όπου το ρεύμα πέρατος μειώνεται γίνεται φανερό η επίδραση των δυνάμεων Coulomb καθώς τότε η ενέργεια του πεδίου καταναλώνεται σε αυτές και όχι στην αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται η ένταση του ρεύματος.



**Σχήμα 3.3-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσεως του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Παρόλη την παράλληλη αύξηση των στιγμιαίων τιμών των ρευμάτων έναρξης και πέρατος των μερικών εκκενώσεων η συνολική διάρκεια του ρεύματος κατά την διεξαγωγή του φαινομένου μειώνεται λογαριθμικά. Προφανώς το ρεύμα έναρξης αυξάνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς από το ρεύμα πέρατος. Εμφανής είναι επίσης η επίδραση των δυνάμεων Coulomb στην άνωθεν χαρακτηριστική.

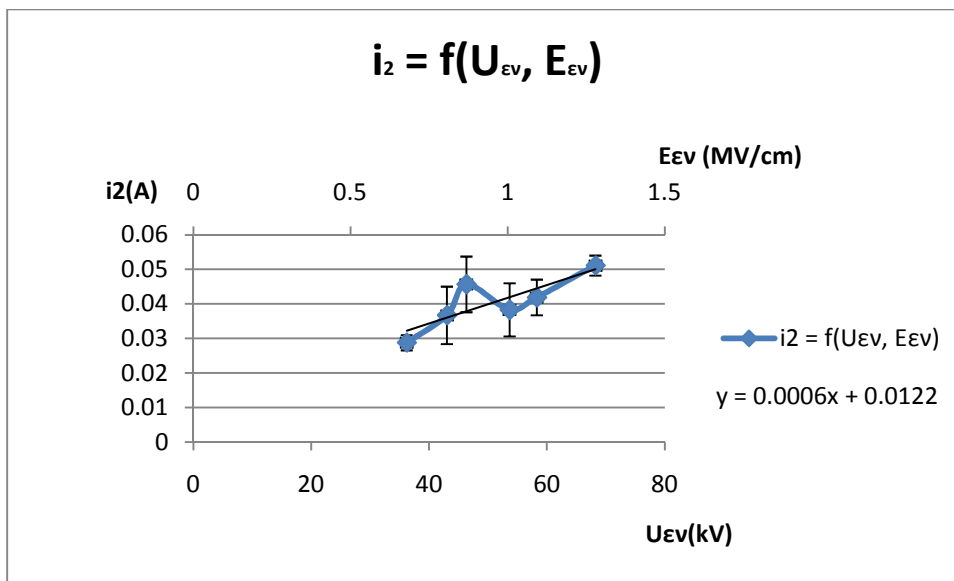


**Σχήμα 3.3-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Η βασική σχέση με βάση την οποία έγινε η προσέγγιση των χαρακτηριστικών και η μαθηματική τους ερμηνεία είναι η ακόλουθη :

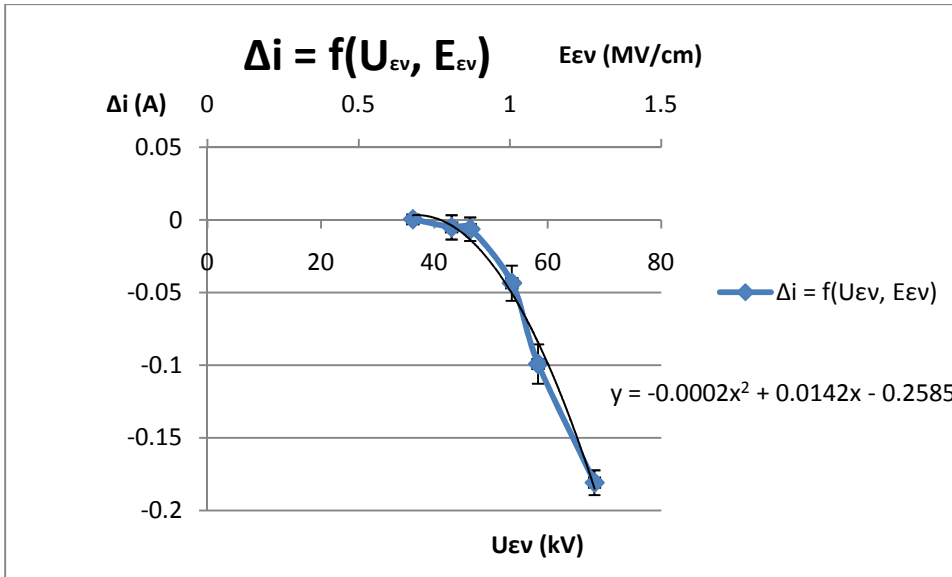
$$Q = Q_0 \exp \left( \frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2} \right)$$

Το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο συνεπώς η αναμενόμενη μορφή της χαρακτηριστικής του θα είναι η εκθετική. Η σταθερά A της άνωθεν σχέσης αφορά το βιομηχανικό μονωτικό Pertinax και είναι χαρακτηριστική για το κάθε μονωτικό. Αύξηση των τιμών των κρουστικών τάσεων οδηγεί σε εντονότερη και πιο γρήγορη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερο χρόνο. Το ρεύμα συνεπώς, το οποίο ισούται με το πηλίκο του φορτίου με το χρόνο, θα αυξάνεται.



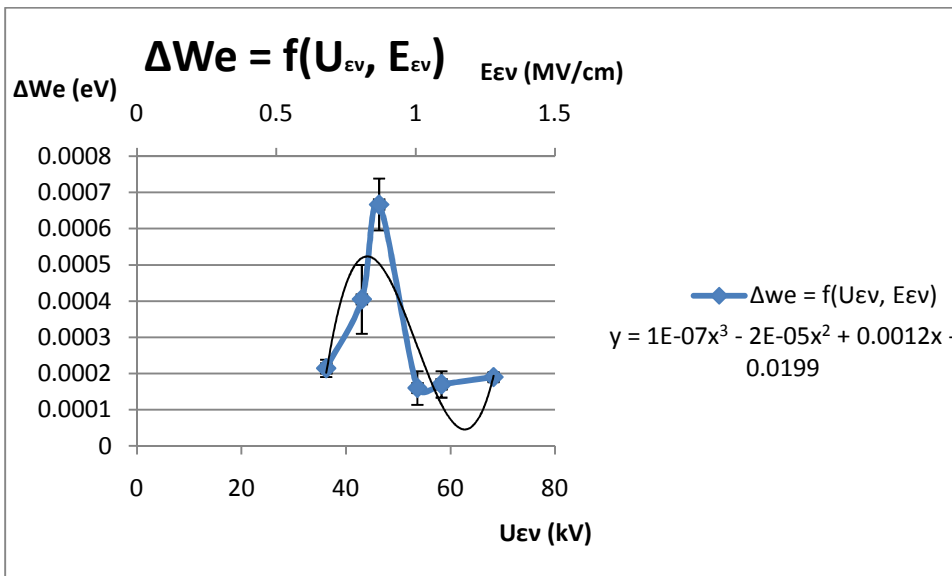
**Σχήμα 3.3-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Τα ίδια ισχύουν και για το ρεύμα πέρατος των εκκενώσεων το οποίο αυξάνει εκθετικά. Για ενεργούς τιμές κρουστικών τάσεων κοντά στα 50 kV γίνεται φανερό το αποτέλεσμα των δυνάμεων Coulomb οι οποίες μειώνουν την πρόσκαιρα το ρεύμα πέρατος των εκκενώσεων. Για πολύ υψηλές τιμές τάσεων το υλικό καταπονείται τόσο που επέρχεται ολοσχερής διάλυση του.



**Σχήμα 3.3-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{EV}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{EV}$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Η τιμή του ρεύματος κατά την διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης και παρουσιάζεται αρνητική πολικότητα ρεύματος.



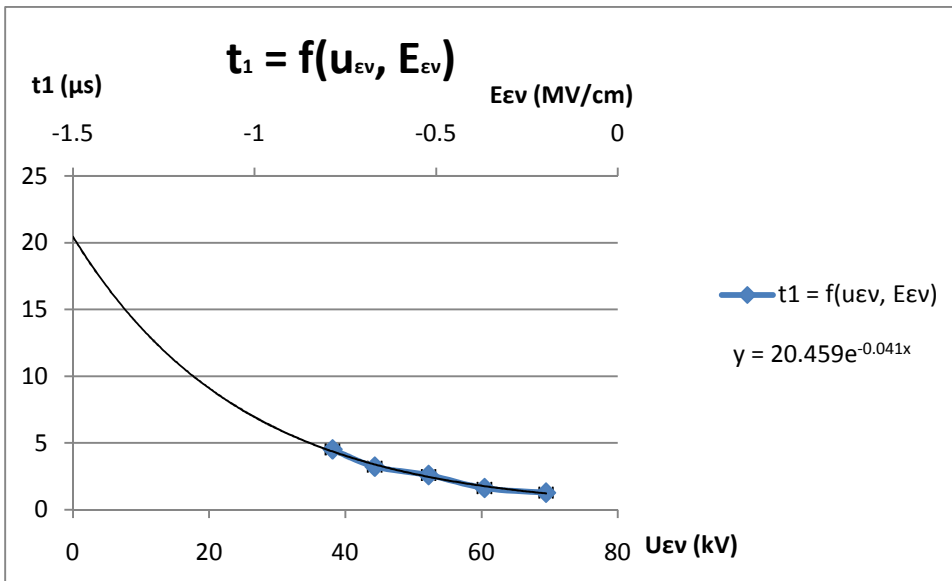
**Σχήμα 3.3-10 :** Χαρακτηριστική της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ) και της αντίστοιχης ενεργού τιμής της πεδιακής έντασης ( $\hat{E}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση +1,2/100μs.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 15,726e^{-0,038x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 3,4146e^{0,0218x}$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 16,165\ln(x) - 54,996$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0024e^{0,0633x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0203e^{0,0124x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = -0,297\ln(x) + 1,1234$
$i_1 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 0,0023e^{0,0681x}$
$i_2 = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 0,0006x + 0,0122$
$\Delta i = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = -0,0002x^2 + 0,0142x - 0,2585$
$\Delta We = f(U_{\varepsilon V}, E_{\varepsilon V})$	$y = 1E-07x^3 - 2E-05x^2 + 0,0012x - 0,0199$

**Πίνακας 3.3.1:** Χαρακτηριστικές διάφορων μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.

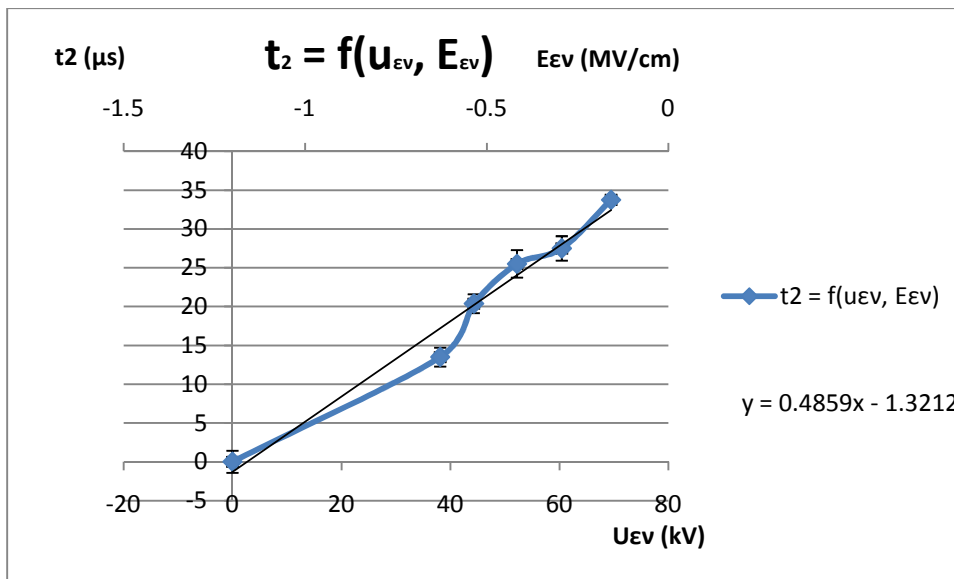


### 3.4 Κρουστική τάση – 1,2/100μs και πλάτος δοκιμίου $d = 2mm$ .



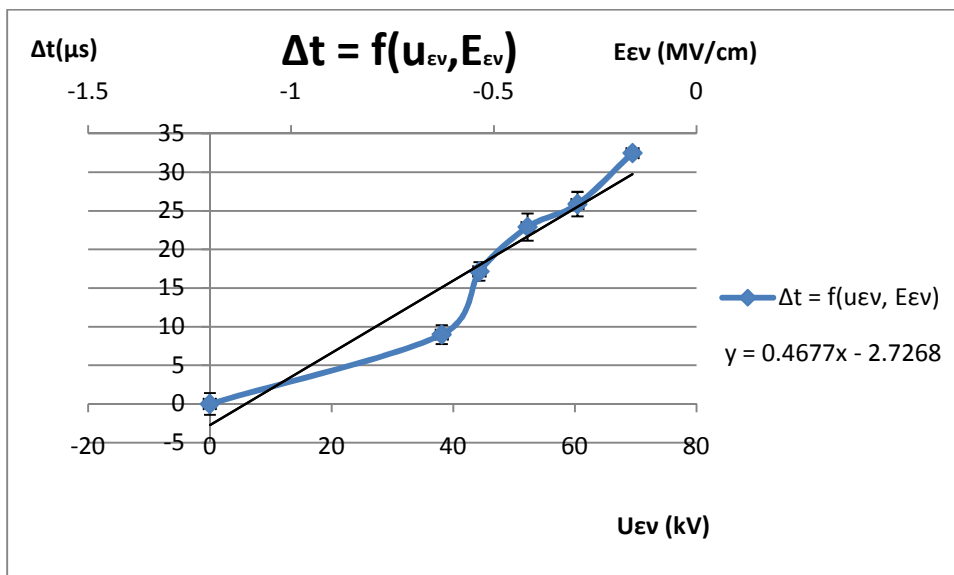
**Σχήμα 3.4-1 :** Χαρακτηριστική του χρόνου έναρξης των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{\epsilon\nu}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{\epsilon\nu}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τιμής της κρουστικής τάσης και συνεπώς της τάσης του πεδίου η οποία αντιστοιχεί σε αυτήν ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων μειώνεται εκθετικά. Η αύξηση της πεδιακής έντασης οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα ταχύτερη διάσπαση του υλικού και συνεπώς γρηγορότερη εκκίνηση των εκκενώσεων. Η σταδιακή μείωση του χρόνου έναρξης θα οδηγήσει σε μηδενισμό του όταν το υλικό καταπονηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να καταστραφεί ολοσχερώς.



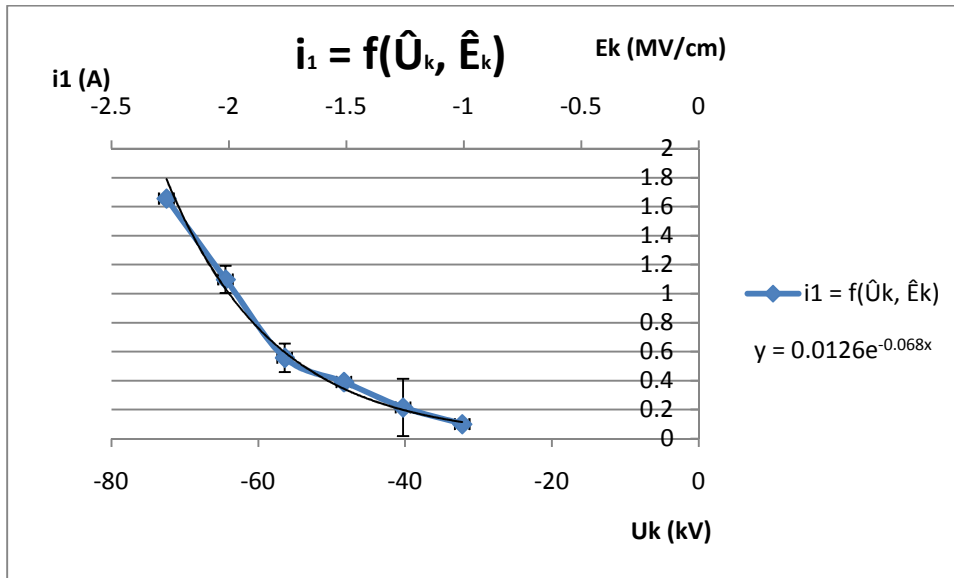
**Σχήμα 3.4-2 :** Χαρακτηριστική του χρόνου πέρατος των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Σε αντίθεση με τον χρόνο έναρξης των εκκενώσεων ο χρόνος πέρατος αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της επιβαλλόμενης κρουστικής τάσης. Μεγαλύτερη τάση επιφέρει αυξημένη ενέργεια ηλεκτρονίων και μεγαλύτερη εκπομπή αυτών στην διάταξη << ακίδας – πλάκας >> με αποτέλεσμα το μονωτικό να διασπάται ευκολότερα και για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έτσι η διάρκεια των εκκενώσεων αυξάνεται



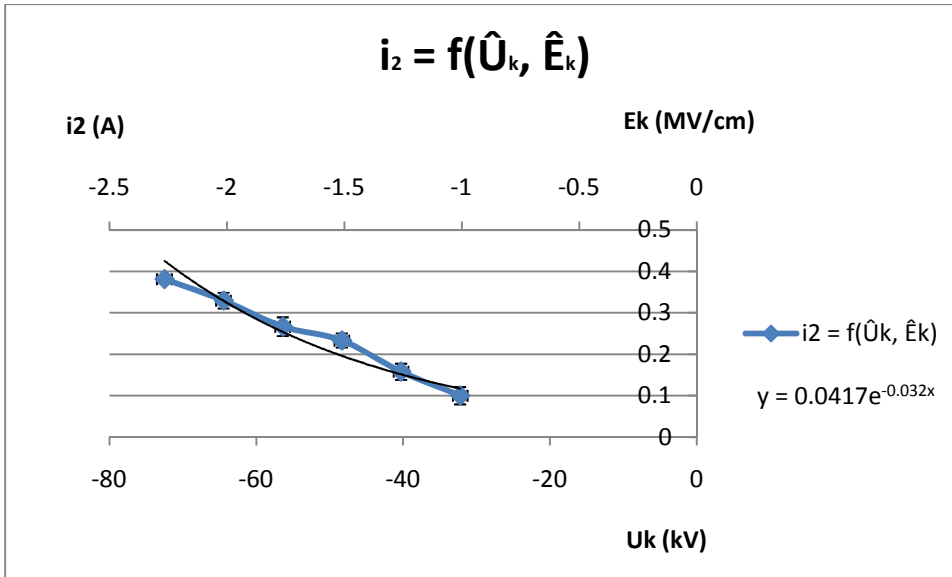
**Σχήμα 3.4-3 :** Χαρακτηριστική της χρονικής διάρκειας των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{ev}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{ev}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Στις δύο άνωθεν χαρακτηριστικές ερμηνεύτηκε η μείωση του χρόνου έναρξης και η αύξηση του χρόνου περάτωσης των μερικών εκκενώσεων. Το φυσιολογικό επαγόμενο των δύο αυτών γεγονότων είναι η αύξηση της χρονικής διάρκειας του φαινομένου όπως φαίνεται και στην χαρακτηριστική.



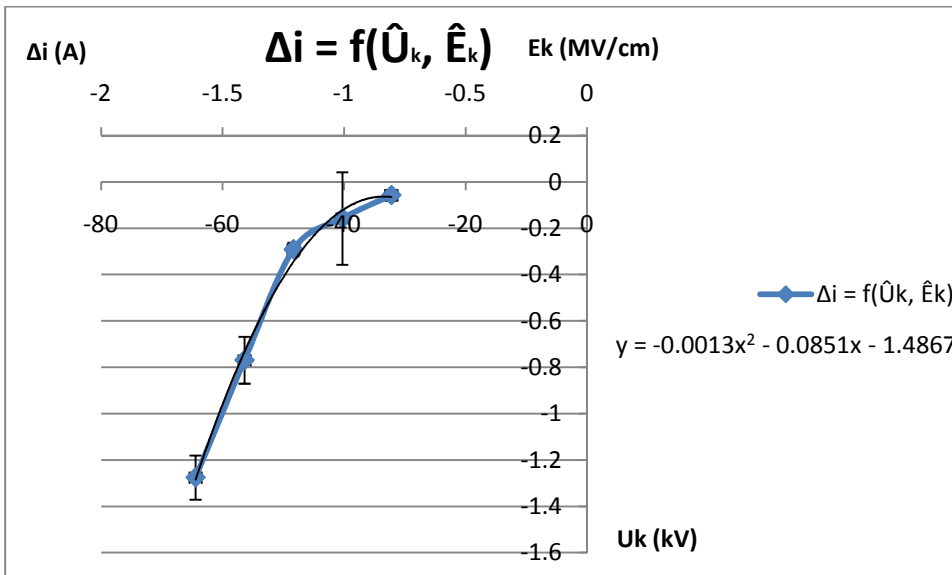
**Σχήμα 3.4-4 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Με βάση την σχέση προσέγγισης  $Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right)$  καθώς και το ότι το ρεύμα ισούται με το πηλίκο του φορτίου προς το χρόνο αναμένουμε εκθετική αύξηση ρεύματος με την σταδιακή αύξηση της πεδιακής έντασης. Μεγαλύτερη τάση συνεπάγεται ταχύτερη κίνηση των ηλεκτρονίων σε μικρότερους χρόνους και συνεπώς υψηλότερες τιμές ρευμάτων. Λόγω της αρνητικής πολικότητας της τάσης προκύπτουν και αρνητικά ρεύματα.



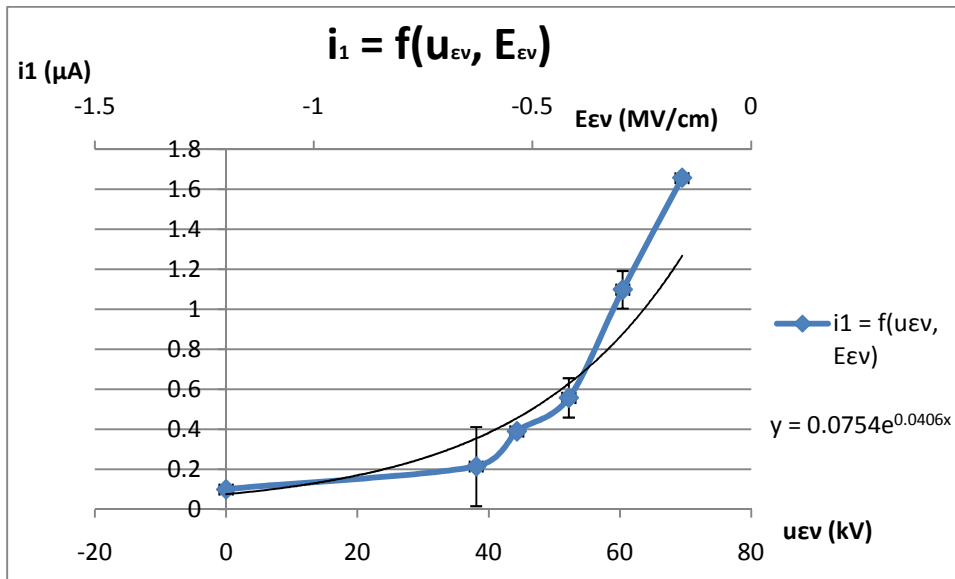
**Σχήμα 3.4-5:** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με την στιγμιαία τιμή του ρεύματος κατά την εκκίνηση των μερικών εκκενώσεων το ρεύμα κατά το πέρασ των εκκενώσεων παρουσιάζει επίσης εκθετική μορφή όπως και το φορτίο.



**Σχήμα 3.4-6:** Χαρακτηριστική του ρεύματος συναρτήσεϊ του ηλεκτρικού πεδίου ( $\hat{E}_k$ ) και της αντίστοιχης μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ( $\hat{U}_k$ ), με πάχος δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

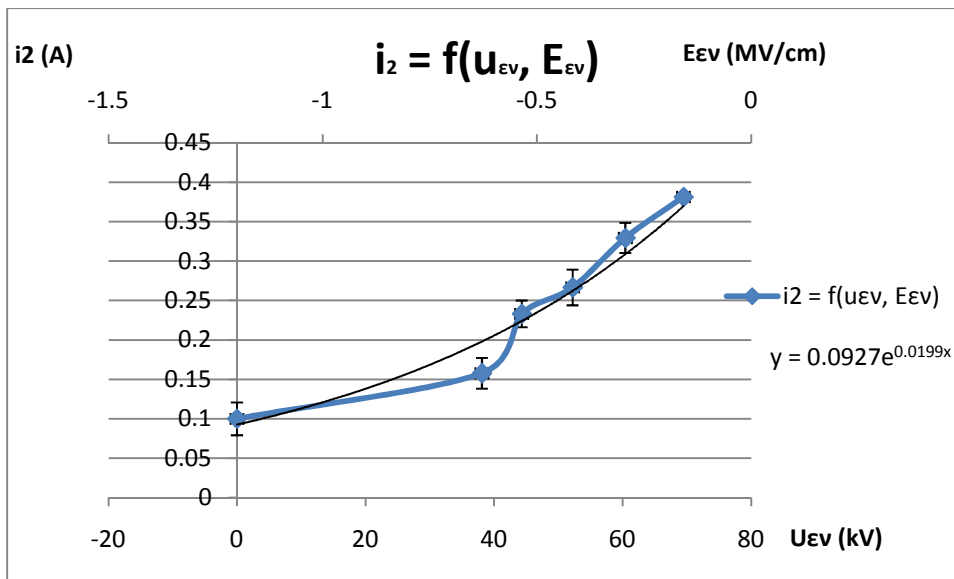
Η γραμμική αύξηση του ρεύματος υποδηλώνει την ταχύτερη αύξηση των ρευμάτων εκκινήσεως σε σχέση με τα ρεύματα πέρατος με αποτέλεσμα το ρεύμα να έχει αρνητική πολικότητα.



**Σχήμα 3.4-7 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεως της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και της πεδιακής έντασης το ρεύμα κατά την έναρξη των εκκενώσεων αυξάνεται καθώς η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξηση είναι εκθετική λόγω της επίσης εκθετικής αύξησης του φορτίου:  $Q =$

$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$



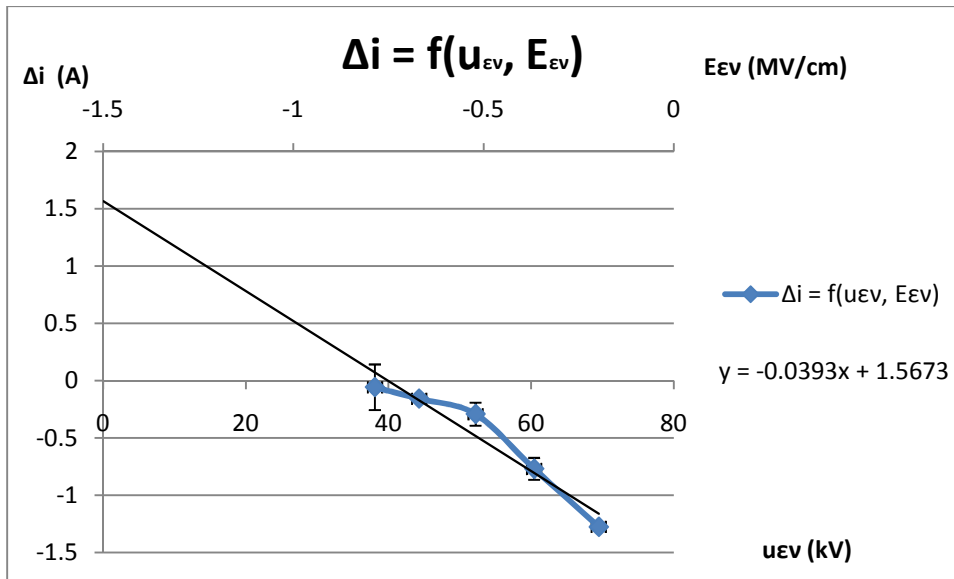
**Σχήμα 3.4-8 :** Χαρακτηριστική της στιγμιαίας τιμής ρεύματος κατά το πέρασ των μερικών εκκενώσεων συναρτήσεϊ της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσεϊ ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασεϊ ( $E_{εν}$ ), με πάχου δοκιμίου Pertinax 2mm υπό κρουστική τάση -1,2/100μs.

Σε αντιστοιχία με τις χαρακτηριστικές του ρεύματος με την μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσεϊ και της πεδιακής έντασεϊ το ρεύμα κατά το πέρασ των εκκενώσεων αυξάνεταϊ καθώσ η ενεργός τιμή των τάσεων μεγαλώνει. Η αύξεση είναι εκθετική λόγω της επίσεϊ εκθετικής αύξεσης του φορτίου:  $Q =$

$$Q_0 \exp\left(\frac{A(\hat{E}_k^2 - \hat{E}_{k0}^2)}{\hat{E}_{k0}^2}\right).$$

Η προκύπτουσα ανομοιομορφία στην περιοχή των 40-50kV

πιθανότατα οφείλεταϊ σε ανομοιογένεια του μονωτικού Pertinax η στην καταπόνηση του από τις επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεϊς.



**Σχήμα 3.4-9 :** Χαρακτηριστική της τιμής ρεύματος κατά την διάρκεια των μερικών εκκενώσεων συναρτήσει της ενεργού τιμής της κρουστικής τάσης ( $U_{εν}$ ) και της αντίστοιχης ενεργού πεδιακής έντασης ( $E_{εν}$ ), με πάχος δοκιμίου *Pertinax 2mm* υπό κρουστική τάση  $-1,2/100\mu s$ .

Παρατηρούμε αύξηση του ρεύματος με την ταυτόχρονη αύξηση της έντασης του πεδίου. Το ρεύμα έχει αρνητική πολικότητα κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι το ρεύμα έναρξης του φαινομένου αυξάνεται με γρηγορότερο ρυθμό από το ρεύμα πέρατος.

Χαρακτηριστική	Μαθηματική Σχέση
$t_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 20,459e^{-0,041x}$
$t_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,4859x - 1,3212$
$\Delta t = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,4677x - 2,7268$
$i_1 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0126e^{-0,068x}$
$i_2 = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = 0,0417e^{-0,032x}$
$\Delta i = f(\hat{U}_k, \hat{E}_k)$	$y = -0,0013x^2 - 0,0851x - 1,4867$
$i_1 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0754e^{0,0406x}$
$i_2 = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = 0,0927e^{0,0199x}$
$\Delta i = f(U_{\varepsilon\nu}, E_{\varepsilon\nu})$	$y = -0,0393x + 1,5673$

**Πίνακας 3.4.1:** Χαρακτηριστικές διαφορών μεγεθών αναλόγως της αύξησης της κρουστικής τάσης και της επιβαλλόμενης τάσης πεδίου με τις αντίστοιχες μαθηματικές προσεγγίσεις τους.