



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΤΑ
ΤΗΝ ΓΗΡΑΝΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ
ΤΑΣΕΙΣ 10 / 200 μ s**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΚΩΣΤΗΣ

Επιβλέπων: ΠΕΡΙΚΛΗΣ Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΙΟΣ 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1.Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	5
1.2. Η διάσπαση των αερίων μονωτικών.....	8
1.3 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά.....	11
1.4. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.....	13
1.4.1. Παραδείγματα εφαρμογών των στερεών μονωτικών.....	20
1.5. Το μονωτικό λάδι των μετασχηματιστών.....	23
1.5.1 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών	24
1.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ 10 / 200 μ s.....	35
3.1 Παλμογραφήματα.....	36
3.2 Μετρήσεις.....	72
3.3 Υπολογισμοί.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

Copyright © Νικόλαος Α. Κωστής, 2009.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες που αφορούν τα ηλεκτρομονωτικά υλικά. Επίσης περιγράφεται ο τρόπος, με τον οποίο γίνεται η διάσπαση σε αέρια και στερεά μονωτικά και αναλύεται σε δύο μοντέλα τα οποία όμως είναι συμπληρωματικά και ο συνδυασμός τους επεξηγεί συνολικά την όλη διαδικασία από μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής πλευράς. Επιπλέον γίνεται αναφορά σε εφαρμογές των ηλεκτρομονωτικών υλικών και στην συνεργασία διαφορετικών υλικών με σκοπό την εξέταση της διηλεκτρικής αντοχής και συνεπώς της μονωτικής ικανότητάς τους. Η τελευταία παράγραφος του κεφαλαίου δίνει μια σαφή εικόνα για τις στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας και δείχνει το πώς κάθε φυσικό μέγεθος εξαρτάται από το φορτίο και τη μεταβολή συναρτήσει αυτού, μέσα από την μαθηματική ερμηνεία του φαινομένου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται οι μετρήσεις με την επεξεργασία των μετρήσεων σε πίνακες για τέσσερις περιπτώσεις. Επί πρόσθετα μέσα από την επεξεργασία των μετρήσεων προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις μεγεθών όπως της ταχύτητας, της ενέργειας, της κινητικότητας και του αριθμού ελευθέρων ηλεκτρονίων, της συχνότητας και του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, της αύξησης της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων, της ειδικής αγωγιμότητας του δοκιμίου και της πυκνότητας ροής του ρεύματος συναρτήσει της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός που αφορά στην ανάλυση των παρατηρήσεων που έγιναν πάνω στα παλμογράφηματά έχοντας υπόψη την θεωρία, η οποία αναφέρεται και στην βιβλιογραφία.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρακάτω εισαγωγικό μέρος της εργασίας αυτής προέρχεται βασικά από εργασίες του καθηγητή μου Π. Δ. Μπούρκα που δίνονται στην βιβλιογραφία.

1.1. Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Σκοπός των μονώσεων σε μια ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς γη.

Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγωγήμη σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ. αέρας – πορσελάνη, βακελίτης - μονωτικό λάδι), τότε ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση ή υπερπήδηση.

Η διάσπαση δια του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται μερική εκκένωση. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθήσεις στην επιφάνεια του: σκόνη, υγρασία κλπ.). Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνειά του εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία Κορονα (στεμματοειδής μερικές εκκενώσεις).

Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού έχει οριστεί το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για την διάσπαση U_{dmin} προς την απόσταση των ηλεκτροδίων d σε ομογενές πεδίο:

$$E_d = \frac{U_{dmin}}{d} \quad \text{συνήθως σε } kV/cm \quad (1.1.1)$$

Η τιμή E_d είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διάφορων ηλεκτρομονωτικών (πίνακας 1-1).

Μονωτικό υλικό	d σε mm	E_d σε kV/cm
Αέρας		21
Λάδι μετασχηματιστών		60...200
Πορσελάνη	0,5...3	340...380
Στεατίτης	0,5...3	200...300
Γυαλί	<1	160...450
Χαρτόνι	0,5...1,5	300...450
Χαρτί στο λάδι	<2	200...400
Σκληρό ελαστικό	<3	300...500
Ξύλο	<3	30...50
Glimmer	0,01..0,1	500...1000

Πίνακας 1-1: Διηλεκτρική αντοχή E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz.

Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r : πίνακας 2), ο συντελεστής απωλειών ($tg\delta$) και η ειδική αγωγιμότητα σ . Για ένα ομοιογενές ηλεκτρομονωτικό υλικό σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ισχύει ότι:

$$\epsilon \times tg\delta = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times tg\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.1.2)$$

Όπου $\epsilon_0 = 8,857 \text{ pF/m}$ και ω η κυκλική συχνότητα. Στον πίνακα 3 δίνονται τιμές $\epsilon \times tg\delta$ για ορισμένα υλικά.

Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_r
Αέρας (κανονικές συνθήκες)	1,000594	Mikanit	4-6
Αέρας υγρός	1,5	Πάγος	2-3
Αποσταγμένο νερό	8	Pertinax	4,8-5,4
Βακελίτης	3,5-8,2	PVC	4-6
Condense	4-8	Plexiglas	2,6-3,5
Glimmer	4-8	Πορσελάνη	5,5-6
Γυαλί	5-16	Presspan	2,5-3,4
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2-5	Ρητίνη	2,2
Λάδι μετασχηματιστών	2-2,5	SF ₆	1,002049
Λάστιχο	2,8-6,5	Στεατίτης	6,4
Ξύλο	2,8-6,5	Χαλαζίας	3-7
		Χαρτί	1,8-26

Πίνακας 1-2: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20°C

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\epsilon \times tg\delta$
Λάδι μετασχηματιστών		0,004 – 0,046
Πορσελάνη	0,5 – 3	0,085 – 0,16
Στεατίτης	0,5 – 3	0,006 – 0,02
Γυαλί	<1	0,003 – 0,1
Χαρτόνι	0,5 – 1,5	0,01
Glimmer	0,01 – 0,1	0,009 – 0,012

Πίνακας 1-3: Τάξη μεγέθους της τιμής $\epsilon \times tg\delta$ για ορισμένα μονωτικά στους 20°C

Ένα κριτήριο αξιολόγησης για τη διηλεκτρική συμπεριφορά στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών (π.χ. από ξένες επικαθήσεις, ή από μεταβολές της επιφάνειας λόγω θερμικής καταπόνησης, κ.λπ.) είναι η επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα. Επειδή οι παράγοντες που προκαλούν την αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας των στερεών μονωτικών ποικίλουν, η επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες όπως: αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, κ.λπ.

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μηχανική αντοχή των μονωτικών υλικών, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που εξασκούνται σε αυτά (δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου και μηχανικές δυνάμεις). Στις περιπτώσεις αυτές οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τους κανόνες της αντοχής των υλικών.

Τυπικό παράδειγμα είναι η αντοχή των μονωτήρων υψηλών τάσεων σε μηχανικές και ηλεκτρικές δυνάμεις (δυναμική καταπόνηση από το ρεύμα βραχυκύκλωσης).

Στα κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών συγκαταλέγεται και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ). Ισχύει γενικά ο κανόνας ότι όσο πιο καλός μονωτής είναι ένα υλικό τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες.

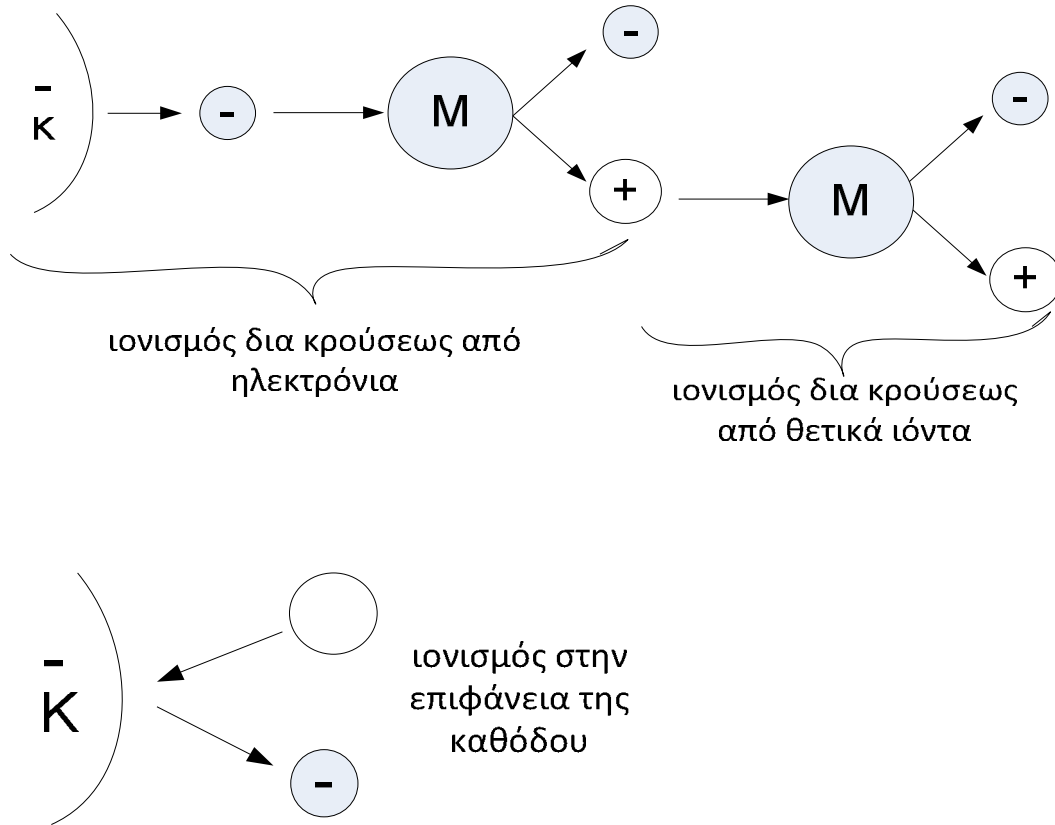
Στον πίνακα 1-4 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για ορισμένα μονωτικά υλικά.

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	λ σε W cm/ cm ² grad
Πορσελάνη	0,5 – 3	0,008 – 0,015
Στεατίτης	0,5 – 3	0,02 – 0,026
Γυαλί	< 1	0,0075 – 0,012
Ξύλο	< 3	0,001 – 0,002
Χαρτόνι	0,3 – 1,5	0,003
Σκληρό ελαστικό	< 3	0,001
Glimmer	< 0,5	0,003
Χαρτί στο λάδι	< 2	0,014 – 0,03

Πίνακας 1-4: Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων μονωτικών υλικών

1.2. Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Η διάσπαση των αερίων για μικρά διάκενα ερμηνεύεται από τη θεωρία Thowsend και τον νόμο του Paschen. Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη θεωρία Thowsend δίνεται στο σχήμα 1.2-1.



Σχήμα 1.2-1: Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις r κατά την θεωρία Thowsend. K: κάθοδος, - : ηλεκτρόνιο, + : θετικό ιόν, M: μόριο.

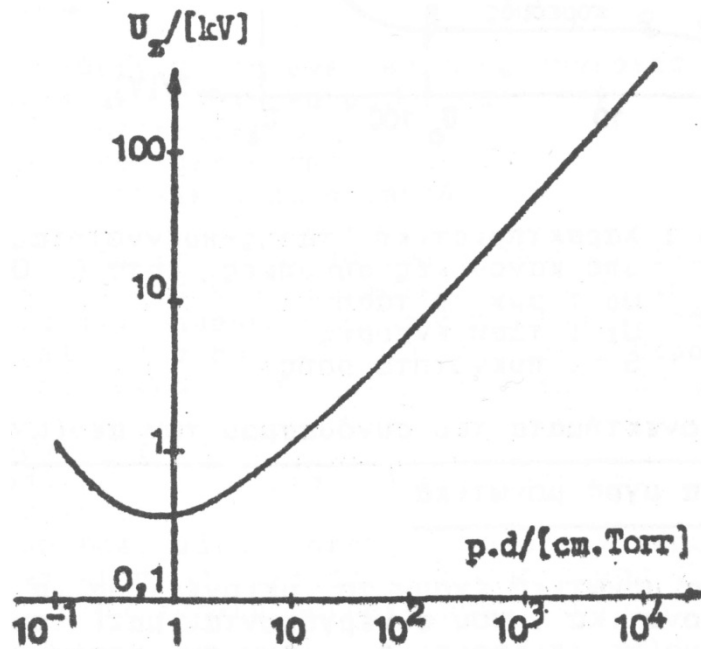
Σύμφωνα με αυτό η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού:

- ιονισμός με κρούσεις από ηλεκτρόνια
- ιονισμός με κρούσεις από θετικά ιόντα
- ιονισμός στην επιφάνεια της καθόδου

Κατά τον νόμο του Paschen η τάση έναυσης (U_z : τάση αυτοσυντήρησης του ιονισμού) διέπεται από την σχέση :

$$U_z = f(p \cdot d)$$

όπου p η πίεση του αερίου και d η απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για τον αέρα σε ομογενές πεδίο δίνεται στο σχήμα 1-2.

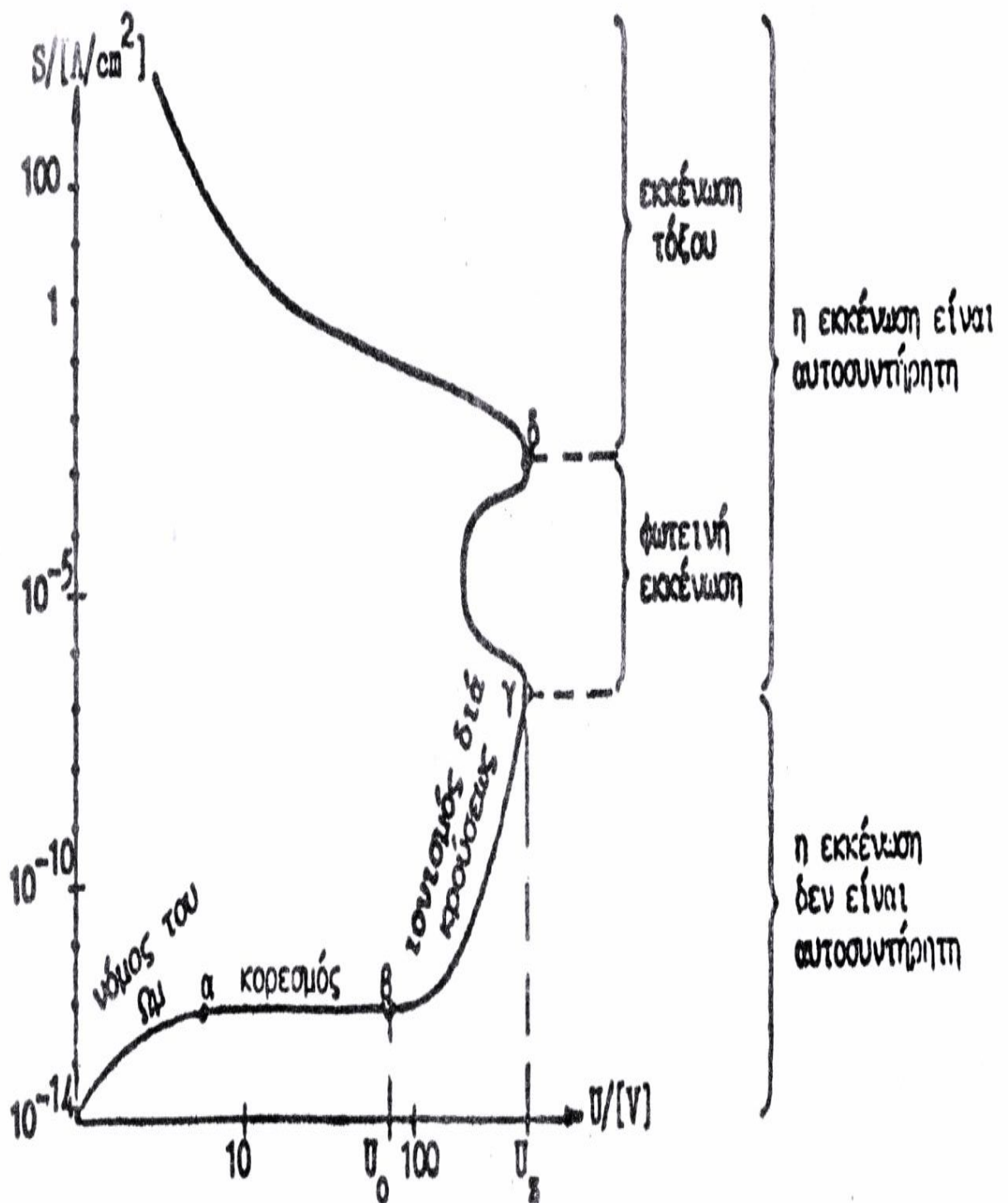


Σχήμα 1.2-2: $U_z = f(p \cdot d)$ για τον αέρα

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των αερίων μονωτικών, έχει ιδιαίτερη σημασία η χαρακτηριστική 'ρεύματος - τάσης', κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενες τάσεις υπό κανονικές συνθήκες (20°C , 760 Torr).

Η χαρακτηριστική αυτή δίνεται προσεγγιστικά στο σχήμα 1-3 για την πυκνότητα ροής (S), ανάλογα με την ενεργό τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U). Στην χαρακτηριστική αυτή επισημαίνονται οι διάφορες περιοχές ανάλογα με το είδος της εκκένωσης.

Ο μηχανισμός διάσπασης μεγάλων διακένων αποδίδεται στη δημιουργία διαδοχικών οχετών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η θεωρία της διάσπασης με διαδοχικούς οχετούς βασίζεται στον ιονισμό, που εκδηλώνεται αρχικά στην περιοχή της ανόδου, με αποτέλεσμα να προκαλείται πρακτικά μείωση της απόστασης του διακένου και να διευκολύνεται η εκδήλωση διαδοχικών οχετών, ανάλογα με τη μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 1.2-3: Χαρακτηριστική τάσης – πυκνότητας ροής των αερίων υπό κανονικές συνθήκες, κατά G. Oberdorffer.
 U_0 : αρχική τάση
 U_z : τάση έναυσης
 S : πυκνότητα ροής

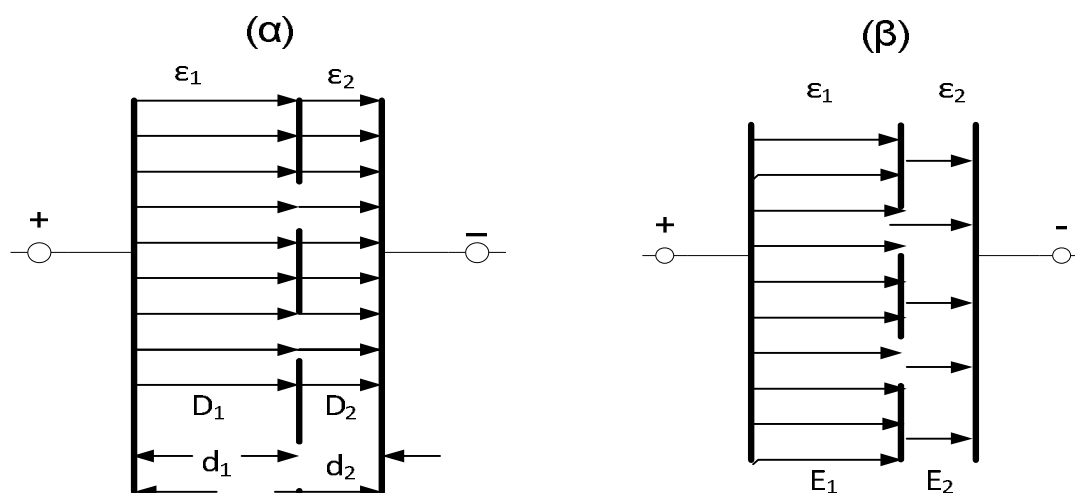
1.3 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά

Τα αέρια μονωτικά έχουν το μειονέκτημα να προκαλούν βλάβες στα στερεά μονωτικά, που συνεργάζονται μαζί τους. Αυτό οφείλεται στις ξένες κυρίως επικαθίσεις, λόγω των οποίων μειώνονται οι αποστάσεις μόνωσης, με αποτέλεσμα την εκδήλωση εκκενώσεων στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών. Προκαλούν επίσης βλάβες στα στερεά και υγρά μονωτικά, όταν εγκλωβίζονται σε αυτά, γιατί τότε επενεργούν ως ανεπιθύμητες ανομοιογένειες, οι οποίες μειώνουν (κυρίως λόγω μερικών εκκενώσεων) τη διηλεκτρική αντοχή των στερεών και υγρών μονωτικών.

Παραδείγματα

Παράδειγμα 1: Ο συνδυασμός «χαρτί - μονωτικό λάδι» έχει δείξει στην πράξη ότι είναι μία πολύ καλή μόνωση γιατί, εκτός του ότι τα δύο παραπάνω μονωτικά έχουν την ίδια περίπου τιμή ϵ , εμποτίζει το λάδι το χαρτί και δεν επιτρέπει έτσι την ύπαρξη αέρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποφυγής της ανεπιθύμητης συνεργασίας των αερίων μονωτικών με τα στερεά και υγρά μονωτικά είναι η πλήρωση του δοχείου των μετασχηματιστών υψηλής τάσης με μονωτικό λάδι υπό συνθήκες κενού.

Παράδειγμα 2: Η ανεπιθύμητη συνεργασία του αέρα με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά εξετάζεται παρακάτω στο παράδειγμα του σχήματος 1.3-1: Σε ομογενές πεδίο με απόσταση μεταξύ των επιπέδων ηλεκτροδίων $d = 1 \text{ cm}$ και εναλλασσόμενη τάση ενεργού τιμής 20 kV πρόκειται να χρησιμοποιηθούν τα μονωτικά: αέρας και γυαλί. Η διαχωριστική επιφάνεια των παραπάνω μονωτικών είναι παράλληλη προς τα ηλεκτρόδια. Το γυαλί καταλαμβάνει $0,8 \text{ cm}$ και ο αέρας $0,2 \text{ cm}$. Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm και του γυαλιού 200 kV/cm .



Σχήμα 1.3-1 : Παράδειγμα της ανεπιθύμητης συνεργασίας του αέρα με τα στερεά μονωτικά

D : ηλεκτρική ροή
 E : πεδιακή ένταση
 ϵ : διηλεκτρική σταθερά

Τα ερωτήματα που τίθενται είναι:

1. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παραπάνω συνδυασμός των μονωτικών, ως μόνωση του πυκνωτή;
2. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ο αέρας σε όλο τον χώρο;
3. Ποια θα μπορούσε να είναι η ενεργός τιμή της τάσης (χωρίς να συμβεί διάσπαση), όταν χρησιμοποιηθεί μόνο το γυαλί σε όλο το χώρο;

Απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα

- 1) Για δύο μονωτικά κατά το σχήμα 1.3-1 ισχύει γενικά ότι:

$$D_1 = D_2 \quad (1.3-1)$$

ή

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2, \quad \varepsilon_{r1} E_1 = \varepsilon_{r2} E_2 \quad (1.3-2)$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι το μονωτικό με τη μικρότερη σχετική διηλεκτρική σταθερά καταπονείται περισσότερο. Επειδή το πεδίο είναι ομογενές έχουμε:

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2 = E_2 \frac{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)}{\varepsilon_1} \quad (1.3-3)$$

δηλαδή είναι:

$$E_2 = \frac{U \varepsilon_1}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} = \frac{U \varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r1} d_2 + \varepsilon_{r2} d_1} \quad (1.3-4)$$

και

$$E_1 = \frac{U \varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} = \frac{U \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} d_2 + \varepsilon_{r2} d_1} \quad (1.3-5)$$

Κατά την καταπόνηση επομένως του συνδυασμού αέρας – γυαλί έχουμε:

Για το γυαλί:

Με $\varepsilon_{r1} = 6,5$ και $\varepsilon_{r2} = 1$ είναι:

$$E_1 = \frac{U \times \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} \times d_2 + \varepsilon_{r2} \times d_1} = \frac{20 \times 1}{6,5 \times 0,2 + 1 \times 0,8} = 9,5 \text{ kV/cm}$$

Για τον αέρα:

$$E_2 = E_1 \times \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} = 62 \text{ kV/cm}$$

- 1) Παρατηρούμε ότι το γυαλί καταπονείται ελάχιστα , ενώ ο αέρας διασπάται.
- 2) Με μονωτικό μόνο τον αέρα είναι: $E = 20 \text{ kV/cm} < 21 \text{ kV/cm}$. Επομένως ο αέρας καλύπτει της απαιτήσεις μόνωσης.
- 3) Το γυαλί έχει διηλεκτρική αντοχή 200 kV/cm και επομένως καλύπτει τις απαιτήσεις μόνωσης για τάσεις μικρότερες από 200 kV .

1.4. Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

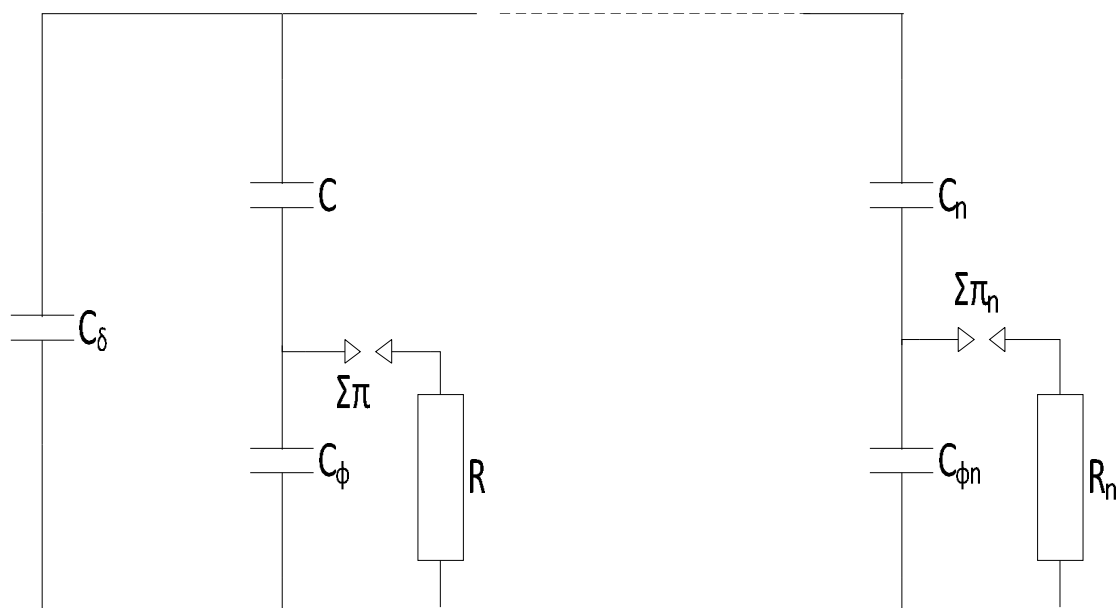
Τα φαινόμενα γήρανσης και διάτρησης στα στερεά βιομηχανικά μονωτικά υλικά ερμηνεύονται με μεθόδους, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο θεωρίες:

- τη μακροσκοπική θεωρία της διάσπασης , και
- τη κβαντομηχανική θεωρία της διάσπασης.

Σύμφωνα με την πρώτη θεωρία , τα αποτελέσματα των ερευνών αποσκοπούν (ή βασίζονται) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα από γραμμικά στοιχεία, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με τις οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση φωτεινών φαινομένων και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Κατά την θεωρία αυτή, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες:

- τις απώλειες Joule.
- τις μερικές εκκενώσεις,
- τις δυνάμεις Coulomb, και
- την θερμότητα του περιβάλλοντος.

Οι παραπάνω παράγοντες υποβοηθούνται βέβαια στην πράξη από διάφορες τοπικές συνθήκες λειτουργίας έτσι ώστε η γήρανση και η διάσπαση του στερεού μονωτικού να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους. Ως σημαντικότερος παράγοντας γήρανσης του υλικού θεωρούνται οι μερικές εκκενώσεις , οι οποίες διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές . Ένα από τα περισσότερα γνωστά ισοδύναμα κυκλώματα για τις μερικές εκκενώσεις, κατά την παραπάνω μακροσκοπική θεωρία, φαίνεται στο σχήμα 1.4-1. Σύμφωνα με αυτό η διάσπαση των επί μέρους θέσεων διαταραχής ($C_{\phi 1} \dots\dots C_{\phi n}$) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση των πυκνωτών $C_1 \dots\dots C_n$, οι οποίοι συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του υλικού. Από τον συνδυασμό ηλεκτρικών μετρήσεων και οπτικών παρατηρήσεων, κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών



Σχήμα 1.4-1 : Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff.

C_{δ} : χωρητικότητα της διάταξης

$C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$: φυσαλίδες αερίων και άλλες ανομοιογένειες

$R_1 \dots R_n$: αντίσταση του τόξου κατά την διάσπαση των $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$

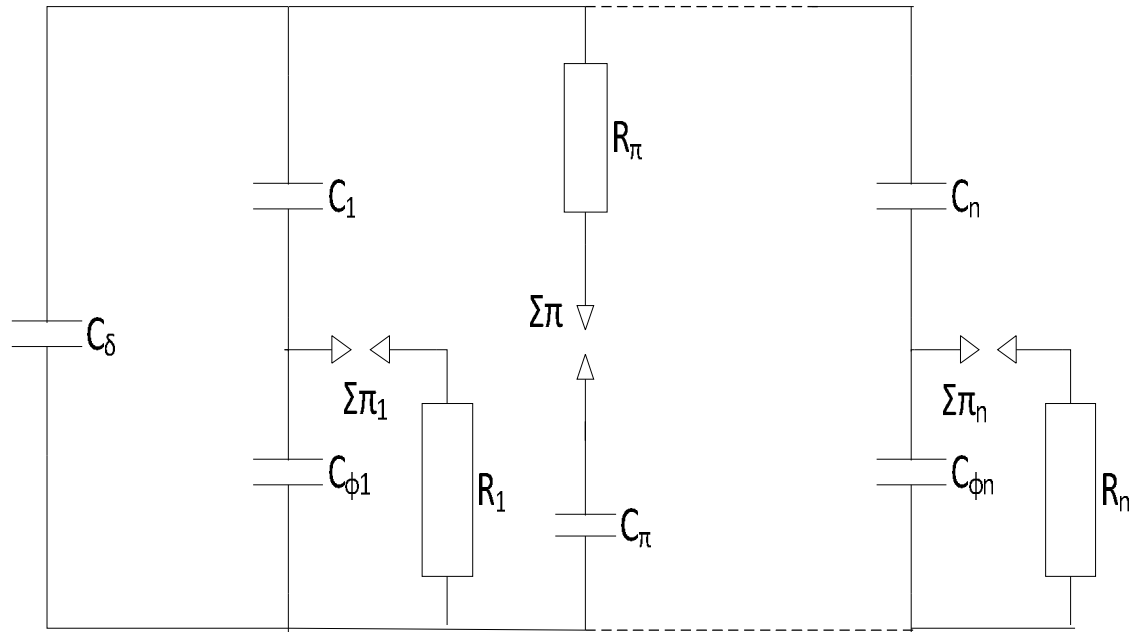
$\Sigma\pi_1 \dots \Sigma\pi_n$: σπινθηριστές που συμβολίζουν την διάσπαση των $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$

$C_1 \dots C_n$: πυκνωτές που συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού

οργανικών μονωτικών (κυρίως φορτίο λόγω μερικών εκκενώσεων, μετρήσεις ρεύματος, εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη και εικόνα επιφανειακών διαταραχών), έχουν προταθεί διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα, ώστε να αποδίδονται από αυτά και άλλοι παράγοντες γήρανσης και διάσπασης. Το ισοδύναμο π.χ. κύκλωμα κατά το σχήμα 1.4-2 είναι μία βελτίωση του προηγούμενου, γιατί διευκολύνει στη διάκριση μεταξύ της διάσπασης λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση) και εκείνης από τις δυνάμεις Coulomb (ηλεκτρομηχανική διάσπαση: δενδροειδής ή υπό μορφή οχετού), σε μία ιδιαίτερη πολωμένη περιοχή του υλικού (πυκνωτής C_{π}).

Η αντίσταση R_{π} και ο σπινθηριστής $\Sigma\pi$ συμβολίζουν στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-2 τον οχετό διάσπασης.

Εκτός από τις παραπάνω θεωρητικές μορφές διάσπασης γίνεται διάκριση και σε άλλες δύο: τη θερμική διάσπαση από τις απώλειες Joule, και τη θερμοχημική διάσπαση, από τη μεγάλη θερμοκρασία στο περιβάλλον. Από πειράματα, που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά, φαίνεται ότι η ενεργός τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη για την ηλεκτρομηχανική διάτρηση, φαίνεται επίσης ότι η γήρανση, υπό ονομαστική τάση, εξαρτάται από τη διαχρονική αύξηση της ενέργειας των μερικών εκκενώσεων. Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος προκαλεί μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, γιατί ενισχύεται ο ρόλος των υπολοίπων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και της ισχύος των μερικών εκκενώσεων).



Σχήμα 1.4-2: Ισοδύναμο κύκλωμα για την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και την διάσπαση λόγω δυνάμεων Coulomb.

C_{π} : πυκνωτής που συμβολίζει την πόλωση του υλικού

Σ_{π} & R_{π} : διαδρομή εκκένωσης λόγω διάσπασης του C_{π}

(C_{δ} , $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$, $R_1 \dots R_n$, $C_1 \dots C_n$, $\Sigma_{\pi 1} \dots \Sigma_{\pi n}$: όπως στο σχήμα 1.4-1)

Οι διάφορες μαθηματικές ερμηνείες της μακροσκοπικής θεωρίας βασίζονται κυρίως στη θερμοδυναμική σχέση:

$$P = P_{\alpha} + C_o \frac{d\theta}{dt} \quad (1.4-1)$$

όπου: P η ηλεκτρική ισχύς,

P_{α} η απαγόμενη θερμική ισχύς,

C_o η θερμοχωρητικότητα του υλικού,

θ η αύξηση της θερμοκρασίας και t ο χρόνος

και στην μεταβολή της ειδικής αγωγιμότητας του υλικού κατά την σχέση :

$$\sigma = \frac{\sigma_o e^{\beta\theta}}{(1-\delta E)^2} \quad (1.4-2)$$

όπου: σ_o : η τιμή της ειδικής αγωγιμότητας προ της καταπόνησης

(αρχική ειδική αγωγιμότητα),

σ : η τιμή της ειδικής αγωγιμότητας μετά την καταπόνηση,

θ : η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού.

β : ένας συντελεστής του υλικού (ο οποίος εξαρτάται επίσης από την τιμή και τη μορφή της τάσης, τον χρόνο καταπόνησης, τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τη διάταξη των ηλεκτροδίων εφαρμογής της τάσης),

δ: ένας συντελεστής του υλικού για την συμμετοχή των μερικών εκκενώσεων στην μείωση της διηλεκτρικής αντοχής (ο οποίος εξαρτάται επίσης από τους παράγοντες, που προαναφέρθηκαν για τον συντελεστή β), και
 Ε : η πεδιακή ένταση.

Με την βοήθεια των παραπάνω σχέσεων μπορούν να διατυπωθούν μαθηματικές σχέσεις, τόσο για τις θεωρητικές μορφές διάσπασης, που προαναφέρθηκαν, όσο και για διάφορους συνδυασμούς τους. Αν και οι σχέσεις αυτές δεν εξυπηρετούν, χωρίς την συμβολή πειραματικών αποτελεσμάτων, σε κάποιους υπολογισμούς, συμπληρώνουν την ερμηνεία των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης, που δίνονται από τα διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα.

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. Η γήρανση και η διάσπαση, κατά τη θεωρία αυτή, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση είναι : από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες . Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές αρκετά μεγαλύτερες από 20 eV.

Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε στερεά οργανικά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 3,5 – 4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου $\sim 0,2$ MV/cm. Για τιμές του πεδίου μέχρι $\sim 0,5$ MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά την σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{W}{k \times T}} \quad (1.4-3)$$

όπου k η σταθερά Boltzmann , T η απόλυτη θερμοκρασία και W η ενέργεια ενεργοποίησης των ηλεκτρονίων.

Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση 1.4-3. 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, λόγω της οποίας γίνεται η συλλογή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από τα ηλεκτρόδια υπό μορφή ομάδων. Το φάσμα της εκ-πεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια.

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

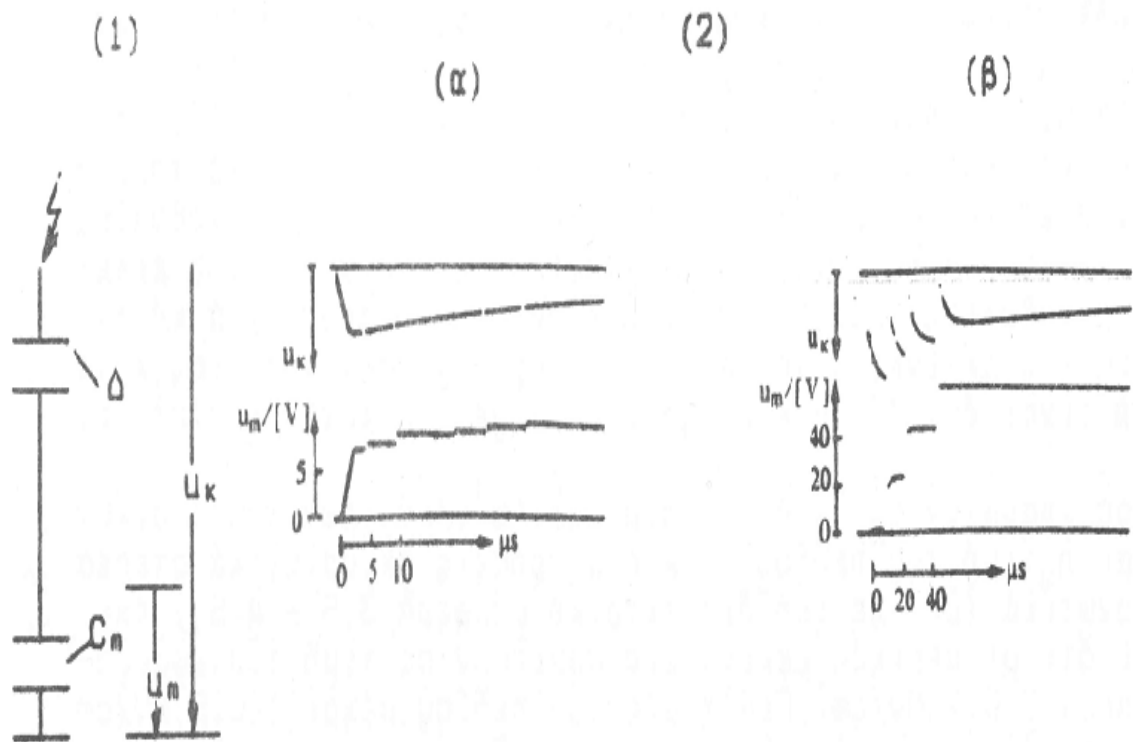
Στο σχήμα 1.4-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογράφηματα, για την γήρανση και την διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου (παλμογράφημα α : γήρανση του βακελίτη, παλμογράφημα β : διάτρηση του Pertinax). Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι ,

μετά από μία τιμή $U_k = 45 \text{ kV}$ (όπου U_k η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δενδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 1.4-4).

Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δενδρίτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μία μικρή τρύπα (μικρότερη από 1 mm) πλησίον της ακίδας. Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται από τις δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, ως ακολούθως.

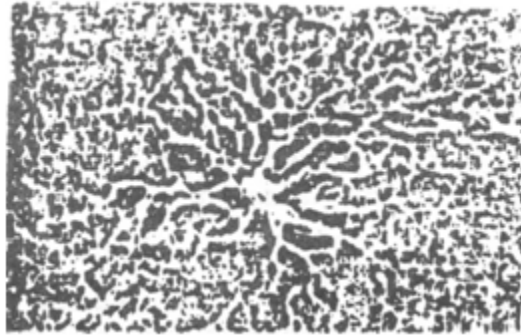
α) Μακροσκοπική ερμηνεία :

Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 1.4-3, α) φαίνεται ότι εκδηλώνονται εσωτερικές και εξωτερικές μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού



Σχήμα 1.4-3 : Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

- 1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (u_k : στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης, Δ : δοκίμιο, u_m : τάση στον πυκνωτή μέτρησης C_m)
- 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής $10/200 \mu\text{s}$:
 - (α) γήρανση : (τιμή πεδίου 1.11 MV/cm , $U_k = 77.5 \text{ kV}$, $C_m = 210 \text{ nF}$
υλικό : βακελίτης)
 - (β) διάτρηση : (τιμή πεδίου 1.20 MV/cm , $U_k = 85 \text{ kV}$, $C_m = 210 \text{ nF}$
υλικό : pertinax)

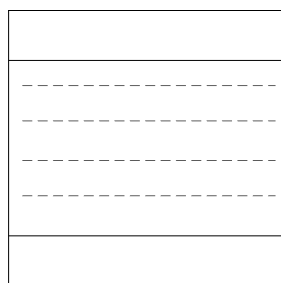


Σχήμα 1.4-4:
Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού peritinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δενδρίτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200 μ s, μέγιστης τιμής 75 kV)

(στο μέτωπο και την ουρά της κρουστικής τάσης αντίστοιχα), τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-1 (ή του σχήματος 1.4-2), από τη σταδιακή διάσπαση των πυκνωτών $C_{\phi 1} \dots\dots C_{\phi n}$. Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευθεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της.

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 C_m ανά άλμα δυναμικού. Η τιμή αυτή για το πρώτο άλμα δυναμικού κατά το σχήματος 1.4-3, είναι περίπου: 0,56 eV κατά τη γήρανση και 21,5 eV κατά τη διάτρηση. Από τις τιμές αυτές φαίνεται ότι η γήρανση και διάτρηση των δοκιμών σχετίζονται με ακτινοβολίες, που δεν μπορούν να ανιχνευθούν με μακροσκοπικές μεθόδους. Μπορούμε να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις διαταραχής (κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-1 ή του σχήματος 1.4-2 οι πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots\dots C_{\phi n}$) αντιστοιχούν σε ενεργειακές ζώνες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του υλικού (σχήμα 1.4-5).

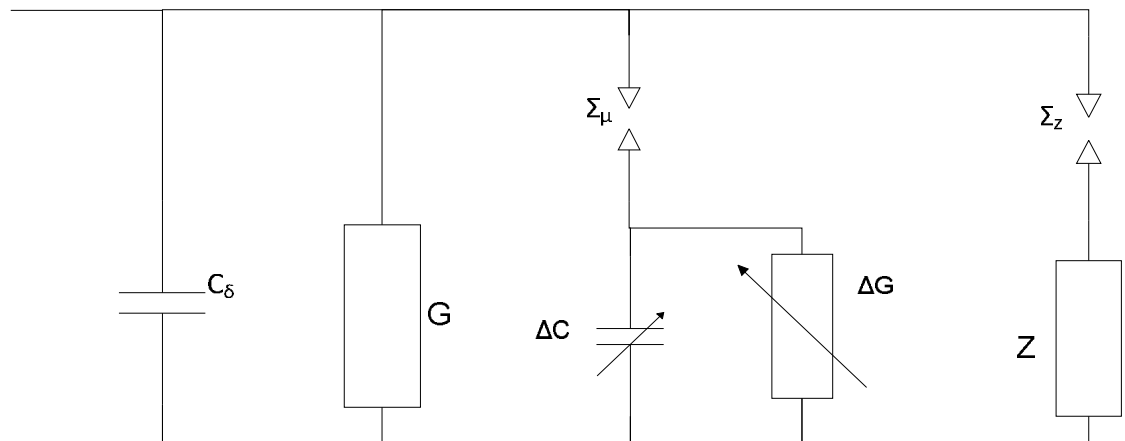


1 Σχήμα 1.4-5: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.
1 : Ζώνη αγωγιμότητας
2 : Ζώνη διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
3 : Ζώνη σθένους

Από το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση χρειάζεται συνδυασμός των δύο θεωριών, που προαναφέρθηκαν. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο συνδυάζει τις δύο παραπάνω θεωρίες, δίνεται στο σχήμα 1.4-6. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philipoff (σχήμα 1.4-1),

όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσουμε ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει σε κάποια τιμή του πεδίου E_{μ} , τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.4-6 ως ακολούθως:

1. Για $E < E_{\mu}$: Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστικές Σ_{μ} και Σ_z)
2. Για $E > E_{\mu}$: Εκδήλωση μερικών εκκενώσεων (διασπάται ο Σ_{μ})
3. Για $E \gg E_{\mu}$: Οι μερικές εκκενώσεις προκαλούν την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Το φάσμα ακτινοβολίας, που εκπέμπεται εξαρτάται από την τιμή E_{μ} . Για τιμές μεγαλύτερες των 20 eV συμβαίνει η διάτρηση



Σχήμα 1.4-6 :Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για την γήρανση και τη διάτρηση.

C_{δ} : ιδανική χωρητικότητα

G : ιδανική αγωγιμότητα

ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων

Z : αρνητική διαφορική αντίσταση

Σ_{μ} : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

Σ_z : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

Παραδείγματα

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα των πρακτικών εφαρμογών, από τα οποία φαίνεται η χρησιμότητα της θεωρίας, που προαναφέρθηκε.

Παράδειγμα 1 : Η θερμική καταπόνηση των μονώσεων των καλωδίων όταν δεν εφαρμόζονται οι σχετικοί κανονισμοί:

Όπως είναι γνωστό, η θερμοκρασία λειτουργίας των καλωδίων ενέργειας είναι της τάξης των 60 έως 90° C. Γι' αυτό η ομαδοποιημένη εγκατάσταση των καλωδίων αυτών (στο έδαφος ή στον αέρα) θα πρέπει να γίνεται με μεθόδους, που να διευκολύνουν την απαγωγή της θερμότητας.

Σε διαφορετική περίπτωση, η ανεπαρκής απαγωγή θερμότητας θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών Joule των αγωγών και επομένως τη θερμική καταπόνηση των μονώσεων.

Μπορούμε να υποθέσουμε, κατά την προηγούμενη θεωρία, ότι θα αυξηθεί η ειδική αγωγιμότητα των διαφόρων μονωτικών υλικών κατά την σχέση 1.4-2

(ή την σχέση 1.4-3) και θα ενισχυθεί κατά συνέπεια ο ρόλος των υπολοίπων παραγόντων γήρανσης και διάσπασης. Απ'το παράδειγμα αυτό φαίνεται η χρησιμότητα των προδιαγραφών σε περιπτώσεις ομαδοποιημένης εγκατάστασης καλωδίων ενέργειας (VDE 0100, BS 6004, κ.λπ.), από όπου θα πρέπει να αναζητήσει κανείς τις απαιτούμενες (κατά περίπτωση εγκατάστασης) πληροφορίες.

Παράδειγμα 2 : Στο εργαστήριο δοκιμών ενός εργοστασίου πινάκων μέσης τάσης διαπιστώθηκε σε έναν πίνακα διακόπτη φορτίου η επιτυχής διεξαγωγή των διηλεκτρικών δοκιμών υπό κρουστικές τάσεις 1,2/50 μ s . Σε επόμενη παραγγελία του ίδιου τύπου πίνακα η παραπάνω δοκιμή μεταξύ φάσεων προς γη ήταν ανεπιτυχής (ένα παλμογράφημα έδειξε αποκοπή στην ουρά της κρουστικής τάσης). Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών, είναι πολύ πιθανή η παρακάτω ερμηνεία για την αναζήτηση της βλάβης :

Τα αποτελέσματα των ερευνών για την χρονική εκδήλωση των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της κρουστικής τάσης, έχουν δείξει ότι : Οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται κατά την διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές κατά τη διάρκεια της ουράς της. Γι' αυτό η αποκοπή στην ουρά της κρουστικής τάσης είναι πολύ πιθανό να σχετίζεται με κατασκευαστικές ατέλειες εκτός του όγκου των μονωτικών υλικών. Υπό την προϋπόθεση ότι δεν συντρέχουν λόγοι ξένων επικαθίσεων στα μονωτικά υλικά, η βλάβη θα πρέπει να οφείλεται σε κατασκευαστική ατέλεια, που προκαλεί μείωση των αποστάσεων μόνωσης στον αέρα . Σε μία τυποποιημένη κατασκευή των μεταλλικών μερών του πίνακα, η μείωση των αποστάσεων μόνωσης θα μπορούσε π.χ. να οφείλεται σε κάποιον λυόμενο σύνδεσμο μεταξύ των ζυγών, ο οποίος προκαλεί μείωση της απόστασης μόνωσης προς γη.

Παράδειγμα 3 : Σε μία ρυπασμένη ατμόσφαιρα το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων είναι μεγαλύτερο από ότι συνήθως, λόγω του αυξημένου ρόλου των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

1.4.1. Παραδείγματα εφαρμογών των στερεών μονωτικών

Τα στερεά μονωτικά χρησιμοποιούνται στις μονώσεις των ηλεκτρικών μηχανών, όπου οι αποστάσεις μόνωσης είναι περιορισμένες, για λόγους μείωσης του όγκου των μηχανών. Χρησιμοποιούνται επίσης σε καλώδια (μόνωσης μεταξύ αγωγών και αγωγών προς γη) καθώς και την κατασκευή μονωτήρων, κάθε είδους σε συνδυασμό με τον αέρα.

Συχνά συνδυάζονται τα στερεά μονωτικά με τα υγρά μονωτικά, όπως : το χαρτί, το Pertinax, ο βακελίτης και άλλα μονωτικά με το λάδι . Χαρακτηριστικά παραδείγματα του συνδυασμού «στερεό - υγρό» μονωτικό είναι οι μετασχηματιστές

μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τα καλώδια με μόνωση «χαρτί-λάδι». Ο συνδυασμός «στερεό - υγρό» μονωτικό αποσκοπεί κυρίως στον εμποτισμό του στερεού μονωτικού με το υγρό, ώστε να αποφεύγονται οι θύλακες αέρα.

Μονώσεις καλωδίων

Τα βασικά μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα καλώδια είναι θερμοπλαστικές ύλες, ελαστικές ύλες, χαρτί και χαρτί ποτισμένο με μονωτικό λάδι.

Η μονωτική ικανότητα ενός καλωδίου δίνεται, κατά VDE 0271, από τις ονομαστικές τάσεις του U_o και U_N . Συγκεκριμένα:

- Η ονομαστική τάση U_o είναι η τάση μεταξύ αγωγού και γης (ή μεταξύ αγωγού και μεταλλικής επένδυσης του καλωδίου)
- Η ονομαστική τάση U_N είναι η τάση μεταξύ αγωγών φάσης

Μεταξύ U_N και U_o ισχύει:

α) για τα καλώδια του τριφασικού συστήματος :

$$U_N = \sqrt{3}U_o \quad (1.4.1-1)$$

β) για τα καλώδια σε μονοφασικό σύστημα και σε συνεχές ρεύμα με δύο αγωγούς:

$$U_N = 2U_o \quad (1.4.1-2)$$

γ) για καλώδια σε μονοφασικό σύστημα και σε συνεχές ρεύμα με ένα αγωγό μονωμένο:

$$U_N = U_o \quad (1.4.1-3)$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται, κατά VDE και BS, η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας των καλωδίων U_{max} , ανάλογα με την ονομαστική τάση.

U_N σε kV		1	3,3	6	6,6	10	11	15	20	22	30	33
U_o σε kV		0,6		3,5		5,8		8,7	11,6		17,3	
U_{max} σε kV	κατά VDE 0111	1,2	-	7,2	-	12	-	17,5	24	-	36	-
	κατά BS 77	1,1	3,6	-	7,2	-	12	-	-	24	-	36

Πίνακας 1.5-1: Μέγιστη τάση λειτουργίας (U_{max}) των καλωδίων, κατά VDE και BS, ανάλογα με την ονομαστική τάση (U_N).

Η τάση λειτουργίας ενός καλωδίου είναι η τάση μεταξύ των αγωγών του σε δεδομένο δίκτυο. Σύμφωνα με την προδιαγραφή VDE 0250 η τάση λειτουργίας ενός καλωδίου δεν μπορεί να υπερβεί το 15 % της ονομαστικής τάσης συνεχούς λειτουργίας.

Τα καλώδια με μόνωση από θερμοπλαστική ύλη έχουν σχεδόν καθιερωθεί στην περιοχή των χαμηλών τάσεων. Τα καλώδια αυτά τείνουν να αντικαταστήσουν στη μέση τάση εκείνα με μόνωση χαρτί ποτισμένο με λάδι. Αυτό οφείλεται στους παρακάτω βασικούς λόγους :

1. Είναι εύχρηστα κατά την τοποθέτηση, σύνδεση και τον τερματισμό τους.
2. Έχουν μικρότερο βάρος και κόστος από τα καλώδια με μόνωση «χαρτί-λάδι».
3. Οι χρησιμοποιούμενες μονώσεις έχουν πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες (μεγάλη διηλεκτρική αντοχή, μικρή tgδ και μικρή θερμική αντίσταση)

Στην Ελλάδα, κατά μεγάλο ποσοστό, τα καλώδια των υπογείων και υποβρυχίων δικτύων χαμηλής, μέσης και υψηλής τάσης έχουν μόνωση από χαρτί-λάδι. Καλώδια από ελαστικό και θερμοπλαστικές μονώσεις χρησιμοποιούνται κυρίως για εσωτερικές συνδέσεις στους υποσταθμούς και στις παροχές καταναλωτών.

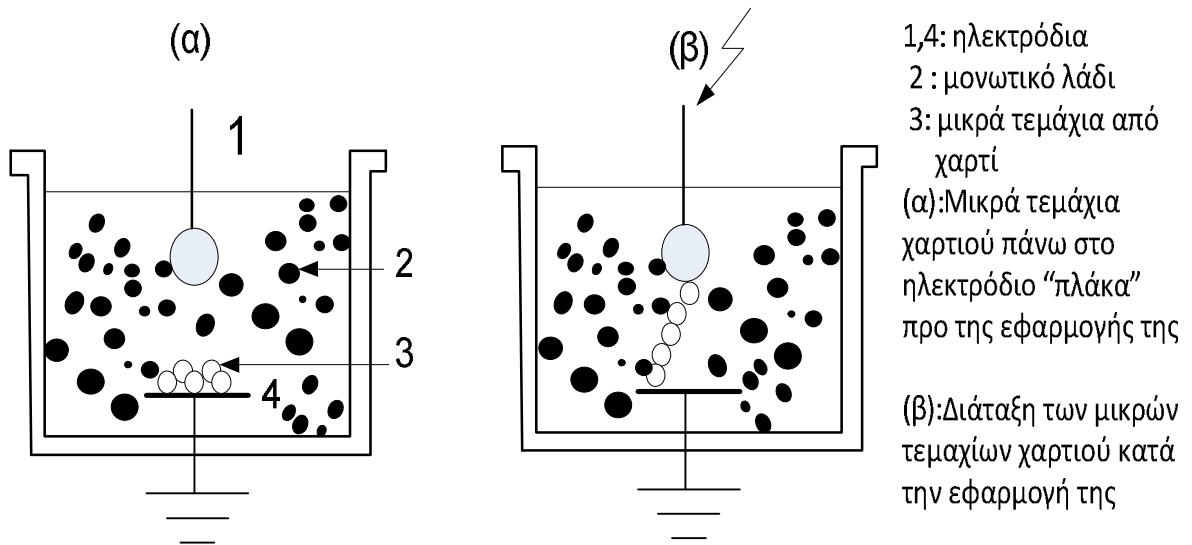
Μονωτήρες

Οι περισσότεροι μονωτήρες των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και των δικτύων μεταφοράς και διανομής κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί. Σε εσωτερικούς χώρους έχουν μεγάλη εφαρμογή οι εποξειδικές ρητίνες. Η επιφάνεια των μονωτήρων είναι λεία, ώστε να παρεμποδίζεται η συγκράτηση ξένων επικαθίσεων.

Οι μονωτήρες διακρίνονται, ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετούν, σε : κανονικού τύπου (χρησιμοποιούνται σε συνηθισμένο περιβάλλον), εσωτερικού χώρου, ομίχλης (έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού και χρησιμοποιούνται σε περιοχές με υψηλή υγρασία και ρύπανση), ανάρτησης (στις γραμμές μεταφοράς), στήριξης (σε γραμμές μεταφοράς και ζυγούς υποσταθμών) και διέλευσης (ως είσοδος και έξοδος των ζυγών, όταν παρεμβάλλονται διαχωριστικές επιφάνειες).

1.5. Το μονωτικό λάδι των μετασχηματιστών

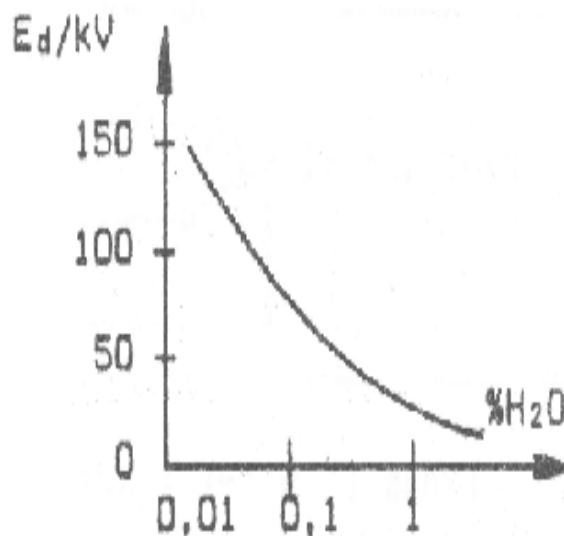
Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης του μονωτικού λαδιού (και γενικότερα των υγρών μονωτικών) αποδίδονται στους παράγοντες, που αναφέρθηκαν στα στερεά μονωτικά (παράγραφος 1.4) αλλά και στα αιωρούμενα σε αυτά ξένα σωματίδια, τα οποία σχηματίζουν αγώγιμες γέφυρες. Η δημιουργία των παραπάνω αγώγιμων γεφυρών μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πειραματικά (σχήμα 1.5-1 : τα μικρά τεμάχια από χαρτί διατάσσονται, κατά την εφαρμογή της τάσης, μεταξύ των ηλεκτροδίων). Η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού μειώνεται σημαντικά όταν έρχεται σε επαφή με τον αέρα.



Σχήμα 1.5-1: Δημιουργία γέφυρας από μικρά τεμάχια χαρτιού μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Η υγρασία προκαλεί επίσης δραστική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού (σχήμα 1.5-2).

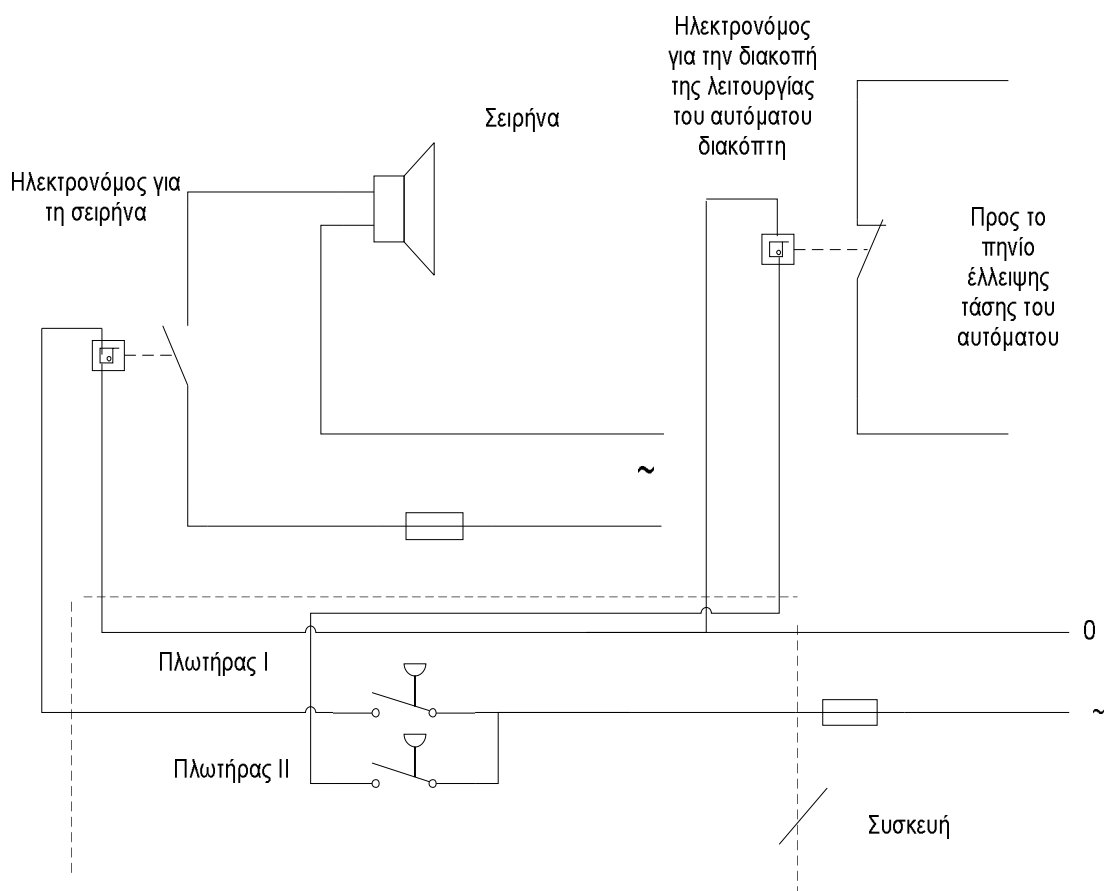
Σχήμα 1.5-2: Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού ανάλογα με το ποσοστό του νερού



1.5.1 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

Η υγρασία και τα αέρια, που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για το λόγο αυτό προβλέπονται (κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών) μέσα ελέγχου, που προειδοποιούν για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού. Προβλέπεται επίσης προστασία του μετασχηματιστή, όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον αφυγραντήρα και την συσκευή Boucholz, που πρέπει να περιλαμβάνει ο μετασχηματιστής. Ο αφυγραντήρας τοποθετείται επί του δοχείου διαστολής του μετασχηματιστή. Περιέχει υλικό (το siticagel), που απορροφά την υγρασία. Από το γυάλινο μέρος του δοχείου του αφυγραντήρα παρακολουθεί κανείς το χρώμα του siticagel. Όταν το χρώμα είναι γαλάζιο, τότε έχει το υλικό αυτό τη δυνατότητα απορρόφησης υγρασίας. Όταν το χρώμα γίνει κόκκινο, τότε το παραπάνω υλικό είναι κορεσμένο από υγρασία και πρέπει να υποβληθεί σε ξήρανση (3 έως 6 ώρες σε θερμοκρασία 140° C το πολύ).

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής Boucholz (σχήμα 1.5.1-1) βασίζεται στα αέρια, που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα αέρια διέρχονται από τη συσκευή Boucholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες (I κ II). Όταν ο χώρος του Boucholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι δύο ανοικτές επαφές.



Σχήμα 1.5.1-1 : Κύκλωμα της προστασίας Boucholz

Κατά την μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού εισχωρούν τα παραγόμενα αέρια στο χώρο του Boucholz. Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό κλείνει ο πλωτήρας I και ενεργοποιείται έτσι το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό αερίων κλείνει και ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή Boucholz διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εξαερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση (ή μετά την αλλαγή λαδιών) Έχει επίσης γυάλινο παραθυράκι για τον έλεγχο της θέσης των πλωτήρων.

Μια μέθοδος διάγνωσης της ποιότητας του ηλεκτρομονωτικού ελαίου, που εφαρμόζεται από τις εταιρείες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στα είδη των παραγομένων αερίων (κυρίως: υδρογόνο, μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο και ακετυλένιο) και στις σχετικές ποσότητές τους, οι οποίες εντοπίζονται μέσω χρωματογράφου αερίων. Μία μικρή αποσύνθεση γίνεται φανερή σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, όπου παράγονται κυρίως υδρογόνο και μεθάνιο. Η παραγωγή του αιθανίου και του αιθυλενίου θεωρείται ότι σχετίζεται με θέσεις αυξημένης θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Το ακετυλένιο γίνεται σημαντικό ως ποσότητα σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, που οφείλονται κυρίως στην εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου και ισχυρών μερικών εκκενώσεων.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται βασικές οδηγίες για τη συντήρηση των μετασχηματιστών ελαίου, που πρέπει να εφαρμόζονται για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους.

Χρονικό Διάστημα	Είδος συντήρησης
Σε 3 μήνες (Μηνιαίως *)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Έλεγχος στάθμης λαδιού 2) Έλεγχος θερμοκρασίας 3) Έλεγχος υγρασίας από τον αφυγραντήρα 4) Εξωτερικά μέρη και ειδικότερα οι μονωτήρες καθαρίζονται από σκόνη κ.λπ. 5) Έλεγχος για τυχόν εξωτερικές σκουριές
Ετησίως (Σε 6 μήνες *)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής λαδιού(**) 2) Έλεγχος της προστασίας του μετασχηματιστή 3) Έλεγχος και σύσφιξη λυόμενων συνδέσμων 4) Λίπανση κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν) 5) Έλεγχος πυροσβεστήρων
Σε 2 έτη	Αλλαγή ρουλμάν κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν)
Σε 5 έτη	Πλήρης έλεγχος του λαδιού & σε περίπτωση μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αλλαγή

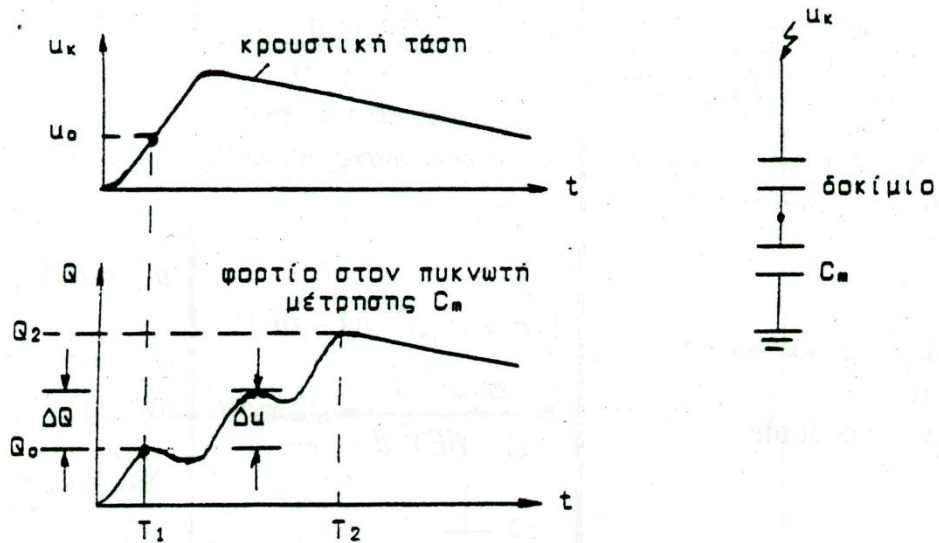
Πίνακας 1.5-1 : Οδηγίες συντήρησης μετασχηματιστών ελαίου.

*: Σε τσιμεντοβιομηχανίες, λατομεία και γενικά σε περιβάλλον που προκαλεί δραστική μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

** : 1 λίτρο σε τελείως στεγνό και καθαρό δοχείο.

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 1.6-1 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 1.6-2). Στο σχήμα π.χ. 1.6-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



Σχήμα 1.6-1: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την 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)

Δu : Άλμα δυναμικού

ΔQ : Αύξηση φορτίου

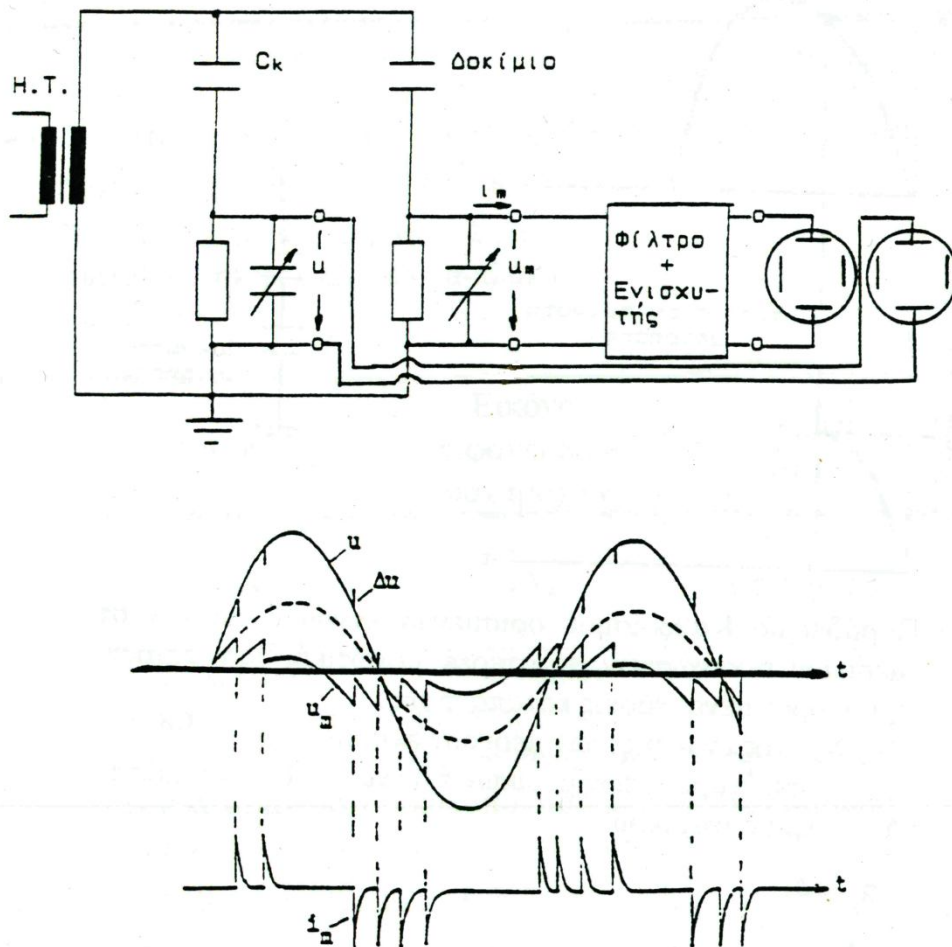
Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως η χαρακτηριστική $Q = f(|\hat{U}_k|)$, η χαρακτηριστική $u_0 = f(|\hat{U}_k|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κ.λπ.. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q = f(|\hat{U}_k|)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής σχήμα 1.6-4, με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στην 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 / 50 μs ή 10 / 200 μs,, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90^η κρούση ως προς την 60^η. 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 μεταβολής της.
- 2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή, όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

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



Σχήμα 1.6-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω “ωμικό -χωρητικό” τετράπολο 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)

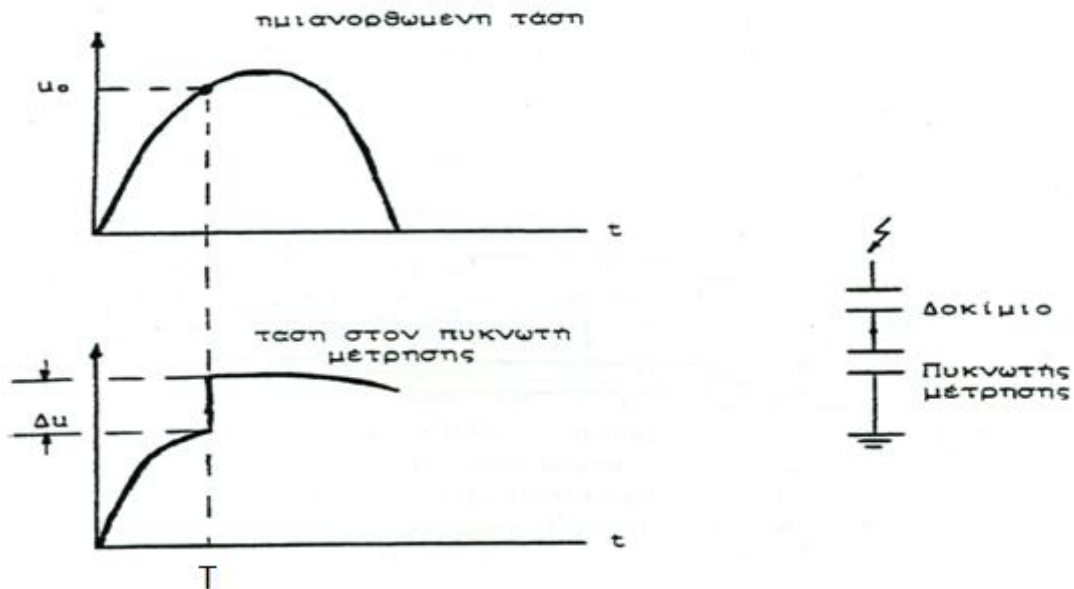
u_m : Στιγμιαία τιμή της τάσης η οποία μετράται στο ωμικό -χωρητικό τετράπολο των μερικών εκκενώσεων

i_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων

Δu : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων

Μια 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 κατά το σχήμα 1.6-6. Στον πίνακα 1.6-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν οργανικά στερεά μονωτικά με $\epsilon_r \approx 2,5 \rightarrow 4,5$, 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 την γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2 / 50 μ s) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.

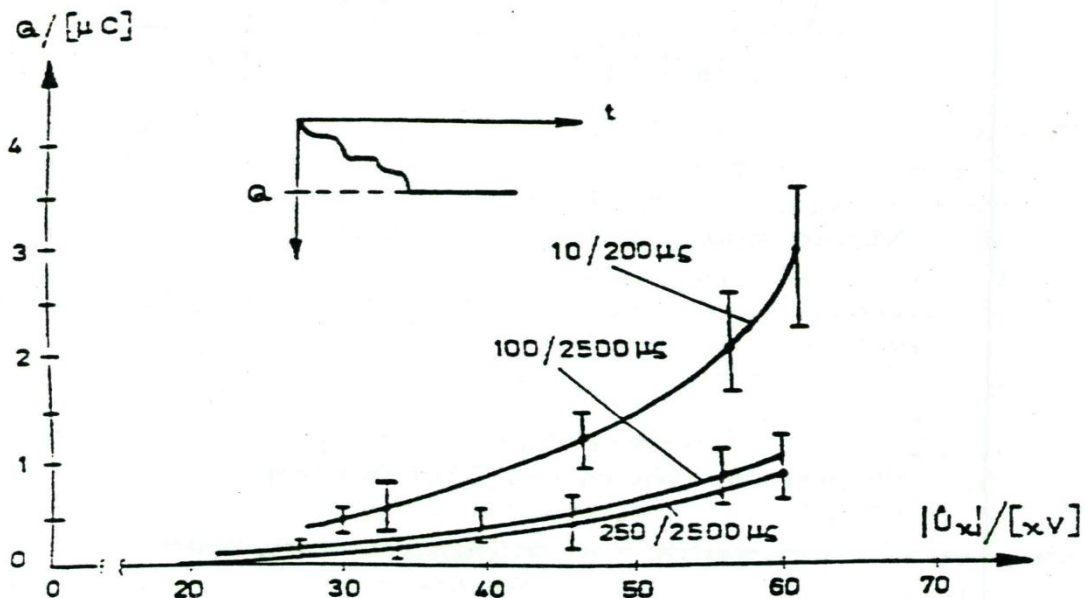


Σχήμα 1.6-3: Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

T: Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

U_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

Δu : Άλμα δυναμικού

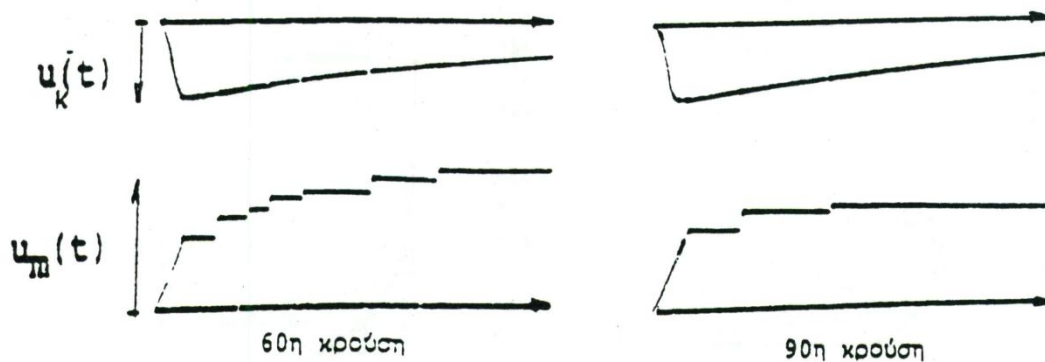


Σχήμα 1.6-4: Χαρακτηριστική $Q_2 = f(\hat{U}_k)$ για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ s, 100 / 2500 μ s, 250 / 2500 μ s.

Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα

C_m : 1000 nF



Σχήμα 1.6-5: Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2 mm).

Μορφή τάσης : 1,2 / 50 μ s ($\hat{U}_k = 99,7$ kV)

Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

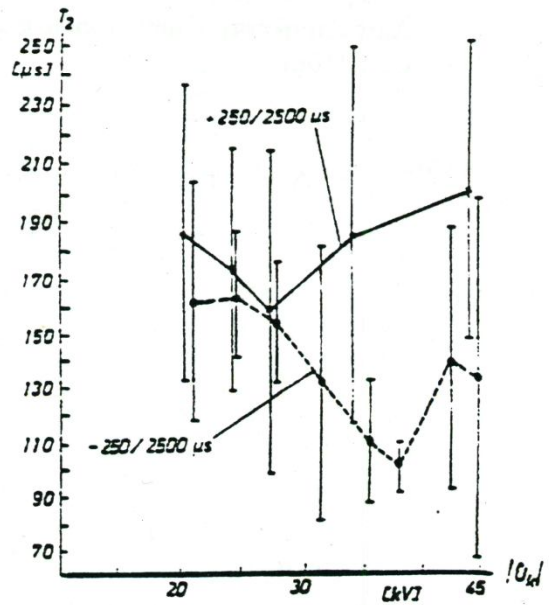
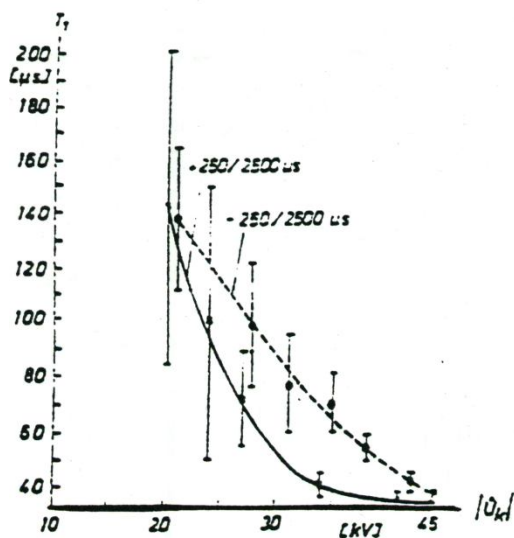
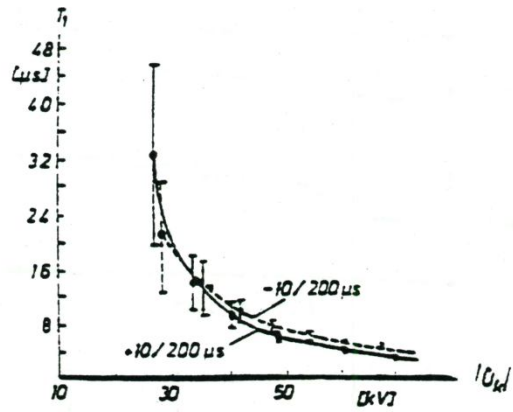
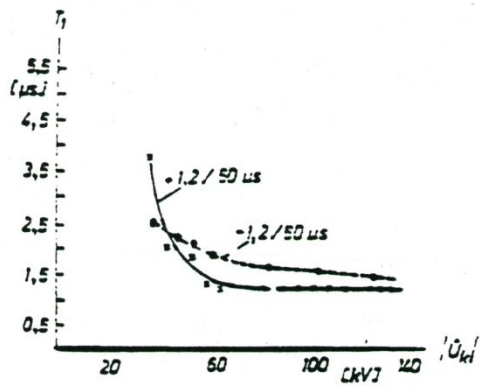
Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα – πλάκα

C_m : 210 nF

Μορφή τάσης σε μ 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)	ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2 / 50)	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250 / 2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

Πίνακας 1.6-1: Αποτέλεσμα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών

Μια άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσής τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές $T_1 = f(|\hat{U}_k|)$ και $T_2 = f(|\hat{U}_k|)$ 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 / 2500 μ s), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 1.6-1 για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



Σχήμα 1.6-6: 1) Χαρακτηριστική $T_1 = f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και $\epsilon_r \approx 2,5 \rightarrow 4,5$) με κρουστικές τάσεις 1,2 / 50 μs , 10 / 200 μs και 250 / 2500 μs .

2) Χαρακτηριστική $T_2 = f(|\hat{U}_k|)$ κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250 / 2500 μs .

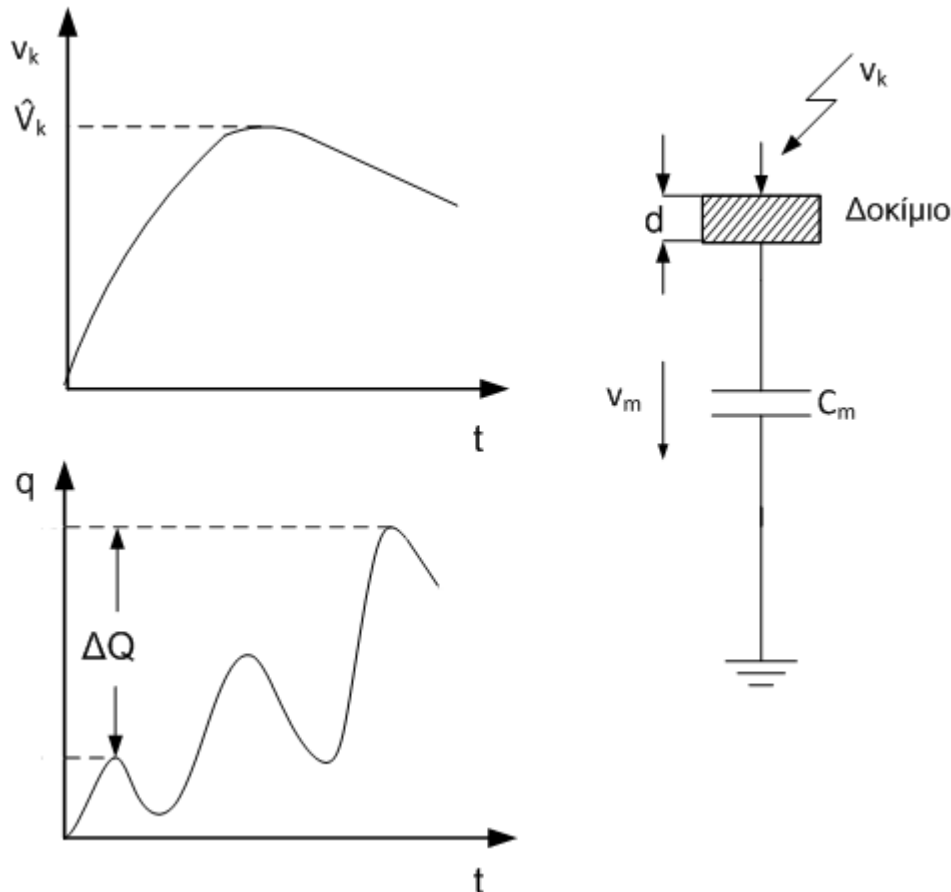
Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα - πλάκα

l : 2 φορές η τυπική απόκλιση

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής εντάσσεται στις στατιστικές μετρήσεις που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.6. Συγκεκριμένα από ένα αριθμό μετρήσεων σε οργανικά στερεά μονωτικά πάχους 1 mm και 2 mm υπό κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200 μ s μετρήθηκαν η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης (\hat{V}_k) και από τα παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων υπολογίστηκε η αύξηση του φορτίου (ΔQ) από το πρώτο μέχρι το τελευταίο άλμα δυναμικού (σχήμα 2-1)



Σχήμα 2-1 : Καθορισμός εννοιών κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων σε

στερεά μονωτικά υπό κρουστικές τάσεις.

v_k : στιγμιαία τιμή της κρουστικής τάσης

\hat{V}_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

d : πάχος δοκιμίου

C_m : πυκνωτής μέτρησης

ΔQ : αύξηση του φορτίου στον C_m

v_m : πτώση τάσης στον C_m

Από την τιμή \hat{V}_k μπορεί κανείς να υπολογίσει τη μέγιστη πεδιακή ένταση από την σχέση:

$$\hat{E} = \frac{2\hat{V}_k}{R \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad (2.1)$$

όπου R: ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας και
d: πάχος δοκιμίου

Με βάση τον καθορισμό της τιμής ΔQ υπολογίστηκε ακολούθως:

1. Η πτώση τάσης v_m στον πυκνωτή C_m :

$$v_m = \frac{\Delta Q}{C_m} \quad (2.2)$$

2. Η ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων ΔW :

$$\Delta W = \frac{1}{2} v_m k \quad (2.3.1)$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} \frac{\Delta Q}{C_m} k \quad (2.3.2)$$

όπου k ένας συντελεστής.

3. Η ταχύτητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων v :

$$\Delta W = \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (2.4.1)$$

$$v = \sqrt{2 \frac{\Delta W}{m_0}} \quad (2.4.2)$$

Η σχέση (2.4.2) λαμβάνοντας υπόψη την (2.3.2) γίνεται:

$$v = \sqrt{\frac{\Delta Q}{C_m m_0} k} \quad (2.4.3)$$

4. Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας f :

$$f = \frac{\Delta W}{h} \quad (2.5.1)$$

$$f = \frac{k \Delta Q}{2h C_m} \quad (2.5.2)$$

όπου $h = 6,626068 \cdot 10^{-34}$ J sec είναι η σταθερά του Planck.

5. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας λ:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.6.1)$$

$$\lambda = \frac{2hC_m c}{k\Delta Q} \quad (2.6.2)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και ισούται με $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$.

6. Η αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων ΔC :

$$\Delta C = \frac{\Delta Q}{\hat{V}_k} \quad (2.7)$$

7. Το πλήθος των ελευθέρων ηλεκτρονίων N :

$$N = \frac{\Delta Q}{q_e} \quad (2.8)$$

όπου το $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο.

8. Η κινητικότητα b η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$b = \frac{v}{\hat{E}} \quad (2.9.1)$$

$$b = \frac{\sqrt{\frac{\Delta Q}{C_m m_0} k}}{\hat{E}} \quad (2.9.2)$$

Επισημαίνεται ότι το v είναι η ταχύτητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων.

9. Η ειδική αγωγιμότητα του δοκιμίου:

$$\sigma = Nq_e b \quad (2.10.1)$$

$$\sigma = \Delta Q b \quad (2.10.2)$$

10. Η πυκνότητα ροής του ρεύματος:

$$J = \sigma \hat{E} \quad (2.11.1)$$

$$J = \Delta Q b \hat{E} \quad (2.11.2)$$

3. Οι μετρήσεις- υπολογισμοί που έγιναν σε στερεά μονωτικά υπό κρουστικές τάσεις 10/200 μs

Ακολούθως δίνονται οι χαρακτηριστικές :

$$\Delta W = F(U_k, E)$$

$$v = F(U_k, E)$$

$$\lambda = F(U_k, E)$$

$$f = F(U_k, E)$$

$$\sigma = F(U_k, E)$$

$$j = F(U_k, E)$$

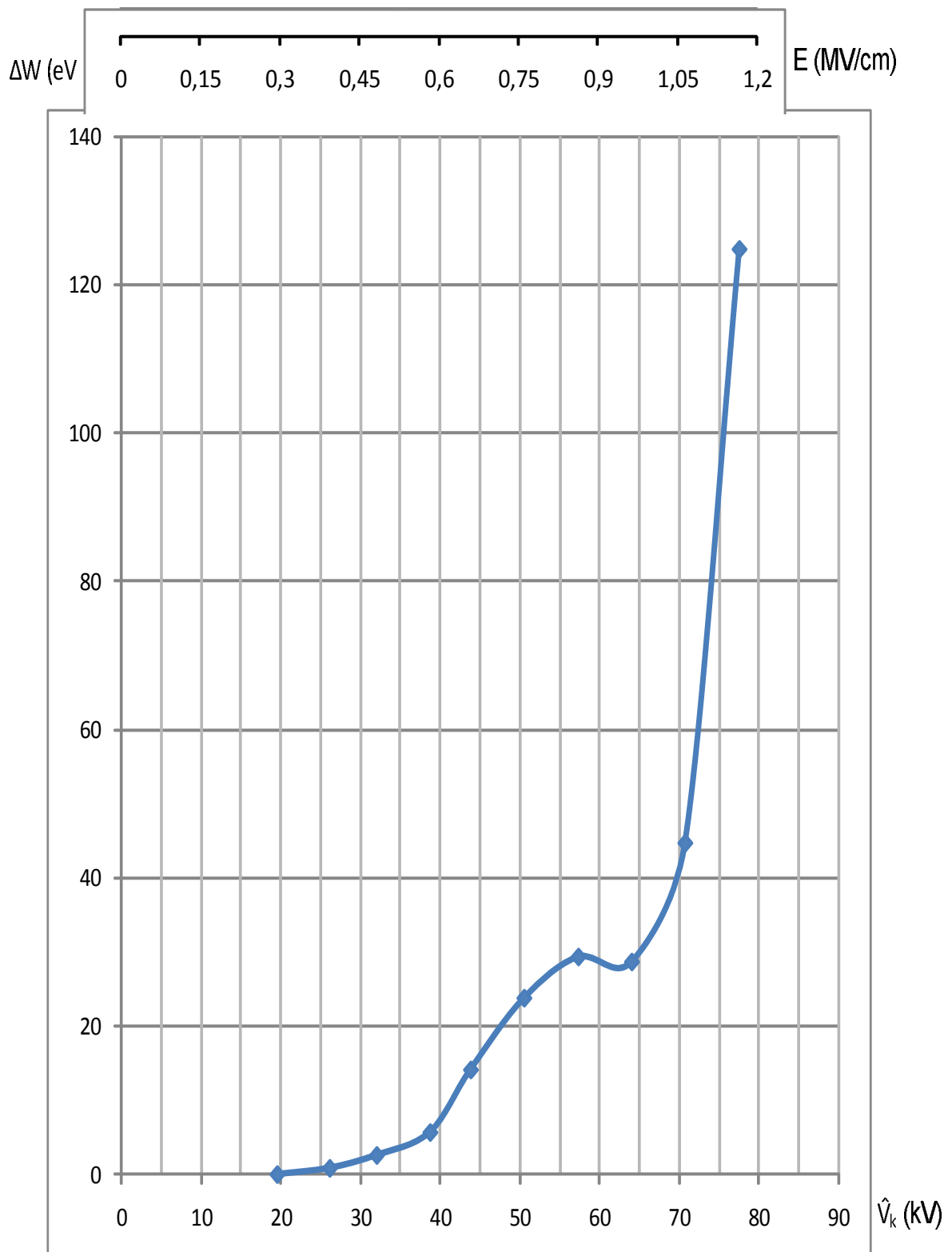
$$\Delta C = F(U_k, E)$$

$$N = F(U_k, E)$$

$$b = F(U_k, E)$$

που προκύπτουν από επεξεργασία των μετρήσεων, τις οποίες πήραμε επιβάλλοντας σε δοκίμια πάχους $d = 1 \text{ mm}$ και $d = 2 \text{ mm}$ κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής και αρνητικής πολικότητας. Στο τέλος του κεφαλαίου βρίσκονται οι πίνακες με τις πειραματικές μετρήσεις και τους υπολογισμούς. Σχόλια επί των αποτελεσμάτων γίνονται στο κεφάλαιο 4.

3.1 Παλμογραφήματα

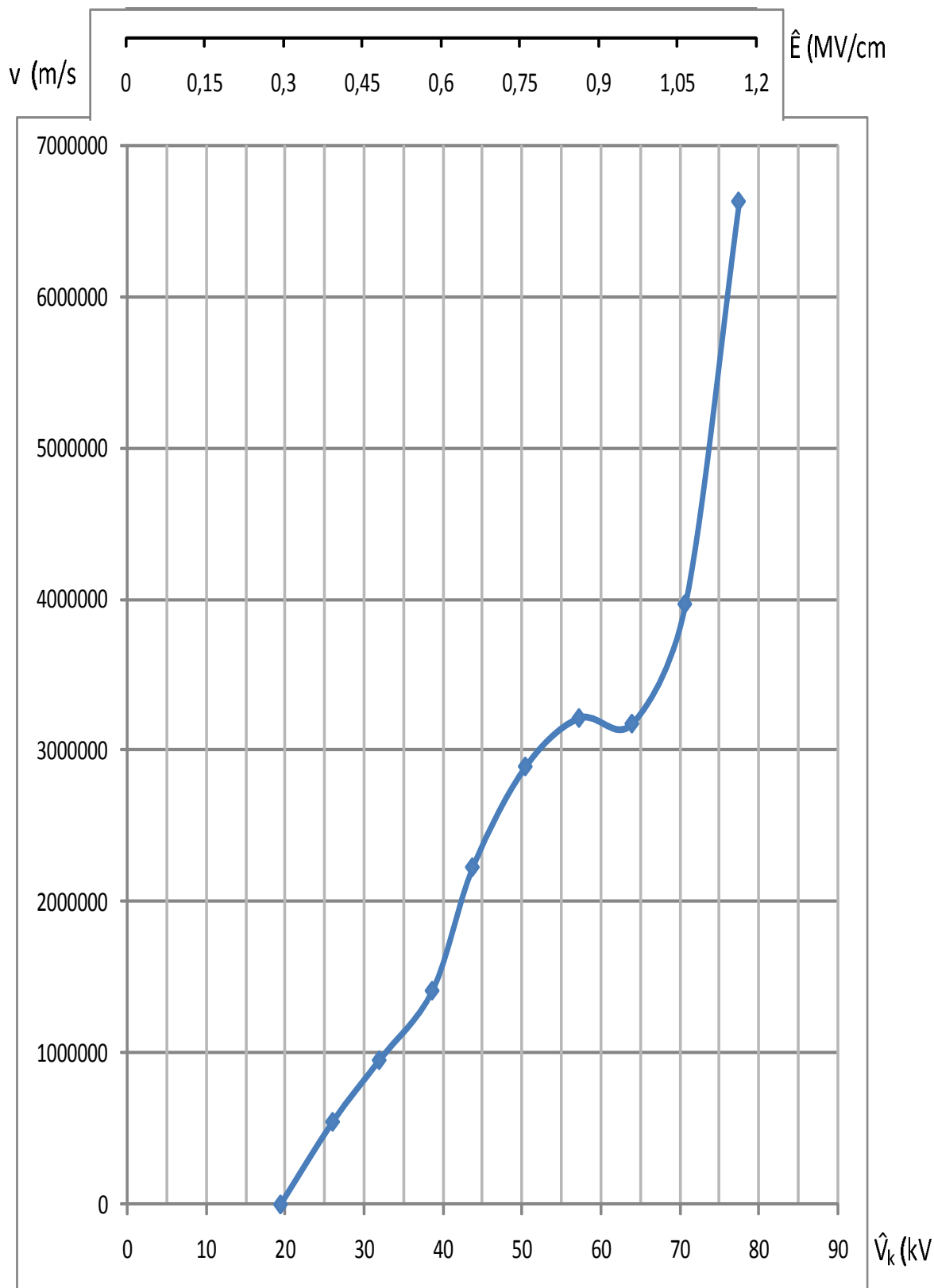


Σχήμα 3.1-1 : Χαρακτηριστική $\Delta W = F(U_k, E)$ σε eV με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

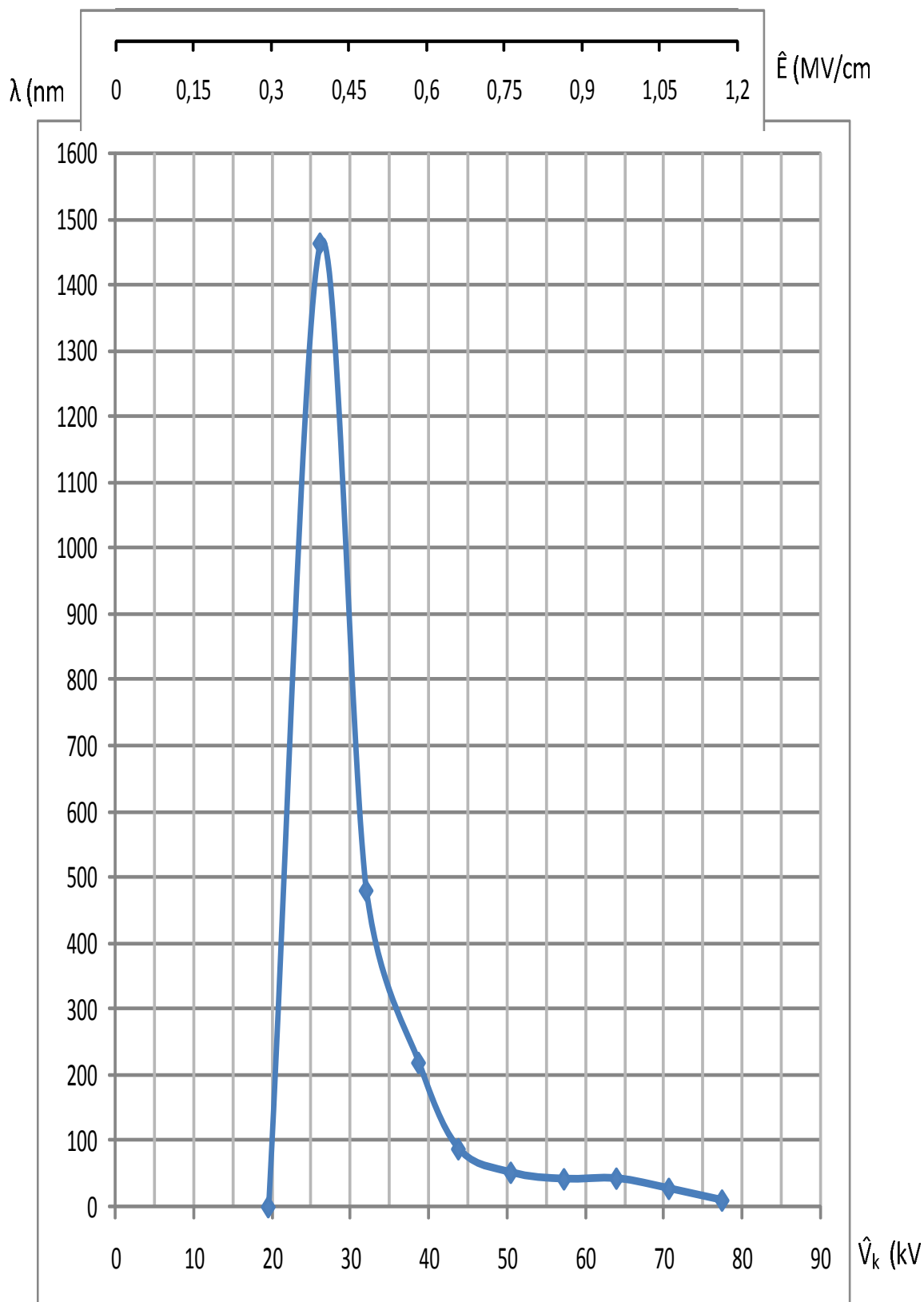
ΔW : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

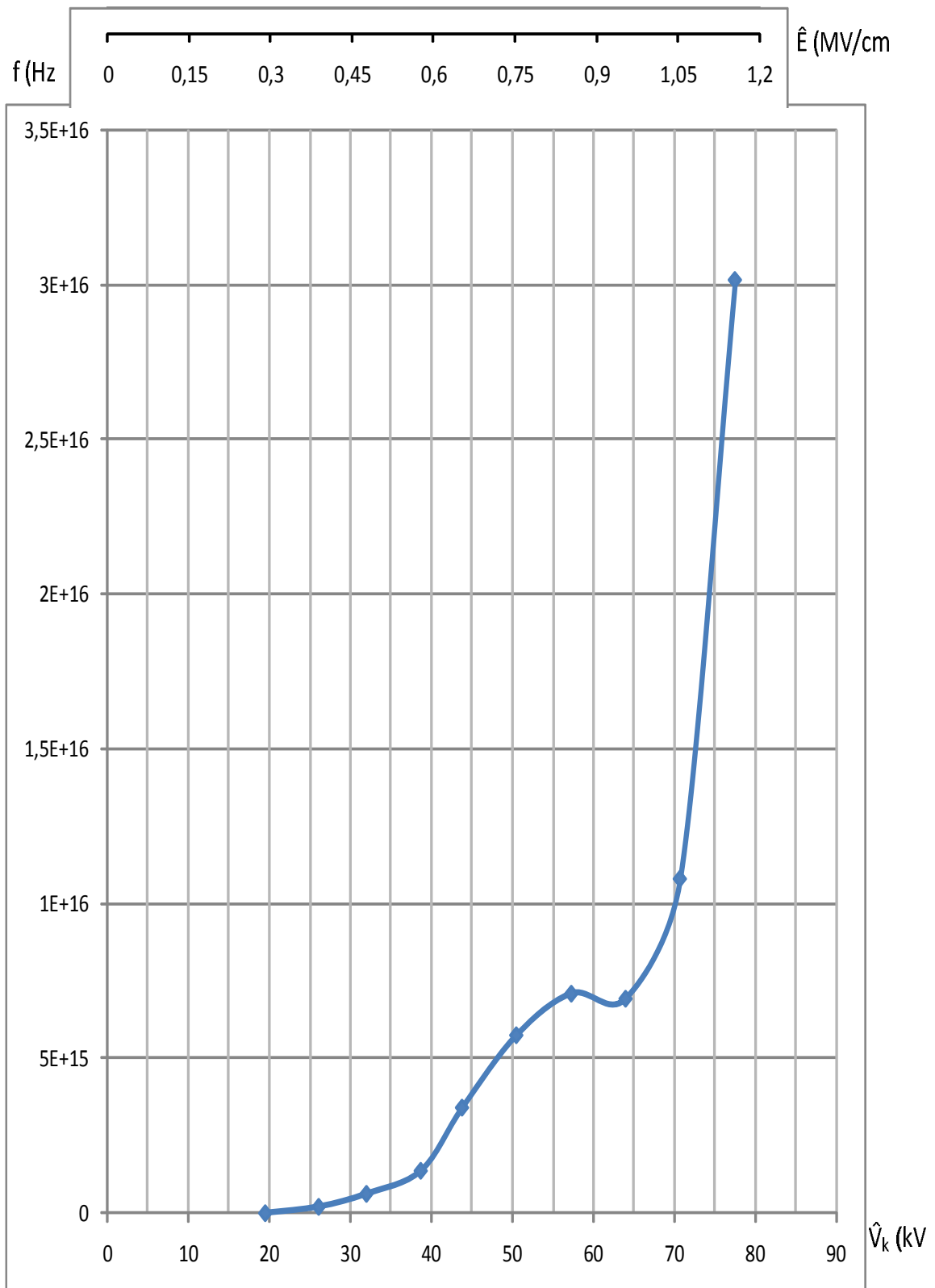
E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



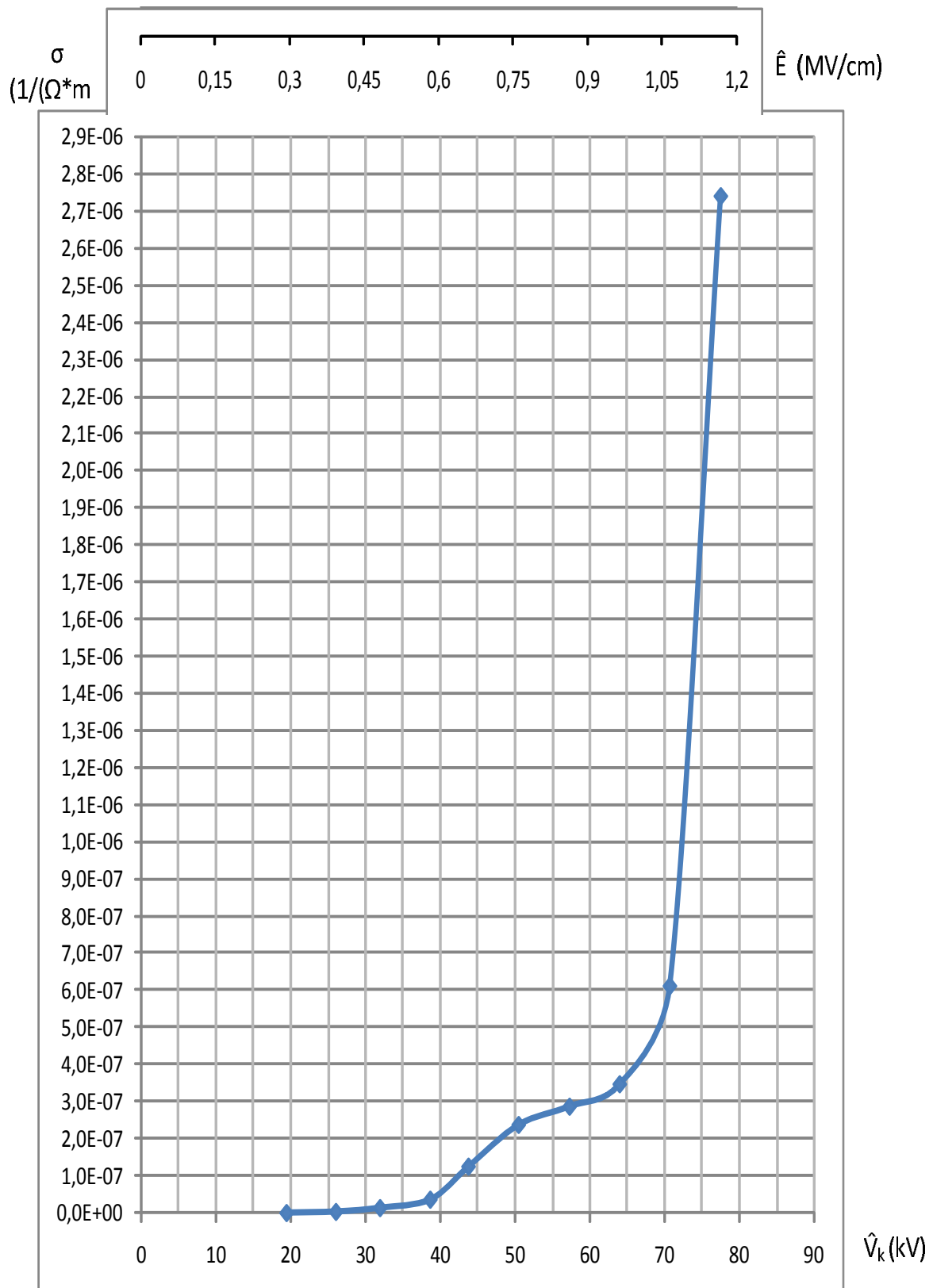
Σχήμα 3.1-2 : Χαρακτηριστική $v = F(U_k, E)$ σε m/s με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 v : ταχύτητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



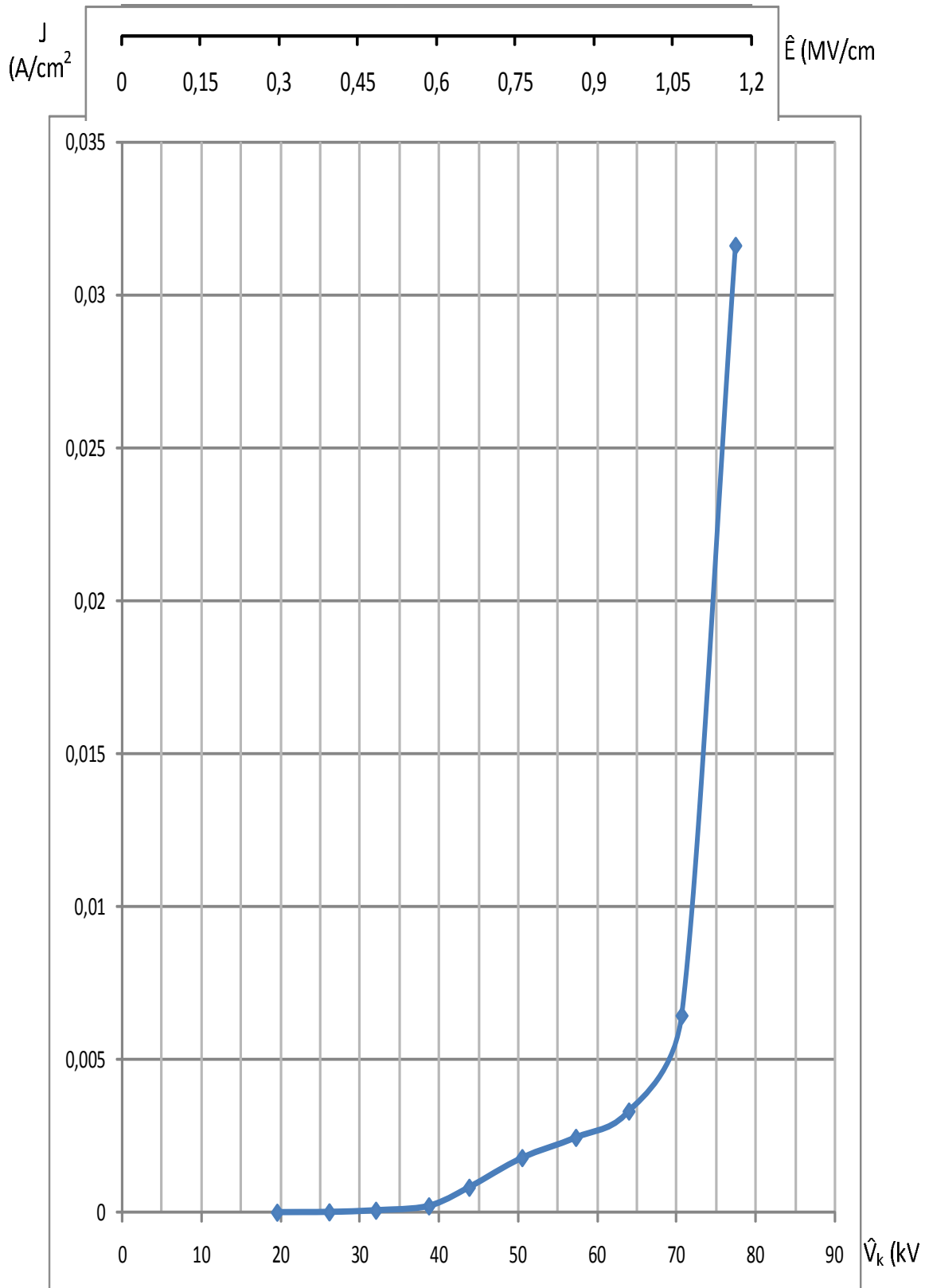
Σχήμα 3.1-3 : Χαρακτηριστική $\lambda = F(U_k, E)$ σε nm με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1$ mm.
 λ : μήκος κύματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.1-4 : Χαρακτηριστική $f = F(U_k , E)$ σε Hz με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 f : συχνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.1-5 : Χαρακτηριστική $\sigma = F(U_k , E)$ σε $(\Omega m)^{-1}$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1mm$.
 σ : ειδική αγωγιμότητα
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

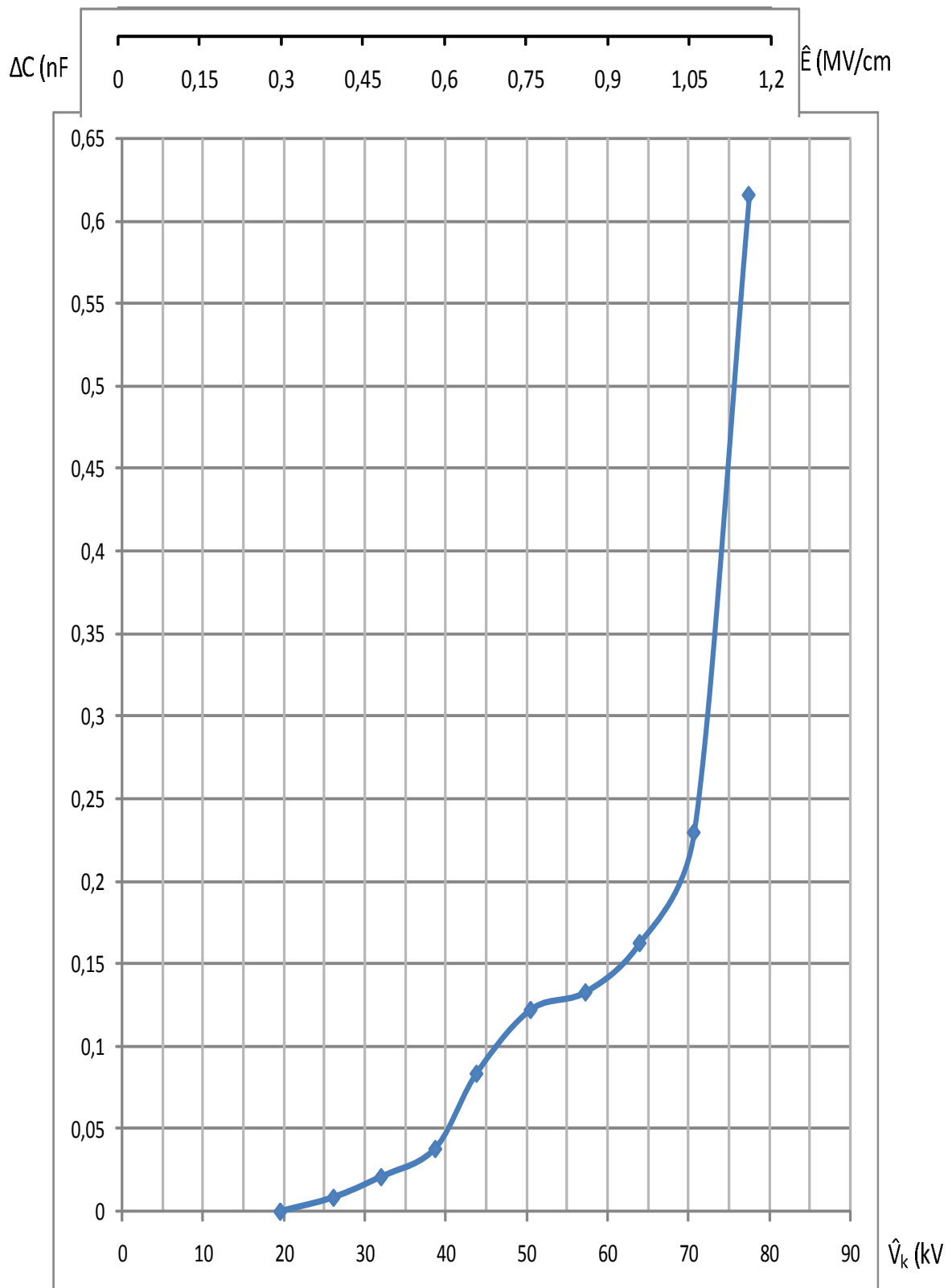


Σχήμα 3.1-6 : Χαρακτηριστική $j = F(U_k, E)$ σε A/cm² με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=1mm.

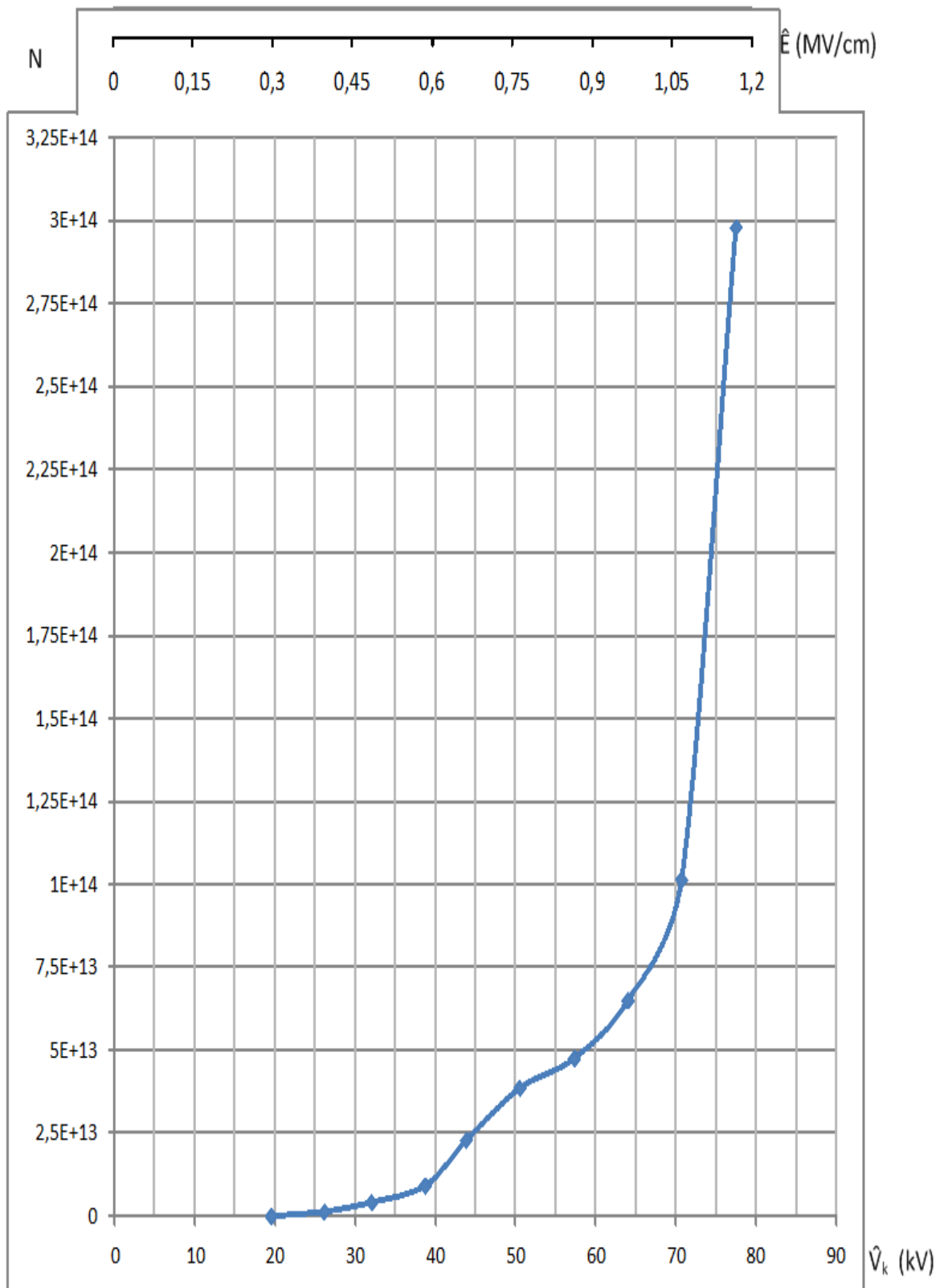
j : πυκνότητα ροής ρεύματος

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.1-7 : Χαρακτηριστική $\Delta C = F(U_k, E)$ σε nF με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=1mm.
 ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

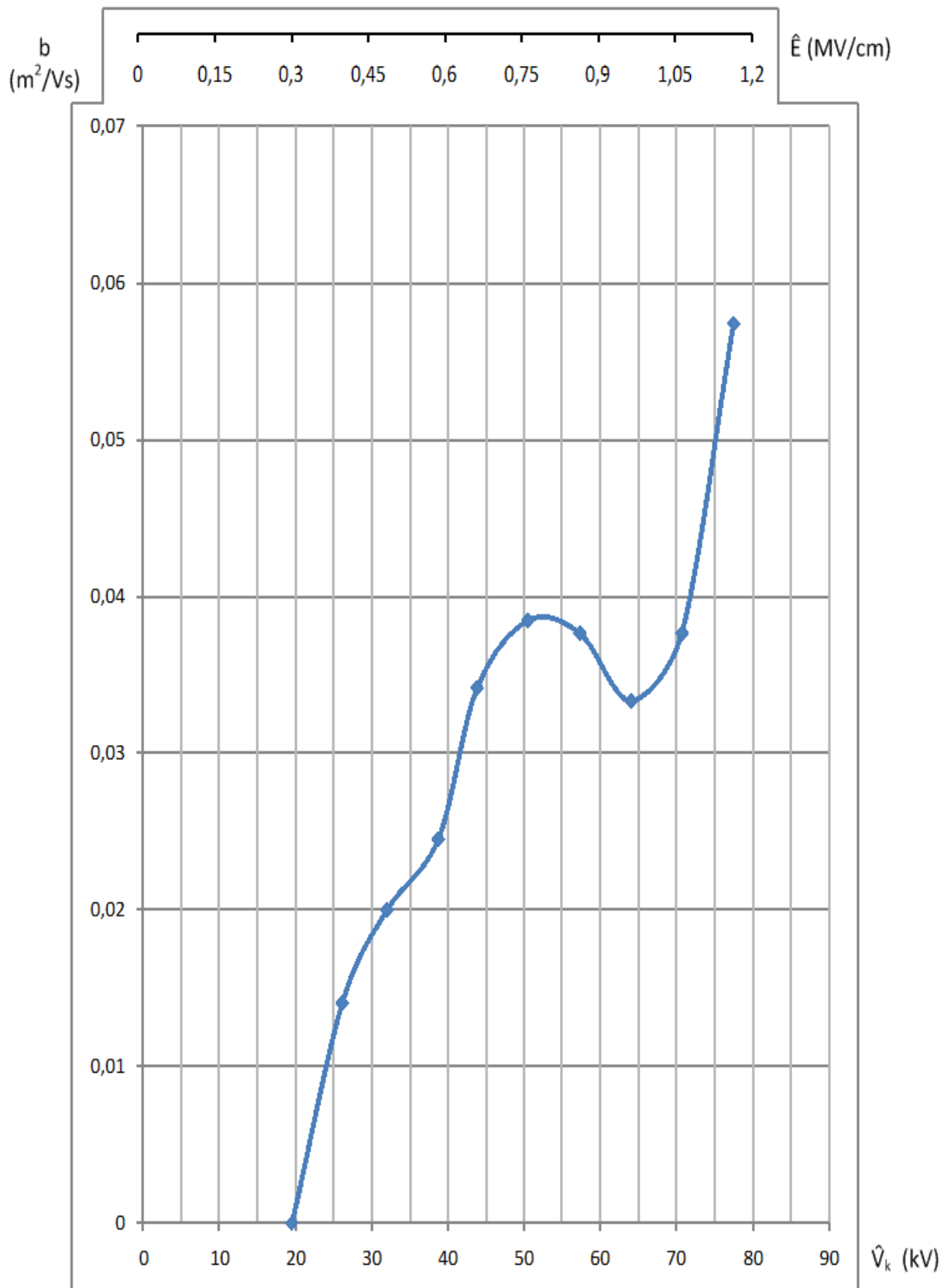


Σχήμα 3.1-8 : Χαρακτηριστική $N = F(U_k, E)$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

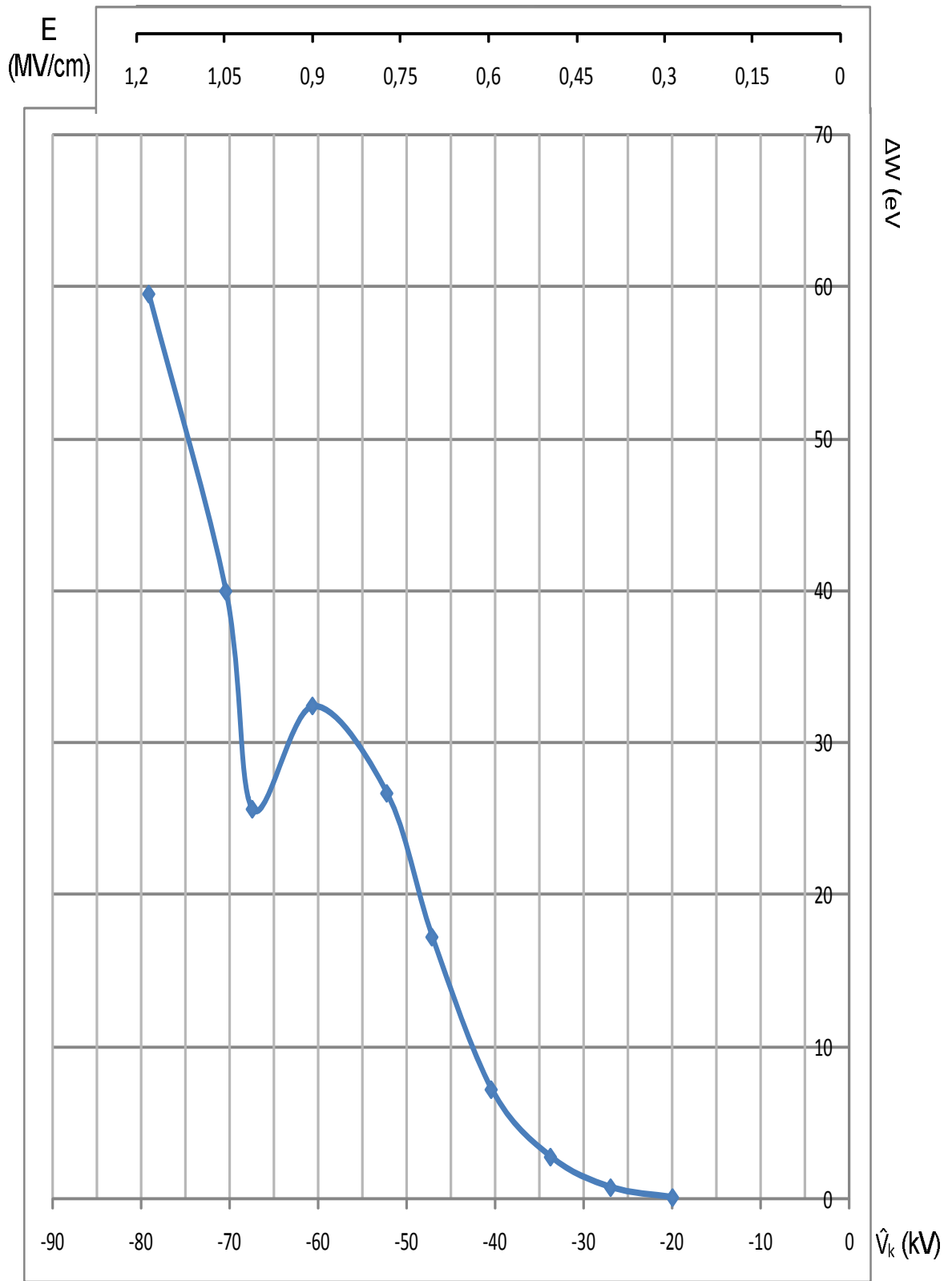
N : αριθμός ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

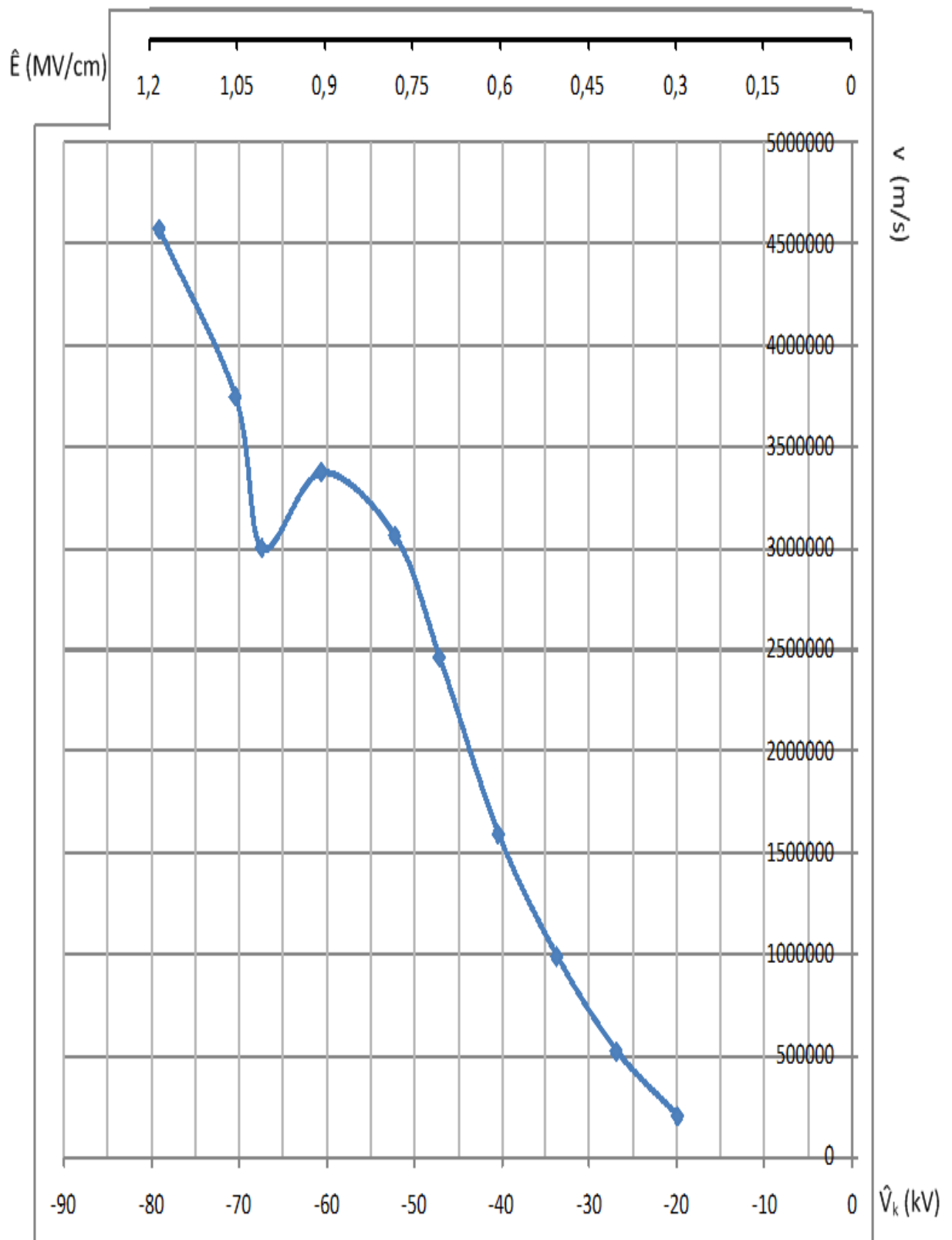
E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.1-9: Χαρακτηριστική $b = F(U_k, E)$ σε m^2/Vs με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1mm$.
 b : κινητικότητα ελευθέρων ηλεκτρονίων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.2-1 : Χαρακτηριστική $\Delta W = F(U_k, E)$ σε eV με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 ΔW : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

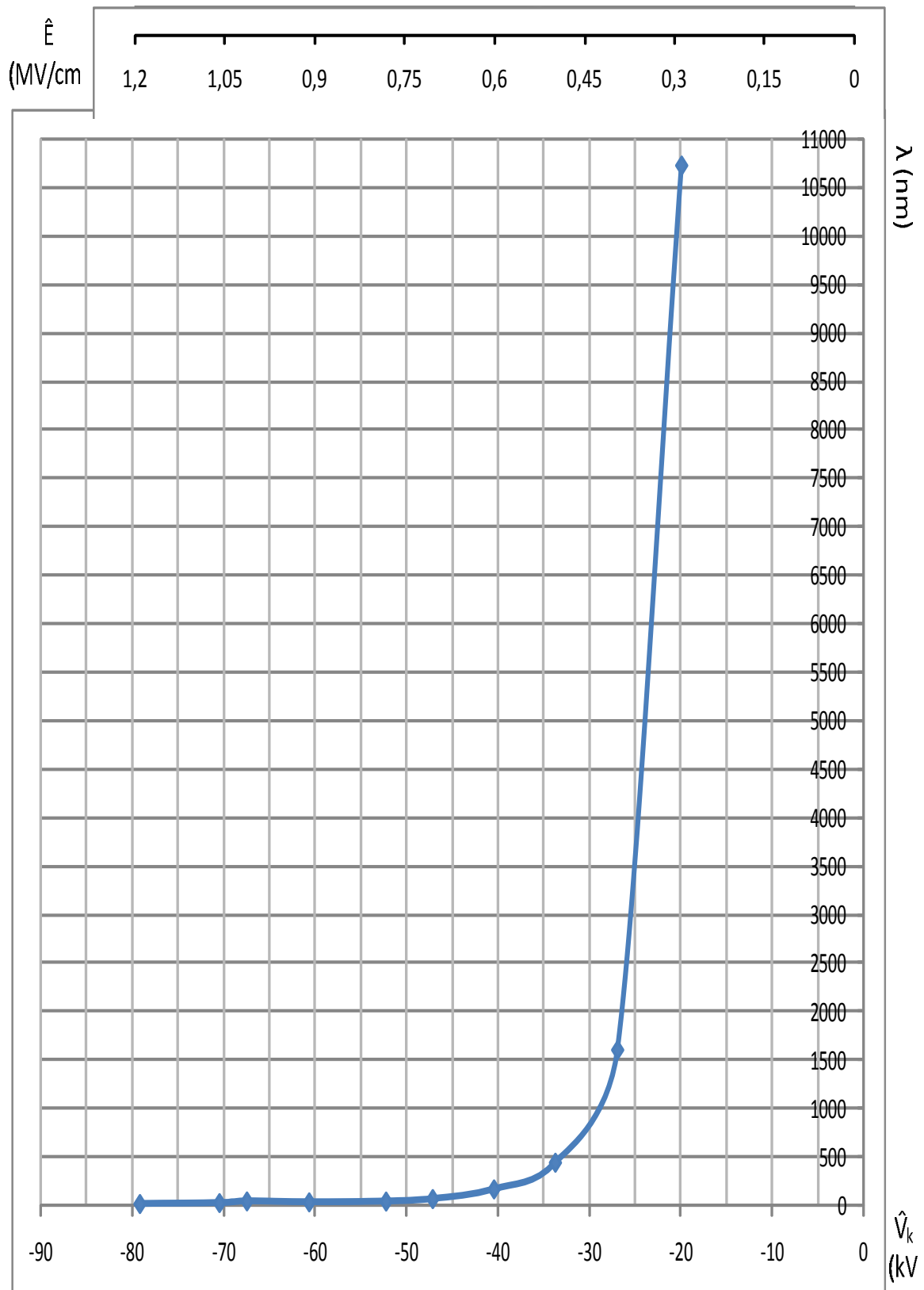


Σχήμα 3.2-2 : Χαρακτηριστική $v = F(U_k, E)$ σε m/s με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=1mm.

v : ταχύτητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

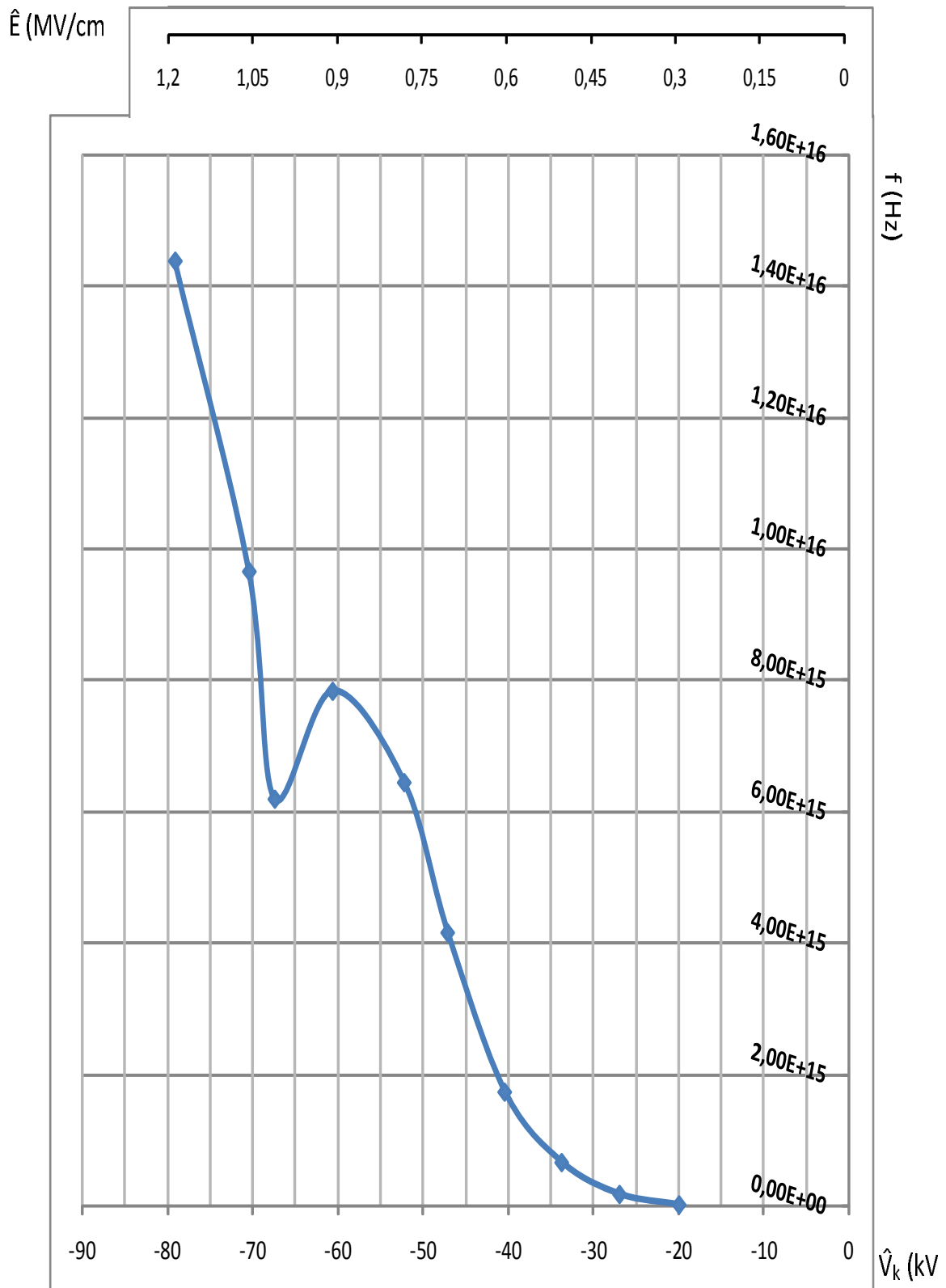


Σχήμα 3.2-3 : Χαρακτηριστική $\lambda = F(U_k, E)$ σε nm με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

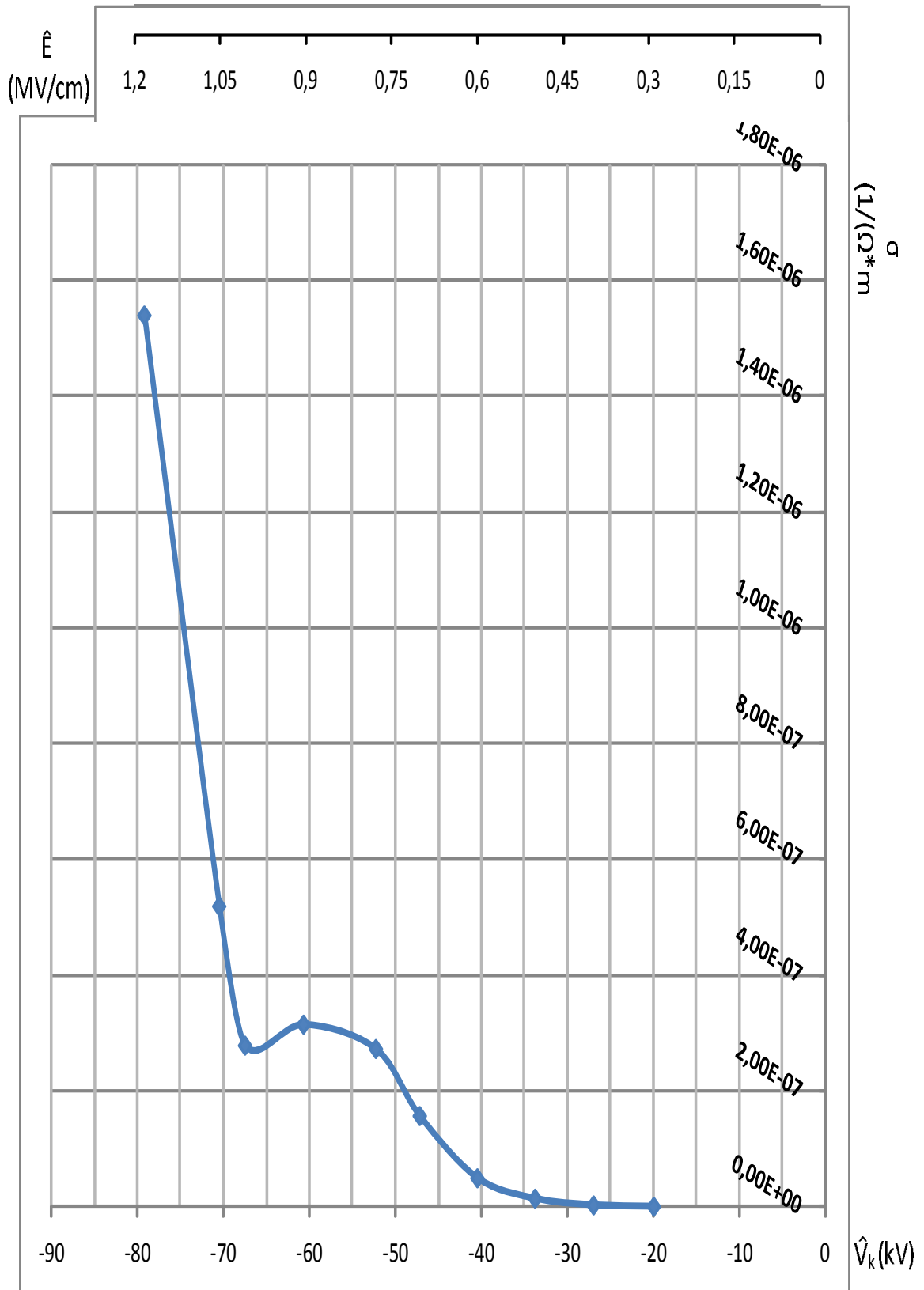
λ : μήκος κύματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

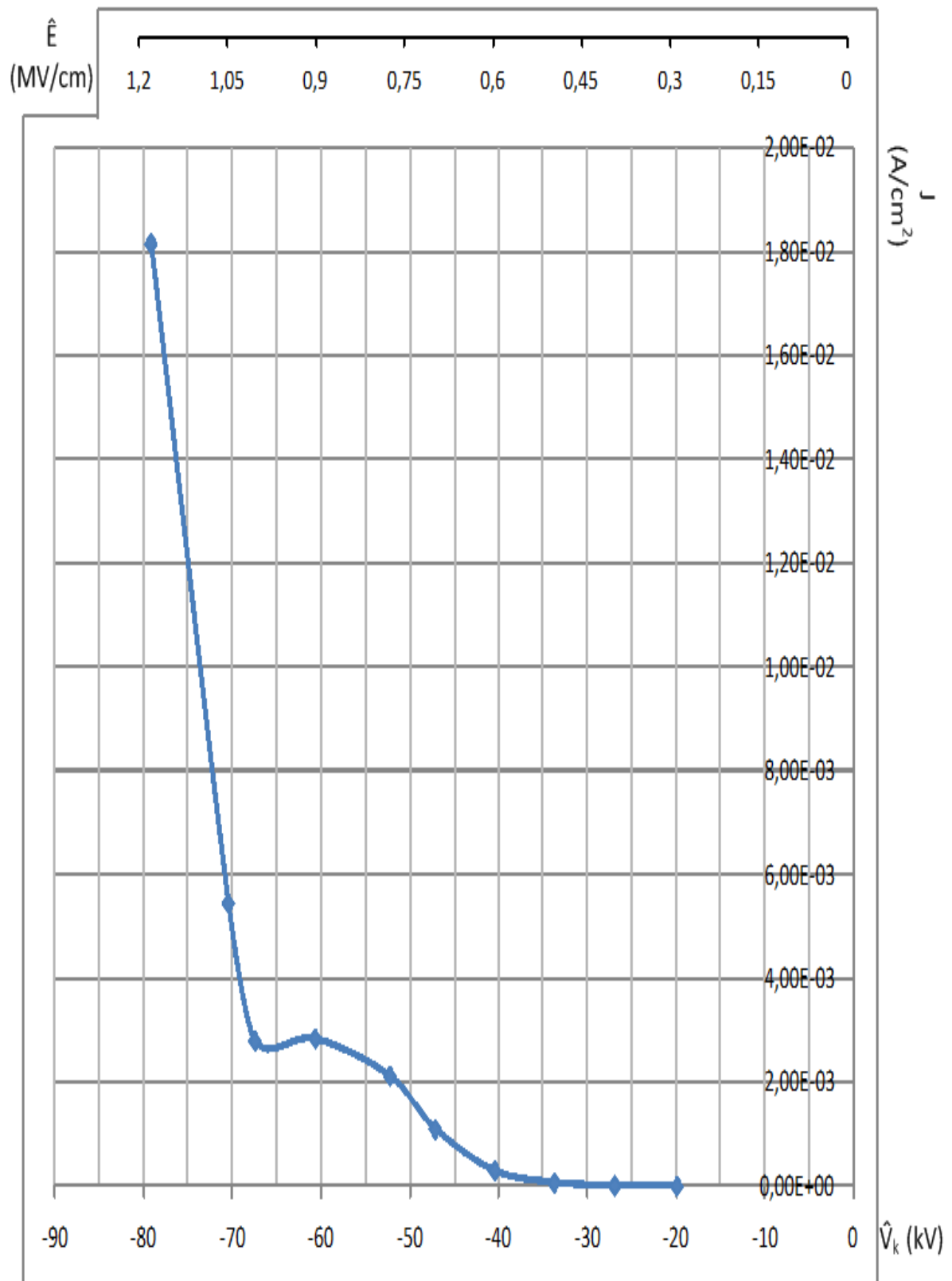
E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.2-4 : Χαρακτηριστική $f = F(U_k, E)$ σε Hz με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 f : συχνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.2-5 : Χαρακτηριστική $\sigma = F(U_k , E)$ σε $(\Omega\text{m})^{-1}$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 σ : ειδική αγωγιμότητα
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

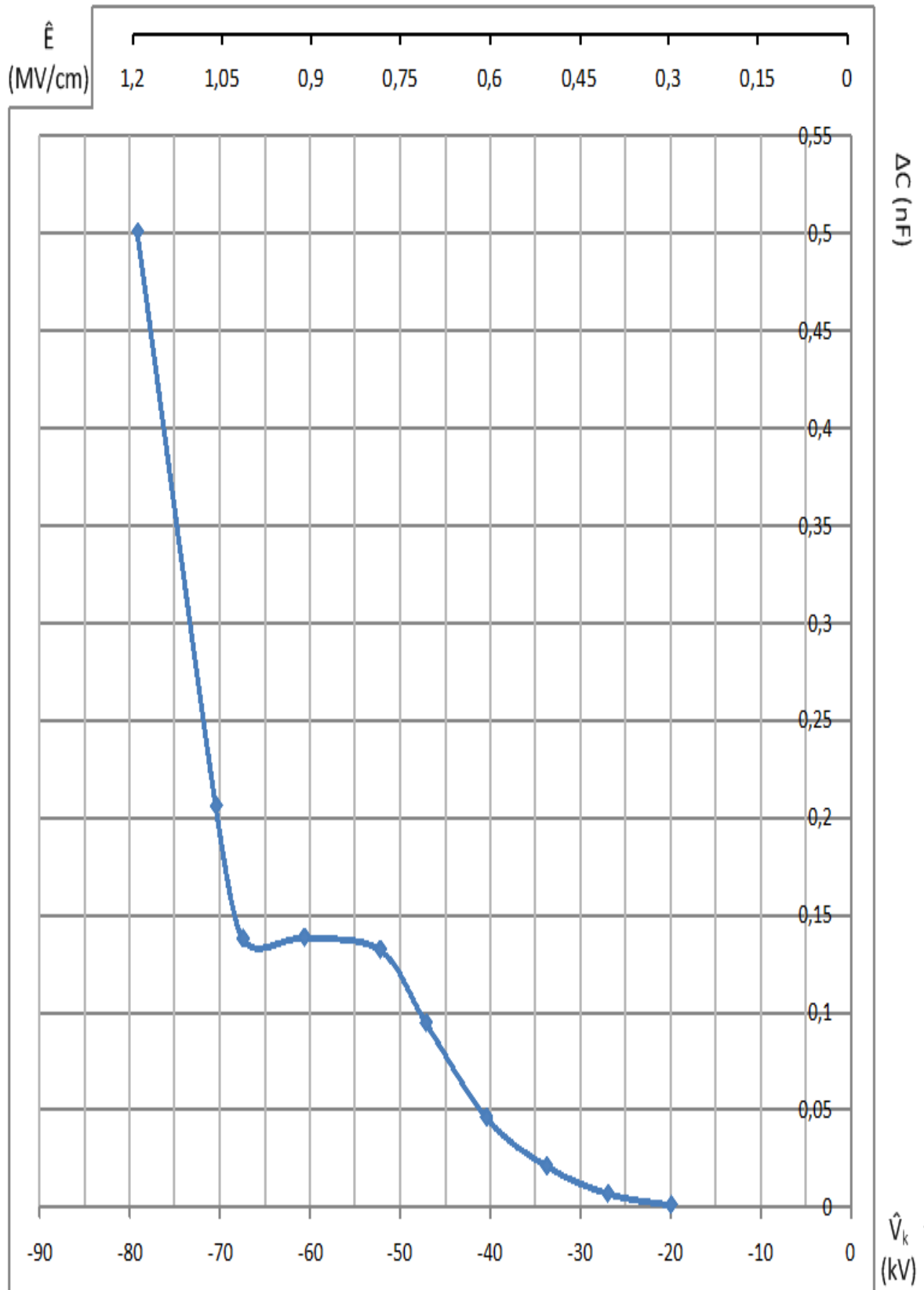


Σχήμα 3.2-6 : Χαρακτηριστική $j = F(U_k, E)$ σε A/cm² με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=1mm.

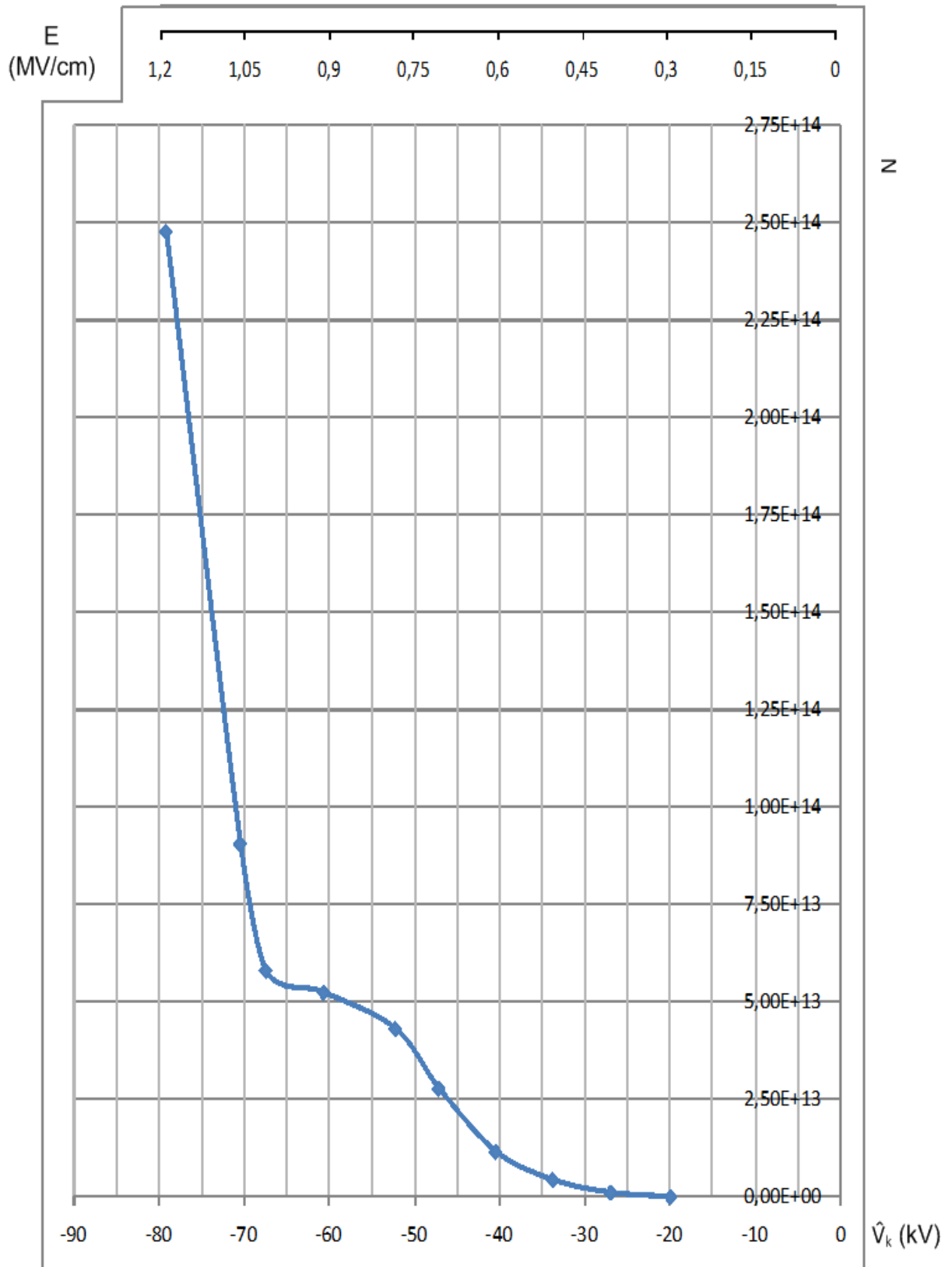
j : πυκνότητα ροής ρεύματος

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.2-7 : Χαρακτηριστική $\Delta C = F(U_k, E)$ σε nF με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

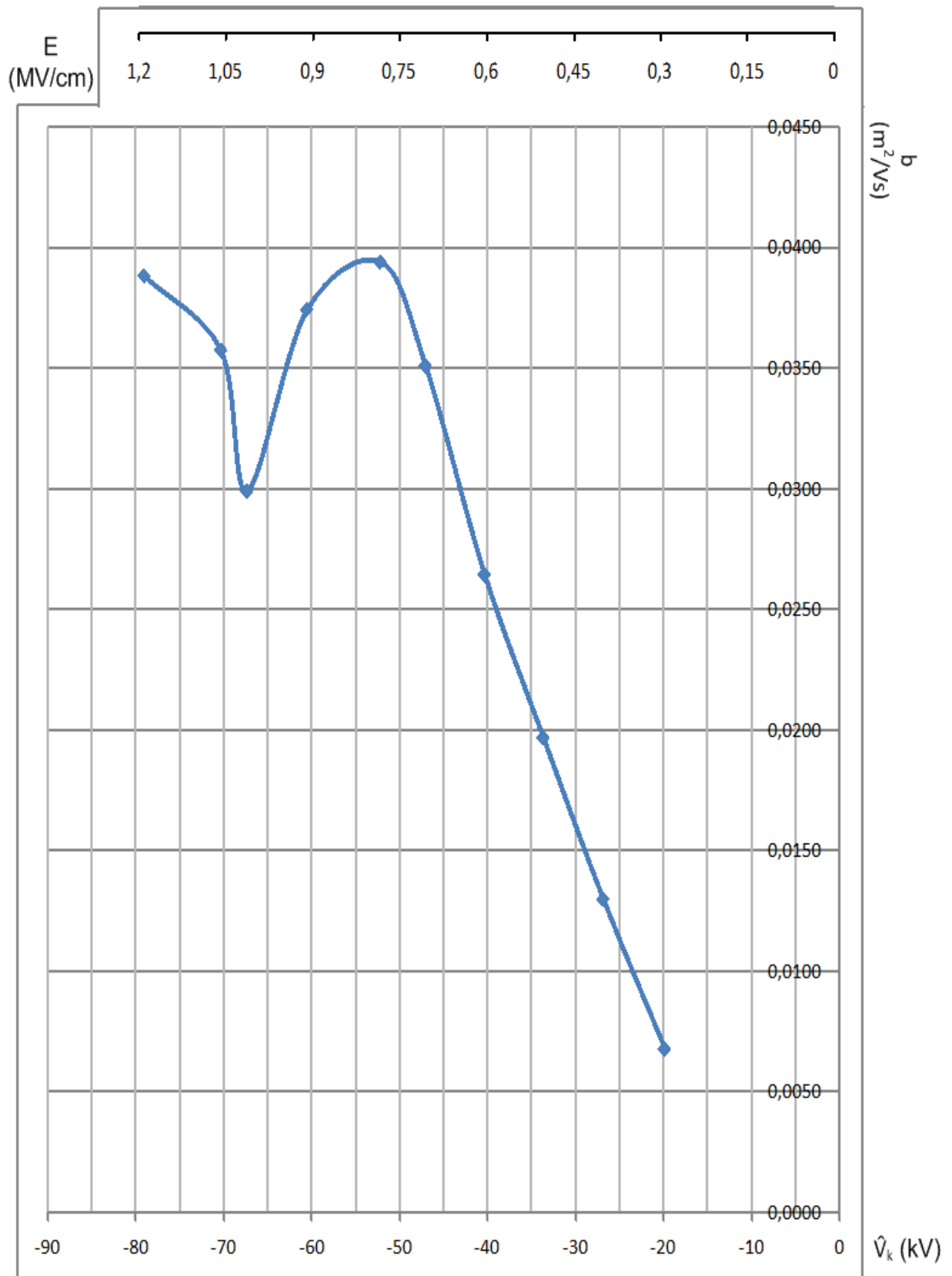


Σχήμα 3.2-8 : Χαρακτηριστική $N = F(U_k, E)$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.

N : αριθμός ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

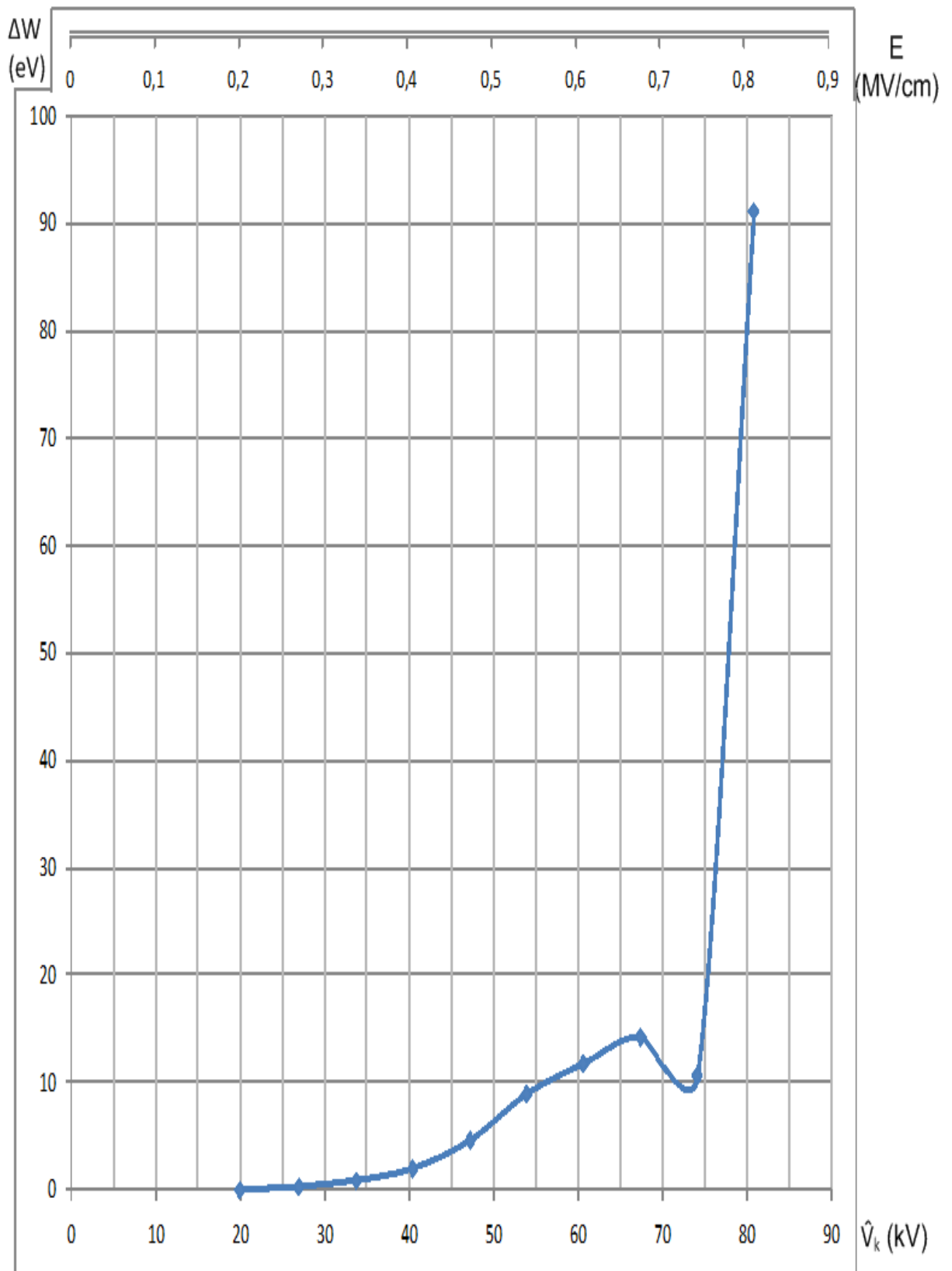


Σχήμα 3.2-9: Χαρακτηριστική $b = F(U_k, E)$ σε m^2/Vs με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1mm$.

b : κινητικότητα ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

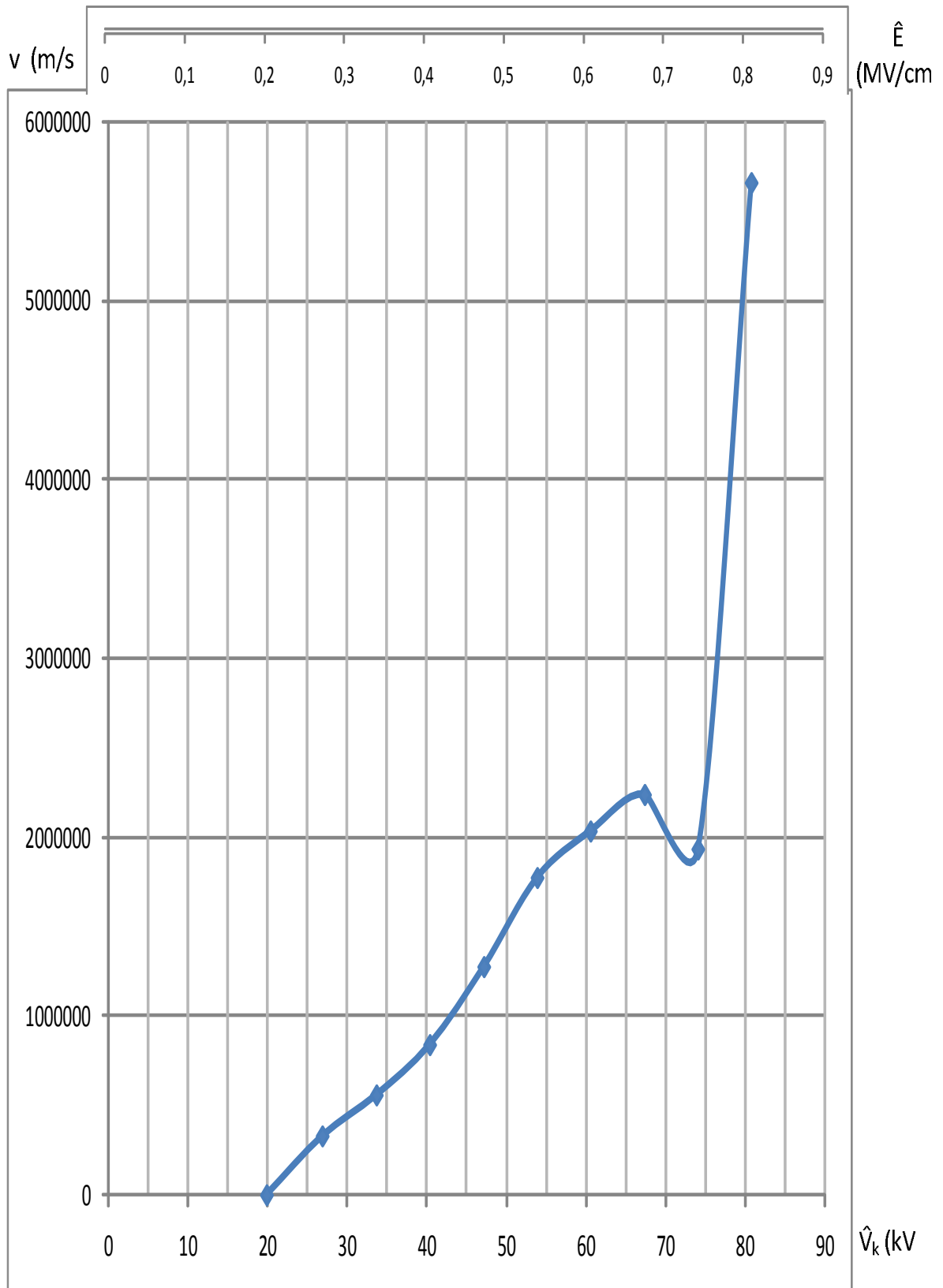


Σχήμα 3.3-1 : Χαρακτηριστική $\Delta W = F(U_k , E)$ σε eV με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

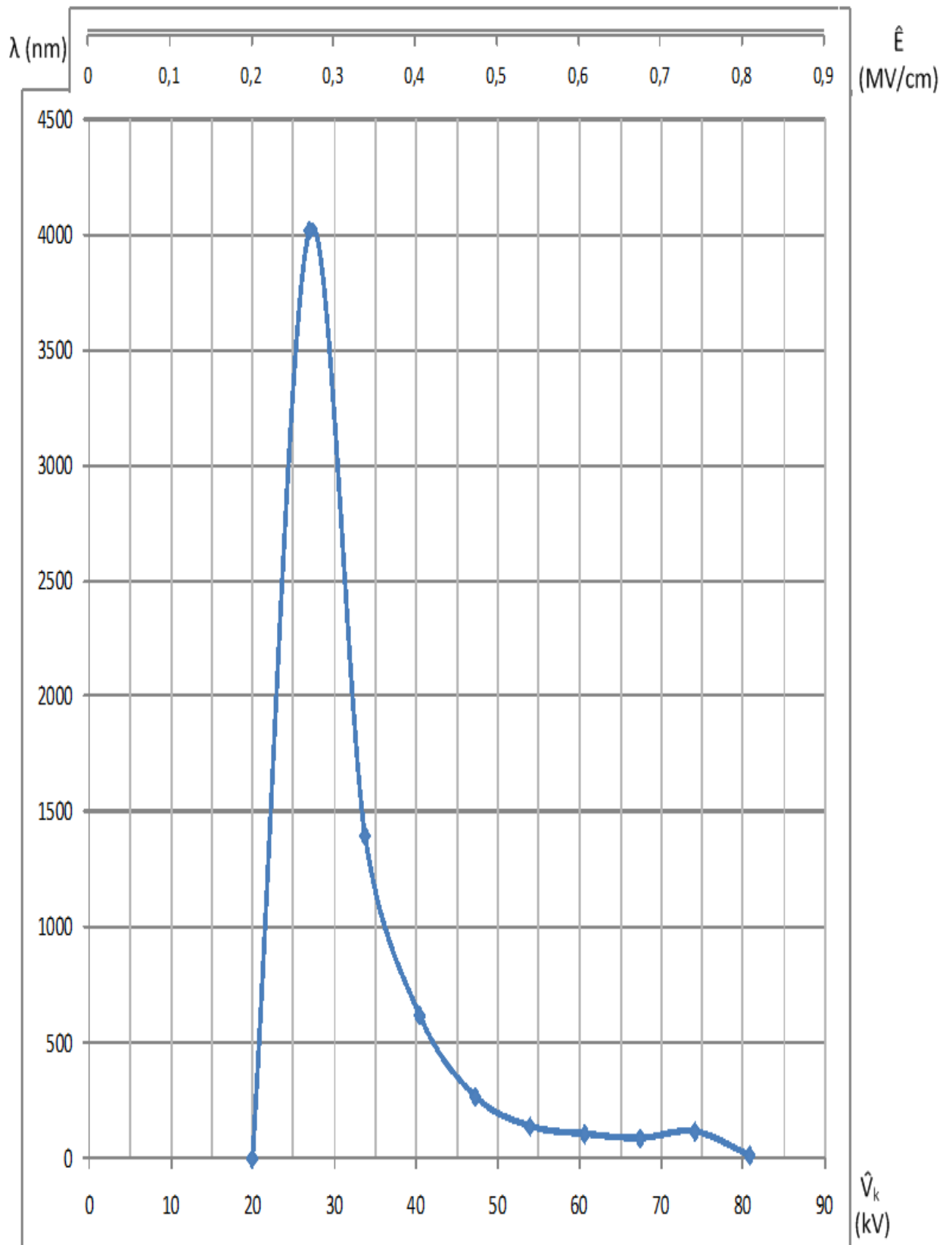
ΔW : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

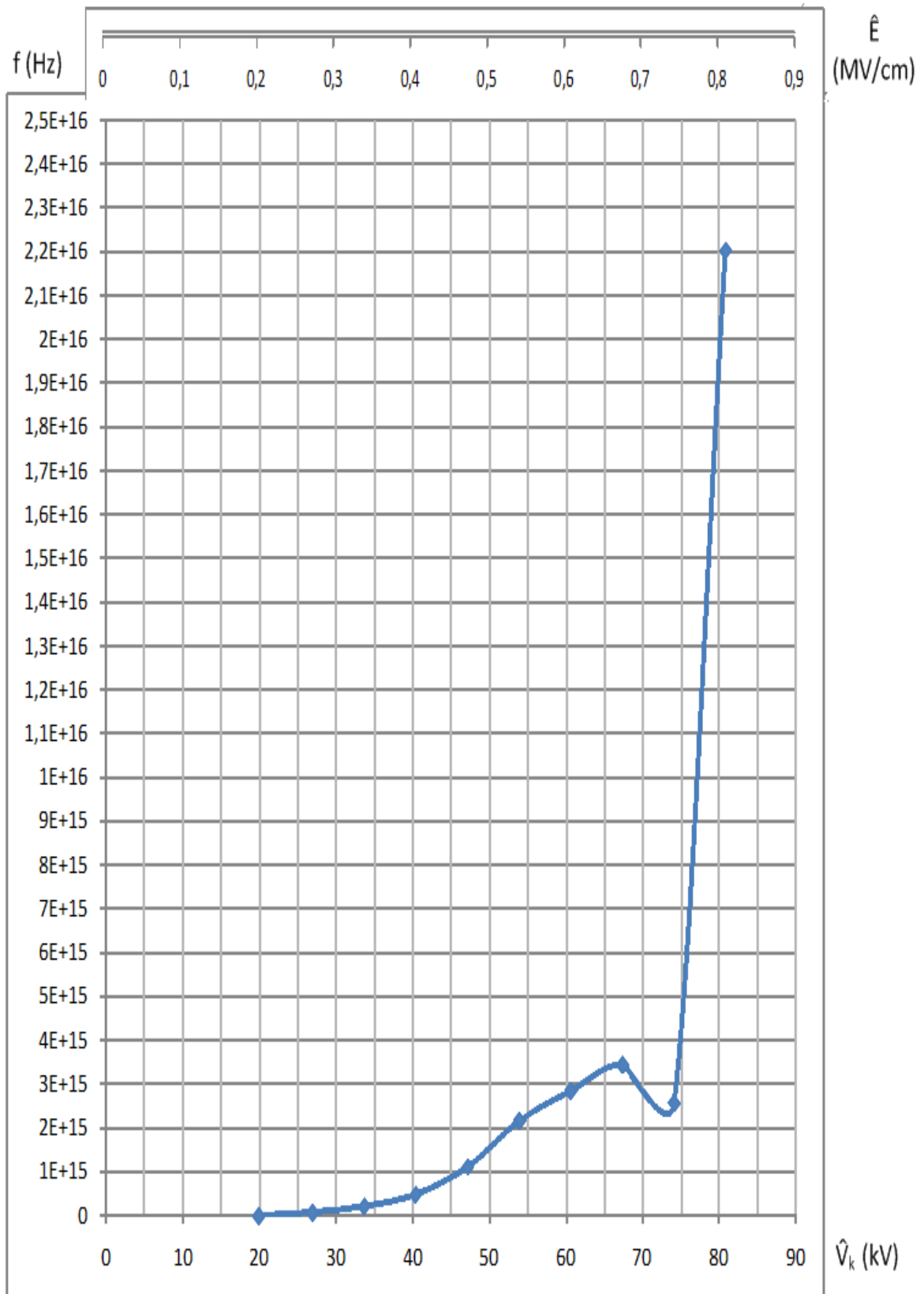
E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



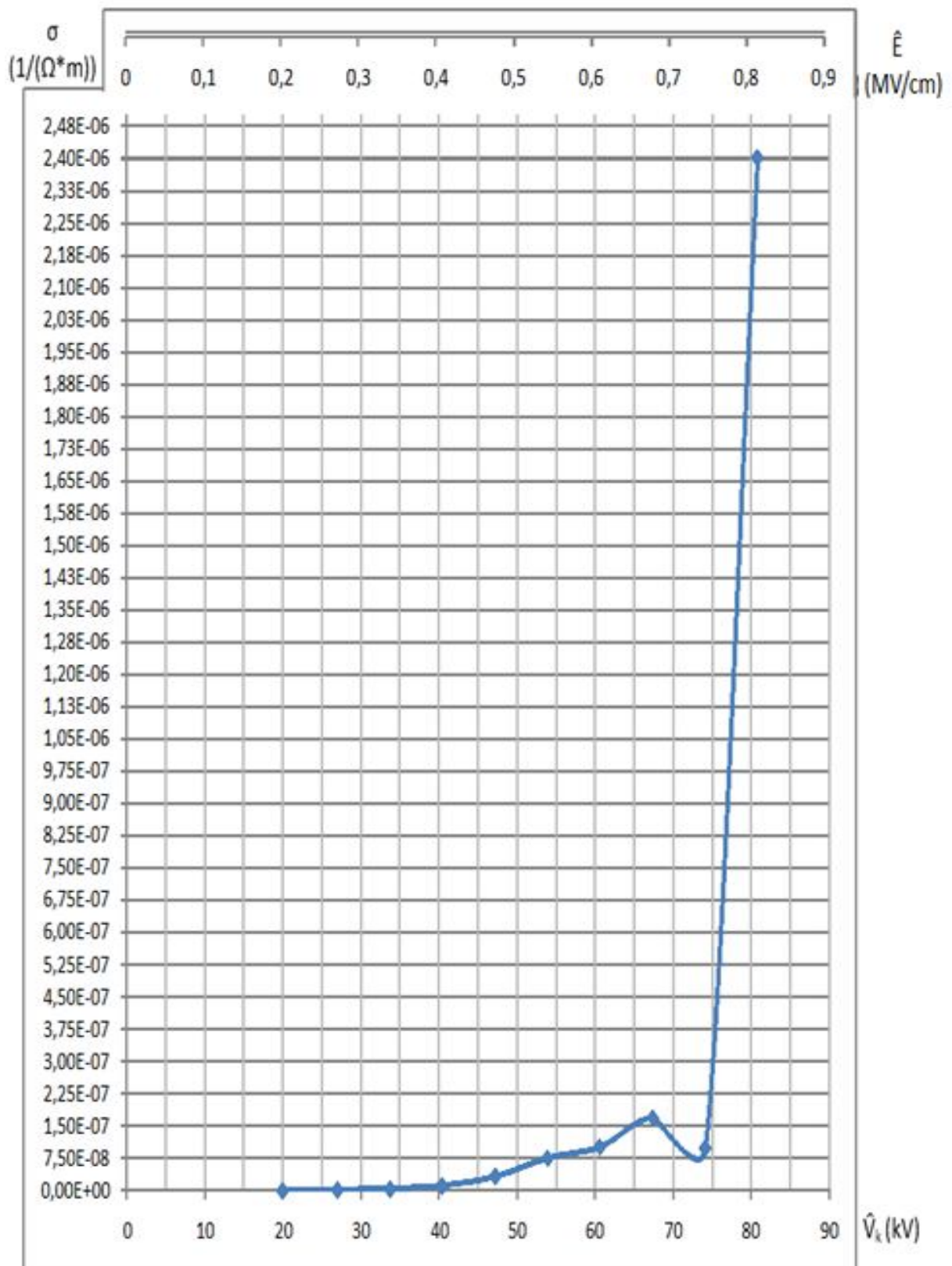
Σχήμα 3.3-2 : Χαρακτηριστική $v = F(U_k, E)$ σε m/s με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.
 v : ταχύτητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



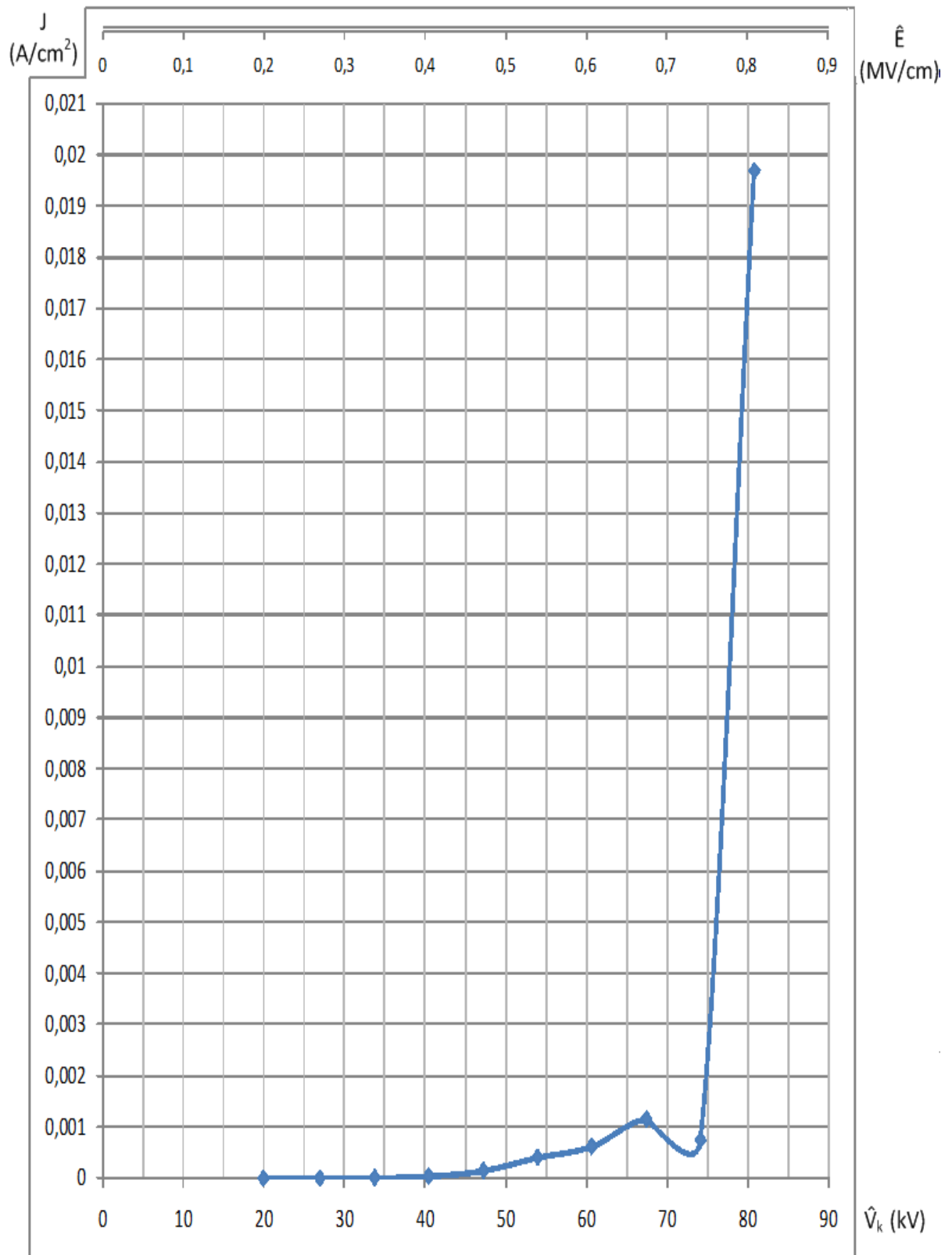
Σχήμα 3.3-3 : Χαρακτηριστική $\lambda = F(U_k, E)$ σε nm με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.
 λ : μήκος κύματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.3-4 : Χαρακτηριστική $f = F(U_k, E)$ σε Hz με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2$ mm.
 f : συχνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.3-5 : Χαρακτηριστική $\sigma = F(U_k, E)$ σε $(\Omega m)^{-1}$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2mm$.
 σ : ειδική αγωγιμότητα
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

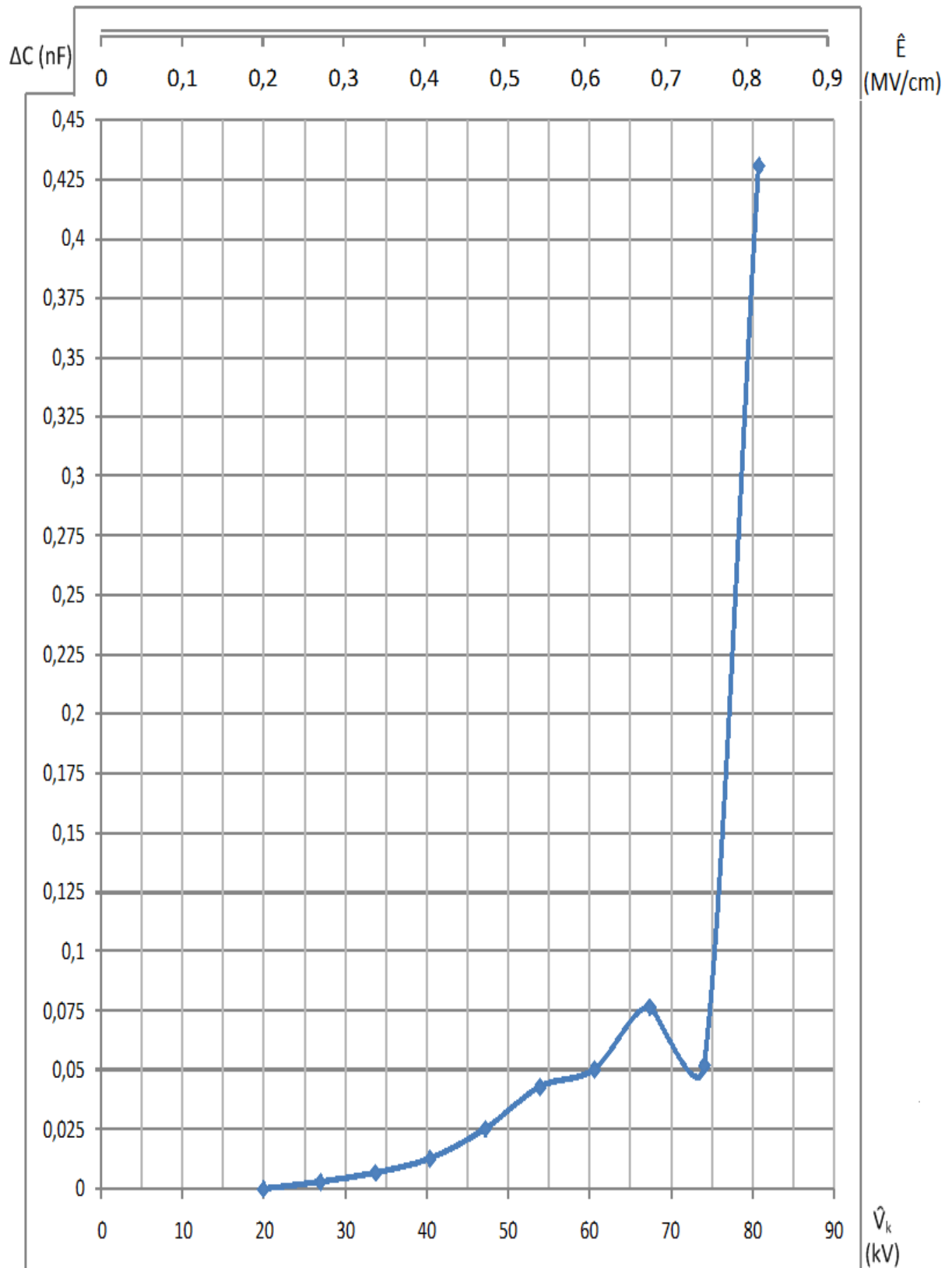


Σχήμα 3.3-6 : Χαρακτηριστική $j = F(U_k, E)$ σε A/cm² με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=2mm.

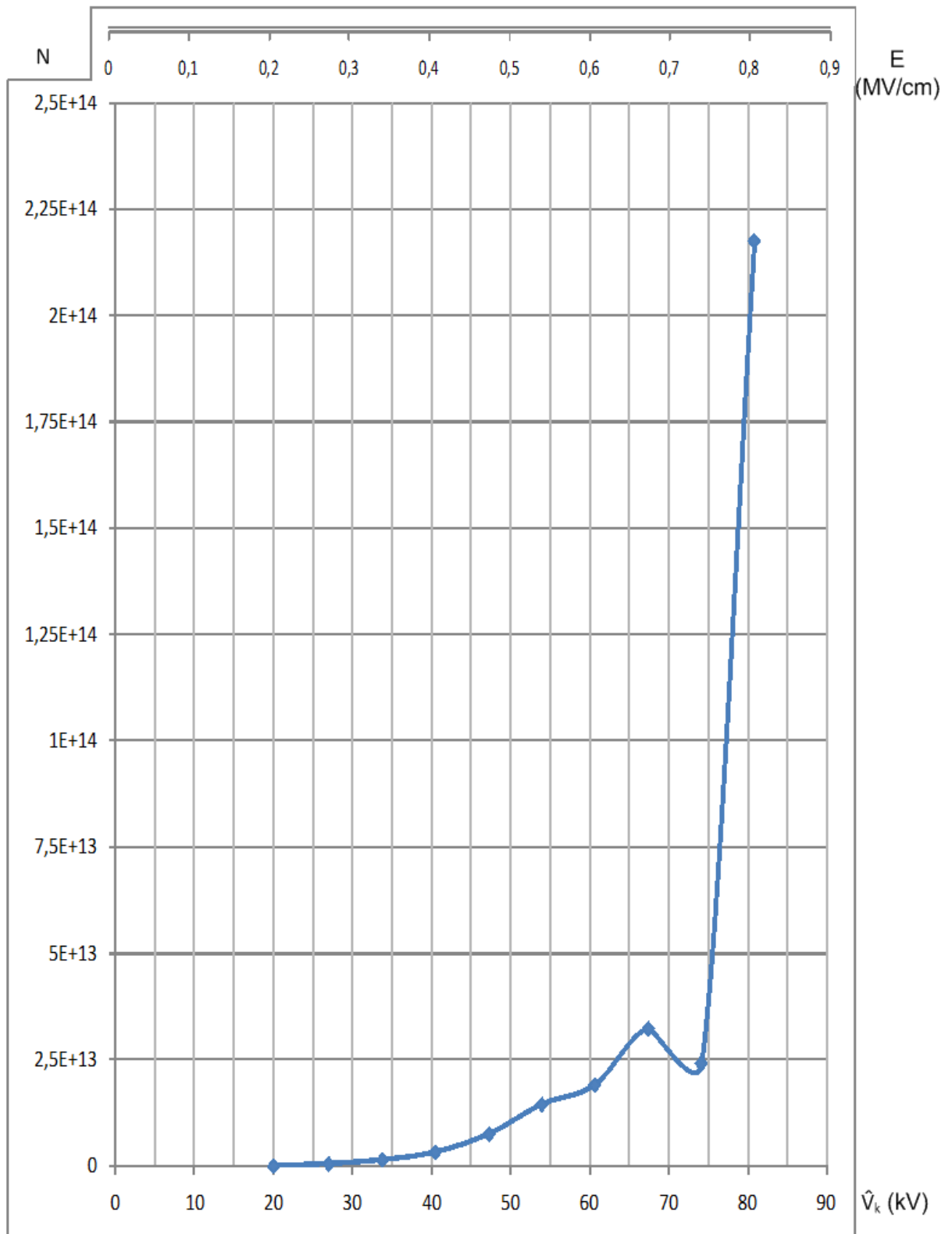
j : πυκνότητα ροής ρεύματος

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.3-7 : Χαρακτηριστική $\Delta C = F(U_k, E)$ σε nF με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=1\text{mm}$.
 ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

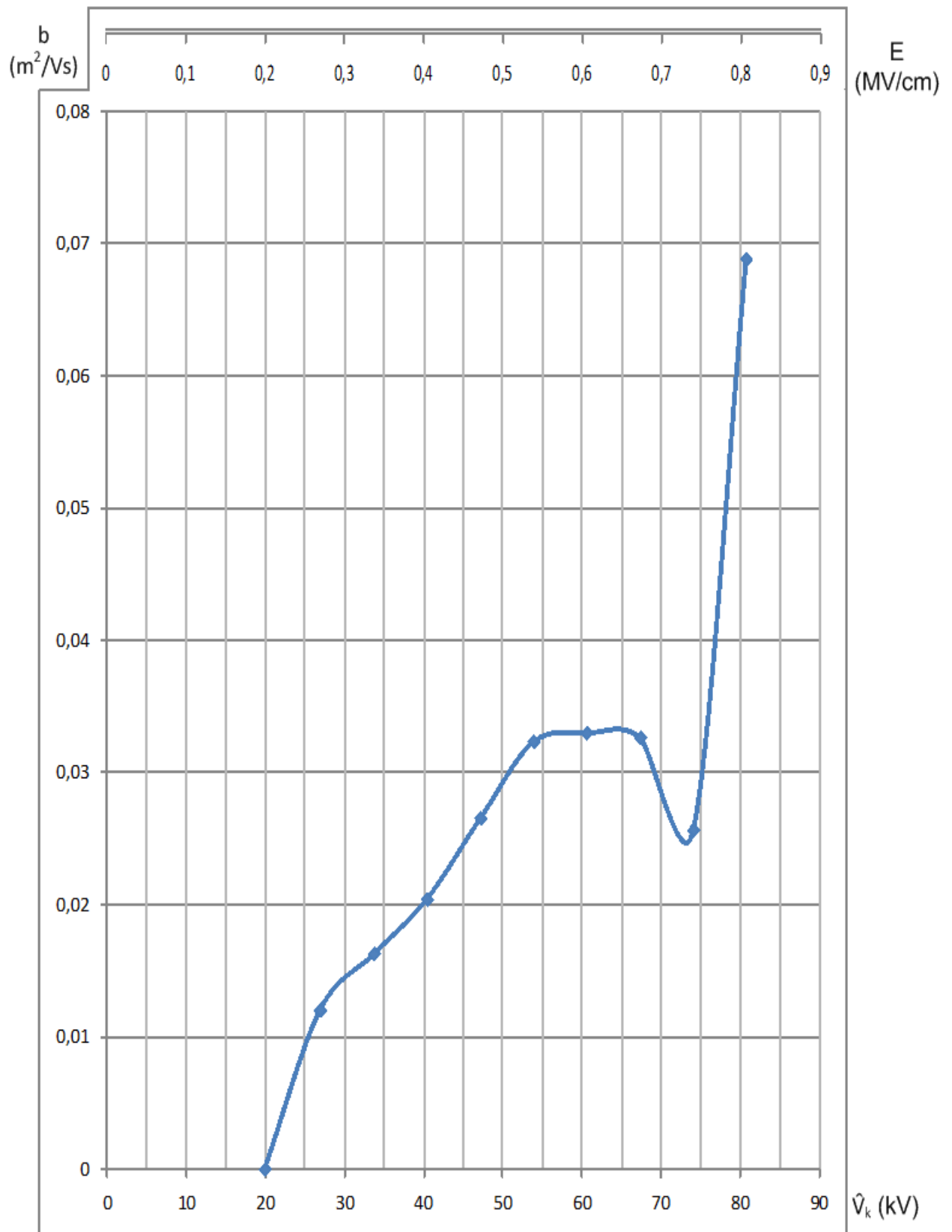


Σχήμα 3.3-8 : Χαρακτηριστική $N = F(U_k , E)$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2$ mm.

N : αριθμός ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

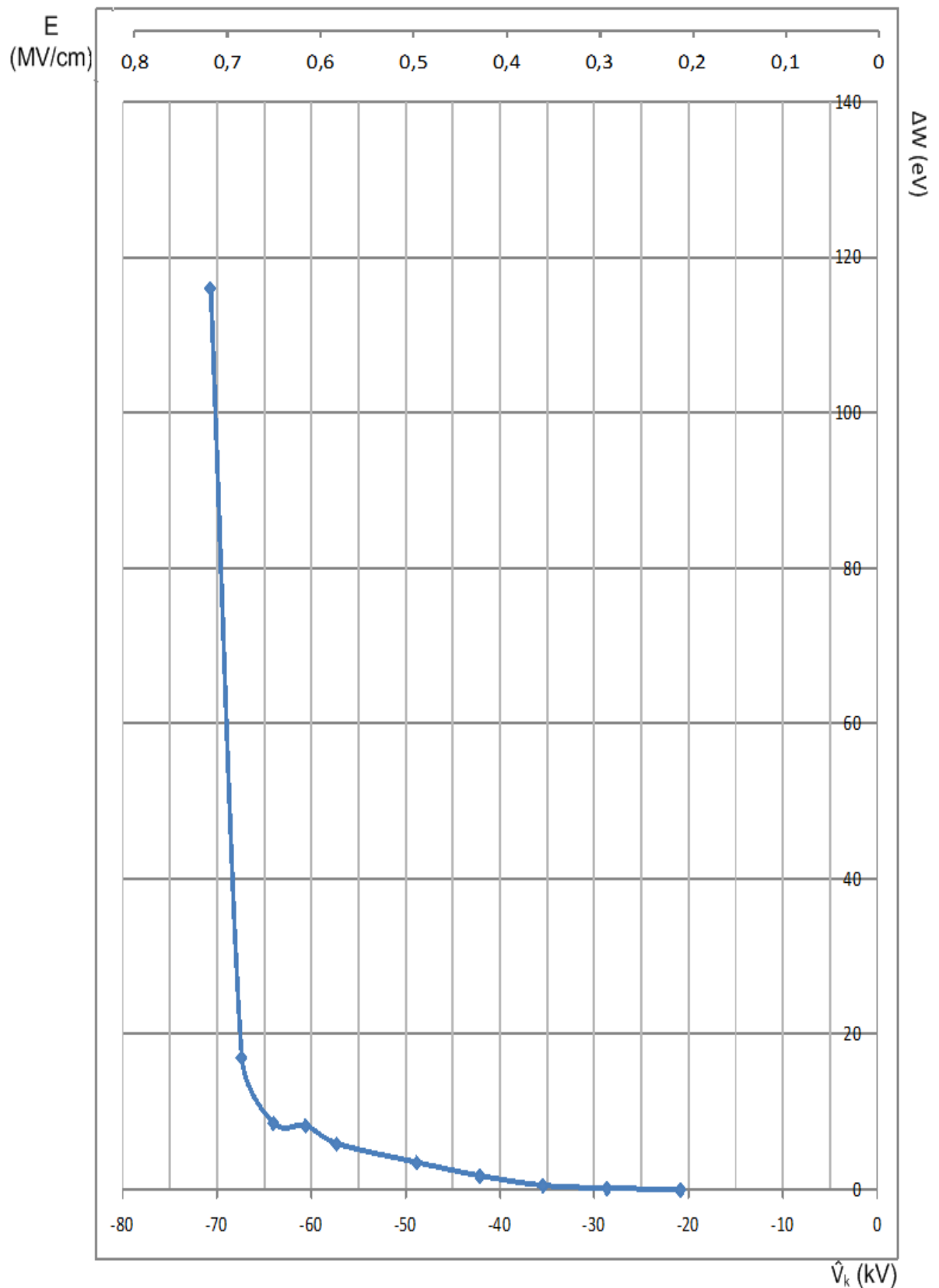


Σχήμα 3.3-9: Χααρακτηριστική $b = F(U_k, E)$ σε m^2/Vs με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μs ς θετικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2$ mm.

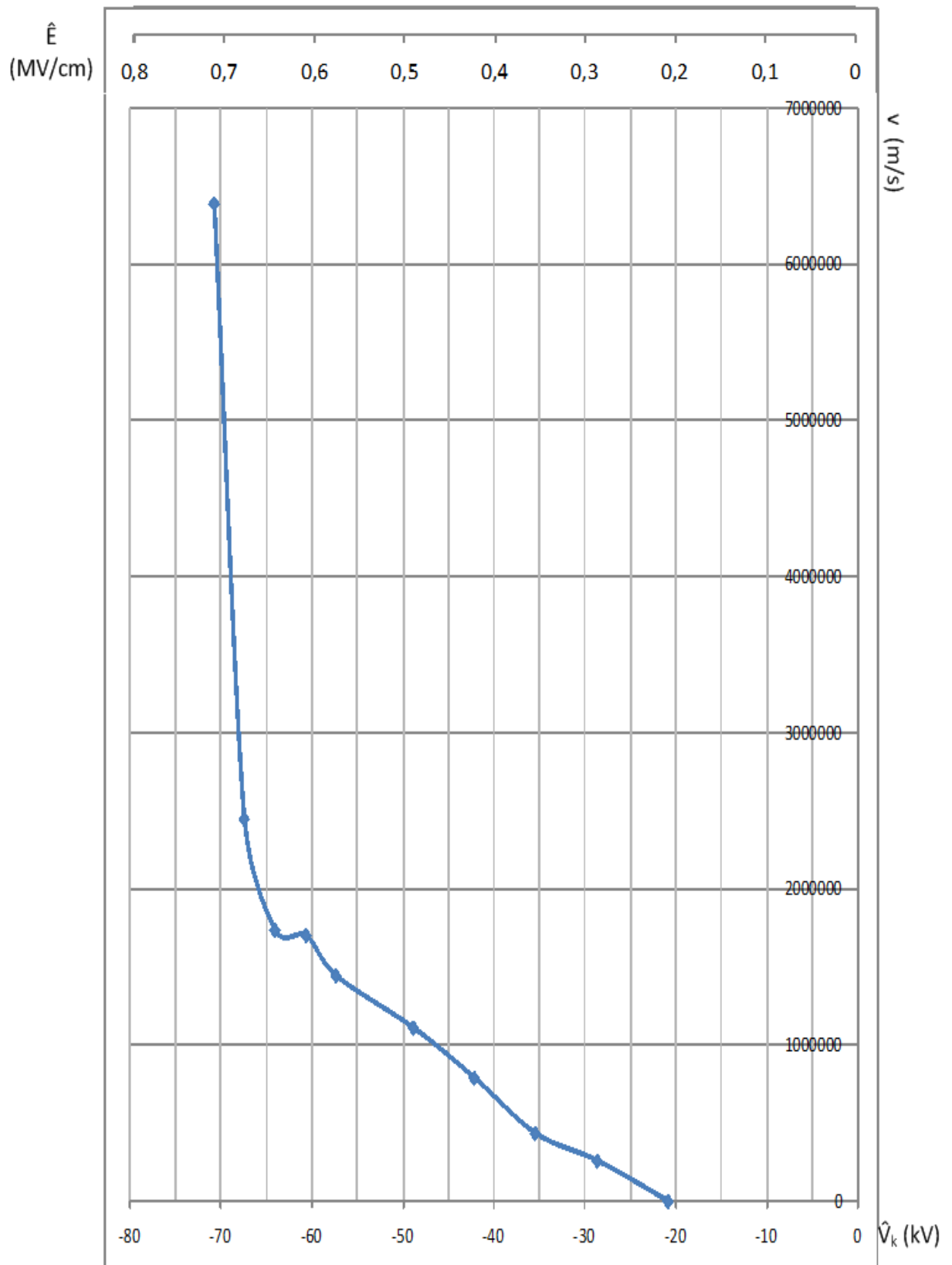
b : κινητικότητα ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.4-1 : Χαρακτηριστική $\Delta W = F(U_k, E)$ σε eV με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.
 ΔW : ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

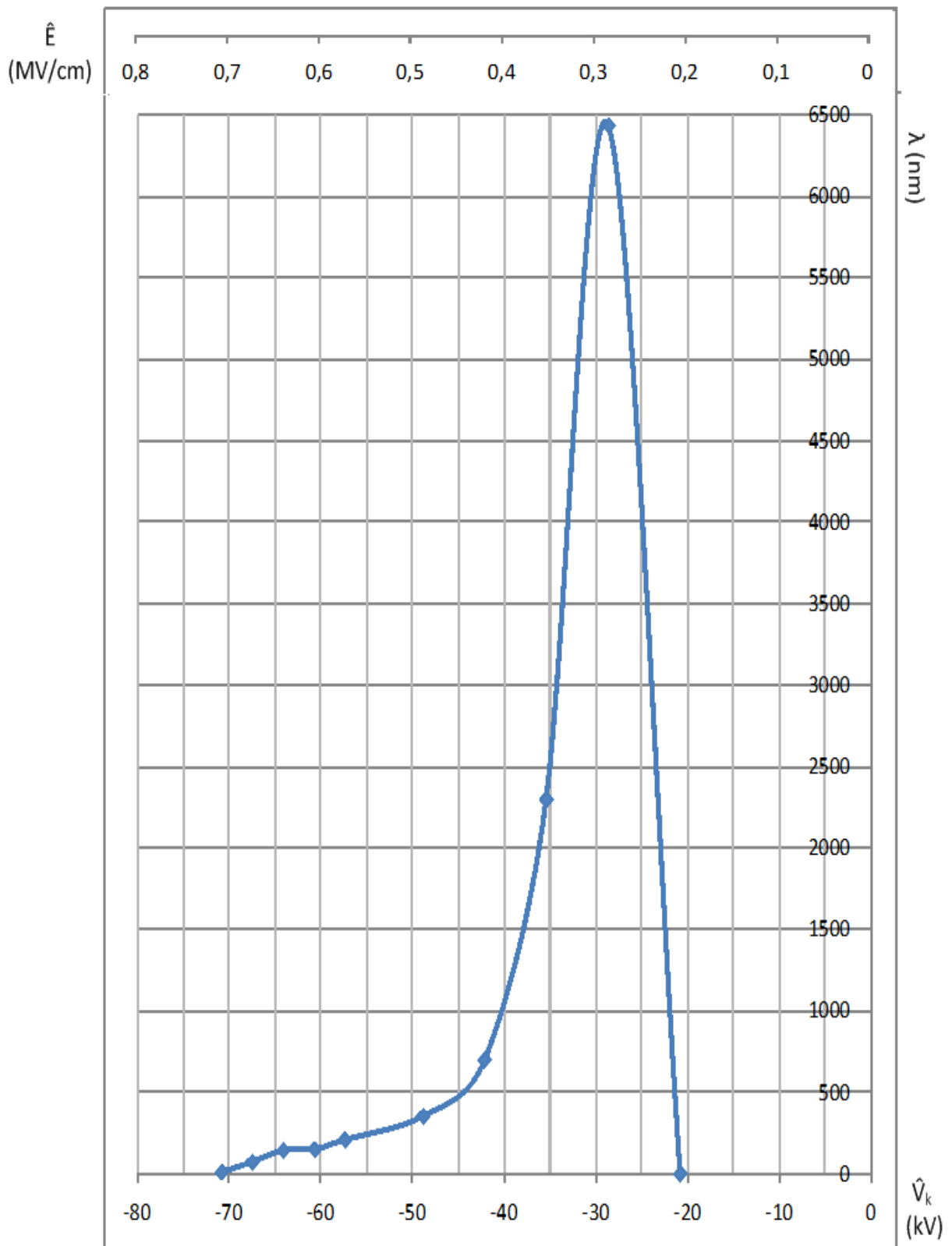


Σχήμα 3.4-2 : Χαρακτηριστική $\nu = F(U_k, E)$ σε m/s με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2$ mm.

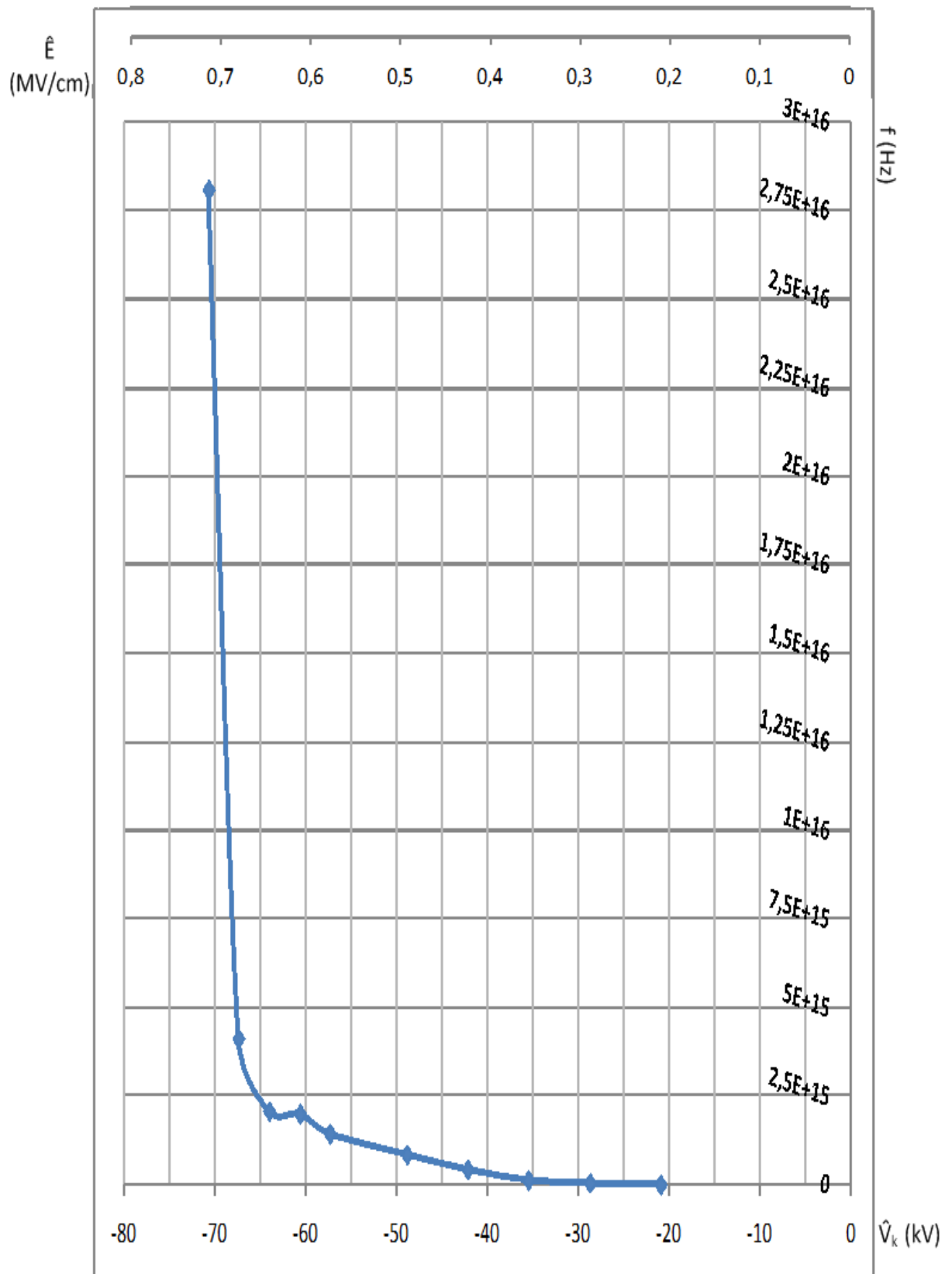
ν : ταχύτητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

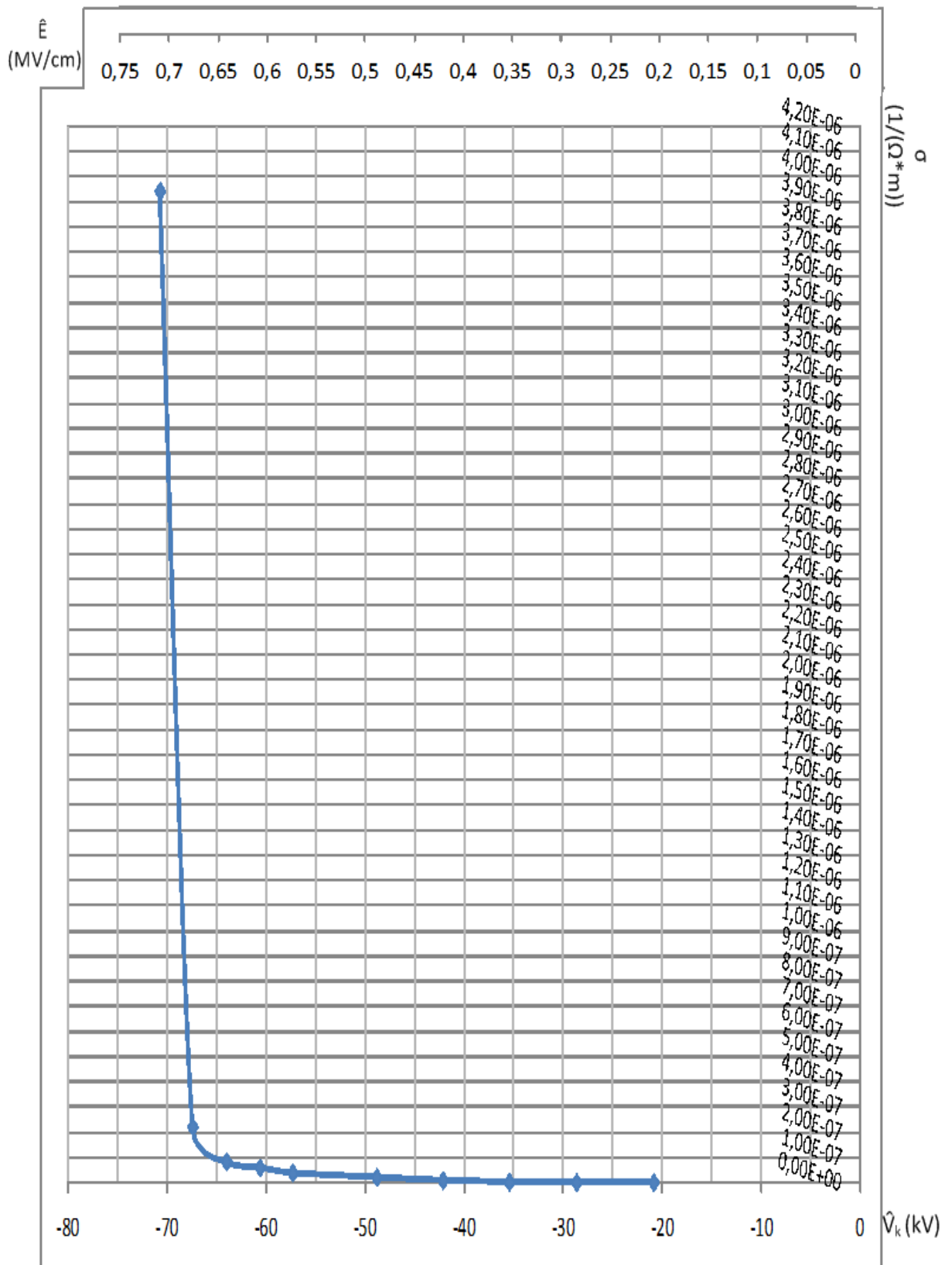
E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.4-3 : Χαρακτηριστική $\lambda = F(U_k, E)$ σε nm με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους d=2mm.
 λ : μήκος κύματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.4-4 : Χαρακτηριστική $f = F(U_k, E)$ σε Hz με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.
 f : συχνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

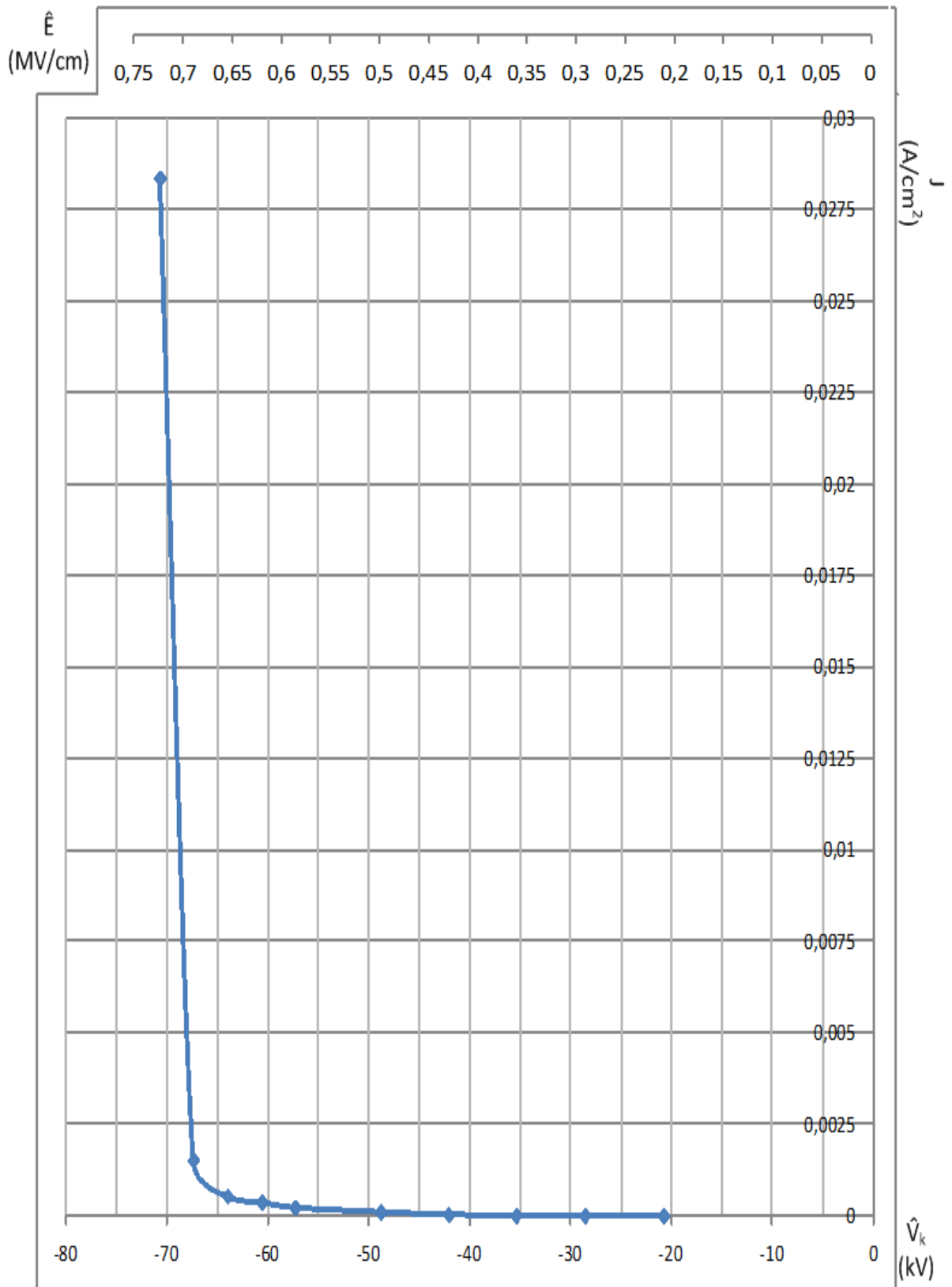


Σχήμα 3.4-5 : Χαρακτηριστική $\sigma = F(U_k, E)$ σε $(\Omega m)^{-1}$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2mm$.

σ : ειδική αγωγιμότητα

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

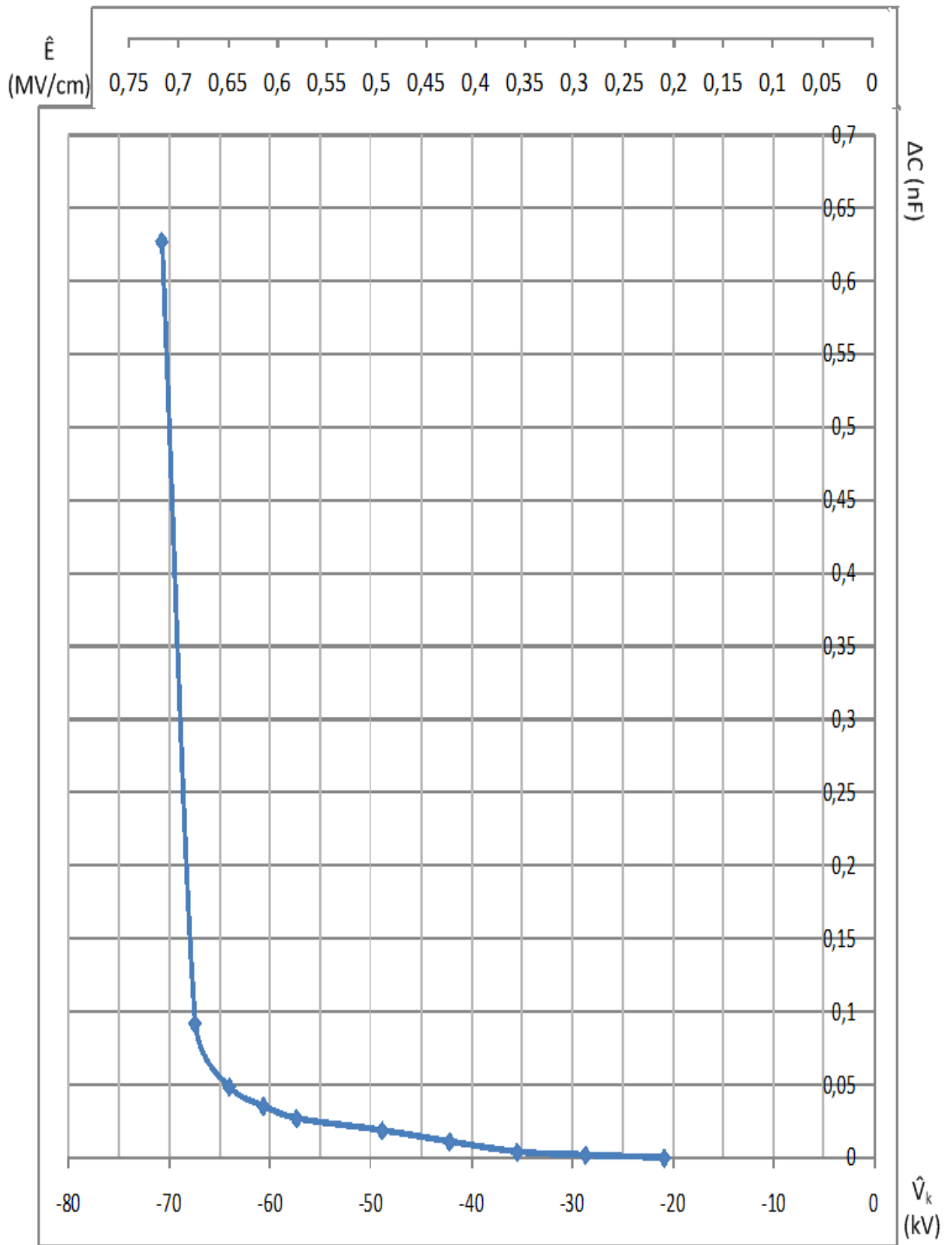


Σχήμα 3.4-6 : Χαρακτηριστική $j = F(U_k, E)$ σε A/cm^2 με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2mm$.

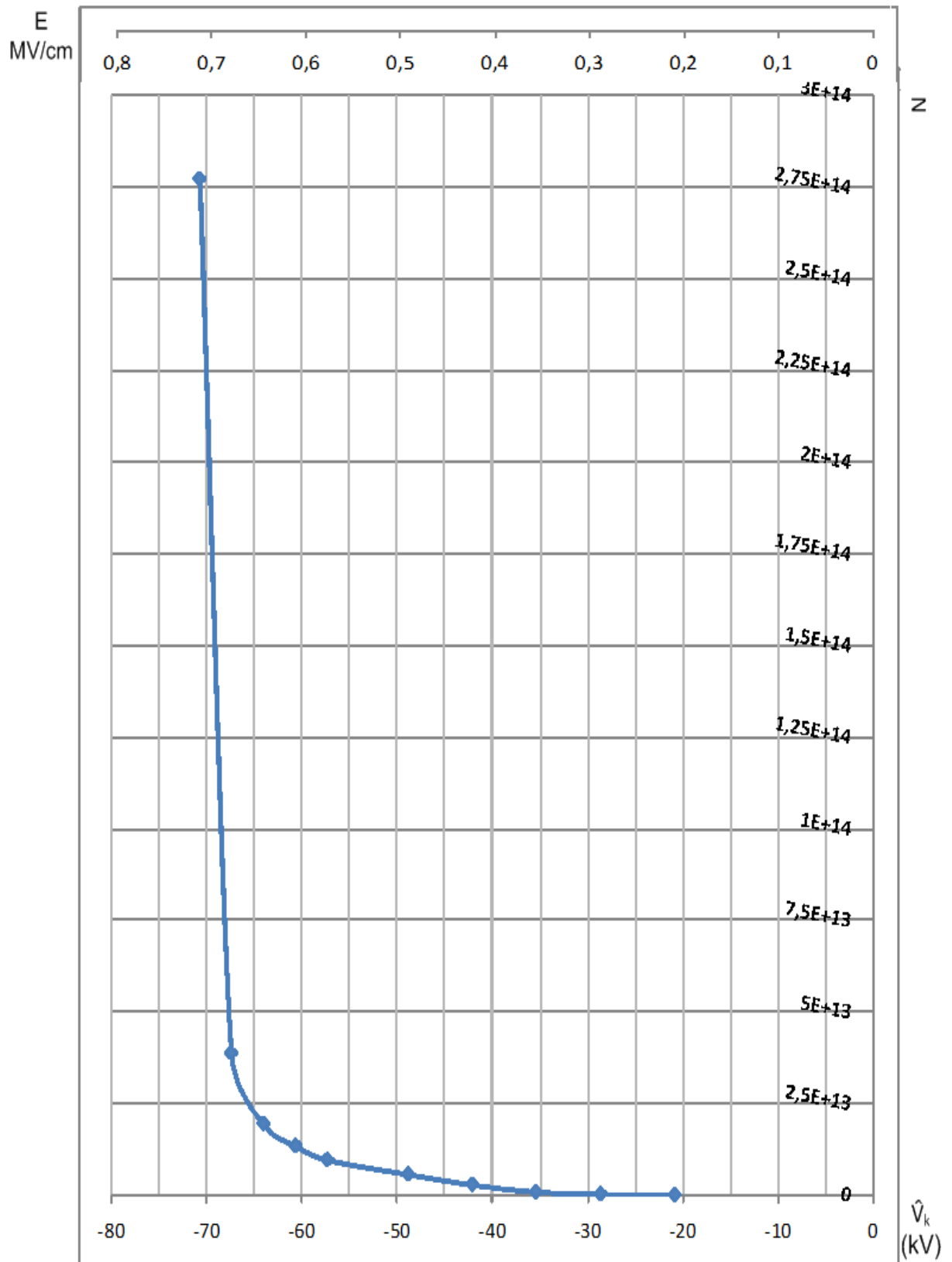
j : πυκνότητα ροής ρεύματος

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.4-7 : Χαρακτηριστική $\Delta C = F(U_k, E)$ σε nF με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μ sec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.
 ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
 V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

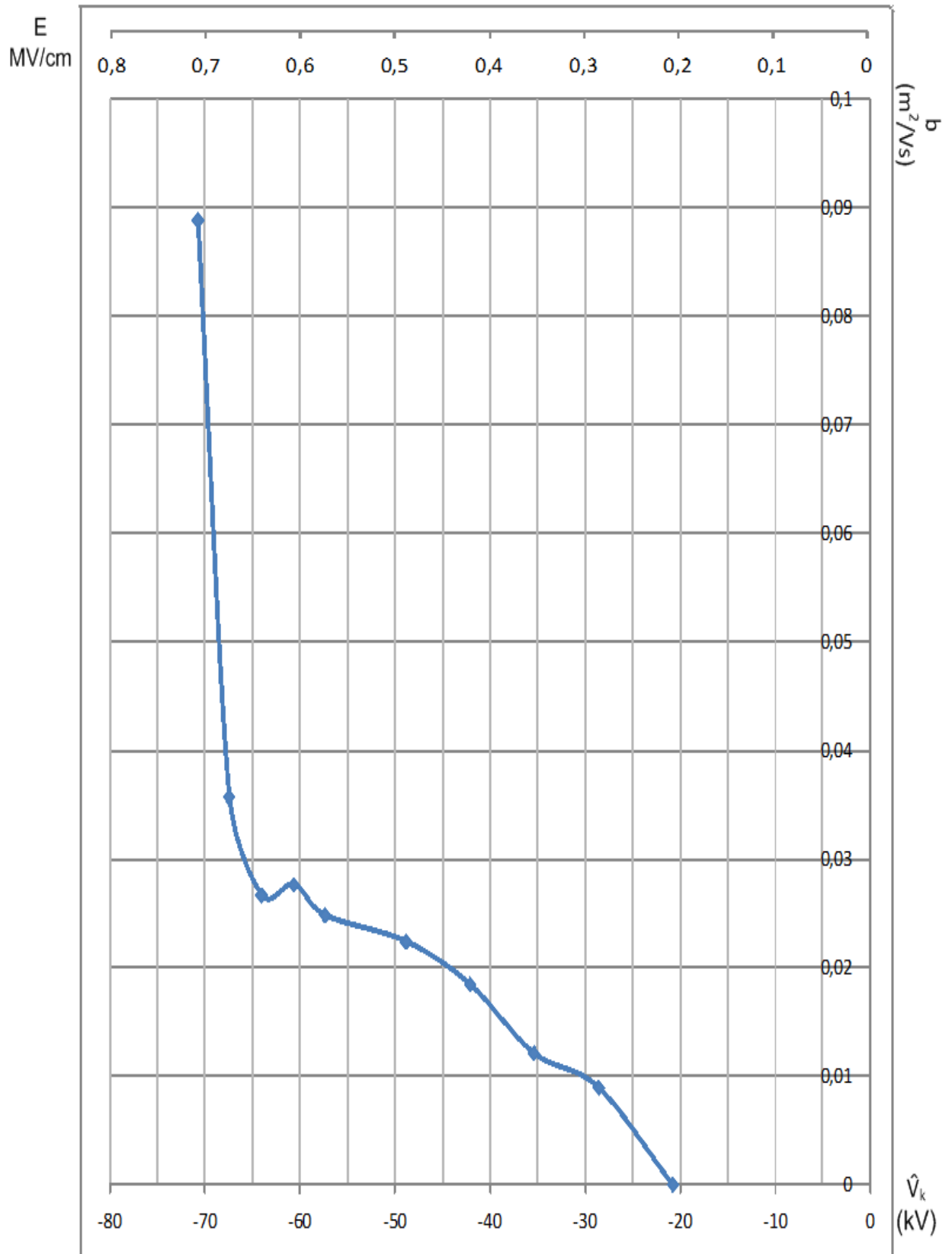


Σχήμα 3.4-8 : Χαρακτηριστική $N = F(U_k, E)$ με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2\text{mm}$.

N : αριθμός ελευθέρων ηλεκτρονίων

V_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 3.4-9: Χαρακτηριστική $b = F(U_k, E)$ σε m^2/Vs με επιβαλλόμενες κρουστικές τάσεις 10 / 200 μs αρνητικής πολικότητας σε δοκίμιο πάχους $d=2 \text{ mm}$.
 b : κινητικότητα ελευθέρων ηλεκτρονίων
 U_k : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης
 E : μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

3.2 Μετρήσεις

\hat{V}_k	\hat{E}	C_m	k	ΔQ
kV	$\frac{MV}{cm}$	nF		μC
19,5	0,29	210	1,62	0
26,1	0,39	210	1,62	0,22
32	0,48	210	1,62	0,67
38,7	0,58	210	1,62	1,47
43,8	0,65	210	1,62	3,66
50,5	0,75	210	1,62	6,17
57,3	0,85	210	1,62	7,61
64	0,95	1000	5,51	10,4
70,7	1,05	1000	5,51	16,2
77,5	1,15	1835	9,60	47,7

Πίνακας 3.1-1: Πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε δοκίμιο με πάχος 1 mm με επιβαλλόμενες σε αυτό κρουστικές τάσεις 10 / 200 μs θετικής πολικότητας.

\hat{V}_k	\hat{E}	C_m	k	ΔQ
kV	$\frac{MV}{cm}$	nF		μC
-19,9	0,296	210	1,62	0,03
-26,9	0,401	210	1,62	0,20
-33,7	0,502	210	1,62	0,72
-40,4	0,602	210	1,62	1,87
-47,1	0,702	210	1,62	4,47
-52,2	0,778	210	1,62	6,92
-60,6	0,903	210	1,62	8,41
-67,4	1,004	1000	5,51	9,31
-70,4	1,049	1000	5,51	14,51
-79,1	1,178	1835	5,51	39,64

Πίνακας 3.1-2: Πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε δοκίμιο με πάχος 1 mm με επιβαλλόμενες σε αυτό κρουστικές τάσεις 10 / 200 μs αρνητικής πολικότητας.

\hat{V}_k	\hat{E}	C_m	k	ΔQ
kV	$\frac{MV}{cm}$	nF		μC
19,9	0,202	210	1,62	0
26,9	0,274	210	1,62	0,08
33,7	0,343	210	1,62	0,23
40,4	0,411	210	1,62	0,52
47,2	0,48	210	1,62	1,2
53,9	0,548	210	1,62	2,32
60,6	0,616	210	1,62	3,05
67,4	0,686	1000	5,51	5,17
74,1	0,754	1000	5,51	3,86
80,8	0,822	1835	9,6	34,82

Πίνακας 3.1-3: Πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε δοκίμιο με πάχος 2 mm με επιβαλλόμενες σε αυτό κρουστικές τάσεις 10 / 200 μs θετικής πολικότητας.

\hat{V}_k	\hat{E}	C_m	k	ΔQ
kV	$\frac{MV}{cm}$	nF		μC
-20,8	0,212	210	1,62	0
-28,6	0,291	210	1,62	0,05
-35,4	0,36	210	1,62	0,14
-42,1	0,428	210	1,62	0,46
-48,8	0,496	210	1,62	0,91
-57,3	0,583	210	1,62	1,54
-64	0,651	210	1,62	2,14
-60,6	0,616	1000	5,51	3,11
-67,4	0,686	1000	5,51	6,19
-70,7	0,719	1835	9,6	44,38

Πίνακας 3.1-4: Πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε δοκίμιο με πάχος 2 mm με επιβαλλόμενες σε αυτό κρουστικές τάσεις 10 / 200 μs αρνητικής πολικότητας.

3.3 Υπολογισμοί

$\frac{\Delta U_m = \Delta Q}{C_m}$	ΔW	v	λ	b	N	σ	J	f	ΔC
V	eV	$\frac{m}{s}$	m	$\frac{m^2}{V \cdot s}$	-----	$\frac{1}{\Omega \cdot m}$	$\frac{A}{cm^2}$	Hz	nF
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,05	0,85	546360,16	1,46E-06	0,0141	1,38E+12	3,09E-09	1,20E-05	2,05E+14	8,43E-03
3,19	2,58	953465,72	4,80E-07	0,0200	4,19E+12	1,34E-08	6,39E-05	6,25E+14	2,09E-02
7,00	5,67	1412298	2,19E-07	0,0245	9,19E+12	3,60E-08	2,08E-04	1,37E+15	3,80E-02
17,43	14,12	2228477,4	8,79E-08	0,0342	2,29E+13	1,25E-07	8,16E-04	3,41E+15	8,36E-02
29,38	23,8	2893411,9	5,21E-08	0,0385	3,86E+13	2,37E-07	1,79E-03	5,75E+15	1,22E-01
36,24	29,35	3213364,6	4,23E-08	0,0376	4,76E+13	2,86E-07	2,45E-03	7,10E+15	1,33E-01
10,41	28,68	3176296,1	4,33E-08	0,0333	6,51E+13	3,47E-07	3,31E-03	6,93E+15	1,63E-01
16,23	44,71	3966019,8	2,77E-08	0,0377	1,01E+14	6,11E-07	6,44E-03	1,08E+16	2,30E-01
26,00	124,8	6625857,8	9,94E-09	0,0574	2,98E+14	2,74E-06	3,16E-02	3,02E+16	6,16E-01

Πίνακας 3.2-1: Επεξεργασία των μετρήσεων για το δοκίμιο πάχους 1 mm στο οποίο επιβλήθηκαν κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας.

$\frac{\Delta U_m = \Delta Q}{C_m}$	ΔW	V	λ	b	N	σ	J	f	ΔC
V	eV	$\frac{m}{s}$	m	$\frac{m^2}{V \cdot s}$	-----	$\frac{1}{\Omega \cdot m}$	$\frac{A}{cm^2}$	Hz	nF
0,14	0,12	201756,86	1,07E-05	0,0068	1,88E+11	2,04E-10	6,05E-07	2,80E+13	1,51E-03
0,95	0,77	520933,97	1,61E-06	0,0130	1,25E+12	2,60E-09	1,04E-05	1,87E+14	7,43E-03
3,43	2,78	988402,72	4,47E-07	0,0197	4,50E+12	1,42E-08	7,12E-05	6,72E+14	2,14E-02
8,90	7,21	1592899,9	1,72E-07	0,0265	1,17E+13	4,95E-08	2,98E-04	1,74E+15	4,63E-02
21,29	17,24	2462756,33	7,20E-08	0,0351	2,79E+13	1,57E-07	1,10E-03	4,17E+15	9,49E-02
32,95	26,69	3064225,55	4,65E-08	0,0394	4,33E+13	2,73E-07	2,12E-03	6,45E+15	1,33E-01
40,05	32,44	3378046,94	3,82E-08	0,0374	5,26E+13	3,15E-07	2,84E-03	7,84E+15	1,39E-01
9,31	25,65	3003796,19	4,84E-08	0,0299	5,82E+13	2,79E-07	2,80E-03	6,20E+15	1,38E-01
14,51	39,98	3749983,25	3,10E-08	0,0358	9,07E+13	5,19E-07	5,44E-03	9,67E+15	2,06E-01
21,60	59,51	4575561,64	2,08E-08	0,0388	2,48E+14	1,54E-06	1,81E-02	1,44E+16	5,01E-01

Πίνακας 3.2-2: Επεξεργασία των μετρήσεων για το δοκίμιο πάχους 1 mm στο οποίο επιβλήθηκαν κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας.

$\frac{\Delta U_m = \Delta Q}{C_m}$	ΔW	v	λ	b	N	σ	J	f	ΔC
V	eV	$\frac{m}{s}$	m	$\frac{m^2}{V \cdot s}$	-----	$\frac{1}{\Omega \cdot m}$	$\frac{A}{cm^2}$	Hz	nF
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,38	0,31	329467,57	4,02E-06	0,0120	5,00E+11	9,63E-10	2,64E-06	7,46E+13	2,97E-03
1,10	0,89	558639,45	1,40E-06	0,0163	1,44E+12	3,75E-09	1,28E-05	2,15E+14	6,82E-03
2,48	2,01	839980,79	6,19E-07	0,0204	3,25E+12	1,06E-08	4,37E-05	4,85E+14	1,29E-02
5,71	4,63	1276022,42	2,68E-07	0,0266	7,50E+12	3,19E-08	1,53E-04	1,12E+15	2,54E-02
11,05	8,95	1774237,17	1,39E-07	0,0324	1,45E+13	7,51E-08	4,12E-04	2,16E+15	4,30E-02
14,52	11,76	2034312,19	1,05E-07	0,0330	1,91E+13	1,01E-07	6,20E-04	2,84E+15	5,03E-02
5,17	14,24	2238416,47	8,71E-08	0,0327	3,23E+13	1,69E-07	1,16E-03	3,44E+15	7,67E-02
3,86	10,63	1934146,09	1,17E-07	0,0257	2,41E+13	9,91E-08	7,47E-04	2,57E+15	5,21E-02
18,98	91,08	5660460,81	1,36E-08	0,0689	2,18E+14	2,40E-06	1,97E-02	2,20E+16	4,31E-01

Πίνακας 3.2-3: Επεξεργασία των μετρήσεων για το δοκίμιο πάχους 2 mm στο οποίο επιβλήθηκαν κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec θετικής πολικότητας.

$\frac{\Delta U_m = \Delta Q}{C_m}$	ΔW	v	λ	b	N	σ	J	f	ΔC
V	eV	$\frac{m}{s}$	m	$\frac{m^2}{V * s}$	-----	$\frac{1}{\Omega * m}$	$\frac{A}{cm^2}$	Hz	nF
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,24	0,19	260466,99	6,43E-06	0,0090	3,13E+11	4,48E-10	1,30E-06	4,66E+13	1,75E-03
0,67	0,54	435844,63	2,30E-06	0,0121	8,75E+11	1,69E-09	6,10E-06	1,31E+14	3,95E-03
2,19	1,77	790035,48	6,99E-07	0,0184	2,88E+12	8,49E-09	3,63E-05	4,29E+14	1,09E-02
4,33	3,51	1111190,14	3,53E-07	0,0224	5,69E+12	2,04E-08	1,01E-04	8,49E+14	1,86E-02
7,33	5,94	1445533,11	2,09E-07	0,0248	9,63E+12	3,82E-08	2,23E-04	1,44E+15	2,69E-02
10,19	8,25	1704019,53	1,50E-07	0,0262	1,34E+13	5,60E-08	3,65E-04	2,00E+15	3,34E-02
3,11	8,57	1736104,31	1,45E-07	0,0282	1,94E+13	8,76E-08	5,40E-04	2,07E+15	5,13E-02
6,19	17,05	2449294,16	7,28E-08	0,0357	3,87E+13	2,21E-07	1,52E-03	4,12E+15	9,18E-02
24,19	116,09	6390444,29	1,07E-08	0,0889	2,77E+14	3,94E-06	2,84E-02	2,81E+16	6,28E-01

Πίνακας 3.2-4: Επεξεργασία των μετρήσεων για το δοκίμιο πάχους 2 mm στο οποίο επιβλήθηκαν κρουστικές τάσεις 10 / 200 μsec αρνητικής πολικότητας.

4.Σχόλια επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων

Από τις χαρακτηριστικές $\Delta W = f(\hat{V}_k, E)$, $v = f(\hat{V}_k, E)$, $\sigma = f(\hat{V}_k, E)$, $J = f(\hat{V}_k, E)$, $f = f(\hat{V}_k, E)$, $N = f(\hat{V}_k, E)$, $b = f(\hat{V}_k, E)$ και $\Delta C = f(\hat{V}_k, E)$ διαπιστώνεται μια αύξηση των μεγεθών ΔW , v , σ , J , f , N , b και ΔC συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης ή της αντίστοιχης προς αυτής πεδιακής έντασης. Επειδή τα δοκίμια είναι από ανομοιογενή υλικά (που σημαίνει ότι οι τιμές έχουν μια διακύμανση ανά επίπεδο τάσης) οι μετρήσεις αφορούν την μέση τιμή από ένα αριθμό πέντε δοκιμίων ανά επίπεδο τάσης. Από την βιβλιογραφία είναι γνωστό (κυρίως την βιβλιογραφία [3] και [8], αλλά και από την υπόλοιπη που δίνεται στο τέλος της εργασίας αυτής) ότι στα στερεά μονωτικά η γήρανση και η διάτρηση σχετίζονται με το φαινόμενο του ιονισμού με κρούσεις. Αυτό σημαίνει κατά την παραπάνω βιβλιογραφία ότι το παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο λόγω ιονισμού με κρούσεις έχει εκθετική μορφή. Συνεπώς επειδή τα μεγέθη v , N , σ , J , f , ΔC είναι ανάλογα του φορτίου θα πρέπει και αυτά να έχουν εκθετική μορφή.

Πράγματι από τα αποτελέσματα της παραγράφου 3 παρατηρείται μια αύξηση των παραπάνω μεγεθών που προσεγγίζει την εκθετική μορφή. Η απόκλιση των τιμών που διαπιστώνονται από την εκθετική μορφή μπορεί να υποθεθεί ότι οφείλεται στις ανομοιογένειες του υλικού λόγω των οποίων εναλλάσσονται οι παράγοντες γήρανσης στην καταπόνηση του υλικού. Η μείωση για παράδειγμα της ταχύτητας (ή και των άλλων μεγεθών που προαναφέρθηκαν) κατά την αύξηση της τάσης που προφανώς οφείλεται στην μείωση του φορτίου σημαίνει ότι την τοπική καταστροφή του υλικού την έχουν αναλάβει οι δυνάμεις Coulomb κ.λπ.

Βιβλιογραφία

1. **Μπούρκας Π.:** Εφαρμογές Κτιριακών – Βιομηχανικών Μελετών και Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1990.
2. **Bourkas P. D., Dervos C., Eleftheriou M., Kagarakis C. :** Ionisationsvorgange beim Gleitdurchschlag der festen organischen Isoliertstoffen, Physika Scripta, Vol. 42, p.p. 737-740, 1990.
3. **Dervos C., Bourkas P. D., Kayafas E.A, Stathopoulos I.A.:** Enhanced partial discharges due to temperature increase in combined system of a solid-liquid dielectric, IEEE Trans, on Electrical Insulation, Vol. 25, No 3, June 1990.
4. **Bourkas P. D., Machias A.V., Stathopoulos I.A., Topalis F.V. :** No- load Medium Voltage Switches Design for Industrial Application, 4th International Conference on High Technology in the Power Industry, June 4-7 1989.
5. **Dervos C., Bourkas P. D., Kayafas E.A. :** High frequency current oscillations in solid, J. Physics D-Applied Physics, Vol. 22, p.p. 316- 322, 1989.
6. **Dervos C., Bourkas P. D., Kayafas E.A. :** Potential profile of dielectrics during impulse application, Physica Status Solidi (a) Vol. 122, 123 , p.p. 123-130, 1989.
7. **Bourkas P. D., Kayafas E.A, Dervos C., Stathopoulos I.A.:** Eine mogliche Esklarung der Glimmentladungen in festen Isoliertstoffen bei Stossspannungsbeanspruchung, etz-Archiv , Bd 11, H. 5, S 163-165, 1988.
8. **Sparks M., Mills D.L., Warren R., Holstein T., Maradudin A.A., Sham L.J., King D.F.:** Theory of electron – avalanche breakdown in solids, Phys. Rev. B, Vol. 24, No 6, p.p. 3519 - 3536, 1987.
9. **Zeller H.R.:** Breakdown and prebreakdown phenomena in solid dielectrics, IEEE Trans. on Electr. Insul. EI-22, Vol. 2, p.p. 115-122, 1987.
10. **Cartier E., Pflunger P.:** Detection of hot electron-induced radiation damage in organic dielectrics by exoelectron emission from thin films, IEEE Trans. on Electr. Insul. EI-22, Vol. 2, p.p. 123-128, 1987.
11. **Himba T., Zeller H.R.:** Direct measurement of spacecharge injection from a needle electrod into dielectrics, J. App. Phy. Vol. 59, p.p. 1614 - 1620, 1986.
12. **Kuffel E.:** High voltage engineering fundamentals, W. S. Zaengl Pergamon Press, Oxford 1984.