



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΗΝ  
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ  
ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ

**ΑΜΠΑΡΤΖΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:**

**ΔΡ-ΜΗΧ Κ.Γ. ΣΙΔΕΡΑΚΗΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ**

**Νοέμβριος 2009**



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΙΑΚΕΝΩΝ  
ΑΕΡΟΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΗΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ  
ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
ΤΟΥ  
**ΑΜΠΑΡΤΖΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

**Νο 1**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:**  
**ΔΡ-ΜΗΧ Κ.Γ. ΣΙΔΕΡΑΚΗΣ**  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ





*Αφιερωμένο στην αγαπημένη*

*μου κόρη*

*Ραφαέλα Ζωή*

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Ευχαριστώ θερμά την σύζυγο μου Στέλλα και την κόρη μου Ραφαέλα που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους μου κ. Χάρη Σφακιανάκη, και κ. Γιώργο Αδαμάκη για την βοήθειά τους τις προτάσεις και τις υποδείξεις τους που κρίθηκαν πολύτιμες για να έρθει σε πέρας η εργασία αυτή.

Ευχαριστώ τον προϊστάμενο μου κ. Σωκράτη Βαβάτσικο για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη που μου έδειξε κατά την διάρκεια της φοίτησης μου.

Ευχαριστώ τον Κο Κ. Σιδεράκη που μου εμπιστεύτηκε αυτή τη Πτυχιακή εργασία και με βοήθησε στο θεωρητικό αλλά και στο πειραματικό μέρος, καθώς όλους τους καθηγητές μου που στάθηκαν αρωγοί σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Ευχαριστώ τον Γρηγόρη Καζάλα για την βοήθεια του στην πραγματοποίηση των σχεδίων.

Τέλος να ευχαριστήσω τους Παντελή, Γιώργο, Νίκο, που έκαναν αυτά τα χρόνια στην σχολή αξέχαστα.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη της διηλεκτρικής συμπεριφοράς διακένων αέρα με παραμέτρους την γεωμετρία, το μήκος του διακένου και την μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για την διεκπεραίωση της εργασίας αρχικά κατασκευάστηκε, στο αμαξοστάσιο του δήμου Ηρακλείου, τηλεχειριζόμενη εργαστηριακή διάταξη και σετ από ηλεκτρόδια διαφόρων γεωμετριών, και στην συνέχεια στο χώρο του εργαστηρίου υψηλών τάσεων του Α.Τ.Ε.Ι. Ηρακλείου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί εισαγωγή της εργασίας, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις υψηλές τάσεις, την εξέλιξη τους και τα προβλήματα που προκύπτουν από την χρήση τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται γενικές, βασικές γνώσεις από την φυσική που σχετίζονται με την επιστήμη των υψηλών τάσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του φαινομένου της διάσπασης των αερίων μονωτικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται και περιγράφεται η λειτουργία της πειραματικής διάταξης. Υπάρχουν σχέδια και φωτογραφίες που αποτυπώνουν με αναλυτικό τρόπο την εικόνα της διάταξης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται ο εξοπλισμός του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και η μορφή της τάσης που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία. Παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την διαδικασία μέτρησης, τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε γραφήματα και μια στατιστική ανάλυση των μετρήσεων.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας σε υπολογιστή με την βοήθεια του προγράμματος QuickField.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο έχουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	6
ΠΕΡΗΛΗΨΗ .....	7

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εφαρμογές υψηλών τάσεων Υ.Τ. ....	13
1.2 Εξέλιξη των Υ.Τ. και λόγοι χρησιμοποίησης αυτών .....	13
1.3 Προβλήματα από την χρήση Υ.Τ. ....	15
1.4 Διάκενα αέρος .....	16
Βιβλιογραφία .....	18

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1 Ηλεκτρικό πεδίο .....	19
2.1.1 Εισαγωγή .....	19
2.1.2 Ηλεκτρικό πεδίο .....	19
2.1.3 Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές .....	20
2.1.4 Ισοδυναμικές γραμμές .....	23
2.1.5 Ομογενές-ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο .....	24
2.1.6 Χωρητικότητα .....	24
2.1.7 Υπολογισμός χωρητικότητας .....	25
2.1.8 Ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου .....	27
2.2 Κριτήρια Αξιολόγησης Ηλεκτρομονωτικών Υλικών .....	28
2.2.1 Ιδιότητες μονωτικών υλικών .....	28
2.2.2 Διηλεκτρική αντοχή .....	28
2.2.3 Σχετική διηλεκτρική σταθερά .....	29
2.3 Ιονισμός και Απιονισμός .....	29
2.3.1 Γενικά .....	29
2.3.2 Ατομικό μοντέλο .....	30
2.3.3 Κινητική θεωρία των αερίων .....	31
2.3.4 Κρούσεις σωματιδίων .....	32
2.3.5 Ιονισμός κρούσεων .....	34
2.3.6 Ιονισμός μέσω διεγέρσεως .....	36
2.3.7 Φωτοϊονισμός .....	36
2.3.8 Ιονισμός εκ μετασταθών .....	37
2.3.9 Θερμοϊονισμός .....	37
2.3.10 Απόσπαση ηλεκτρονίων .....	37
2.3.11 Απιονισμός .....	38
2.3.12 Καθοδικά φαινόμενα .....	38
Βιβλιογραφία .....	42

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΑ ΑΕΡΙΑ

3.1	Γενικά χαρακτηριστικά μονωτικών αερίων –Ομοιογενή διάκενα	43
3.2	Στιβάδες ηλεκτρονίων-Άλφα του Townsend	44
3.3	Δευτερογενή φαινόμενα	48
3.4	Μηχανισμός διάσπασης κατά Townsend	49
3.5	Μηχανισμός διάσπασης με σχηματισμό νηματίου (streamer)	51
3.6	Σύγκριση μηχανισμών	53
3.7	Η καμπύλη και ο νόμος του Paschen	54
3.8	Φαινόμενο κορώνα	57
3.8.1	Αρνητική κορώνα	58
3.8.2	Θετική κορώνα	59
3.9	Διάσπαση του αέρα σε ανομοιογενή πεδία	60
3.10	Τάση διάσπασης σε ανομοιογενή διάκενα	62
3.11	Επίδραση ατμοσφαιρικών συνθηκών	64
3.12	Διηλεκτρική αποκατάσταση	66
3.13	Μηχανισμοί διάσπασης	68
3.13.1	Σφαιρικό διάκενο	68
3.13.2	Διάκενο ακίδας- πλάκας	71
3.13.3	Διάκενο ακίδας-ακίδας	72
3.13.4	Διάκενο ράβδων	74
	Βιβλιογραφία	75

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1	Περιγραφή κατασκευής διάκενου πτυχιακής	77
4.2	Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν -Τρόπος λειτουργίας	77
4.3	Απαγωγείς υπερτάσεων	80
4.4	Κατασκευή ηλεκτροδίων	81
4.5	Μετατροπές βελτιώσεις	82
4.6	Σχέδια και φωτογραφίες της κατασκευής	83
	Βιβλιογραφία	110

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΡΦΗ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**

5.1 Τεχνολογία εργαστηρίου .....	111
5.1.1 Γενικά .....	111
5.1.2 Μετασχηματιστές δοκιμής .....	111
5.1.3 Σύνδεση Μ/Σ δοκιμής κατά βαθμίδες.....	112
5.1.4 Παραγωγή Σ.Υ.Τ. ....	114
5.2 Προσδιορισμός της τάσεως διασπάσεως.....	116
5.2.1 Γενικά-Ορισμοί .....	116
5.2.2 Μέθοδος διαδοχικών διασπάσεων .....	118
5.3 Διαδικασία μέτρησης.....	118
5.4 Πειραματικός προσδιορισμός της επίδρασης της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων και του μήκους διακένου στην τάση διάσπασης .....	119
5.4.1 Πειραματική διερεύνηση διακένου τύπου ακίδα-ακίδα ..	120
5.4.2 Πειραματική διερεύνηση διακένου τύπου ακίδα-πλάκα	124
5.4.3 Πειραματική διερεύνηση διακένου τύπου σφαίρα-πλάκα και σφαίρα-σφαίρα .....	128
5.5 Παραγωγή μοντέλων παλινδρόμησης .....	130
Βιβλιογραφία .....	135

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ**

6.1 Εισαγωγή .....	137
6.1.1 Τι είναι το QuickField .....	137
6.2 Αποτελέσματα αναλύσεων .....	138
6.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα με το QuickField .....	190
6.4 Συμπεράσματα από την μελέτη των γραφημάτων με το QuickField .....	194
Βιβλιογραφία .....	196

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....**

197

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

Αποτελέσματα μετρήσεων .....	201
------------------------------	-----





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Υ.Τ.

Η τεχνολογία των υψηλών τάσεων έχει αναπτυχθεί κυρίως εξ αιτίας της ανάγκης μεταφοράς με τον πιο οικονομικό τρόπο μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σε μεγάλες αποστάσεις. Υπάρχουν όμως και εφαρμογές Υ.Τ. σε πληθώρα άλλων περιπτώσεων που δεν σχετίζονται με την μεταφορά ενέργειας. Γι' αυτό οι εφαρμογές των Υ.Τ. χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις ενεργειακές και στη μη ενεργειακές.

Οι ενεργειακές εφαρμογές σήμερα περιλαμβάνουν επιπλέον της μεταφοράς και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως υψηλή τάση, σύμφωνα με τους κανονισμούς I.E.C. ορίζεται κάθε τάση μεγαλύτερη από 1000V. Συνηθίζεται όμως τάσεις μεταξύ 10-30 KV να θεωρούνται ως μεσαίες τάσεις. Τάσεις άνω των 60 KV να θεωρούνται υψηλές τάσεις ενώ άνω των 275 KV θεωρούνται υπερυψηλές τάσεις.

Οι μη ενεργειακές εφαρμογές συνήθως απαιτούν συνεχή τάση. Τέτοιες εφαρμογές είναι σε επιστήμες του περιβάλλοντος με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, στην ιατρική χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ακτίνων X καθώς και για τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια. Η νεότερη ηλεκτρονική χρησιμοποιεί Υ.Τ. στην τεχνική εμφύτευσης ιόντων σε ημιαγωγούς, επίσης στους παλμογράφους στις τηλεοράσεις και στους καθοδικούς σωλήνες. Ανέκαθεν όμως οι Υ.Τ. χρησιμοποιούνται σε radar και στους ασυρμάτους αλλά και στους ηλεκτρικούς σιδηροδρόμους καθώς και στους αναφλεκτήρες των αυτοκινήτων στους βενζινοκινητήρες.

### 1.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΙ ΕΠΙΚΡΑΤΗΣΗΣ ΑΥΤΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε οι Υ.Τ. εξελίχθηκαν και αναπτύχθηκαν λόγω της χρησιμοποίησης αυτών σε ενεργειακές εφαρμογές, κυρίως για λόγους οικονομικούς, με σκοπό την μείωση των απωλειών. Για να γίνει αυτό καλύτερα κατανοητό θα χρειαστεί να αναφερθεί ο τύπος που δίνει τις απώλειες Joule  $P_j$  σε ένα τριφασικό σύστημα μεταφοράς, ο οποίος είναι:

$$P_j = 3I^2rl \quad (1.1)$$

Όπου  $I$  η ενεργός τιμή της εντάσεως ανά φάση,  $r$  η αντίσταση γραμμής ανά km μήκους και φάση, και  $l$  το μήκος της γραμμής.

Και επειδή η ένταση σε σχέση με τη συνολική ισχύ  $P$  είναι:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \quad (1.2)$$

Όπου  $U$  η ενεργός τιμή της πολικής τάσεως και  $\cos \varphi$  ο συντελεστής ισχύος. Αντικαθιστώντας στην 1.1 το ρεύμα  $I$  θα έχουμε:

$$P_j = \frac{P^2 r l}{U \cos \varphi^2} \quad (1.3)$$

Οπότε γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι απώλειες είναι αντίστροφα ανάλογες προς το τετράγωνο της πολικής τάσεως της γραμμής. Επί πλέον από την εξίσωση 1.3 φαίνεται ότι η ανάγκη για μεταφορά υπό υψηλή τάση γίνεται τόσο πιο απαραίτητη όσο μεγαλύτερη είναι η μεταφερόμενη ενέργεια και όσο μακρύτερη είναι η γραμμή.

Πέρα από το θέμα της οικονομικής λειτουργίας μιας γραμμής τίθεται και θέμα ευστάθειας αυτής. Εδώ θα πρέπει αναφερθεί ο όρος **φόρτιση κρουστικής αντίστασης** ή αλλιώς **φυσική ισχύς**. Η φυσική ισχύς είναι η ισχύς την οποία αποδίδει η γραμμή σε ένα καθαρά ωμικό φορτίο ίσο με την κρουστική της αντίσταση. Η φυσική ισχύς μας δίνει μια πρώτη εκτίμηση στο πόσο μπορούμε να φορτίσουμε τη γραμμή και η οποία είναι μικρότερη από την  $P_{\max}$ . Η  $P_{\max}$  είναι 1.5 έως 2 φορές μεγαλύτερη από την φυσική ισχύ. Η φυσική ισχύς δίνεται από τον τύπο:

$$P_{\text{ΦΚΑ}} = \frac{U^2}{Z_0} \quad (1.4)$$

Όπου  $Z_0$  η κρουστική αντίσταση της γραμμής. Έτσι και πάλι προκύπτει ότι για μεγαλύτερη μεταφερόμενη ισχύ απαιτείται και υψηλότερη τάση.

Τέλος ένας άλλος λόγος χρησιμοποίησης Υ.Τ. είναι ότι σημειώνεται μικρότερη πτώση τάσης σε γραμμές μεγάλου μήκους, όπου, η πτώση τάσεως δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\Delta U}{U} = \left[ \left( \frac{P^2}{P_{\text{ΦΚΑ}}^2} - 1 \right) 19.72 \left( \frac{1}{\lambda} \right) \right] \quad (1.4)$$

Όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος (περίπου 6000 km). Και από αυτή την εξίσωση φαίνεται ότι η ύπαρξη υψηλότερης τάσης, άρα και μεγαλύτερης φυσικής ισχύος, συνεπάγεται και μικρότερη πτώση τάσεως κατά μήκος της γραμμής.

Όλα τα προηγούμενα σε συνδυασμό με την τεράστια αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μας οδηγούν στο να εξελιχτεί στο μέγιστο δυνατό το επίπεδο τάσεως λειτουργίας των Η.Υ.Α.Σ. συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πρώτη μεγάλη γραμμή με υψηλή τάση 10 kV κατασκευάστηκε στο Λονδίνο το 1890 και είχε μήκος 45 Km. Έτσι από το 1910 λειτουργούσαν γραμμές τάξεως μεγέθους 100 kV, ενώ από το 1940 υπήρχαν σε χρήση γραμμές των 380 kV. Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 60 είχαμε τεράστια άλματα στην εξέλιξη των Υ.Τ. αφού υπήρξε μεταφορά σε αποστάσεις των 1000 Km, ισχύων της τάξης του 1 GW με τάσεις μέχρι και 800 kV. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν, για το άμεσο μέλλον, ανάγκες μεταφοράς ισχύος 10 GW, που γι' αυτές θα χρειαστούν τάσεις πάνω από 1000 kV. Σε αυτά τα επίπεδα τάσεων υπάρχουν δυσεπίλυτα προβλήματα που όμως οι μηχανικοί ελπίζουν ότι στο μέλλον αυτά θα αντιμετωπιστούν.

Όσον αφορά την μορφή των τάσεων σήμερα ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται συστήματα Α.Σ. τα οποία επικράτησαν λόγω της μεγάλης δυνατότητας που έχουν αυτά να μετασχηματίζονται. Τα τελευταία όμως χρόνια η μεταφορά υπό συνεχείς υψηλές τάσεις Η.Υ.Δ.Σ., λόγω και της μεγάλης εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος, έχει γίνει τεχνολογικά δυνατή. Έτσι και αυτές κερδίζουν σιγά σιγά έδαφος, δεν παύει ωστόσο η ανύψωση και ο υποβιβασμός στην αρχή και στο τέλος της γραμμής να γίνεται σε Α.Σ. από μετασχηματιστές και η μεταφορά να γίνεται σε Δ.Σ. Τα πλεονεκτήματα των γραμμών Η.Υ.Δ.Σ. είναι ότι χρησιμοποιούν δύο καλώδια αντί των τριών που έχουν οι τριφασικές γραμμές Η.Υ.Α.Σ. , έτσι μειώνεται το κόστος, επιπλέον η απουσία των χωρητικών ρευμάτων φορτίσεως κάνει περιττή τη χρήση αντιδράσεων αντισταθμίσεως. Ενώ το μεγάλο μειονέκτημα των γραμμών Η.Υ.Δ.Σ. είναι το υψηλό κόστος των σταθμών μετατροπής Α.Σ.-Δ.Σ. και αντιστρόφως και η συνεπαγόμενη μεγάλη δυσκολία απομάστευσης ενέργειας σε ενδιάμεσα σημεία.

### **1.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ Υ.Τ.**

Οι τάσεις που προαναφέρθηκαν είναι οι τάσεις λειτουργίας των γραμμών ή και εγκαταστάσεων. Δεν αρκεί όμως οι μονώσεις να υπολογιστούν από την τάση λειτουργίας και αυτό γιατί συχνά εμφανίζονται στις εγκαταστάσεις, για διάφορους λόγους, διάφορες υπερτάσεις. Έτσι, μετά από πειραματικές παρατηρήσεις ομαδοποιήθηκαν οι μορφές των ηλεκτρικών καταπονήσεων, που εμφανίζονται σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση, ώστε να μπορούν να παράγονται τάσεις αντίστοιχες με τις πραγματικές. Οι κυριότεροι τύποι υπερτάσεων είναι οι εξής:

- 1. Υπερτάσεις από χειρισμούς ή εσωτερικές υπερτάσεις.** Αυτές εμφανίζονται στα δίκτυα ως οδεύοντα κύματα και οφείλονται στους

διάφορους χειρισμούς ή σε σφάλματα. Συνήθως έχουν τη μορφή αποσβεννύμενης ταλαντώσεως με μέγιστο εύρος, για καλά προστατευόμενες γραμμές, ως 3 ρυ τις τάσεως λειτουργίας. Αν όμως δεν υπάρχει η κατάλληλη προστασία μπορούν να φτάσουν και τα 7 ρυ. Οι υπερτάσεις από χειρισμούς αποτελούν τις πιο επικίνδυνες μορφές υπερτάσεων για δίκτυα e.h.v. ενώ για τα u.h.v. δεν έχουν καταφέρει οι μηχανικοί ακόμα να τις αντιμετωπίσουν.

**2. Υπερτάσεις από κεραυνούς ή εξωτερικές υπερτάσεις.** Και αυτές εμφανίζονται ως οδεύοντα κύματα είναι μονόφορες και προκαλούνται είτε με απ' ευθείας πτώση κεραυνού πάνω στις γραμμές μεταφοράς οπότε έχουν εύρος μέχρι και 20 MW, είτε λόγω δευτερογενών υπερπηδήσεων οπότε δεν υπερβαίνουν συνήθως τις μερικές εκατοντάδες KW. Τέτοιες υπερτάσεις αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο για δίκτυα μέχρι 400 kV.

**3. Υπερτάσεις από υπερπηδήσεις.** Αυτές εμφανίζονται κατά τις διασπάσεις των μονώσεων ανάμεσα σε δύο κυκλώματα διαφορετικής τάσεως οπότε το κύκλωμα με την χαμηλότερη τάση βρίσκεται ξαφνικά υπό τάση μεγαλύτερη από την τάση λειτουργίας του. Τέτοιες υπερτάσεις συναντάμε κυρίως στους μετασχηματιστές.

Έτσι λοιπόν με την κατασκευή που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας δίνεται η δυνατότητα, μελλοντικά, να προσομοιωθούν και να μελετηθούν όλες αυτές οι μορφές υπερτάσεων που προαναφέρθηκαν.

#### **1.4 ΔΙΑΚΕΝΑ ΑΕΡΟΣ**

Η μόνωση ανάμεσα σε δύο στοιχεία ενός συστήματος που βρίσκονται σε διαφορετικές τάσεις ή μεταξύ ενός στοιχείου και της γης επιτυγχάνεται με την παρεμβολή ενός μονωτικού υλικού. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι οποιοδήποτε μη αγώγιμο υλικό, όπως είναι το λάδι, το γυαλί, ένα συνθετικό υλικό, ένα αέριο ή ο ατμοσφαιρικός αέρας. Η χρησιμοποίηση του ατμοσφαιρικού αέρα σαν μονωτικού υλικού είναι από τις πιο ενδιαφέρουσες εφ' όσον ο αέρας σαν υλικό έχει μηδενικό κόστος.

Ο αέρας ήταν το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε σαν μονωτικό σε ηλεκτρικές εφαρμογές. Το σπουδαιότερο πλεονέκτημά του, εκτός από το μηδενικό του κόστος, είναι ότι αποτελεί επανορθούμενη μόνωση. Μετά από μία διάσπαση δηλαδή, ανακτά πλήρως τις ιδιότητές του, σε αντίθεση με άλλα σύγχρονα μονωτικά υλικά. Το βασικό μειονέκτημά του είναι ότι διατάξεις με μόνωση αέρα έχουν μεγάλες διαστάσεις σε σχέση με διατάξεις που χρησιμοποιούν άλλα μονωτικά υλικά.

Τα πλεονεκτήματα όμως που παρουσιάζει έναντι των υπόλοιπων μονωτικών υλικών συντελούν στην ευρεία χρησιμοποίησή του, ακόμα και

σήμερα, σαν μονωτικό υλικό και μόνο αν υπάρχουν λόγοι περιορισμένου χώρου, λειτουργικοί, αισθητικοί ή οικονομικοί χρησιμοποιούνται άλλα υλικά.

Για τη διαμόρφωση της μόνωσης αέρα πρέπει να είναι γνωστή η συμπεριφορά του αέρα σε ηλεκτρικές καταπονήσεις. Η επιστημονική διερεύνηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του αέρα άρχισε πολύ νωρίς με τις βασικές έρευνες των Townsend, Raether, Loeb, Meek και άλλων ερευνητών. Παρά τις εκτεταμένες θεωρητικές γνώσεις που αποκτήθηκαν από αυτές τις έρευνες μέχρι σήμερα, σε πολύ λίγες περιπτώσεις είναι δυνατή η πρόβλεψη της τάσης διάσπασης ενός μονωτικού διακένου όταν υπόκειται σε καταπονήσεις που εμφανίζονται υπό συνθήκες λειτουργίας.

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε και μία ημιεμπειρική τεχνική για τον υπολογισμό των αναγκαίων για τη μόνωση αποστάσεων. Η τεχνική αυτή συνίσταται στη διαμόρφωση κανόνων με τους οποίους εργαστηριακά αποτελέσματα μπορούν να επεκταθούν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Επειδή η ηλεκτρική διάσπαση ενός μονωτικού διακένου αέρα είναι στατιστικό φαινόμενο, η τάση διάσπασης ενός διακένου μπορεί να περιγραφεί με κάποια μέση τιμή, κάποια τυπική απόκλιση και κάποιο νόμο της θεωρίας πιθανοτήτων που το διέπει. Στα εργαστήρια συνήθως μελετώνται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα μονωτικό διάκενο διασπάται. Το ίδιο διάκενο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση έτσι ώστε να μην διασπάται. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας εργαστηριακές τιμές τάσεων διάσπασης με κανόνες της στατιστικής και της θεωρίας πιθανοτήτων. Για να καθορίσουμε την τάση αντοχής ενός διακένου αέρα, ενώ γνωρίζουμε την τάση διάσπασής του, θα πρέπει να γνωρίζουμε την στατιστική κατανομή που ακολουθεί η τάση διάσπασης του διακένου αυτού.

Στα εργαστήρια υψηλών τάσεων γίνονται δοκιμές σε ομοιογενή ή ανομοιογενή διάκενα διαφόρων μεγεθών με σκοπό την μελέτη της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του αέρα. Οι δοκιμές αυτές γίνονται με την χρήση γεννητριών υψηλής τάσεως και τα διάκενα καταπονούνται με συνεχείς, εναλλασσόμενες και κρουστικές τάσεις, που αντιστοιχούν σε καταπονήσεις που εφαρμόζονται στα δίκτυα από υπερτάσεις, κατά την λειτουργία τους.

## Βιβλιογραφία

**Κ.Α.ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ** ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, πρώτη έκδοση

**ΜΙΧΑΗΛ ΔΑΝΙΚΑΣ** ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις  
ΣΜΠΙΛΙΑΣΑ.Ε.Β.Ε. Β' Έκδοση

**ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ** ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΟ ΔΙΑΚΕΝΟ ΑΕΡΑ/ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ  
Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Μάρτιος 2006

**ΘΑΛΗ Μ. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ** ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ Εκδόσεις  
ΤΥΠΟΚΡΕΤΑ Α.Β.Ε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### 2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

#### 2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχίζουμε με μερικές γενικές γνώσεις, οι οποίες είναι λίγο πολύ γνωστές σε όλους μας.

1. Παραδεχόμαστε την ύπαρξη ενός φυσικού ποσού που το ονομάζουμε ηλεκτρικό φορτίο. Αν και δεν γνωρίζουμε τη φύση του, μπορούμε με την παραδοχή του να περιγράψουμε ή να εξηγήσουμε πάμπολλα φυσικά φαινόμενα.
2. Υπάρχουν δύο ειδών ηλεκτρικά φορτία, στα οποία δόθηκαν θετικό και αρνητικό φορτίο.
3. Από πληθώρα πειραμάτων βρέθηκε ότι μεταξύ ομωνύμων φορτίων δημιουργούνται απωστικές δυνάμεις, ενώ μεταξύ ετερονύμων ελκτικές.
4. Τα φορτία είναι κβαντισμένα, δηλαδή είναι πάντοτε πολλαπλάσια ενός **στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου**<sup>1</sup>  $e$ .
5. Υλικά στα οποία τα ηλεκτρικά φορτία δεν μπορούν να μετακινούνται ονομάζονται **μονωτές**, σ' αντίθεση με τους **αγωγούς**, στους οποίους τα ηλεκτρικά φορτία μετακινούνται εύκολα. Τυπικό παράδειγμα αγωγού αποτελούν τα μέταλλα στα οποία τα μόνα φορτία που μπορούν να μετακινηθούν είναι τα αρνητικά φορτία των ελευθέρων ηλεκτρονίων των μετάλλων.

#### 2.1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αν πλησιάσει ένα φορτίο  $q$  σ' ένα δεύτερο φορτίο  $Q$  θα του ασκηθεί μια δύναμη. Ο χώρος λοιπόν γύρω από το φορτίο  $Q$  έχει την ιδιότητα να ασκεί μια δύναμη σε κάθε φορτίο που βρίσκεται μέσα σε αυτόν. Ο χώρος μέσα στον οποίο τα φορτία δέχονται δυνάμεις ονομάζεται **ηλεκτρικό πεδίο**. Αν σε κάποιο σημείο ηλεκτρικού πεδίου βρεθεί δοκιμαστικώς ένα απειροστό θετικό φορτίο  $dq$ , η δύναμη  $dF$  που θα του ασκηθεί, βρίσκεται πειραματικώς ότι είναι ανάλογη αυτού του φορτίου<sup>2</sup>. Δηλαδή προκύπτει ο εξής νόμος:

$$dF = Edq \quad (2.1)$$

Ο συντελεστής αναλογίας  $E$  ονομάζεται **ένταση του ηλεκτρικού πεδίου** και ορίζεται ως: **το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  σε ένα τυχαίο σημείο του χώρου είναι εξ ορισμού ίσο προς το πηλίκο της δύναμης  $\eta$  οποία ασκείται πάνω σε ένα δοκιμαστικό θετικό φορτίο**

<sup>1</sup>  $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Cb εκτενέστερη αναφορά για αυτό γίνεται παρακάτω στην παράγραφο για τον ιονισμό

<sup>2</sup> Το δοκιμαστικό φορτίο που τοποθετούμε σ' αυτό το σημείο πρέπει να είναι απειροστό, ώστε η παρουσία του να μην παραμορφώνει την αρχική μορφή του πεδίου.

**q**, που βρίσκεται στο σημείο αυτό, διά του φορτίου αυτού, **q** και δίνεται από την σχέση:

$$E = \frac{dF}{dq} \quad (2.2)$$

Εδώ ας σημειωθεί ότι η ένταση του πεδίου **E** περιγράφει το εξωτερικό προς το **q**, ηλεκτρικό πεδίο, δηλαδή δεν περιγράφει το πεδίο που παράγει αυτό το ίδιο το **q**. Οι μονάδες του **E** στο SI είναι newtons δια coulomb (N/Cb). Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι διανυσματικό μέγεθος και έχει τη διεύθυνση της δύναμης.

### 2.1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι εντελώς καθορισμένο, όταν σε κάθε σημείο του (x,y,z) είναι γνωστή η ένταση **E**. Συνεπώς, για την παράσταση του, έπρεπε να δίνεται σε κάθε σημείο του χώρου το διάνυσμα της εντάσεως του πεδίου. Όμως, λόγω του πλήθους των διανυσμάτων, η εικόνα δεν θα ήταν εποπτική και, γι' αυτό προτιμάται να σχεδιάζονται οι δυναμικές γραμμές. Ορίζεται σαν **δυναμική γραμμή**, κάθε γραμμή που στα σημεία της η ένταση του πεδίου είναι εφαπτόμενη (σχήμα 2.1).



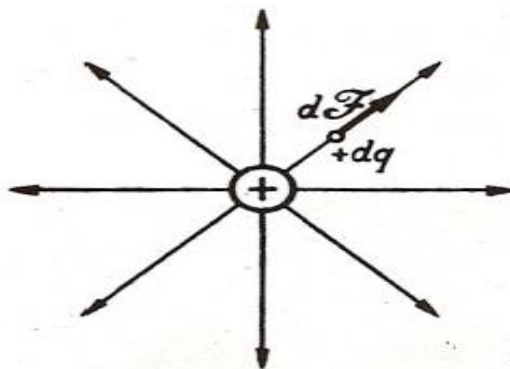
**Σχήμα 2.1** Η ένταση του πεδίου είναι εφαπτόμενη σε κάθε σημείο των δυναμικών γραμμών.(Πηγή: Γενική Φυσική-Αλεξόπουλου Μαρίνου )

Οι δυναμικές γραμμές σχεδιάζονται κατά τρόπο ώστε, εκτός από τη διεύθυνση και φορά, να παρέχουν και το μέτρο της εντάσεως του πεδίου. Έτσι δεχόμαστε συμβατικώς ότι μέσα από μια επιφάνεια με εμβαδόν ίσο με τη μονάδα που την τοποθετούμε κάθετα στην ένταση του πεδίου, περνάνε τόσες



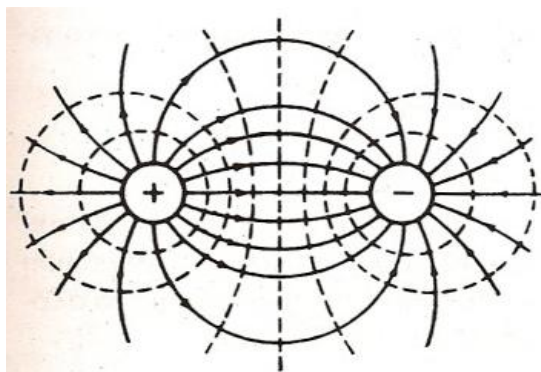
δυναμικές γραμμές, όσο είναι το μέτρο της εντάσεως του πεδίου. Άρα όπου οι δυναμικές γραμμές είναι πυκνότερες εκεί το πεδίο είναι ισχυρότερο.

Η μορφή των δυναμικών γραμμών εξαρτάται από την κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων στο χώρο. Σαν παράδειγμα μπορεί να εξεταστεί η μορφή των δυναμικών γραμμών γύρω από ένα θετικό φορτίο  $Q$  (σχήμα 2.2).



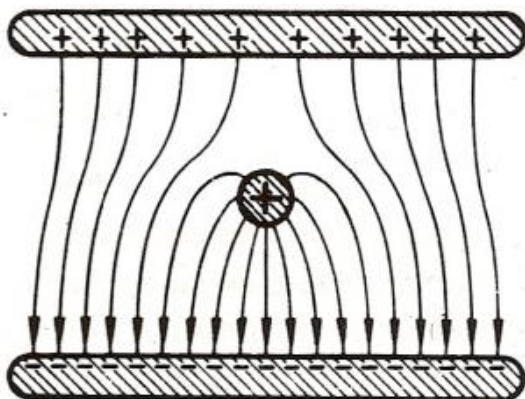
**Σχήμα 2.2** Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από μια σφαίρα είναι ακτινικό. (Πηγή: Γενική Φυσική-Αλεξόπουλου Μαρίνου )

Αν στο περιβάλλον του φορτίου  $Q$  βρεθεί ένα ομώνυμο απειροστό φορτίο  $dq$ , θα του ασκήσει μια απωστική δύναμη  $dF$ , η οποία θα έχει τη διεύθυνση της ευθείας που ενώνει τα δύο φορτία. Επειδή η διεύθυνση της δύναμης συμπίπτει με τη διεύθυνση της εντάσεως του πεδίου, έπεται ότι οι δυναμικές γραμμές θα είναι ευθείες που ξεκινούν από το  $Q$  και έχουν φορά προς τα έξω. Με ακριβώς ανάλογους συλλογισμούς βρίσκεται ότι οι δυναμικές γραμμές που οφείλονται σε ένα αρνητικό φορτίο παρουσιάζουν την ίδια εικόνα, με μόνη διαφορά ότι διευθύνονται προς το αρνητικό φορτίο. Τώρα αν θεωρηθούν δύο σφαίρες φορτισμένες με αντίθετα φορτία, η ένταση του πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου, θα είναι η συνισταμένη των εντάσεων των δύο προηγούμενων ηλεκτρικών πεδίων και οι δυναμικές γραμμές θα είναι καμπύλες, που ξεκινάνε από τη θετική σφαίρα και καταλήγουν στην αρνητική. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 2.3 παρακάτω.



**Σχήμα 2.3** Ηλεκτρικό πεδίο γύρω από δύο σφαίρες που φέρουν αντίθετα φορτία. (Πηγή: Γενική Φυσική-Αλεξόπουλου Μαρίνου )

Από τους προηγούμενους συλλογισμούς συνάγεται ότι οι δυναμικές γραμμές δεν αρχίζουν και δεν καταλήγουν οπουδήποτε στο χώρο. Οι δυναμικές γραμμές έχουν πάντοτε την αρχή τους επί θετικών και το τέλος τους επί αρνητικών φορτίων. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 2.4 που παριστάνει δύο επίπεδες πλάκες, φορτισμένες με ετερόνυμα φορτία και μεταξύ τους μια σφαίρα, φορτισμένη ομώνυμα με την πάνω πλάκα. Παρατηρείται ότι τόσο από τη θετική πλάκα όσο και από τη θετική σφαίρα ξεκινάνε δυναμικές γραμμές που καταλήγουν στην αρνητική πλάκα.

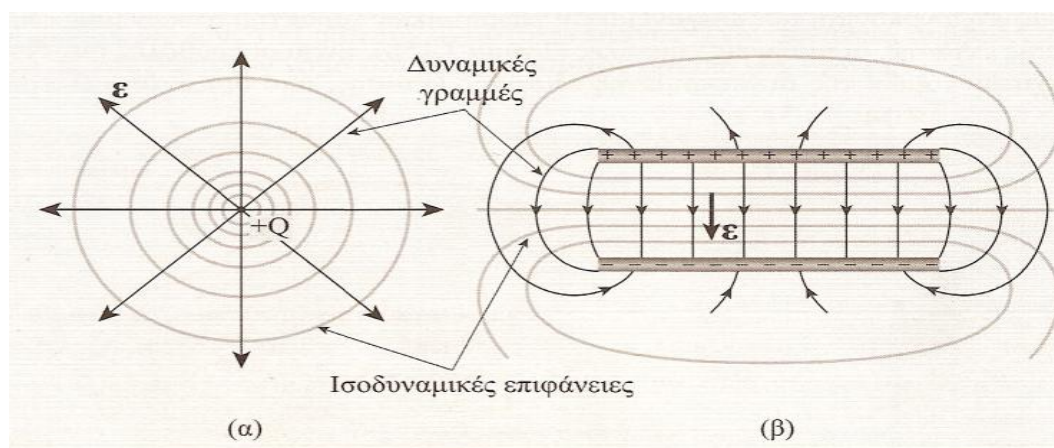


**Σχήμα 2.4** Όλες οι δυναμικές γραμμές έχουν αρχή τους τα θετικά φορτία και τέλος τα αρνητικά. (Πηγή: Γενική Φυσική-Αλεξόπουλου Μαρίνου )

### 2.1.4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες όπως και οι δυναμικές γραμμές είναι στην ουσία ένας τρόπος για να έχουμε μια παραστατική εικόνα του πεδίου. Βάση ορισμού λοιπόν ο γεωμετρικός τύπος των σημείων με το ίδιο δυναμικό ανήκουν σε επιφάνειες που ονομάζονται ισοδυναμικές. Για να αξιοποιηθούν τα χαρακτηριστικά που προσφέρουν οι ισοδυναμικές επιφάνειες, για την περιγραφή του πεδίου, σχεδιάζονται οι καμπύλες ενός δεδομένου συνόλου τέτοιων επιφανειών, με ένα επίπεδο. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα γραφήματα ισοδυναμικών επιφανειών, σταθερής διαφοράς δυναμικού, μεταξύ δύο οποιωνδήποτε διαδοχικών επιφανειών. Συνεπώς και οι ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο σχεδίασης, χαρακτηρίζονται από το ίδιο βήμα δυναμικού, σ' όλη την έκταση του πεδίου.

Εκεί που οι ισοδυναμικές καμπύλες είναι πυκνές, η ένταση του πεδίου είναι μεγάλη και αντιστρόφως. Σε κάθε περίπτωση η ένταση του πεδίου σε ένα σημείο της ισοδυναμικής επιφάνειας είναι κάθετη σ' αυτή. Συνεπώς οι δυναμικές γραμμές είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες. Στην περίπτωση ενός μεμονωμένου σημειακού φορτίου, οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι σφαιρικές, με κέντρο το σημειακό φορτίο (Σχήμα 2.5α), όσο για τη πυκνότητα τους ελατώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο. Στο εσωτερικό ενός επίπεδου πυκνωτή, του οποίου οι οπλισμοί είναι απείρου εκτάσεως, ώστε το ηλεκτροστατικό πεδίο να περιορίζεται, πρακτικά, ανάμεσα τους, οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι επίπεδα, παράλληλα και ισαπέχοντα. Σ' ένα επίπεδο πυκνωτή με περιορισμένης έκτασης οπλισμούς, όπως συμβαίνει στην πράξη, το ηλεκτροστατικό πεδίο έχει τη μορφή του σχήματος 2.5β όπου το πεδίο στο κεντρικό τμήμα του πυκνωτή προσεγγίζει την εικόνα του ομογενούς<sup>3</sup> πεδίου.



**Σχήμα 2.5** α) πεδίο Coulomb ενός σημειακού φορτίου και β) σύνθετο πεδίο επίπεδου πυκνωτή. Δυναμικές γραμμές και ισοδυναμικές επιφάνειες στα δύο πεδία (Πηγή: Φυσική και Τεχνολογία-Φραγκιαδάκης).

<sup>3</sup> Για το ομογενές και ανομοιογενές πεδίο θα αναφερθούμε στην επόμενη παράγραφο.

Τέλος αν το δυναμικό είναι το ίδιο σ' όλα τα σημεία του χώρου που περικλείεται από μια κλειστή επιφάνεια, τότε μιλάμε για ένα ισοδυναμικό χώρο.

### 2.1.5 ΟΜΟΓΕΝΕΣ –ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Το ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ομογενές όταν η ένταση του είναι παντού η ίδια. Το ομογενές πεδίο παριστάνεται με παράλληλες και ισαπέχουσες δυναμικές γραμμές. Πεδίο τέτοιας μορφής παράγεται μεταξύ δύο μεταλλικών επιπέδων και παραλλήλων πλακών, απείρων διαστάσεων, όταν αυτές στις αντιμέτωπες επιφάνειες τους φέρουν φορτία αντίθετου σημείου. Κατά προσέγγιση, αυτό πραγματοποιείται στο χώρο μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών, οι οποίες βρίσκονται σε μικρή (σχετικά με τις διαστάσεις τους) απόσταση  $\ell$  και παρουσιάζουν διαφορά δυναμικού  $U$  (σχήμα 2.5β). Στο ομογενές πεδίο η ένταση του δίνεται από τη σχέση:

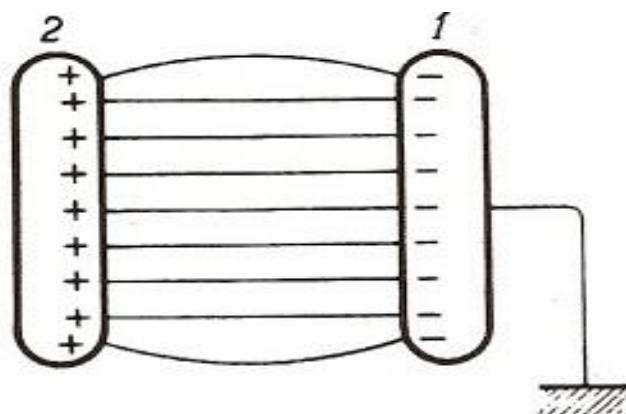
$$E = \frac{U}{\ell} \quad (2.3)$$

Στην πράξη ομοιογενή διάκενα λέγονται αυτά στα οποία ο λόγος της μέγιστης προς τη μέση τιμή της πεδιακής έντασης είναι μικρότερος από 5.

Αντίθετα τα πεδία που η ένταση τους μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, ονομάζονται ανομοιογενή. Κατά κανόνα τα ηλεκτρικά πεδία που εμφανίζονται στη φύση είναι ανομοιογενή και έχουν ένταση, που σε κάθε σημείο του πεδίου είναι εν γένει, διαφορετικού μέτρου και κατεύθυνσης. Ουσιαστικά και στον πυκνωτή το πεδίο είναι ανομοιογενές όμως είναι δυνατόν κατά προσέγγιση να θεωρηθεί τοπικά ομογενές.

### 2.1.6 ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Αν θεωρηθούν δύο επίπεδοι και παράλληλοι αγωγοί, σχήμα 2.6, που βρίσκονται σε απόσταση  $\ell$ . Απ' αυτούς, ο ένας προσγειώνεται  $U_1=0$ , ενώ ο άλλος φορτίζεται με φορτίο  $+q$ . Ο φορτισμένος αγωγός 2, λόγω ηλεκτρίσεως εξ επιδράσεως, προκαλεί την εμφάνιση του αντίθετου φορτίου  $-q$  πάνω στον αγωγό 1.



Σχήμα 2.6 (Πηγή: Γενική Φυσική-Αλεξόπουλου Μαρίνου )

Όπως φαίνεται και στο σχήμα τα φορτία συγκεντρώνονται στις απέναντι επιφάνειες των δύο αγωγών και, έτσι, μεταξύ τους παράγεται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Ταυτόχρονα οι δύο αγωγοί παρουσιάζουν μια διαφορά δυναμικού  $U$  που είναι ανάλογη του φορτίου, δηλαδή :  $U=q \cdot \text{σταθ}$ . Το σταθερό πηλίκο  $q/U$  ονομάζεται **χωρητικότητα**  $C$  του συστήματος των δύο αγωγών, δηλαδή είναι :

$$C = \frac{q}{U} \quad (2.4)$$

Η χωρητικότητα εξαρτάται από το σχήμα των δύο αγωγών, από τη μεταξύ τους απόσταση και από το μεταξύ τους παρεμβαλλόμενο μέσο.

Το σύστημα των δύο αγωγών που μελετήθηκε, ονομάζεται **πυκνωτής** και οι αγωγοί, **οπλισμοί** του πυκνωτή. Φαίνεται λοιπόν ότι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή περιγράφει την ικανότητα του να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο και ηλεκτρική δυναμική ενέργεια.

**Μονάδες χωρητικότητας.** Στο σύστημα S.I. μονάδα χωρητικότητας είναι το **1 Farad**, το οποίο είναι η χωρητικότητα πυκνωτή που όταν φορτίζεται με φορτίο 1 Cb, παρουσιάζει στους οπλισμούς του τάση 1V. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σ' έναν πάρα πολύ μεγάλο πυκνωτή. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι μονάδες 1μF, 1nF και 1pF.

### 2.1.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η χωρητικότητα ενός συστήματος δύο αγωγών εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, εφόσον δεν παρεμβάλλεται κάποια ύλη. Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω είδη πυκνωτών:

- **Πυκνωτής με επίπεδους και παράλληλους οπλισμούς.** Εδώ η χωρητικότητα παρέχεται από τον τύπο

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{\ell} \quad (2.6)$$

Όπου  $S$  η επιφάνεια των οπλισμών,  $\ell$  η απόσταση μεταξύ των οπλισμών και  $\epsilon_0$  είναι μια σταθερά η οποία ονομάζεται **διηλεκτρική σταθερά του κενού** η οποία έχει διαστάσεις  $\epsilon_0 = \frac{q}{SE} = \frac{\text{φορτίο}}{(\text{εμβαδόν})(\text{τάση} / \text{μήκος})} = \frac{\text{φορτίο}}{(\text{μήκος})(\text{τάση})}$  και αν μετρήσουμε το φορτίο σε Cb, την τάση σε Volt και το μήκος σε m τότε για το  $\epsilon_0$  προκύπτει η τιμή:  $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12} \text{ Cb/Vm}$ .

- **Σφαιρικός πυκνωτής.** Η χωρητικότητα ενός σφαιρικού πυκνωτή, δηλαδή πυκνωτή που οι οπλισμοί του έχουν σχήμα συγκεντρικών σφαιρών, υπολογίζεται ως εξής: αν ο πυκνωτής φέρει φορτίο  $q$ , η ροή που διαπερνά οποιαδήποτε νοητή συγκεντρική σφαίρα, κατά το θεμελιώδη νόμο της ροής, είναι :

$$E4\pi r^2 = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (2.7)$$

Αν οι οπλισμοί έχουν ακτίνες  $R$  και  $r$ , η τάση μεταξύ των δύο οπλισμών υπολογίζεται με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου

$$U = \int_r^R E dr = \int_r^R \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \quad (2.8)$$

Η χωρητικότητα  $C$ , ως πηλίκο του φορτίου  $q$  της τάσεως  $U_1-U_2$ , είναι ίση προς:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}} \quad (2.9)$$

Στην περίπτωση, κατά την οποία ο εξωτερικός οπλισμός έχει ακτίνα άπειρον  $R = \infty$ , ο προηγούμενος τύπος απλουστεύεται στον εξής:

$$C = 4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r \quad (2.10)$$

Αυτή είναι η περίπτωση της χωρητικότητας μιας μόνο σφαίρας, οπότε δεχόμαστε ότι τον άλλο οπλισμό αποτελούν τα τοιχώματα της αίθουσας.

- **Κυλινδρικός πυκνωτής.** Οι οπλισμοί αυτού του πυκνωτή είναι ομοαξονικοί κύλινδροι και η χωρητικότητα του υπολογίζεται με τον τύπο:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{\ell}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (2.11)$$

Όπου  $\ell$  είναι το ύψος των κυλίνδρων και  $R_1, R_2$  οι ακτίνες αντίστοιχα του εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου.

### 2.1.8 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Έστω πυκνωτής, χωρητικότητας  $C$  του οποίου οι οπλισμοί είναι αρχικώς αφόρτιστοι, οπότε και η μεταξύ τους διαφορά δυναμικού είναι ίση με μηδέν. Ένας τρόπος για να φορτισθεί ο πυκνωτής είναι, καταρχήν, ο εξής: από τον ένα οπλισμό αφαιρείται ένα φορτίο  $dq$  (π.χ. με απόσπαση μερικών ηλεκτρονίων) και μεταβιβάζεται στον άλλο, οπότε τώρα οι δύο οπλισμοί θα είναι φορτισμένοι με αντίθετα φορτία  $\pm dq$ , ενώ στον μεταξύ τους χώρο, θα παρουσιαστεί ένα ασθενές ηλεκτρικό πεδίο. Ακολούθως, αν μεταφερθεί ένα νέο φορτίο  $dq$ , θα πρέπει να καταναλωθεί έργο για την υπερνίκηση των δυνάμεων του πεδίου. Αν συνεχίσουμε το πείραμα, το έργο για κάθε μεταφορά θα γίνεται διαρκώς μεγαλύτερο. Απ' αυτούς τους συλλογισμούς προκύπτει ότι ο φορτισμένος πυκνωτής θα περιέχει ενέργεια, η οποία είναι εναποθηκευμένη υπό μορφή **ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου** στο χώρο μεταξύ των δύο οπλισμών. Την ενέργεια αυτή ο πυκνωτής την αποδίδει όταν εκφορτιστεί.

Για να αυξηθεί το φορτίο του ενός οπλισμού κατά  $dq$ , πρέπει να καταναλώσουμε έργο  $dA$ , ίσο με:

$$dA = Udq = \frac{q}{C} dq \quad (2.12)$$

Επομένως, το ολικό έργο  $A$  θα είναι ίσο με:

$$A = \int dA = \frac{1}{C} \int qdq = \frac{q^2}{2C} \quad (2.13)$$

Επειδή είναι  $q=CU$ , παίρνουμε για το έργο  $A$ , το οποίο καταναλώθηκε και το οποίο αποταμιεύτηκε ως ενέργεια  $W$  του ηλεκτρικού πεδίου, τη σχέση :

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \quad (2.14)$$

**Πυκνότητα ενέργειας.** Αν στον τύπο 2.14 αντικατασταθεί το  $C$  με το ίσο του  $\epsilon_0 \frac{S}{\ell}$ , παίρνουμε τη σχέση:

$$W = \epsilon_0 \frac{S U^2}{\ell} \quad (2.15)$$

Επειδή όμως είναι  $U=E\ell$  η εξίσωση 2.15 γράφεται ως εξής:

$$W = \epsilon_0 \frac{S E^2 \ell^2}{\ell} = \epsilon_0 \frac{S \ell E^2}{2} \quad (2.16)$$

Αν ονομαστεί πυκνότητα ενέργειας  $u$  το πηλίκο της ενέργειας  $W$  διά του όγκου  $S\ell$  εξάγεται η σχέση :

$$u = \varepsilon_0 \frac{E^2}{2} \quad (2.17)$$

## 2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 2.2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ως μονωτικά σώματα ή μονωτές χαρακτηρίζονται τα υλικά που πρακτικά δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχετικά ασθενείς πεδία συνεχούς ρεύματος. Στη χημική τους σύνθεση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής. Καθώς, μάλιστα τα ιόντα των σωμάτων αυτών είναι δυσκίνητα, ή η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών είναι μεγάλη, ή τα μόρια τους είναι σταθερά, δηλαδή δεν διασπώνται εύκολα σε φορτισμένες ρίζες, δεν υπάρχουν στα παραπάνω σώματα ευκίνητοι φορείς σε αξιόλογη ποσότητα, και έτσι δεν έχουν την δυνατότητα της εκδήλωσης μιας ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Πάντως είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη, σε κάθε σώμα, ενός κάποιου πλήθους προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων και διασπάσεων που δημιουργούν ένα μικρό αριθμό φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος.

Αποτέλεσμα της έλλειψης αξιόλογης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίσουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων διαμέσου της μάζας τους, και για να διατηρήσουν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων. Έτσι βρίσκουν πολύ σημαντικές χρήσεις, κυρίως ως ηλεκτρικές μονώσεις σε όλες τις ηλεκτρικές εφαρμογές, και ως διηλεκτρικά υλικά στην κατασκευή των πυκνωτών.

Η ανάγκη για την αξιόπιστη, διαχρονική συμπεριφορά των μονωτικών υλικών σε μια κατασκευή έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησης τους ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής αυτών. Αυτά είναι η διηλεκτρική αντοχή, η σχετική διηλεκτρική σταθερά, ο συντελεστής απωλειών και η ειδική αγωγιμότητα. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στα δύο πρώτα καθώς είναι αυτά που μας αφορούν περισσότερο.

### 2.2.2 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Ως διηλεκτρική αντοχή  $E_d$  ενός μονωτικού υλικού ορίζεται το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση  $U_{dmin}$  προς την απόσταση των ηλεκτροδίων  $\ell$  σε ομογενές πεδίο:

$$E_d = U_{dmin} / \ell \quad (\text{συνήθως σε kV/cm}) \quad (2.18)$$



Για μια δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων η τιμή  $E_d$  αποτελεί ένα πρώτο κριτήριο για την επιλογή των διαφόρων μονωτικών. Ενδεικτική τιμή διηλεκτρικής αντοχής για τον αέρα για ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz και για μικρό χρονικό διάστημα καταπόνησης είναι 21 kV/cm.

Η διηλεκτρική αντοχή μετριέται με επιβολή ημιτονικής εναλλασσόμενης τάσης σε δοκίμιο πάχους 1mm, και είναι η ενεργός τιμή της τάσης στην οποία εκδηλώνεται ακαριαία η διάσπαση του υλικού. Στις εφαρμογές όμως ενδιαφέρει η μακροχρόνια και όχι η στιγμιαία συμπεριφορά των υλικών. Επειδή λοιπόν όταν η τάση επιβάλλεται για μεγάλο χρονικό διάστημα προκαλείται εξασθένηση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού, λόγω κυρίως των μερικών εκκενώσεων, στους υπολογισμούς των μονωτικών υλικών θεωρείται συνήθως ότι η διηλεκτρική αντοχή τους είναι πρακτικά περίπου 10% της τιμής που μετριέται στις δοκιμές.

### 2.2.3 ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ , ή απλούστερα διηλεκτρική σταθερά (ή επιτρεπτότητα ή διαπερατότητα) ενός υλικού είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών υλικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών, μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, ώστε να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Χαρακτηριστική τιμή σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς για τον αέρα είναι 1,000594, ενώ για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες είναι 1,5 .

## 2.3 ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΙΟΝΙΣΜΟΣ

### 2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μελέτη του μοντέλου του ατόμου του N.Bohr, της κινητικής θεωρίας των αερίων καθώς και κάποιων άλλων φυσικών διεργασιών θα βοηθήσουν να κατανοηθεί καλύτερα η διάσπαση των αερίων διηλεκτρικών. Αυτό γιατί η διάσπαση οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη ιόντων ή ελευθέρων ηλεκτρονίων που δημιουργούνται από τους εξής μηχανισμούς :

1. Σε μηχανισμούς μέσα στο αέριο και
2. Σε μηχανισμούς και φαινόμενα που συμβαίνουν κοντά ή πάνω στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

### 2.3.2 ΑΤΟΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το 1911 ο Νεοζηλανδός φυσικός E.Rutherford διατύπωσε το περίφημο πλανητικό υπόδειγμα του ατόμου πειραματιζόμενος με ακτίνες σωματιδίων  $\alpha$  πάνω σε λεπτά φύλλα χρυσού. Κατά τον Rutherford το άτομο δεν είναι συμπαγές, αλλά αποτελείται από ένα κεντρικό πυρήνα που γύρω από αυτόν κινούνται ηλεκτρόνια. Στον πυρήνα του ατόμου είναι συγκεντρωμένη η μεγαλύτερη μάζα του ατόμου και ο πυρήνας ακόμη είναι ο φορέας του θετικού φορτίου του ατόμου. Το άτομο είναι εξωτερικά ουδέτερο, γιατί το θετικό φορτίο του πυρήνα εξουδετερώνεται από το άθροισμα των αρνητικών φορτίων των περιφερομένων ηλεκτρονίων. Το ηλεκτρόνιο είναι σωματίδιο με μάζα  $m_e=9.107*10^{-28}$  gr και αρνητικό φορτίο  $e$  που η απόλυτη τιμή του είναι  $e=1.602*10^{-19}$  Cb.

Το 1913 ένας μαθητής του Rutherford, ο δανός φυσικός Niels Bohr, βελτίωσε το υπόδειγμα του δασκάλου του, αφού έλαβε υπόψη του τη θεωρία των κβάντων του M. Planck. Ο Bohr για να αντιπαρέλθει τις δυσκολίες που παρουσίαζε η θεωρία του Rutherford διατύπωσε την άποψη ότι κάθε πλανητικό ηλεκτρόνιο εκτελεί κυκλική κίνηση γύρω από τον πυρήνα και υπακούει στις παρακάτω συνθήκες :

1. Ένα σταθερό άτομο αποτελείται από ένα πυρήνα από πρωτόνια και νετρόνια με ένα σταθερό αριθμό ηλεκτρονίων που περιφέρονται γύρω τους σε τροχιά. Καμιά ακτινοβολία δεν εκπέμπεται από αυτήν την κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου. Το φορτίο ενός ηλεκτρονίου είναι  $e=1.602*10^{-19}$  Cb. Ένα ηλεκτρόνιο επιταχύνεται υπό την επίδραση μιας διαφοράς δυναμικού  $U(V)$  και αποκτά ενέργεια  $W(eV)^4$ , όπου  $1eV=1.602*10^{-19}$  Joules.
2. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να περιστρέφονται μόνο σε καθορισμένες τροχιές στις οποίες η γωνιακή ποσότητα κίνησης του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο  $\eta$  της ποσότητας  $h/2\pi$  όπου  $h$  η σταθερά του Planck  $h=6.6262*10^{-34}$  Joule\*sec.
3. Το άτομο εκπέμπει ή απορροφά ένα απλό quantum ενέργειας  $h\nu$  από τη μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου από μια τροχιά σε μία άλλη, όπου  $\nu$  η συχνότητα της ακτινοβολίας.

Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά από μια τροχιά συνολικής ενέργειας  $W_1$  σε μια άλλη μικρότερης ενέργειας  $W_2$  δίνεται από τη σχέση :

$$\nu = \frac{W_1 - W_2}{h} \quad (2.19)$$

Ή αλλιώς

<sup>4</sup> Όπου eV ηλεκτρονιοβόλτ πρακτική μονάδα έργου

$$\nu = \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m}{h^3} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

Όπου  $Z$  ο ατομικός αριθμός του ατόμου,  $m$  η μάζα του ηλεκτρονίου και  $n_1, n_2$  οι κβαντικοί αριθμοί της αρχικής και τελικής τροχιάς.

### 2.3.3 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα αέριο περιγράφεται μακροσκοπικά από την πίεση τον όγκο και την θερμοκρασία του. Τα μεγέθη αυτά για ορισμένη ποσότητα αερίου δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους αλλά συσχετίζονται. Οι σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη αυτά προσδιορίστηκαν πειραματικά και αποτελούν τους νόμους των αερίων.

#### Νόμος του Boyle (1627-1691)

Η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου του οποίου η θερμοκρασία παραμένει σταθερή είναι αντίστροφα ανάλογη με τον όγκο του.

Δηλαδή  $pV=C$  για  $T=\text{σταθ.}$

Όπου  $p$  η πίεση,  $V$  ο όγκος,  $T$  η θερμοκρασία και  $C$  μια σταθερά.

#### Νόμος του Charles(1746-1823)

Η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου του οποίου ο όγκος διατηρείται σταθερός είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου. Δηλαδή

$$\frac{p}{T} = \text{σταθ. για } V = \text{σταθ.}$$

#### Νόμος του Gay-lussac (1778-1850)

Ο όγκος ορισμένης ποσότητας αερίου, όταν η πίεση του διατηρείται σταθερή, είναι ανάλογος με την απόλυτη θερμοκρασία του. Δηλαδή

$$\frac{V}{T} = \text{σταθ. για } p = \text{σταθ.}$$

Από τα παραπάνω βρίσκεται η βασική εξίσωση των αερίων :

$$P=NkT \quad (2.20)$$

Όπου  $N$  είναι ο αριθμός των μορίων του αερίου ανά μονάδα όγκου και  $k=1,3804 \cdot 10^{-23}$  Joules/°K η παγκόσμια σταθερά του Boltzmann.

Από αυτές τις εξισώσεις αποδεικνύεται ότι αν δεν είναι ένα αλλά « $n$ » τα αέρια με όγκους  $V_1, V_2, \dots, V_n$  και μερικές πιέσεις  $p_1, p_2, \dots, p_n$  το κάθε ένα τότε  $V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$

και

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

όπου  $V$  και  $p$  ο συνολικός όγκος και η συνολική πίεση αντιστοίχως.

Για να ισχύουν όμως αυτές οι εξισώσεις, κάνουμε κάποιες παραδοχές, δηλαδή :

- Τα μόρια του αερίου βρίσκονται σε τυχαία συνεχή κίνηση.
- Το αέριο αποτελείται από μόρια της ίδιας μάζας τα οποία θεωρούνται σφαιρικά.
- Η μέση απόσταση μεταξύ των μορίων είναι πολύ μεγαλύτερη από την διάμετρο τους.
- Οι δυνάμεις μεταξύ των μορίων και των τοιχωμάτων του δοχείου που περιέχει το αέριο είναι αμελητέες.

Τέλος αποδεικνύεται, για αέριο που βρίσκεται σε ένα κυβικό δοχείο, ότι η μέση ενέργεια ανά μόριο αερίου είναι :

$$W_m = \frac{3}{2} kT \quad (2.21)$$

Ενώ αν εμπεριέχονται περισσότερα του ενός είδη σωματιδίων, δηλαδή μίγμα αερίων, τότε η μέση ενέργεια των σωματιδίων του μίγματος είναι:

$$\frac{1}{2} m_i V_{rms}^2 = \frac{3}{2} kT \quad (2.22)$$

Όπου  $m_i$  η μάζα και  $V_{rms}$  η ενεργός τιμή της ταχύτητας των σωματιδίων «i» άσχετα αν αυτά είναι ηλεκτρόνια, μόρια, ή ηλεκτρόνια οποιασδήποτε πολικότητας.

### 2.3.4 ΚΡΟΥΣΕΙΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Οι κρούσεις των σωματιδίων μεταξύ τους είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα αφού από αυτές εξαρτώνται μηχανισμοί που είναι θεμελιώδεις για τις διαδικασίες ιονισμού. Αυτές χωρίζονται σε δύο είδη :

1. Σε ελαστικές όπου η μεταβολή ενέργειας είναι μόνο κινητική
2. Σε ανελαστικές όπου μέρος της κινητικής ενέργειας του ενός σωματιδίου μετασχηματίζεται σε δυναμική ενέργεια του άλλου σωματιδίου.

Από τις ανελαστικές κρούσεις προκύπτουν όλα τα φαινόμενα που προκαλούν άμεσα ή έμμεσα ιονισμό, αντίθετα οι ελαστικές δεν ενδιαφέρουν γιατί το μόνο που προκαλούν είναι μεταβολή της ταχύτητας μέσω διαφορετικής κατανομής της κινητικής ενέργειας και της ορμής των δύο σωματιδίων που αφορά η κρούση.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αναφορά σε δύο όρους. **Ελεύθερη διαδρομή  $\lambda$**  σωματιδίου, που είναι το διάστημα που αυτό διατρέχει χωρίς να

προσक्रούει πουθενά. Και **μέση ελεύθερη διαδρομή**  $\lambda_m$ , που είναι η μέση τιμή της κατανομής των τιμών της ελεύθερης διαδρομής.

Για να υπολογιστεί η  $\lambda_m$  θεωρείται ένας αριθμός σωματιδίων με ακτίνα  $r_1$  και μάζα  $m_1$ , τα οποία θεωρούνται ακίνητα, καθώς και ένα άλλος αριθμός σωματιδίων με  $r_2$  και  $m_2$  αντίστοιχα που κινούνται προς τα πρώτα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς τα δεύτερα κινούνται προς τα πρώτα η πυκνότητα τους μειώνεται επειδή διασκορπίζονται λόγω των κρούσεων τους με τα πρώτα. Αν θεωρηθεί ότι συμπεριφέρονται ως στερεές σφαίρες τότε η επιφάνεια προσκρούσεως, λέγεται και **διατομή κρούσεως**, σε κάθε άτομο θα είναι :

$$\sigma = \pi (r_1 + r_2)^2 \quad (2.23)$$

Έτσι αν θεωρηθεί ότι υπάρχουν  $N$  σωματίδια ανά μονάδα όγκου του αερίου τότε αποδεικνύεται ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή δίνεται από την σχέση

$$\lambda_m = \frac{1}{N\sigma} \quad (2.24)$$

Ενώ το γινόμενο της διατομής κρούσεως  $\sigma$  επί την πυκνότητα των μορίων  $N$  ανά μονάδα όγκου δίνει την **ενεργό διατομή κρούσεως**  $Q$

$$Q = \frac{1}{\lambda_m} \quad (2.25)$$

Αποδεικνύεται ότι για ένα άτομο στο αέριο του η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι :

$$\lambda_{ma} = 4\sqrt{2}\pi N r_1^2 \quad (2.26)$$

Ομοίως και για ένα ηλεκτρόνιο :

$$\lambda_{me} = 4\sqrt{2}\lambda_{ma} \quad (2.27)$$

Ενώ από την εξίσωση 3.2 προκύπτει ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι ανάλογη της θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογη της πίεσης :

$$\lambda_{m(p,t)} = \lambda_{m0} \frac{p_0 T}{p T_0} \quad (2.28)$$

Όπου ο δείκτης 0 υποδηλώνει την αρχική πίεση και θερμοκρασία του αερίου.

Τέλος σε ένα σύστημα σωματιδίων και πιο συγκεκριμένα για περίπτωση ηλεκτρονίου-μορίου όπου η μάζα του ηλεκτρονίου είναι πολύ μικρότερη από τη μάζα του μορίου, δηλαδή  $m_2 \ll m_1$  η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ενέργειας, η  $W_{p \max}$  δίνεται από την εξίσωση :

$$W_{p\max} \approx \frac{mV_{20}^2}{2} \quad (2.29)$$

Όπου  $V_{20}$  η αρχική ταχύτητα του σωματιδίου. Βλέπουμε δηλαδή ότι όλη η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε δυναμική ενώ στην περίπτωση ζεύγους μορίου-ιόντος όπου  $m_2=m_1$  η  $W_{p\max}$  γίνεται :

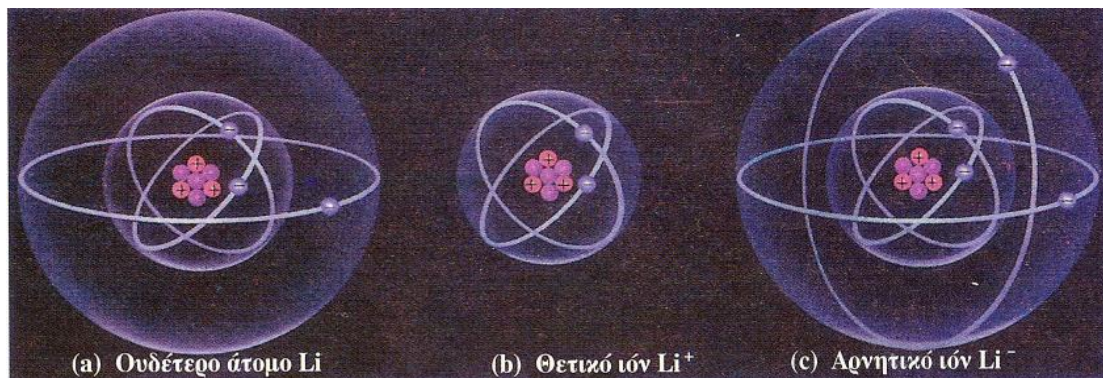
$$W_{p\max} \approx \frac{mV_{20}^2}{4} \quad (2.30)$$

Από αυτές τις δύο εξισώσεις, και δεδομένου ότι για να προκαλέσει ιονισμό κάποιο σωματίδιο πρέπει να έχει κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από κάποια δεδομένη ποσότητα, φαίνεται ότι τα ηλεκτρόνια μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό πολύ ευκολότερα από τα ιόντα.

### 2.3.5 ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΚΡΟΥΣΕΩΣ

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ο ορισμός του ιονισμού και στην συνέχεια τους τρόπους με τους οποίους αυτός επιτυγχάνεται.

Όταν από ένα άτομο απομακρυνθούν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια τότε αυτό απομένει θετικά φορτισμένο και ονομάζεται **θετικό ιόν**. Το **αρνητικό ιόν** είναι άτομο που έχει κερδίσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Αυτή η πρόσληψη ή η απώλεια ηλεκτρονίων ονομάζεται **ιονισμός**. Όπως στην εικόνα 2.1 παρακάτω.



**Εικόνα 2.1** a. Το ουδέτερο άτομο Li έχει πρωτόνια στον πυρήνα του και τρία ηλεκτρόνια. b. Αν απομακρυνθεί ηλεκτρόνιο από ουδέτερο άτομο έχουμε θετικό ιόν. c. Αν προστεθεί ηλεκτρόνιο σε ουδέτερο άτομο έχουμε αρνητικό ιόν. (Πηγή: Ηλεκτρομαγνητισμός Οπτική Σύγχρονη Φυσική-HUGH D. YOUNG)

Επίσης η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να αποσπασθεί ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερική στοιβάδας από την ελκτική επίδραση του πυρήνα ισούται με το γινόμενο του φορτίου του ηλεκτρονίου  $e$  επί το πρώτο δυναμικό ιονισμού  $V_i$ , και δίνεται από την εξίσωση :

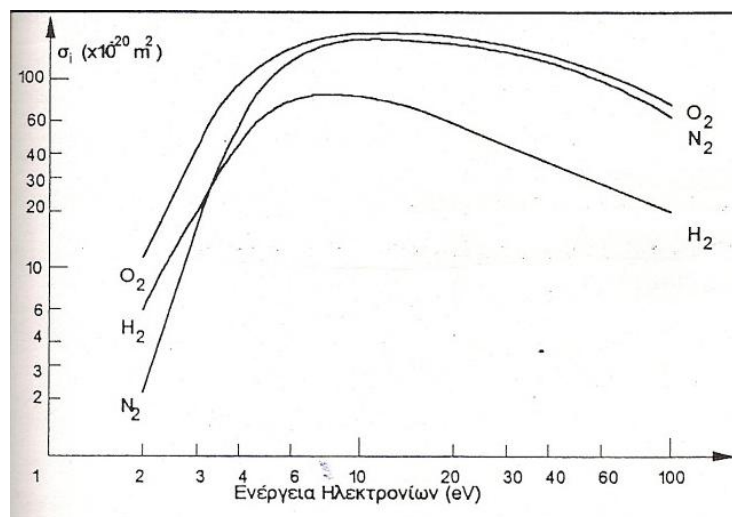
$$W_i = eV_i \text{ σε eV} \quad (2.31)$$

Όταν η κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου που επιταχυνόμενο από κάποιο ηλεκτρικό πεδίο συγκρούεται με ένα ουδέτερο μόριο ή άτομο αερίου υπερβεί τη τιμή της ελάχιστης ενέργειας ιονισμού  $W_i$  του αερίου, τότε είναι δυνατό να προκαλέσει ιονισμό οπότε από ένα ουδέτερο άτομο προκύπτει ένα θετικό ιόν και ένα ηλεκτρόνιο. Δηλαδή  $A + e_1 \rightarrow A^+ + e + e_2$  όπου  $A$  το ουδέτερο άτομο,  $e_1$  ηλεκτρόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια ιονισμού του  $A$ ,  $A^+$  και  $e$  το προκύπτουν ζεύγος θετικού ιόντος-ηλεκτρονίου και  $e_2$  το αρχικό ηλεκτρόνιο  $e_1$  χωρίς την επιπλέον ενέργεια. Αυτός ο τρόπος ιονισμού λέγεται **ιονισμός κρούσεως**.

Παρά ταύτα, ακόμη και αν η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια  $W_i$  που αντιστοιχεί στο πρώτο δυναμικό ιονισμού, δεν είναι απαραίτητο αυτό το ηλεκτρόνιο προσκρούοντας με ένα μόριο να προκαλέσει ιονισμό κρούσεως και αυτό επειδή κάθε τρόπος ιονισμού είναι στοχαστικό φαινόμενο και εκφράζεται με μια διατομή ιονισμού  $\sigma_i$  όπου :

$$\sigma_i = P_i \sigma \quad (2.32)$$

με  $P_i$  την πιθανότητα ιονισμού κρούσεως και  $\sigma$  τη μοριακή ή ατομική διατομή κρούσεως.



**Σχήμα 2.7** Διατομή ιονισμού συναρτήσει της  $W_e$  (Πηγή: Τεχνολογία Των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου )

Στο σχήμα 2.7 φαίνεται ότι η διατομή ιονισμού κρούσεως  $\sigma_i$  είναι μηδέν όταν η  $W_e$  (η ενέργεια που προσλαμβάνει το ηλεκτρόνιο, όταν βρίσκεται σε ένα πεδίο, από αυτό) είναι ίση με την ελάχιστη ενέργεια ιονισμού  $W_i$ , αυξάνει καθώς η  $W_e$  παίρνει τιμές μεγαλύτερες από την  $W_i$ , φθάνει ένα μέγιστο και

ακολουθώς μικραίνει καθώς οι ενέργειες των ηλεκτρονίων γίνονται ακόμα μεγαλύτερες.

Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι για κάθε αέριο υπάρχει μια βέλτιστη για ιονισμό δέσμη ενέργειας των ηλεκτρονίων. Έξω από αυτή τη δέσμη, αφενός μεν τα ηλεκτρόνια με ενέργειες μικρότερες από το πρώτο δυναμικό ιονισμού δεν μπορούν να ιονίσουν, αφετέρου δε πολύ ταχέα ηλεκτρόνια έχουν την τάση να περνούν από ένα άτομο χωρίς να το ιονίζουν.

### 2.3.6 ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΣ

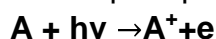
Υπάρχει και ένας έμμεσος τρόπος ιονισμού, ο **ιονισμός μέσω διεγέρσεως**. Ηλεκτρόνια μικρότερης ενέργειας από την ενέργεια ιονισμού  $W_i$  όταν συγκρούονται με άτομα του αερίου μπορούν να αυξήσουν την ενεργειακή στάθμη των τελευταίων δηλαδή να τα διεγείρουν. Τα διεγερμένα άτομα μπορούν συγκρουόμενα με κάποιο βραδύ ηλεκτρόνιο να ιονιστούν. Η αντίδραση αυτή είναι δυνατόν να παρασθεί συμβολικά :



Όπου  $A$  το άτομο στην κανονική του κατάσταση, και  $A^*$  στην εν διεγέρση,  $e_1$  το ηλεκτρόνιο που διεγείρει  $e_2$  το  $e_1$  χωρίς την επιπλέον ενέργεια διεγέρσεως,  $e_3$  το ηλεκτρόνιο που ιονίζει,  $A^+$  και  $e$  το ζεύγος θετικού ιόντος ηλεκτρονίων που προκύπτουν,  $e_4$  το  $e_3$  χωρίς την επιπλέον ενέργεια. Εννοείται ότι η συνολική ενέργεια των  $e_1$  και  $e_3$  πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το πρώτο δυναμικό ιονισμού του  $A$ . Άρα λοιπόν αυτός ο τρόπος έχει αποδειχτεί ότι αποτελεί σημαντικό μηχανισμό μόνο στην περίπτωση που η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι μεγάλη.

### 2.3.7 ΦΩΤΟΪΟΝΙΣΜΟΣ

Υπάρχει μια διαδικασία ιονισμού που συμβαίνει όταν ένα φωτόνιο με ενέργεια  $h\nu$  προσκρούοντας σε ένα άλλο άτομο μπορεί να το ιονίσει, δηλαδή :



Η διαδικασία αυτή λέγεται **φωτοϊονισμός**. Το δυναμικό ιονισμού του  $A$  πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο από την ενέργεια του φωτονίου, δηλαδή:

$$h\nu \geq eV_i \quad \text{ή} \quad \lambda \leq \frac{ch}{eV_i} \quad (2.33)$$

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος του φωτονίου,  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $\nu$  η συχνότητα και  $h$  η σταθερά του Planck. Φαίνεται λοιπόν ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτονίου τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να μπορέσει αυτό να προκαλέσει φωτοϊονισμό. Τα φωτόνια που προκαλούν φωτοϊονισμό μπορούν να προέλθουν είτε από διεγερμένα άτομα που αποδιεγειρόμενα επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, συνήθως μετά από  $10^{-7} \div 10^{-10}$  sec, είτε από απευθείας ακτινοβολήση. Πειραματικά έχει βρεθεί



ότι η πιθανότητα να προκληθεί φωτοϊονισμός είναι μέγιστη όταν η διαφορά  $h\nu - eV_i$  είναι μικρή δηλαδή περίπου  $0.1 \div 1eV$ .

### 2.3.8 ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΕΚ ΜΕΤΑΣΤΑΘΩΝ

Σε ορισμένα στοιχεία όπως τα αδρανή αέρια και τα στοιχεία της ομάδας II του περιοδικού πίνακα<sup>5</sup> των στοιχείων, τα διεγερμένα άτομα παραμένουν στην κατάσταση αυτή για χρόνους πολύ μεγαλύτερους από τους συνήθεις (έως και sec). Αυτές οι ατομικές καταστάσεις ονομάζονται **μετασταθείς** και συμβολίζονται  $A^m$ . Αν  $V_A^m$  η ενέργεια του μετασταθούς ατόμου  $A^m$  και  $V_B^i$  το πρώτο δυναμικό ιονισμού του ατόμου B, τότε εφόσον  $V_A^m > V_B^i$  το μετασταθές  $A^m$  συγκρουόμενο με το άτομο B μπορεί να το ιονίσει. Αυτός ο τρόπος ιονισμού λέγεται **ιονισμός εκ μετασταθών**. Αν όμως  $V_A^m < V_B^i$  τότε απλώς μπορεί να διεγείρει το B. Άλλος τρόπος ιονισμού από μετασταθή είναι όταν  $2V_A^m > V_B^i$  όπου το  $V_B^i$  είναι το πρώτο δυναμικό ιονισμού του  $A^m$ .

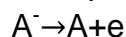
### 2.3.9 ΘΕΡΜΟΪΟΝΙΣΜΟΣ

Ο όρος θερμοϊονισμός περιλαμβάνει τις ιονίζουσες δράσεις που προκαλούνται από υψηλή θερμοκρασία. Ειδικότερα τα άτομα και τα μόρια ενός αερίου όταν θερμαίνονται πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία, αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να μπορούν να ιονίσουν άλλα άτομα. Ο θερμοϊονισμός είναι η κύρια αιτία ιονισμού στις στήλες των ηλεκτρικών τόξων.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι σε θερμοκρασίες δωματίου ο θερμοϊονισμός είναι ασήμαντος, χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι, αν το έργο ιονισμού είναι της τάξης των 10 eV, απαιτείται θερμοκρασία της τάξης των  $10^5$  °K. Έτσι το φαινόμενο αυτό συμβαίνει μόνο σε περιοχές με πολύ υψηλή θερμοκρασία (Κορόνα Ήλιου).

### 2.3.10 ΑΠΟΣΠΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

Όταν υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση αρνητικών ιόντων και σε συνδυασμό με την ύπαρξη πολύ ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων τότε μπορεί να έχουμε απόσπαση ηλεκτρονίων από αυτά, δηλαδή :



Ο Loeb βρήκε ότι απόσπαση ηλεκτρονίων από  $O_2$  υπάρχει μόνο όταν ο λόγος  $E/\rho$  υπερβαίνει τα 90V/cm/mmHg. Έτσι απόσπαση ηλεκτρονίων

<sup>5</sup> Οι αλκαλικές γαίες σχηματίζουν την «Ομάδα II» ή «2η Ομάδα» (δεύτερη από αριστερά) χημικών στοιχείων στον Περιοδικό πίνακα. Τα στοιχεία αυτής της καθίστανται ομάδας διατηρούν στην εξωτερική στοιβάδα (ή εξωτερικό φλοιό) από δύο ηλεκτρόνια με συνέπεια να λιγότερο δραστικά από τα αλκάλια. Όπως και τα αλκάλια όμως, αντιδρούν με το νερό και σχηματίζουν υδροξείδια. Το πιο γνωστό από αυτά είναι το υδροξείδιο του ασβεστίου, γνωστό στην οικοδομή ως «ασβέστης». Τα στοιχεία της ομάδας αυτής είναι: βηρύλλιο (Be), μαγνήσιο (Mg), ασβέστιο (Ca), στρόντιο (Sr), βάριο (Ba) και ράδιο (Ra).

παρατηρείται μόνο σε περιοχές υψηλού αρνητικού πεδίου δηλαδή στην αρνητική κορόνα.

### 2.3.11 ΑΠΙΟΝΙΣΜΟΣ

Ο **απιονισμός** είναι το αντίθετο του ιονισμού, δηλαδή είναι το φαινόμενο της απώλειας ηλεκτρικών φορτίων. Παρακάτω παρουσιάζονται εν τάχη οι κυριότεροι από τους τρόπους που συντελείτε ο απιονισμός.

- **Απιονισμός λόγω επανασύνδεσης**

Είναι φαινόμενο το οποίο παρουσιάζεται όπου υπάρχουν σωματίδια θετικά μαζί με αρνητικά και είναι αντίθετο του φωτοϊονισμού, επειδή η δυναμική ενέργεια και η σχετική κινητική ενέργεια του επανασυνδεόμενου ηλεκτρονίου-θετικού ιόντος εκλύεται ως κβάντο ακτινοβολίας.

- **Απιονισμός λόγω προσαρτήσεως**

Σε κάποια αέρια, ηλεκτρόνια που βρίσκονται ελεύθερα μπορούν να προσαρτηθούν από ουδέτερα άτομα ή μόρια του αερίου σχηματίζοντας έτσι αρνητικά ιόντα. Αυτό λέγεται απιονισμός λόγω προσαρτήσεως, τα αέρια αυτά λέγονται ηλεκτραρνητικά. Τα σημαντικότερα ηλεκτραρνητικά αέρια είναι τα:  $O_2$ ,  $SF_6$ ,  $CCl_2F_2$ , κ.α. Λόγο της ιδιότητας να προκαλούν την απώλεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων παρουσιάζουν μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή.

- **Απιονισμός λόγω διάχυσης**

Το φαινόμενο αυτό συναντάται στις εκκενώσεις σε ανομοιογενή πεδία. Ο λόγος είναι ότι σε ιονισμένο αέριο με ανομοιογενή συγκέντρωση ιόντων παρατηρείται ότι υπάρχει η τάση των ιόντων να πάνε από περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση ιόντων σε περιοχές με χαμηλότερη. Η διαδικασία αυτή προκαλεί μείωση του ιονισμού στις περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση ιόντων.

### 2.3.12 ΚΑΘΟΔΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Η κάθοδος παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στις εκκενώσεις μέσα στα αέρια παρέχοντας ηλεκτρόνια απαραίτητα για την έναρξη και για τη συντήρηση των εκκενώσεων. Η απόσπαση των ηλεκτρονίων από την κάθοδο μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους που όλοι μαζί λέγονται **καθοδικά φαινόμενα**.

Όταν προσδίδεται ενέργεια σε στερεό υλικό, τα ηλεκτρόνια του διεγείρονται σε υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα. Αν η ενέργεια που αποκτούν τα διεγερμένα ηλεκτρόνια είναι τόσο μεγάλη ώστε να υπερβούν το ενεργειακό φράγμα της επιφάνειας, τότε αποχωρίζονται από το υλικό.

Σύμφωνα με την ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων στα υλικά είναι φανερό ότι για να αποσπαστεί ένα ηλεκτρόνιο από ένα μονωτή απαιτείται μεγάλη ενέργεια γιατί πρέπει καταρχήν να υπερπηδήσει το μεγάλο ενεργειακό

χάσμα και να μεταπέσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και στη συνέχεια να υπερβεί το ενεργειακό χάσμα της επιφάνειας.

Αντίθετα η εκπομπή ηλεκτρονίων από τα μέταλλα απαιτεί πολύ μικρότερη ενέργεια. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων διεγείρονται εύκολα στα υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα της ενιαίας ζώνης αγωγιμότητας και στη συνέχεια ξεπερνούν το ενεργειακό φράγμα της επιφάνειας και εκπέμπονται. Η κρίσιμη ενέργεια που πρέπει να αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια για να αποσπαστούν από τα μέταλλα ονομάζεται **έργο εξόδου**. Το έργο εξόδου ορίζεται ως **η ενέργεια πάνω από το ενεργειακό επίπεδο Fermi που πρέπει να αποκτήσουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια για να αποχωριστούν από το μέταλλο.**

$$\Phi = W - E_f \quad (2.34)$$

Όπου  $\Phi$ : το έργο εξόδου,  $W$  η ενέργεια του ηλεκτρονίου κατά την εκπομπή του και  $E_f$  το επίπεδο Fermi. Η εκπομπή των ηλεκτρονίων από τα μέταλλα μπορεί να προκληθεί από διάφορα αίτια όπως, εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου μεγάλης έντασης, θέρμανση του υλικού (θερμιονική εκπομπή), επίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατάλληλου μήκους κύματος (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) κ.α.

Το έργο εξόδου διαφέρει από υλικό σε υλικό όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1** Έργο εξόδου μερικών μετάλλων (Πηγή: Τεχνολογία υλικών-Σαββάκης)

Μέταλλο	Έργο εξόδου (eV)	Μέταλλο	Έργο εξόδου (eV)
Ag	4.73	K	2.24
Al	4.08	Li	2.49
Au	4.82	Mg	3.68
Ba	2.48	Mo	4.20
Cd	4.07	Na	2.28
Co	4.40	Ni	5.01
Gr	4.60	Pd	4.97
Cs	1.81	Pt	5.32
Cu	4.46	Ta	4.19
W	4.50	Th	3.35

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του κάθε αίτιου:

1. **Θερμιονική εκπομπή.** Είναι το φαινόμενο εκπομπής ηλεκτρονίων από τα μέταλλα όταν θερμαίνονται. Με την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού τα ηλεκτρόνια διεγείρονται πάνω από το επίπεδο Fermi και ένα μικρό κλάσμα από αυτά αποκτά την απαιτούμενη κινητική ενέργεια και αποσπάται από την επιφάνεια του υλικού. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εγκαταλείπουν την επιφάνεια. Η πυκνότητα του θερμιονικού ρεύματος υπολογίζεται από την εξίσωση Richardson-Dushman που εξάγεται με βάση την κβαντομηχανική θεωρία των ελεύθερων ηλεκτρονίων των μετάλλων,

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{-\Phi}{kT}\right) \quad (2.35)$$

Όπου : J η πυκνότητα θερμιονικού ρεύματος σε A/cm<sup>2</sup>, A σταθερά που περιλαμβάνει φυσικές σταθερές και έχει τιμή 120 A/cm<sup>2</sup> \*K<sup>-2</sup>, K σταθερά Boltzmann, T απόλυτη θερμοκρασία (K), Φ έργο εξόδου .

2. Εκπομπή από την κάθοδο μπορεί να γίνει όταν προσκρούουν σε αυτήν φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το έργο εξόδου ( $h\nu \geq \Phi$ ). Αυτό λέγεται **φωτοηλεκτρική εκπομπή** αν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από το Φ τότε η επιπλέον ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου.
3. Εκπομπή ηλεκτρονίων λόγω **βομβαρδισμού της καθόδου από θετικά ιόντα ή μετασταθή άτομα**. Για να έχουμε εκπομπή λόγω βομβαρδισμού της καθόδου από θετικά ιόντα πρέπει τα τελευταία να έχουν ελάχιστη συνολική ενέργεια, η κινητική και δυναμική τους ενέργεια, μεγαλύτερη από το διπλάσιο του έργου εξόδου ώστε να πετύχουν την έκλυση δύο ηλεκτρονίων έτσι το ένα θα αποδοθεί στο διάκενο ενώ το άλλο θα εξουδετερώσει το θετικό ιόν. Ουδέτερα μετασταθή άτομα που πέφτουν στην κάθοδο μπορούν να προκαλέσουν την εκπομπή ηλεκτρονίων αρκεί η συνολική τους ενέργεια να είναι μεγαλύτερη από το έργο εξόδου.
4. Ο Schottky βρήκε ότι κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου το εκπεμπόμενο ρεύμα από την κάθοδο είναι μεγαλύτερο από το θερμιονικό ρεύμα και αυτό γιατί ενισχύεται η ηλεκτρονική εκπομπή από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, κοντά στο επίπεδο Fermi, τα οποία έχουν σίγουρες πιθανότητες να υπερβούν το ενεργειακό φράγμα. Αυτό λέγεται φαινόμενο σήραγγας και εκφράζεται αναλυτικά ως μείωση του έργου εξόδου το οποίο τώρα παίρνει τιμή :

$$\Phi_{eff} = \Phi - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (2.36)$$

Όπου  $e$  το ηλεκτρονικό φορτίο και  $E$  η πεδιακή ένταση. Έτσι, αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.35 το έργο εξόδου  $\Phi_{\text{eff}}$ , η πυκνότητα του εκπεμπόμενου ρεύματος συναρτήσει της πυκνότητας θερμοϊονικού ρεύματος θα είναι :

$$J_s = J \exp\left[\frac{K_1 \sqrt{E}}{T}\right] \quad (2.37)$$

Αυτό το φαινόμενο λέγεται **εκπομπή Schottky**.

5. Στην πράξη η εκπομπή Schottky γίνεται σημαντική μόνο για πολύ ισχυρά πεδία,  $\sim 10\text{MV/cm}$  και πάνω, επομένως δεν μπορεί να εξηγήσει ρεύματα ισχυρότερα από αυτά της θερμοϊονικής εκπομπής που όμως παρατηρούνται και για πολύ χαμηλότερα πεδία. Το φαινόμενο αυτό που εξηγήθηκε με τη βοήθεια της κβαντομηχανικής από τους Fowler και Nordheim βασίζεται στην ύπαρξη στην κάθοδο ηλεκτρονίων με ενέργεια λίγο πάνω από το επίπεδο Fermi, έγινε γνωστό ως **εκπομπή πεδίου** και δίνεται από την έκφραση :

$$J_F = K_2 E^2 \exp\left[-\frac{K_3}{E}\right] \quad (2.38)$$

Όπου  $K_2$  και  $K_3$  είναι σταθερές. Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η  $J_F$  δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία, όμως ισχύει μόνο για χαμηλές θερμοκρασίες. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η εκπομπή Fowler – Nordheim καλύπτεται από την θερμοϊονική εκπομπή .

## Βιβλιογραφία

**Κ.Α.ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ** ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, πρώτη έκδοση

**Ι.Ε.ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ** ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Εκδόσεις Ζήτη

**Κ.Ε.ΣΑΒΒΑΚΗΣ** ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ Εκδόσεις ΙΩΝ, Τρίτη έκδοση

**Κ.ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ-Δ.ΜΑΡΙΝΟΥ** ΓΕΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ-ΚΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ Εκδόσεις  
ΠΑΠΑΖΗΣΗ 1993

**HUGH D. YOUNG** ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ  
Εκδόσεις ΠΑΠΑΖΗΣΗ

ΦΥΣΙΚΗ ΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ Εκδόσεις ΟΕΔΒ

**ΠΑΝΟΥ ΣΤ. ΜΑΝΙΑΤΗ** ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ –ΦΥΣΙΚΗ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ  
Εκδόσεις ΟΕΔΒ 1981

**SIEMENS** Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ Εκδόσεις ΠΑΠΑΖΗΣΗ

**RAYMOND SERWAY** PHYSICS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS ΤΟΜΟΣ  
II ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ THIRD EDITION

**ΜΙΧΑΗΛ ΔΑΝΙΚΑΣ** ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις ΣΜΠΙΛΙΑΣ  
Α.Ε.Β.Ε. Β' Έκδοση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΣΤΑ ΑΕΡΙΑ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ –ΟΜΟΙΟΓΕΝΗ ΔΙΑΚΕΝΑ

Από τα χιλιάδες χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών μεταφοράς γίνεται φανερό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελεί το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μονωτικό, από την κατηγορία των αέριων μονωτικών υλικών. Αποτελεί επίσης την μόνωση πολλών ηλεκτροτεχνικών διατάξεων όπως είναι οι αποζεύκτες, διακόπτες φορτίου, πίνακες μέσης τάσης κλπ. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm, ενώ η διηλεκτρική σταθερά είναι περίπου ίση με τη μονάδα και πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με εκείνη του κενού.

Βασικό χαρακτηριστικό των περισσότερων αέριων μονωτικών είναι το γεγονός ότι η διηλεκτρική τους συμπεριφορά επανέρχεται, μετά την εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου, οφειλόμενο σε διάσπαση ή σε χειρισμούς υπό τάση, σε υψηλά επίπεδα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (από 1 – 5 μs). Αντίθετα στα στερεά μονωτικά υλικά η διάσπαση δημιουργεί τις περισσότερες φορές μόνιμες βλάβες, οι οποίες με τη σειρά τους επιταχύνουν τη διαδικασία γήρανσης της μόνωσης.

Οι μονωτικές ιδιότητες των αέριων μονωτικών υλικών επηρεάζονται από την πίεση, στην οποία βρίσκονται, και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Σημαντική μείωση στην διηλεκτρική αντοχή των αέριων μονωτικών προκαλούν τα μικροσωματίδια, η υγρασία και οι διάφορες αστοχίες στα στερεά μονωτικά με τα οποία συνεργάζονται, σε μία ηλεκτρολογική εφαρμογή.

Ο αέρας έχει συγκριτικά με άλλα μονωτικά υλικά, χαμηλή διηλεκτρική αντοχή και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλα διάκενα αέρος για να αποφευχθούν οι διασπάσεις, πράγμα που γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτό στις εφαρμογές υψηλής τάσης. Ωστόσο τα τελευταία 30 χρόνια έχουν γίνει αρκετές έρευνες με σκοπό την ανάπτυξη αέριων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο από αυτά είναι το ξηρό εξαφθοριούχο θείο SF<sub>6</sub>, του οποίου η διηλεκτρική αντοχή σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι δύο φορές καλύτερη από αυτή του αέρα ενώ παράλληλα διαθέτει άριστη χαρακτηριστική θερμικής καταπόνησης και δυνατότητα σβέσης των ηλεκτρικών τόξων. Δυαδικά μίγματα του SF<sub>6</sub> με φθηνά αέρια συστατικά όπως N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>O βρίσκονται κάτω από συνεχή έρευνα προκειμένου να κατασκευασθούν αποτελεσματικά και οικονομικά μονωτικά, αλλά και να κατανοηθούν καλύτερα οι διαδικασίες που αφορούν τη λειτουργία των αέριων

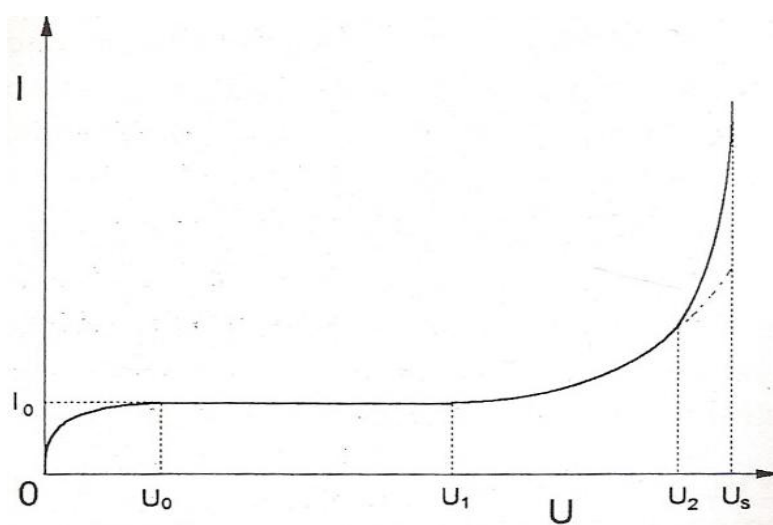
διηλεκτρικών. Το μοναδικό μίγμα που βρίσκει εμπορική εφαρμογή σε συστήματα διακοπών ισχύος είναι το μίγμα  $SF_6$  και  $N_2$ .

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις στα αέρια μονωτικά μπορούν χωριστούν σε δύο τύπους, στις **αυτοσυντηρούμενες**, δηλαδή αυτές που παράγουν τους αναγκαίους για την συντήρησή τους φορείς χωρίς εξωτερική επίδραση, και στις **μη αυτοσυντηρούμενες**.

Στην μελέτη που θα ακολουθήσει για λόγους ευκολίας θα θεωρήσουμε τα διάκενα με ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό θεωρητικά είναι αδύνατο, όμως στην πράξη ορισμένα διάκενα παρουσιάζουν σχετικά μικρή διαφορά στις ακραίες τιμές της πεδιακής έντασης, έχοντας έτσι συμπεριφορά που πλησιάζει τα ομοιογενή διάκενα. Άρα λοιπόν μπορεί αυτά να θεωρηθούν ομοιογενή με αμελητέο σφάλμα στους υπολογισμούς.

### 3.2 ΣΤΟΙΒΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ-ΑΛΦΑ ΤΟΥ TOWNSEND

Σε κάθε ομοιογενές διάκενο υπάρχει ένας μικρός αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων που η ύπαρξη τους οφείλετε σε φυσικούς τρόπους. Όταν σε αυτό το διάκενο εφαρμοστεί και κάποια τάση, άρα και πεδίο, τότε λαμβάνουν χώρα διάφορα φαινόμενα που πρώτα περιγράφηκαν από τον Townsend και που θα δούμε παρακάτω.



**Σχήμα 3.1** Χαρακτηριστική τάσεως-εντάσεως ομοιογενούς διακένου (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου )

Ο Townsend βρήκε ότι όταν αυξάνεται η τάση το ρεύμα στην αρχή αυξάνεται μέχρι μια τιμή  $I_0$  (σχήμα 3.1) που αντιστοιχεί σε μια τάση  $U_0$ . Αυτό γίνεται επειδή, κάτω από την επίδραση του πεδίου, όλο και περισσότερα από τα αρχικά ηλεκτρόνια διασχίζουν το διάκενο φθάνοντας στην άνοδο. Το ρεύμα



$I_0$  που διαρρέει το διάκενο όταν όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φθάνουν στην άνοδο είναι πολύ μικρό. Ακολούθως και για αρκετή ακόμα ανύψωση της τάσης, μέχρι μια τιμή  $U_1$ , το ρεύμα παραμένει σταθερό. Όταν όμως η τάση υπερβεί την  $U_1$  τότε το ρεύμα ξαναρχίζει να αυξάνεται με συνεχώς μεγαλύτερη κλίση. Αυτή την αύξηση ο Townsend την απέδιδε σε ιονισμό κρούσεως και τη δημιουργία **ηλεκτρονικών στοιβάδων**.

Η διαδικασία σχηματισμού μιας ηλεκτρονικής στοιβάδας είναι η εξής: τα αρχικώς ελεύθερα ηλεκτρόνια, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, επιταχύνονται προς την άνοδο μέχρις ότου αποκτήσουν κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από το πρώτο δυναμικό ιονισμού, τότε στην περίπτωση σύγκρουσης τους με άτομα του αερίου μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό κρούσεως δημιουργώντας νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα νέα αυτά ηλεκτρόνια, με την σειρά τους, επιταχύνονται προς την άνοδο προκαλώντας νέους ιονισμούς. Στο σχήμα 3.2 βλέπουμε το σχήμα της στοιβάδας και την κατανομή των φορτίων μέσα σ' αυτήν. Όπως παρατηρούμε έχει μια ημισφαιρική κεφαλή που αποτελείται από ηλεκτρόνια και μια κωνική ουρά από θετικά ιόντα. Τα ηλεκτρόνια είναι στην κεφαλή και τα θετικά ιόντα στην ουρά επειδή τα πρώτα είναι πολύ ταχύτερα των δευτέρων. Το σφαιρικό σχήμα της κεφαλής οφείλεται στην αλληλοάπωση και διάχυση των ηλεκτρονίων. Το κωνικό σχήμα της ουράς οφείλεται στο ότι καθώς η στοιβάδα προχωρεί προς την άνοδο αυξάνει εκθετικά ο αριθμός των φορέων της άρα και η διάμετρος της, επιπλέον κατά την διάρκεια δημιουργίας της στοιβάδας τα ηλεκτρόνια διασκορπίζονται και προς πλευρικές κατευθύνσεις με αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους της στοιβάδας.



Σχήμα 3.2 (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου )

Επανερχόμενοι στις περιγραφές του Townsend, εισάγεται μια καινούργια έννοια, ο **συντελεστής ιονισμού α**. Ο συντελεστής ιονισμού α αντιπροσωπεύει τον μέσο αριθμό των κρούσεων λόγω ιονισμού, οι οποίες προέρχονται από ένα ηλεκτρόνιο που διανύει μοναδιαία απόσταση κατά την διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Ο συντελεστής ιονισμού α είναι ανάλογος του αριθμού των κρούσεων οι οποίες γίνονται ανά εκατοστό καθώς και της πίεσεως  $p$  του μονωτικού αερίου. Έτσι έχουμε ότι:

$$\alpha \propto p \quad (3.1)$$

Εάν ο συντελεστής α εξαρτάται ομοίως από την κινητική ενέργεια των συγκρουόμενων ηλεκτρονίων τότε  $W = eEl$  και δεδομένου ότι  $\lambda \propto 1/p$ , τελικά έχουμε

$$W \propto E / p \quad (3.2)$$

Η πιθανότητα να συμβεί ιονισμός εξαρτάται από την ενέργεια  $W$ , κατά συνέπεια έχουμε

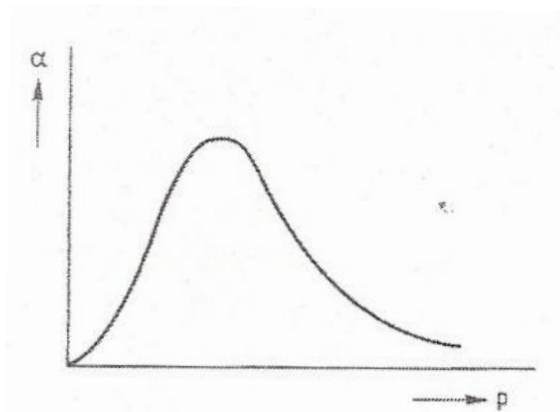
$$\alpha \propto f(E / p) \quad (3.3)$$

Εάν συνδυάσουμε τις σχέσεις 3.1 και 3.3 προκύπτει ότι :

$$a = pf \left( \frac{E}{p} \right) \quad (3.4)$$

Δηλαδή ο συντελεστής  $\alpha$  εξαρτάται από την πίεση  $p$  του αερίου μονωτικού αλλά και από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο  $E$ .

Στο σχήμα 3.3 που ακολουθεί μας φαίνεται πως ο συντελεστής  $\alpha$  μεταβάλλεται ως προς την πίεση  $p$ . Παρατηρούμε ότι για πολύ υψηλές και πολύ χαμηλές πιέσεις ο συντελεστής  $\alpha$  λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές. Στην μεν πρώτη περίπτωση, η ελευθέρα τροχιά  $\lambda$  παίρνει πολύ μικρές τιμές οπότε τα ηλεκτρόνια ενδεχομένως να μη μπορούν να αποκτήσουν αρκετή κινητική ενέργεια, λόγω των συχνών κρούσεων με τα μόρια του αερίου, ούτως ώστε να δημιουργήσουν συνθήκες ιονισμού, στην δεύτερη περίπτωση, η ελευθέρα τροχιά  $\lambda$  λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές με αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο να χρειάζεται να διανύσει μεγάλη απόσταση για να συγκρουσθεί με μόρια του αερίου προκειμένου να δημιουργήσει τις απαραίτητες συνθήκες ιονισμού.



**Σχήμα 3.3** Ο συντελεστής ιονισμού  $\alpha$  ως συνάρτηση της πίεσεως  $p$ . (Πηγή: Στοιχεία Υψηλών Τάσεων-Μ. Δανίκας )

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, αν από την κάθοδο γίνει εκπομπή ηλεκτρονίων  $n_0$  αυτά αφού διατρέξουν απόσταση  $x$  κατά τη φορά του πεδίου λόγω ιονισμού κρούσεως θα έχουν πολλαπλασιαστεί και γίνει  $n_x$ , αν διατρέξουν ακόμη απόσταση  $dx$  ελευθερώσουν κι άλλα  $dn_x$  νέα ηλεκτρόνια όπου:

$$dn_x = \alpha n_x dx \quad (3.5)$$

και αφού το πεδίο θεωρείται ομογενές άρα και ο συντελεστής  $\alpha$  σταθερός, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που φθάνουν στην άνοδο είναι:

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (3.6)$$

όπου γίνεται φανερό ότι, κατά μέσο όρο, κάθε ηλεκτρόνιο που ξεκινά από την κάθοδο μέχρι να φτάσει στην άνοδο (διανύοντας ένα διάκενο μήκους  $d$ )

δημιουργεί μέσω ιονισμού κρούσεως ( $e^{ad}-1$ ) ηλεκτρόνια και άλλα τόσα θετικά ιόντα. Το σύνολο αυτών των ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων λέγεται **ηλεκτρονική στοιβάδα**.

Επειδή όμως το ρεύμα είναι το σύνολο των ηλεκτρονίων  $n$  ανά μονάδα χρόνου  $e$  δηλαδή :  $I=dq/dt=en$  από την 3.6 προκύπτει ότι :

$$I=I_0 e^{ad} \quad (3.7)$$

Αυτό φυσικά για τάσεις μεγαλύτερες από  $U_1$  όπου ο συντελεστής  $a$  αποκτά σημαντική τιμή. Αφού το ρεύμα  $I$  εξαρτάται από το φωτοηλεκτρικό ρεύμα  $I_0$  έπεται ότι η εκκένωση που περιγράφεται από την 3.7 είναι μη αυτοσυντηρούμενη κι' αυτό γιατί ο μηδενισμός του  $I_0$  συνεπάγεται και μηδενισμό του  $I$  άρα σταμάτημα της εκκένωσης.

### 3.3 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Ως τώρα θεωρήθηκε ότι όλα τα πρωτογενή ηλεκτρόνια προήλθαν από την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας και της φυσικής ραδιενέργειας του περιβάλλοντος κυρίως ως φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στη κάθοδο και δευτερευόντως ως φωτοϊονισμός μέσα στο διάκενο.

Υπάρχουν όμως και άλλοι δευτερογενείς μηχανισμοί που απελευθερώνουν ηλεκτρόνια στην κάθοδο τα οποία μπορούν να προκαλέσουν τη δημιουργία στοιβάδων.

Σύμφωνα με την εξίσωση 3.6, ο αριθμός των ηλεκτρονίων μιας στοιβάδας είναι ανάλογος του  $e^{ad}$ . Σε ένα όμως ομοιογενές διάκενο σταθερού μήκους και κάτω από συνεχή τάση (το σχήμα 3.1 αναφέρεται σε ένα τέτοιο διάκενο) η μόνη μεταβλητή είναι ο πρώτος συντελεστής ιονισμού  $\alpha$  που σημαίνει ότι με υψηλές τάσεις (στο σχήμα 3.1 αυτή η τάση είναι η  $U_2$ ) θα υπάρχουν μεγάλες τιμές του  $\alpha$  άρα και μεγάλες στοιβάδες. Με μεγάλες όμως ηλεκτρονικές στοιβάδες αυξάνονται οι πιθανότητες ύπαρξης δευτερογενών μηχανισμών ικανών να επηρεάσουν την εκκένωση.

Οι σημαντικότεροι από αυτούς τους μηχανισμούς είναι:

1. Τα φωτόνια που εκπέμπονται όταν ένα άτομο που βρίσκεται σε διέγερση αποδιεγείρεται είναι δυνατόν προσκρούοντας στην κάθοδο να προκαλέσουν φωτοηλεκτρική εκπομπή ηλεκτρονίων.
2. Ενώ τα θετικά ιόντα που παράγονται στις πρωτογενείς στοιβάδες, οι στοιβάδες που παρήχθησαν από τα φωτοηλεκτρόνια, δεν μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό κρούσεως, παρόλα αυτά μπορούν βομβαρδίζοντας την κάθοδο να προκαλέσουν εκπομπή ηλεκτρονίων.

3. Επίσης και μετασταθή άτομα, εάν βέβαια υπάρχουν τέτοια στο διάκενο, όταν πέσουν πάνω στην κάθοδο μπορούν να προκαλέσουν εκπομπή ηλεκτρονίων.

Τέλος εκτός των παραπάνω μηχανισμών είναι δυνατόν να έχουμε παραγωγή ηλεκτρονίων κοντά στην κεφαλή της στοιβάδας από φωτοϊονισμό, αυτός όμως ο μηχανισμός παίζει ρόλο μόνο ίσως σε υψηλές πιέσεις.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ο συντελεστής  $\gamma$  ή **δεύτερος συντελεστής ιονισμού** ή **γάμμα του Townsend**, και είναι:

$$\gamma = \gamma_p + \gamma_i + \gamma_m \quad (3.8)$$

όπου  $\gamma_i$ ,  $\gamma_p$  και  $\gamma_m$  τα μέρη του  $\gamma$  που οφείλονται στον βομβαρδισμό από θετικά ιόντα, από φωτόνια και από μετασταθή άτομα.

Ο **δεύτερος συντελεστής ιονισμού** ορίζεται ως: ο αριθμός των δευτερογενών ηλεκτρονίων που παράγονται, κατά μέσο όρο, στην κάθοδο για κάθε ηλεκτρόνιο που παράγεται από ιονισμό κρούσεως. Όπως για το συντελεστή  $\alpha$  έτσι και για το  $\gamma$  έχει βρεθεί τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά ότι:

$$\gamma = g \left( \frac{E}{p} \right) \quad (3.9)$$

Ενώ από τον ορισμό του  $\gamma$  προκύπτει ότι κάθε στοιβάδα παράγει κατά μέσο όρο:

$$\mu = \gamma(e^{\alpha d} - 1) \quad (3.10)$$

δευτερογενή ηλεκτρόνια. Αν η γενιά των πρωτογενών στοιβάδων αρχίζει με  $n_0$  ηλεκτρόνια η δεύτερη γενιά θα αρχίζει με  $n_0 \mu$  ηλεκτρόνια.

### 3.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΚΑΤΑ TOWNSEND

Δύο είναι οι μηχανισμοί για την εξήγηση της διασπάσεως στα αέρια για ομοιογενή πεδία και κάτω από συνεχή τάση, ο μηχανισμός Townsend και ο μηχανισμός με σχηματισμό νηματίου. Ο σχηματισμός ηλεκτρονικών στοιβάδων αποτελεί το βασικό φαινόμενο και στις δύο περιπτώσεις. Ο μηχανισμός του Townsend στηρίζεται στην εξακολουθητική παραγωγή δευτερογενών στοιβάδων μέχρι τη διάσπαση του διακένου. Παρακάτω θα αναλύσουμε τον μηχανισμό του Townsend ενώ για τον άλλο μηχανισμό θα δούμε στην επόμενη παράγραφο.

Έστω  $n_0$  είναι ο αριθμός των πρωτογενών φωτοηλεκτρονίων που παράγονται στη κάθοδο, και  $n_{01}$  ο αριθμός των δευτερογενών, τότε ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων  $n_{02}$  που παράγονται στην κάθοδο θα

είναι:  $n_{02} = n_{01} + n_0$ . Όπως έχει είδη αναφερθεί, κάθε ηλεκτρόνιο που παράγεται στην κάθοδο μέχρι να φτάσει στην άνοδο ελευθερώνει ( $e^{\alpha d} - 1$ ) ηλεκτρόνια με ιονισμό κρούσης, άρα ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται από ιονισμό κρούσεως είναι  $n_{02}(e^{\alpha d} - 1)$ . Από τον ορισμό του  $\gamma$  έχουμε ότι κάθε τέτοιο ηλεκτρόνιο παράγει  $\gamma$  ηλεκτρόνια στην κάθοδο, άρα:  $n_{01} = \gamma n_{02}(e^{\alpha d} - 1)$  αντικαθιστώντας το  $n_{01}$  με το ίσο του και επιλύοντας ως προς  $n_{02}$  έχουμε:

$$n_{02} = \frac{n_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.11)$$

Από την εξίσωση 3.6 έχουμε ότι αν παράγονται στην κάθοδο  $n_{02}$  ηλεκτρόνια θα φθάσουν στην άνοδο  $n$  όπου:

$$n = n_{02} e^{\alpha d} = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.12)$$

Άρα και το ρεύμα που θα διαρρέει το διάκενο θα είναι:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.13)$$

Η εξίσωση 3.13 περιγράφει το ρεύμα στο διάκενο πριν συντελεστεί η διάσπαση του όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Συγκεκριμένα για χαμηλές τιμές της τάσης  $U$  ο συντελεστής  $\gamma$  είναι αμελητέος και η εξίσωση 3.13 μεταπίπτει στην εξίσωση 3.7 για το σχήμα 3.1 αυτό συμβαίνει για τάσεις μικρότερες από  $U_2$ . Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης  $U_2$ , οι δευτερογενείς μηχανισμοί αρχίζουν και παίζουν ρόλο και έτσι το ρεύμα αυξάνει κατακόρυφα, μεγαλύτερη κλίση  $dI/dU$ . Πάντως και εδώ η εκκένωση δεν είναι αυτοσυντηρούμενη, δηλαδή αν μηδενισθεί το αρχικό φωτοηλεκτρικό ρεύμα  $I_0$  μηδενίζεται και το  $I$ . Αν τώρα αυξηθεί ακόμα η τάση (πάνω από  $U_s$ ) περνάμε σε αυτοσυντηρούμενη εκκένωση. Η μετάβαση αυτή, δηλαδή ο σπινθήρας, συνοδεύεται από μεγάλη αύξηση στο ρεύμα. Εδώ το ρεύμα γίνεται απροσδιόριστο αφού ο παρονομαστής της εξίσωσης 3.13 μηδενίζεται.

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (3.14)$$

ή επειδή  $e^{\alpha d} \gg 1$  μπορεί να απλοποιηθεί:

$$\gamma e^{\alpha d} = 1 \quad (3.15)$$

Θεωρητικά η τιμή του ρεύματος κατά τη διάσπαση τείνει προς το άπειρο, στην πραγματικότητα όμως αυτή περιορίζεται από τα στοιχεία του κυκλώματος.

Οι εξισώσεις 3.14 και 3.15 προσδιορίζουν τη συνθήκη κάτω από την οποία επέρχεται η διάσπαση του διακένου και λέγονται **κριτήριο διάσπασης του Townsend**. Ο Loeb εξήγησε το κριτήριο του Townsend ως εξής:

1. Για  $\mu < 1$  (εξ.3.10) η εκκένωση είναι μη αυτοσυντηρούμενη επειδή εξαρτάται από το αρχικό φωτοηλεκτρικό ρεύμα  $I_0$  (εξ.3.13).
2. Για  $\mu = 1$  η εκκένωση είναι αυτοσυντηρούμενη, επειδή για κάθε ηλεκτρονική στοιβάδα θα έχουμε την παραγωγή, κατά μέσο όρο, ενός δευτερογενούς ηλεκτρονίου στην κάθοδο προκαλώντας έτσι μια νέα στοιβάδα. Αυτή η σχέση ισχύει μόνο για την ελάχιστη τάση διάσπασης  $U_S$  (σχήμα 3.1).
3. Για  $\mu > 1$  κάθε στοιβάδα θα προκαλέσει την εκπομπή περισσότερων από ένα δευτερογενή ηλεκτρόνια στην κάθοδο, έτσι ο ιονισμός που προκαλείται από διαδοχικές στοιβάδες είναι αθροιστικός. Ο σπινθήρας αναπτύσσεται τόσο ταχύτερα όσο η ανισότητα είναι μεγαλύτερη. Αυτά ισχύουν για τάσεις μεγαλύτερες από την  $U_S$ .

Αν λοιπόν η πλήρωση του κριτηρίου του Townsend, εξ. 3.14 θεωρείται απαραίτητη προκειμένου να διασπασθεί ένα διάκενο, ωστόσο για να επέλθει γρήγορα αύξηση του ρεύματος μέχρι των τιμών που αντιστοιχούν στη διάσπαση ουσιαστικά πρέπει να συντρέχει η 3<sup>η</sup> περίπτωση, δηλαδή να είναι  $\mu > 1$ . Επειδή όμως ο 2<sup>ος</sup> συντελεστής ιονισμού  $\gamma$  είναι στατιστικό μέγεθος που υπόκειται σε διακυμάνσεις δεν αποκλείεται ακόμα και όταν κατά μέσο όρο είναι  $\mu = 1$  να γίνει στιγμιαία  $\mu > 1$  και να επέλθει ταχύτατα η διάσπαση.

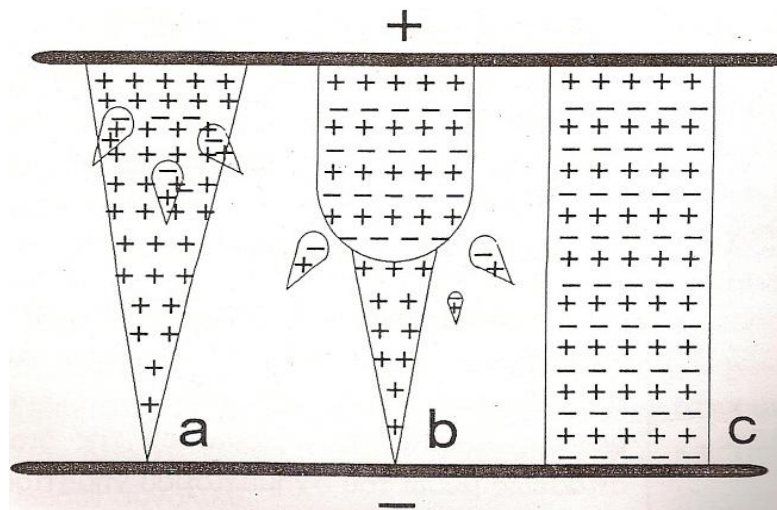
### 3.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΜΕ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΝΗΜΑΤΙΟΥ

Κάποια φαινόμενα είναι αδύνατο να εξηγηθούν με βάση το μηχανισμό του Townsend, π.χ. οι πολύ μικροί χρόνοι που μεσολαβούν μεταξύ της επιβολής της τάσεως και της διασπάσεως του διακένου και που εμφανίζονται όταν επιβληθούν υπερτάσεις. Αυτό γίνεται επειδή ο μηχανισμός του Townsend προϋποθέτει ότι για τη διάσπαση χρειάζεται ολόκληρη σειρά από διαδοχικές ηλεκτρονικές στοιβάδες.

Δυο διακεκριμένοι επιστήμονες ο Meek και ο Raether, αν και εργάστηκαν εντελώς ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, κατάφεραν να εξηγήσουν αυτά τα φαινόμενα, καταλήγοντας σε όμοια αποτελέσματα. Μέσα από την ερευνητική τους προσπάθεια προέκυψε μια άλλη θεωρία για τη διάσπαση, η θεωρία του **μηχανισμού της διάσπασης με σχηματισμό νηματίου (streamer)**. Πιο συγκεκριμένα ο μεν Meek ανέπτυξε την θεωρία του θετικού νηματίου, δηλαδή αυτού που πηγαίνει από την άνοδο στην κάθοδο, ενώ ο Raether του αρνητικού, από την κάθοδο στην άνοδο.

Και οι δύο θεωρίες βασίζονται στα φαινόμενα που προκαλούνται στο διάκενο από τη στρέβλωση του ομοιογενούς πεδίου που προκαλείται από την ύπαρξη χωρικών φορτίων κατά μήκος μιας ηλεκτρονικής στοιβάδας. Συγκεκριμένα η κεφαλή μιας στοιβάδας αποτελείται κυρίως από ηλεκτρόνια ενώ η ουρά της από τα κατά πολύ αργότερα θετικά ιόντα.

Στην εργασία αυτή θα αναλυθεί η θεωρία του Meek. Σύμφωνα με την θεωρία του ο σχηματισμός και η πρόοδος του θετικού νημάτιου επεξηγήθηκαν ως εξής: όταν μια στοιβάδα, που ξεκινάει από την κάθοδο, φθάσει στην άνοδο, τα ηλεκτρόνια της εξουδετερώνονται και έτσι μένει ένα θετικό χωρικό φορτίο που προκαλείται από τα θετικά ιόντα που παραμένουν στο διάκενο. Το φορτίο αυτό όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4a έχει κωνικό σχήμα με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση θετικών ιόντων στη γειτονιά της ανόδου όπου κυρίως προκαλεί αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, αν το πεδίο αποκτήσει αρκετά μεγάλη τιμή παρατηρείται στην περιοχή κοντά στην άνοδο ισχυρός ιονισμός που δημιουργεί μεγάλο πλήθος φωτοηλεκτρονίων, τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν βοηθητικές ηλεκτρονικές στοιβάδες με κατεύθυνση προς τη βάση της κωνικής ουράς(σχήμα3.4a).



**Σχήμα 3.4** Σχηματισμός νημάτιου κατά Meek (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου )

Βοηθητικές στοιβάδες δημιουργούνται ως επί το πλείστον κατά μήκος του άξονα της αρχικής στοιβάδας όπου και το πεδίο έχει τη μεγαλύτερη τιμή. Τα θετικά ιόντα των βοηθητικών στοιβάδων που παραμένουν πίσω αφού τα ηλεκτρόνια μπουν στην περιοχή μεγάλης συγκέντρωσης φορτίου (κεφαλή της κύριας στοιβάδας), ενισχύουν και επιμηκύνουν το χωρικό φορτίο της αρχικής στοιβάδας με κατεύθυνση προς την κάθοδο, σχήμα 3.4b δημιουργώντας έτσι ένα αυτοπροωθούμενο αγώγιμο νημάτιο, που κάποια στιγμή γεφυρώνει το διάκενο σχήμα 3.4c προκαλώντας έτσι τη διάσπαση του.



Η μετατροπή της αρχικής στοιβάδας σε νημάτιο μπορεί να γίνει, αν η τιμή  $E_r$  της έντασης του ακτινικού πεδίου στην κεφαλή της στοιβάδας είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αρχική πεδιακή ένταση  $E=U/d$ .

Για να υπολογιστεί η τιμή της  $E_r$ , θεωρείται ότι τα θετικά ιόντα με συνολικό φορτίο  $q$ , είναι συγκεντρωμένα σε μια σφαίρα με ακτίνα  $r$  στην κεφαλή της στοιβάδας και γνωρίζοντας την τιμή της ταχύτητας των ηλεκτρονίων καθώς και το συντελεστή διάχυσης για τον ατμοσφαιρικό αέρα αποδεικνύεται ότι η τιμή του πεδίου σε V/cm δίνεται από τον τύπο:

$$E_r = 5.27 * 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\sqrt{x/p}} \quad (3.16)$$

Όπου  $x$  η απόσταση που έχει διατρέξει η στοιβάδα. Αν λοιπόν θεωρηθεί ότι  $E = E_r$  και  $x=d$  (δηλαδή η αρχική στοιβάδα έχει διανύσει το διάκενο) τότε η εξίσωση γίνεται:

$$ad + \ln\left(\frac{a}{p}\right) = 14.5 + \ln\left(\frac{E}{p}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{d}{p}\right) \quad (3.17)$$

Ανάλογα ήταν και τα συμπεράσματα του Raether για το αρνητικό νημάτιο. Και για αυτόν το κριτήριο για τη δημιουργία και εξέλιξη του νημάτιου είναι το γεωμετρικό πεδίο να είναι περίπου ίσο με το πεδίο που οφείλεται στο αρνητικό χωρικό φορτίο. Το συνολικό πεδίο προκαλεί τη δημιουργία στοιβάδων που κινούνται προς την άνοδο και που οφείλουν την αρχή τους σε φωτοηλεκτρόνια που παράγονται από τον έντονο φωτοϊονισμό που υπάρχει εμπρός από την κεφαλή του νημάτιου. Ο Raether μάλιστα υπολόγισε ότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που πρέπει να αποκτήσει μια στοιβάδα ώστε να μετασχηματιστεί σε νημάτιο είναι  $10^8 \div 5 \times 10^8$ .

Παρόλο που τα κριτήρια του Raether και Meek είναι εμπειρικά, η εφαρμογή τους δίνει αποτελέσματα που δεν απέχουν πολύ από την πράξη.

### 3.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ

Από αυτά που έχουν αναφερθεί έως τώρα προκύπτει ότι ο κάθε ένας από τους δύο μηχανισμούς μπορεί να περιγράψει τη διάσπαση ενός ομοιογενούς διακένου. Το ερώτημα όμως που προκύπτει είναι το πότε γίνεται η διάσπαση με το μηχανισμό νηματίου και πότε με το μηχανισμό Townsend.

Η απάντηση στο προηγούμενο ερώτημα δίνεται μέσα από τη χρονική σειρά περαίωσης των κριτηρίων. Δηλαδή αν ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην κεφαλή ξεπεράσει τον κρίσιμο αριθμό των  $10^8$  θα γίνει διάσπαση με σχηματισμό νηματίου, ενώ αν αντίθετα πληρωθεί πρώτα το κριτήριο του Townsend, δηλαδή πριν τα ηλεκτρόνια της κεφαλής της στοιβάδας

ξεπεράσουν τα  $10^8$ , τότε θα γίνει διάσπαση με το μηχανισμό Townsend. Προκύπτει λοιπόν μία ανισότητα που καθορίζει πια συνθήκη θα ισχύσει, αυτή είναι:

$$\frac{1}{\gamma} \geq \sim 10^8 \quad (3.18)$$

Όταν δηλαδή ικανοποιείται αυτή η σχέση η διάσπαση γίνεται με το μηχανισμό νηματίου. Επίσης το συμπέρασμα από αυτή την εξίσωση είναι ότι ο μηχανισμός διάσπασης εξαρτάται από κάποιες παραμέτρους όπως το αέριο (συντελεστής  $\alpha$ ), το υλικό της καθόδου (συντελεστής  $\gamma$ ), της πεδιακής έντασης και της πίεσης. Μεταβάλλοντας λοιπόν κάποια από αυτές τις παραμέτρους είναι δυνατόν να περνάμε από τον ένα μηχανισμό στον άλλο.

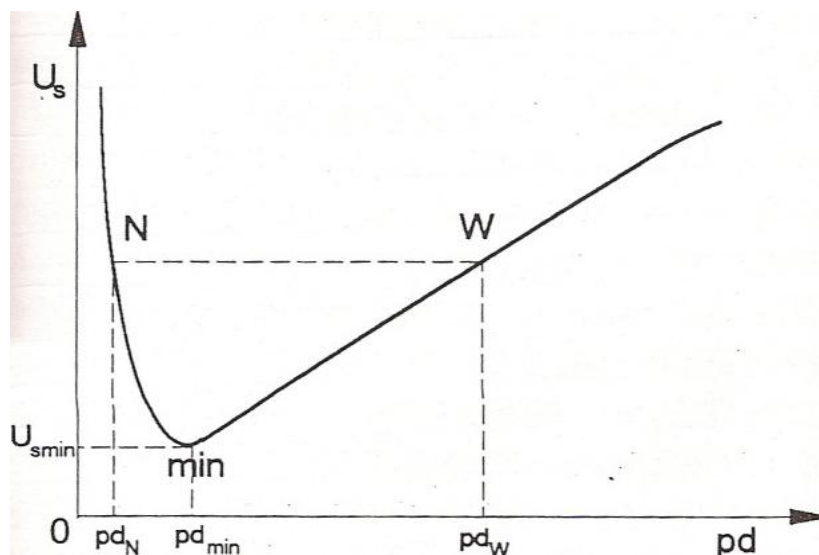
Μια τελική πλην όμως πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι όλα αυτά ισχύουν για ομοιογενή πεδία ενώ για ανομοιογενή διάκενα παρατηρείται πάντα σχηματισμός νηματίου.

### 3.7 Η ΚΑΜΠΥΛΗ ΚΑΙ Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ PASCHEN

Στο κεφάλαιο αυτό θα χρειαστεί να γίνει μία αναδρομή και να θυμηθούμε κάποιες εξισώσεις που έχουν αναφερθεί. Είδαμε ότι η διάσπαση ενός ομοιογενούς διακένου  $d$  με το κριτήριο Townsend θα γίνει εφ' όσον ισχύει η εξίσωση 3.15 ( $\gamma e^{\alpha d} = 1$ ), ενώ αν εδώ αντικατασταθούν τα  $\alpha$  και  $\gamma$  με τις τιμές τους από τις εξισώσεις 3.4 και 3.9 θα προκύψει η παρακάτω εξίσωση:

$$g\left(\frac{U}{pd}\right) \exp\left[pdf\left(\frac{U}{pd}\right)\right] = 1 \quad (3.19)$$

Λύνοντας την 3.19 ως προς  $U$  θα έχουμε την ελάχιστη τάση διάσπασης  $U_S$  εξαρτημένη από την πίεση και το μήκος του διακένου  $d$ . Δηλαδή μεταβολή στο διάκενο ή στην πίεση επηρεάζει την τάση διάσπασης γιατί μεταβάλλει το γινόμενο  $pd$ , εφ' όσον βέβαια η μορφή των ηλεκτροδίων και το αέριο παραμένουν ίδια. Αυτός είναι ο νόμος του **Paschen** που πρώτος το 1889 τον διατύπωσε πειραματικά μετά από μετρήσεις σε  $O_2$  και  $H_2$  και είναι ένας από τους σημαντικότερους νόμους στην επιστήμη των υψηλών τάσεων. Η σχέση μεταξύ της τάσης  $U_S$  και του γινομένου  $pd$  φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 3.5 και λέγεται **καμπύλη του Paschen**. Εύκολα διακρίνεται ότι για κάθε τάση μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή της καμπύλης του Paschen, υπάρχουν δύο τιμές του  $pd$ . Είναι προφανές ότι για κάθε αέριο ή μίγμα αερίων αντιστοιχεί και μια καμπύλη του Paschen που έχει τη γενική μορφή της καμπύλης του σχήματος 3.5.



**Σχήμα 3.5** Καμπύλη του Paschen (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου )

Η καμπύλη του Paschen μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά αν εξεταστεί η αποτελεσματικότητα των ηλεκτρονίων στο να προκαλούν ιονισμό. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η αποτελεσματικότητα αυτή των ηλεκτρονίων θεωρούμε για λόγους απλότητας την ύπαρξη μόνο του ιονισμού κρούσεως αμελώντας όλους τους άλλους μηχανισμούς (φωτοϊονισμός, μηχανισμοί  $\gamma$  κ.τ.λ.). Η αποτελεσματικότητα αυτή εξαρτάται αφ' ενός μεν από τον αριθμό των κρούσεων ενός ηλεκτρονίου κατά τη διαδρομή του προς την άνοδο, αφ' ετέρου δε από τη μέση ελεύθερη διαδρομή  $\lambda_m$  των ηλεκτρονίων. Μεγάλος αριθμός κρούσεων συνεπάγεται απ' την μία αυξημένη πιθανότητα ιονισμού απ' την άλλη μεγάλες απώλειες ενέργειας των ηλεκτρονίων. Μεγάλη  $\lambda_m$  σημαίνει όμως και αυξημένη δυνατότητα επιπλέον απόκτησης ενέργειας από τα ηλεκτρόνια. Το γινόμενο  $pd$  επηρεάζει άμεσα τόσο τη μέση ελεύθερη διαδρομή  $\lambda_m$  όσο και τον αριθμό των κρούσεων των ηλεκτρονίων. Ο καλύτερος συνδυασμός αριθμού κρούσεων και τιμής του  $\lambda_m$  όσον αφορά τον ιονισμό, άρα και η ελάχιστη τάση διάσπασης, βρίσκεται προφανώς στην περιοχή του ελαχίστου ( $pd=pd_{min}$ ) της καμπύλης του Paschen. Για τιμές του  $pd$  στα δεξιά της καμπύλης ( $pd_W > pd_{min}$ ) η πυκνότητα του αερίου είναι μεγάλη άρα ο αριθμός κρούσεων με μόρια του αερίου είναι μεγαλύτερος απ' ότι για  $pd=pd_{min}$ , αλλά η  $\lambda_m$ , άρα και η ενέργεια που αποκτάται μεταξύ δύο κρούσεων, είναι μικρότερη απ' ότι στην περιοχή του  $pd_{min}$ . Οπότε η σχέση αριθμού κρούσεων, απωλειών ενέργειας λόγω κρούσεων και πρόσκτησης ενέργειας κατά την διάρκεια των ελευθέρων διαδρομών είναι δυσμενέστερη απ' ότι στην περιοχή του ελαχίστου άρα και ο ιονισμός είναι πιο δύσκολο να πραγματοποιηθεί και χρειάζεται υψηλότερη τάση προκειμένου να επιτευχθεί διάσπαση. Για τα σημεία στα αριστερά της καμπύλης ( $pd_N < pd_{min}$ ), ναι μεν η  $\lambda_m$ , άρα και η ενέργεια που αποκτάται μεταξύ δύο κρούσεων, είναι μεγάλη αλλά εδώ ο συνολικός αριθμός των κρούσεων είναι πολύ μικρός. Έτσι και εδώ

ο ιονισμός είναι δυσχερέστερος απ' ό τι στην περιοχή ελαχίστου, άρα χρειάζεται υψηλότερη τάση προκειμένου να επιτευχθεί διάσπαση.

Ποια είναι όμως η ισχύς του νόμου του Paschen; Αρχικά αναφέρθηκε για ομοιογενή διάκενα , ο νόμος του Paschen ισχύει και για ανομοιογενή ηλεκτρικά πεδία, όμως η κατάσταση στην περίπτωση αυτή περιπλέκεται λόγω της ταχέως μεταβαλλόμενης τιμής του ηλεκτρικού πεδίου. Απόκλιση από το συγκεκριμένο νόμο έχομε στις πολύ υψηλές και στις πολύ χαμηλές πιέσεις. Στις χαμηλές πιέσεις η μέση απόσταση μεταξύ των μορίων του αερίου είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τη μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων πράγμα που καθιστά τις κρούσεις λίγο πιθανές το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα οι αναγκαίοι φορείς για τη διάσπαση να παρέχονται από άλλους μηχανισμούς<sup>1</sup>. Απ' την άλλη στις υψηλές πιέσεις ένα φαινόμενο που εμφανίζεται εκεί είναι ότι η τάση διασπάσεως αυξάνει με κάθε επιβολή της τάσης μέχρι να φτάσει σε μία τιμή όπου σταθεροποιείται. Αυτή η αύξηση της τάσης διάσπασης οφείλεται στην καταστροφή από τους επανειλημμένους σπινθηρισμούς μικροπροεξοχών και ακαθαρσιών που υπάρχουν πάνω στα ηλεκτρόδια και που επηρεάζουν την ομοιογένεια του πεδίου. Επίσης σε αρκετά υψηλές πιέσεις >10atm η τάση διάσπασης είναι μικρότερη από ότι για το ίδιο rd αλλά για χαμηλότερες πιέσεις, εδώ πλέον ο νόμος του Paschen παύει να ισχύει. Αυτό οφείλεται στο ότι λόγω των πολύ ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων (για το ίδιο rd όσο μεγαλύτερη η πίεση τόσο μικρότερο το διάκενο άρα και τόσο μεγαλύτερη η πεδιακή ένταση) έχομε ότι οι μηχανισμοί  $\alpha$  και  $\gamma$  ενισχύονται και από εκπομπή λόγω ισχυρού πεδίου με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη τάση διάσπασης.

Τι γίνεται όμως με την επίδραση της θερμοκρασίας; Στην ανάλυση του νόμου Paschen που προηγήθηκε είδαμε ότι η πίεση επηρεάζει τη  $U_S$  επειδή η μεταβολή της επηρεάζει την πυκνότητα  $\rho$  του αερίου. Όμως η πυκνότητα είναι και συνάρτηση της θερμοκρασίας η οποία έτσι επηρεάζει την τάση διάσπασης. Ο νόμος του Paschen ισχύει για θερμοκρασίες μέχρι περίπου 1400°C γιατί για ανώτερες θερμοκρασίες υπάρχουν τα φαινόμενα της θερμοηλεκτρικής εκπομπής, του θερμοϊονισμού και πιθανή παραμόρφωση των ηλεκτροδίων ώστε να μην είναι πλέον το πεδίο ομοιογενές. Όλα αυτά τείνουν να μειώσουν την  $U_S$  σε τιμές μικρότερες από αυτές του νόμου Paschen.

Τέλος σε ότι έχει να κάνει με τα μίγματα, ο νόμος του Paschen, δεν ισχύει για πολλά μίγματα αερίων. Κλασσικό παράδειγμα είναι το μίγμα νέου-αργού. Πρόσθεση μικρού ποσοστού αργού σε νέον έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της διηλεκτρικής αντοχής κάτω από αυτήν του καθαρού αργού ή

---

<sup>1</sup> Η ανάλυση αυτών των μηχανισμών δεν θα γίνει, καθώς ξεφεύγουν από τους στόχους της παρούσας εργασίας.

του καθαρού νέου. Ο λόγος αυτής της συμπεριφοράς έγκειται στο ότι η χαμηλότερη διεγερμένη κατάσταση του νέου είναι μετασταθερά και ότι το δυναμικό διεγέρσεως (16 eV) είναι περίπου 0,9 eV μεγαλύτερο του δυναμικού ιονισμού του αργού. Τα μετασταθερά άτομα έχουν μακρά διάρκεια ζωής<sup>2</sup>, για το νέον  $10^{-3}$  και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ιονισμού αν συγκρουστούν με άτομα του αργού. Αυτό έχει σαν συνέπεια μικρή ποσότητα αργού να μπορεί να προκαλέσει αυξημένο ιονισμό. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό σαν φαινόμενο **Penning**.

### 3.8 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΟΡΟΝΑ

Το φαινόμενο κορόνα παρατηρείται σε μεταλλικές προεξοχές διατάξεων αερίων μονώσεων. Το φαινόμενο παρατηρείται σε περιοχές πεδίου υψηλής εντάσεως γύρω από μια μεταλλική προεξοχή. Στον αέρα η κορόνα συνοδεύεται από παραγωγή όζοντος και ένα χαρακτηριστικό ήχο. Το φαινόμενο κορόνα εκδηλώνεται σε περιοχές μη ανομοιογενούς ηλεκτρικού πεδίου και χαρακτηρίζεται από σταθερές εκκενώσεις αίγλης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τις εκκενώσεις Trichel, οι οποίες είναι εκκενώσεις που παρατηρούνται σε διάταξη ακίδα-πλάκας (με μονωτικό τον αέρα) όταν όμως η ακίδα βρίσκεται σε αρνητική τάση.

Το φαινόμενο κορόνα έχει μεγάλη σημασία για την τεχνολογία των υψηλών τάσεων. Η κορόνα προκαλεί απώλειες ισχύος στα εναέρια συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας γιατί κάποια ποσότητα ρεύματος του αγωγού μεταφέρεται από τον ιονισμένο αέρα ο οποίος περιβάλλει τον αγωγό. Οι απώλειες αυτές δεν είναι πολύ σημαντικές αν οι καιρικές συνθήκες είναι καλές. Έτσι οι απώλειες υπό καλές καιρικές συνθήκες δίδονται από τον παρακάτω τύπο:

$$p = \frac{3.37 \times 10^{-5} F V^2 f}{\left[ \log_{10} \left( \frac{2S}{d} \right) \right]^2} \text{ kW/φάση/μίλι} \quad (3.20)$$

Όπου  $V$  η ενεργός τιμή της τάσης της γραμμής προς τη γη σε kV,  $f$  η συχνότητα σε Hz,  $F$  είναι ένας παράγοντας του φαινομένου κορόνα προσδιοριζόμενος από δοκιμές,  $S$  η απόσταση μεταξύ των αγωγών και  $d$  η διάμετρος του αγωγού. Υπό άσχημες όμως καιρικές συνθήκες (καταρρακτώδης βροχή ή συνθήκες πολικού ψύχους) είναι δυνατό να δούμε απώλειες κατά 20 έως και 30 φορές περισσότερο από ότι προκαλούνται σε σχετικώς καλές καιρικές συνθήκες. Το φαινόμενο κορόνα μπορεί να προκαλέσει την παραγωγή παραπροϊόντων στην ατμόσφαιρα  $SF_6$  τα οποία θα φθείρουν την μόνωση ενός συστήματος. Εξ' αιτίας του φαινομένου κορόνα

<sup>2</sup> Βλέπε παράγραφο 2.2.8

στις εναέριες γραμμές μεταφοράς έχουμε και ραδιοφωνική παρενόχληση σε μια ευρύτατη περιοχή συχνοτήτων (200 kHz-4 MHz), και η όχληση αυτή γίνεται εντονότερη υπό συνθήκες βροχής ή υγρασίας. Μπορεί επίσης να προκαλέσει πρόβλημα κατά την διάρκεια μετρήσεων μερικών εκκενώσεων όπου θα πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για την αντιμετώπιση της. Μια άλλη αρνητική συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι ο κίνδυνος διάβρωσης στερεής μόνωσης ιδίως όταν αυτή είναι εκτεθειμένη στον αέρα π.χ. στην περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανών.

Σε αγωγούς κάτω από υψηλή τάση και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, η όψη της κορόνα μεταβάλλεται με την πολικότητα. Σε θετική πολικότητα της τάσης η κορόνα εμφανίζεται με τη μορφή μιας ανοιχτογάλαζης αίγλης που σκεπάζει όλο τον αγωγό. Αντίθετα κάτω από αρνητική πολικότητα η κορόνα έχει τη μορφή κόκκινων στιγμάτων σε διάφορα σημεία κατά μήκος του αγωγού. Αυτό συμβαίνει σε περίπτωση λείων αγωγών, αν όμως, όπως συμβαίνει πάντοτε, έχουμε ανωμαλίες στην επιφάνεια των αγωγών, τότε έχουμε και για τις δύο πολικότητες πιο εκτεταμένες εκκενώσεις κορόνα με τη μορφή θυσάνων. Στροβοσκοπικές μελέτες του φαινομένου σε H.V.A.C. δείχνουν ότι η κορόνα σε κάθε ημιπερίοδο έχει την ίδια εμφάνιση που έχει κάτω από την αντίστοιχη πολικότητα σε H.V.D.C.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι το φαινόμενο κορόνα δεν εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο αλλά από την τάση έτσι μπορεί να εμφανιστεί και σε σχετικά χαμηλές τάσεις. Και ανακεφαλαιώνοντας η κορόνα και οι επιπτώσεις της είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα για την τεχνική των υψηλών τάσεων όπου αφθονούν τα ανομοιογενή πεδία, αυτή προκαλεί σημαντικές απώλειες στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, χειροτέρευση των μονώσεων, και ραδιοφωνικά παράσιτα. Από την άλλη μεριά η κορόνα αποτελεί τη βάση βοηθητικών συσκευών, όπως οι μετρητές Geiger και οι ηλεκτροστατικοί διαχωριστές. Παρακάτω θα ακολουθήσει μία σύντομη αναφορά των δύο ειδών κορόνας που υπάρχουν, την αρνητική και την θετική.

### 3.8.1 ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΟΡΟΝΑ

Στην περίπτωση που η κορόνα ξεκινά από ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο κάτω από συνεχή ή βραδέως μεταβαλλόμενη τάση, το ρεύμα που οφείλεται στην αρνητική κορόνα έχει τη μορφή πολύ κανονικών παλμών με συχνότητα που αυξάνει με την ένταση του ρεύματος και μειώνεται με την ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας. Πρώτος ο Trichel μελέτησε το φαινόμενο και γι' αυτό οι παλμοί αυτοί ονομάστηκαν **παλμοί Trichel**.

Η εξήγηση κατά τον Trichel έχει ως εξής: ένα θετικό ιόν που βρίσκεται στην περιοχή κοντά στην αρνητική ακίδα επιταχύνεται προς αυτήν και

προσκρούοντας επάνω της ελευθερώνει ένα ηλεκτρόνιο<sup>3</sup> (μηχανισμός  $\gamma_i$ ). Αυτό το ηλεκτρόνιο επιταχυνόμενο προκαλεί μέσω ιονισμού κρούσεως τη δημιουργία ηλεκτρονικής στοιβάδας, φωτόνια από την περιοχή της στοιβάδας προκαλούν έκλυση νέων ηλεκτρονίων από την κάθοδο (μηχανισμός  $\gamma_p$ ) άρα και σχηματισμό νέων στοιβάδων. Αυτό το φαινόμενο επαναλαμβάνεται προκαλώντας μια γρήγορη άνοδο στο ρεύμα. Η πτώση στο ρεύμα οφείλεται από την μία στα θετικά ιόντα ( που σχηματίστηκαν στις στοιβάδες) και που ελκόμενα προς την ακίδα αυξάνουν την ένταση του πεδίου στη γειτονιά της μειώνοντας όμως ταυτόχρονα την έκταση της περιοχής ισχυρού πεδίου, όπου μπορεί να υπάρχει ιονισμός, και απ' την άλλη στη δημιουργία αρνητικών ιόντων που τείνουν να ελαττώσουν το πεδίο στη γειτονιά της ακίδας.

Και τέλος κάτω από κρουστικές τάσεις η αρνητική κορόνα, παρουσιάζεται υπό μορφή κόκκινων στιγμάτων και για υψηλότερες τάσεις με θυσανοειδή μορφή. Η αρνητική κρουστική κορόνα ξεκινά από σχετικά υψηλές τιμές του πεδίου και έχει πολύ μικρή αγωγιμότητα ( $\sim 15\text{kV/cm}$ ).

### 3.8.2 ΘΕΤΙΚΗ ΚΟΡΟΝΑ

Το φαινόμενο αυτό έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές και στην γενικότερα αποδεκτή μορφή του έχει ως εξής: όταν η τάση ξεπεράσει ένα όριο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην περιοχή της ακίδας επιταχύνονται προς την άνοδο (ακίδα) δημιουργώντας ηλεκτρονικές στοιβάδες που έχει σαν αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος. Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι το όριο της τάσης καθορίζεται από την πεδιακή ένταση. Η τιμή της έντασης αυξάνει με την τάση καθώς υπάρχουν περισσότερες και μεγαλύτερες στοιβάδες. Όταν η τάση αυξηθεί σημαντικά το ρεύμα παίρνει τη μορφή παλμών συχνότητας περίπου 1 kHz. Ένας ερευνητής που μελέτησε ιδιαίτερα το φαινόμενο, ο Loeb, ονόμασε αυτού του είδους την κορόνα **παλμική κορόνα**. Στο σημείο αυτό ο μέσος όρος του ρεύματος αυξάνει καθώς αυξάνει η τάση μέχρι η εκκένωση να γίνει αυτοσυντηρούμενη, συνήθως η παλμική κορόνα συνοδεύεται από σχηματισμό νηματίου που λέγεται προκαταρκτικός στρήμερ. Και αφού πλέον η κορόνα καταστεί αυτοσυντηρούμενη η μορφή της δεν αλλάζει, απλώς αυξάνει η ένταση καθώς η παλμική κορόνα γίνεται πιο έντονη αλλά και τα νημάτια της μακρύτερα. Αν αυξηθεί ακόμα περισσότερο η τάση τα νημάτια εξαφανίζονται και παραμένει μια εκκένωση αίγλης η **αίγλη του Hermstein** προς τιμή του Hermstein που πρώτος τη μελέτησε. Τέλος σε πολύ υψηλότερες τάσεις, λίγο πριν την τάση διάσπασης  $U_s$ , θα επανεμφανιστούν τα νημάτια τα οποία επιμηκυνόμενα διασχίζουν το διάκενο προκαλώντας τη διάσπαση του.

<sup>3</sup> Βλέπε παράγραφο 3.3 για ιονισμό λόγω βομβαρδισμού.

Κάτω από κρουστικές τάσεις η θετική κορόνα εμφανίζεται ως μεμονωμένοι παλμοί με μορφή θυσανοειδή. Αυτοί οι θύσανοι φαίνονται ως νημάτια με ένα κάπως πιο λαμπρό μίσχο ο οποίος είναι ο μόνος από όλη την εκκένωση που έχει υπολογίσιμη αγωγιμότητα. Η αρχική κορόνα, δηλαδή η πρώτη που εμφανίζεται μετά την επιβολή της τάσεως, αποτελείται από νημάτια πιο φαρδιά και ξεκινά απ' ευθείας από την θετική ακίδα. Οι εκκενώσεις κορόνα που ακολουθούν την αρχική ξεκινούν από το μίσχο της προηγούμενης και έχουν πολύ λεπτότερα νημάτια. Στην περίπτωση που επιβληθεί κρουστική τάση με μεγαλύτερη διάρκεια μετώπου, και πριν από την εμφάνιση της αρχικής κορόνας είναι δυνατόν να εμφανιστεί μια έκχυση θετικού χωρικού φορτίου στη γειτονιά της ακίδας που μπορεί να οφείλεται σε μια μορφή αίγλης.

### 3.9 ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΕ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΗ ΠΕΔΙΑ

Στα ανομοιογενή πεδία η διάσπαση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η μορφή της τάσης, η μορφή του διακένου, η πολικότητα κ.α. Εδώ θα σταθούμε λίγο στην πολικότητα, ανάλογα με την πολικότητα του ηλεκτροδίου από το οποίο ξεκινά η εκκένωση χαρακτηρίζεται θετική ή αρνητική. Στη συνέχεια θα γίνει μια λεπτομερέστερη περιγραφή και των δύο μηχανισμών κάτω από κρουστικές τάσεις επειδή αυτές είναι και οι πιο επικίνδυνες μορφές τάσεων. Πιο συγκεκριμένα οι εσωτερικές SS και οι εξωτερικές LS υπερτάσεις είναι οι μορφές τάσεων που προκαλούν τους περισσότερους και μεγαλύτερους κινδύνους στα δίκτυα μεταφοράς. Αυτές αναπαρίστανται στο εργαστήριο ως εσωτερικές κρουστικές τάσεις ή με μεγάλη διάρκεια μετώπου (250/2500μs) και ως εξωτερικές κρουστικές τάσεις ή με μικρή διάρκεια μετώπου (1.2/50μs)<sup>4</sup>.

Ο μηχανισμός της θετικής εκκένωσης ξεκινάει από το θετικό ηλεκτρόδιο με μια εκκένωση κρουστικής κορόνα. Αμέσως μετά την **πρώτη κορόνα**<sup>5</sup>, ακολουθούν διαδοχικές εκκενώσεις κορόνα που η κάθε μια ξεκινά από το μίσχο της προηγούμενης. Αν προσθέσουμε όλους τους μίσχους σχηματίζεται ένας οδηγός προεκκενώσεως ή λήντερ ο οποίος εκτείνεται απομακρυνόμενος από το θετικό ηλεκτρόδιο προωθούμενος άλλοτε με άλματα και άλλοτε ομαλά καθώς εκκενώσεις κορόνα εκπηδούν από το άκρο του, οι εκκενώσεις αυτές λέγονται κορόνα του λήντερ. Ο λήντερ είναι στην ουσία ο πιο αγωγίμος από όλα τα νημάτια της κορόνα, πιο συγκεκριμένα ενώ τα νημάτια έχουν μια μέση πτώση τάσεως περίπου στα 5kV/cm ο λήντερ έχει περίπου 1kV/cm.

<sup>4</sup> Μια κρουστική τάση περιγράφεται με δύο αριθμούς, ο πρώτος δείχνει τη διάρκεια του μετώπου ενώ ο δεύτερος τη διάρκεια ημίσεως εύρους.

<sup>5</sup> Βλέπε προηγούμενη παράγραφο 3.8.2



Ο μηχανισμός της αρνητικής εκκένωσης υπό κρουστικές τάσεις έχει ως εξής: Σε υψηλότερες πεδιακές εντάσεις από ότι στην θετική κρουστική κορόνα έχουμε την εμφάνιση αρνητικής κρουστικής κορόνα νηματοειδούς μορφής η οποία προκαλεί την έκχυση στο διάκενο μεγαλύτερης ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου απ' ότι η θετική κορόνα, την εκκένωση αυτή ακολουθεί ένας αρνητικός λήντερ. Ο λήντερ αυτός προωθείται με άλματα προς την πλάκα ενώ από την άκρη του εκπηδά περαιτέρω αρνητική κορόνα. Και εδώ, τα νημάτια δημιουργούν μεγαλύτερη πτώση τάσης περίπου  $12\text{kV/cm}$ , ενώ ο λήντερ έχει μικρότερη, περίπου  $1\div 2\text{kV/cm}$ .

Οι μηχανισμοί αυτοί είτε μόνο ο θετικός ή και οι δύο μαζί μπορούν να συνδυαστούν έτσι ώστε να προκαλέσουν τη διάσπαση κάποιου διακένου. Αυτό στις κυριότερες περιπτώσεις γίνεται ως εξής:

1. Στην περίπτωση διακένου θετικής ακίδας αρνητικής πλάκας που είναι και η σημαντικότερη επειδή ακριβώς παρουσιάζει τη μικρότερη δυνατή διηλεκτρική αντοχή παρατηρείται μόνο θετική εκκένωση που ξεκινά φυσικά από την ακίδα όπως περιγράφηκε παραπάνω. Όταν η κορόνα του λήντερ φτάσει στην πλάκα η εξέλιξη του επιταχύνεται πολύ κατά την διάρκεια ενός τελικού άλματος (final jump). Η διάσπαση του διακένου επέρχεται όταν ο θετικός λήντερ φτάσει στην πλάκα και αποκατασταθεί κατά αυτόν τον τρόπο αγώγιμη σύνδεση μεταξύ ακίδας και πλάκας.
2. Στην περίπτωση διακένου ακίδας-ακίδας η εκκένωση κορόνα και λήντερ ξεκινά χωριστά και αυτόνομα και από τα δύο ηλεκτρόδια με την διάσπαση να συμβαίνει όταν οι δύο λήντερ συναντηθούν κάπου στην μέση του διακένου. Δηλαδή εδώ συνυπάρχουν και η θετική και η αρνητική εκκένωση.
3. Στην περίπτωση διακένου αρνητικής ακίδας θετικής πλάκας ξεκινά αρνητική εκκένωση από την ακίδα. Όταν τα νημάτια της κορόνας του αρνητικού λήντερ που έχουν πολύ υψηλό φορτίο πλησιάσουν στην πλάκα, προκαλούν μεγάλη τοπική ανύψωση της τιμής του πεδίου, τέτοια ώστε να ξεκινά από αυτήν θετική εκκένωση κορόνα. Ο θετικός λήντερ που ακολουθεί οδεύει προς την ακίδα. Όταν οι δύο λήντερ ενωθούν κάπου στο μέσο του διακένου δημιουργείται αγώγιμη σύνδεση μεταξύ ακίδας και πλάκας και επέρχεται η διάσπαση του. Και σε αυτήν την περίπτωση προκειμένου να συντελεστή η διάσπαση συνυπάρχουν τόσο η αρνητική όσο και η θετική εκκένωση. Σε μικρά μόνο διάκενα η διάσπαση μπορεί να προκληθεί και μόνο με αρνητική εκκένωση.

Πρέπει να αναφερθεί ότι αν μια εκκένωση που αποτελείται από λήντερ και νημάτια έχει μήκος

$$l = l_l + l_s \quad (3.21)$$

όπου  $l_l$  το μήκος του λήντερ και  $l_s$  το μήκος των νηματίων, τότε αν  $E_l$  είναι η μέση πτώση τάσης κατά μήκος του λήντερ και  $E_s$  κατά μήκος των νηματίων η συνολική πτώση τάσεως θα είναι:

$$U = l_l E_l + E_s l_s \quad (3.22)$$

Τέλος, οι θετικές εκκενώσεις επειδή έχουν μικρότερες τιμές πτώσεις τάσεως εξελίσσονται πολύ πιο εύκολα, δηλαδή για χαμηλότερες τάσεις απ' ότι οι αρνητικές.

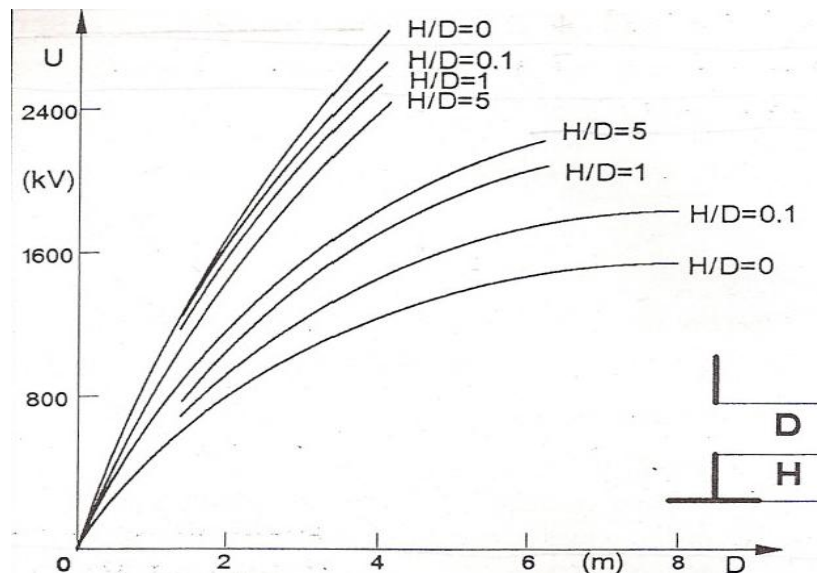
### 3.10 ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΣΕ ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΗ ΔΙΑΚΕΝΑ

Ενώ στα ομοιογενή διάκενα γίνονταν λόγος για ελάχιστη τάση διάσπασης  $U_s$  και όταν η εφαρμοζόμενη τάση στο διάκενο γινόταν μεγαλύτερη ή ίση με αυτήν επήρχετο πάντα διάσπαση. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει όμως στα ανομοιογενή διάκενα όπου η τάση διάσπασης δεν είναι ένα μέγεθος με αυστηρά καθορισμένη τιμή. Έτσι στην περίπτωση εφαρμογής συνεχών τάσεων που αυξάνουν βαθμιαία μέχρι τη διάσπαση, η τάση στην οποία αυτή γίνεται δεν είναι ένα σταθερό μέγεθος, δηλαδή αυτή μπορεί να διαφέρει σε κάθε εφαρμογή. Επίσης σε εφαρμογή κρουστικών τάσεων μπορεί να δούμε να συμβαίνει το ίδιο φαινόμενο. Αυτό εξηγείται διότι η διάσπαση σε ανομοιογενή πεδία είναι άθροισμα πολύπλοκων φαινομένων όπως π.χ. πολλαπλές εκκενώσεις κορόνα με αντίστοιχο αριθμό βημάτων στην εξέλιξη του λήντερ κάτι που δικαιολογεί διαφορετικό μήκος αλλά και κατεύθυνση του λήντερ σε κάθε νέα επιβολή τάσης.

Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί το παραπάνω φαινόμενο στατιστικό και η κατανομή της πιθανότητας διασπάσεως συναρτήσει της επιβεβλημένης τάσεως μια **ολοκληρωμένη κανονική** που ορίζεται από μια **μέση τιμή  $U_m$**  και μια **τυπική απόκλιση  $\sigma$** . Ονομάζεται **τάση διασπάσεως 50%** ή  **$U_{50}$**  η μέση τιμή επειδή κάτω από αυτήν το διάκενο διασπάται στο 50% των περιπτώσεων. Ουσιαστικά το ίδιο συμβαίνει και στα λεγόμενα ομοιογενή διάκενα με την διαφορά ότι εκεί επειδή το φαινόμενο είναι πιο απλό, η τυπική απόκλιση είναι πολύ μικρή μπροστά στη  $U_m$  και θεωρείται αμελητέα ώστε η μέση τιμή και η ελάχιστη τάση διάσπασης πρακτικά να συμπίπτουν.

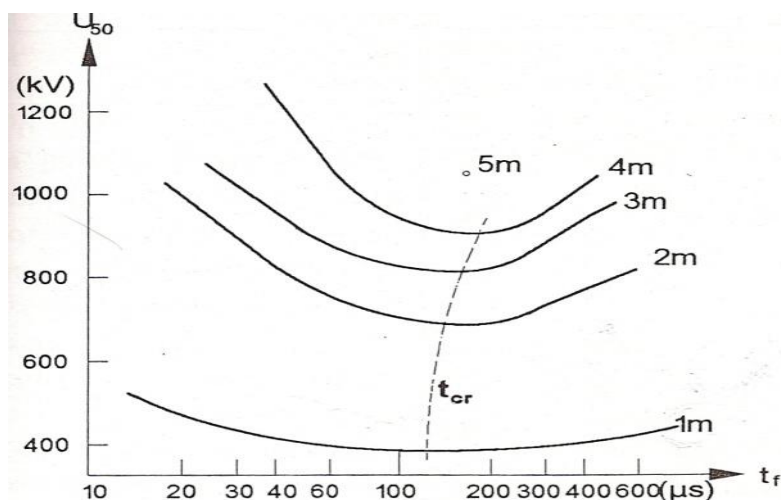
Αναφέρθηκε πριν ότι η τάση διάσπασης σε ανομοιογενή διάκενα εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως το μήκος του διακένου τη μορφή των ηλεκτροδίων την πολικότητα και την κυματομορφή της τάσεως. Το σχήμα 3.6 που ακολουθεί δείχνει την  $U_{50}$  σε kV κάτω από κρουστικές τάσεις τύπου 250/2500μs συναρτήσει του μήκους του διακένου με παραμέτρους τη μορφή

του διακένου και την πολικότητα της τάσης. Στο σχήμα 3.6 μπορεί κάποιος να διακρίνει τρεις ομάδες διακένων, τα διάκενα θετικής πλάκας-αρνητικής ράβδου έχουν τη μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή, τα διάκενα θετικής ράβδου-αρνητικής πλάκας έχουν τη μικρότερη ενώ στο μέσον είναι τα διάκενα ράβδου-ράβδου.



Σχήμα 3.6 Μεταβολή της  $U_{50}$  με το μήκος του διακένου σε διάφορα είδη διακένων. (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου )

Στα διάκενα θετικής ράβδου-αρνητικής πλάκας έχει αποδειχθεί ότι η  $U_{50}$  επηρεάζεται περισσότερο από τη διάρκεια μετώπου  $t_f$  της κυματομορφής και λιγότερο από την μορφή της. Αυτό μπορούμε να το δούμε στο σχήμα 3.7 που ακολουθεί όπου συνδέεται η  $U_{50}$  με την  $t_f$ . Οι καμπύλες που φαίνονται έχουν χαρακτηριστικό σχήμα U. Αυτές εξηγούνται ως εξής: για μικρές  $t_f$  οι  $U_{50}$  είναι σχετικά μεγάλες, καθώς αυξάνει η  $t_f$  ελαττώνεται η  $U_{50}$  μέχρι κάποιο ελάχιστο, στη συνέχεια για παραπάνω αύξηση της  $t_f$  η  $U_{50}$  ξανανεβαίνει όμως τώρα λιγότερο. Η διάρκεια μετώπου για την οποία η τάση διασπάσεως ελαχιστοποιείται ονομάζεται **κρίσιμη** και συμβολίζεται με  $t_{cr}$ . Παρατηρείται ότι όσο πιο μεγάλο είναι το διάκενο τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσοστιαία ελάττωση της  $U_{50}$  από την τιμή της όταν επιβάλλεται τάση με μικρή  $t_f$ . Επιπλέον η τιμή της  $t_{cr}$  αυξάνεται με την αύξηση του μήκους του διακένου  $d$ .



**Σχήμα 3.7** Μεταβολή της  $U_{50}$  συναρτήσει της  $t_r$ . (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου )

### 3.11 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Όπως είδη έχει αναφερθεί στις παραγράφους 2.2.3 και 3.7, η τάση διάσπασης στα ομοιογενή διάκενα σε ατμοσφαιρικό αέρα, εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ατμοσφαιρική πίεση, στα ανομοιογενή διάκενα επιπλέον παίζει ρόλο και η απόλυτη υγρασία.

Στα διάκενα με ανομοιογενή πεδία στις περιοχές όπου υπάρχει υψηλή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου η συγκέντρωση βαριών μορίων  $H_2O$  εμποδίζει την κίνηση των ηλεκτρονίων και των αρνητικών και θετικών ιόντων κάνοντας έτσι πιο δύσκολο το σχηματισμό και την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών στοιβάδων. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που η υγρασία έχει ανασταλτική επίδραση στο σχηματισμό και την εξέλιξη της εκκενώσεως κορόνα. Ιδιαίτερα σε ότι έχει να κάνει με τη θετική κρουστική κορόνα η αύξηση της υγρασίας αυξάνει την τάση έναρξης της και μειώνει το ηλεκτρικό φορτίο που εκχέεται στο διάκενο.

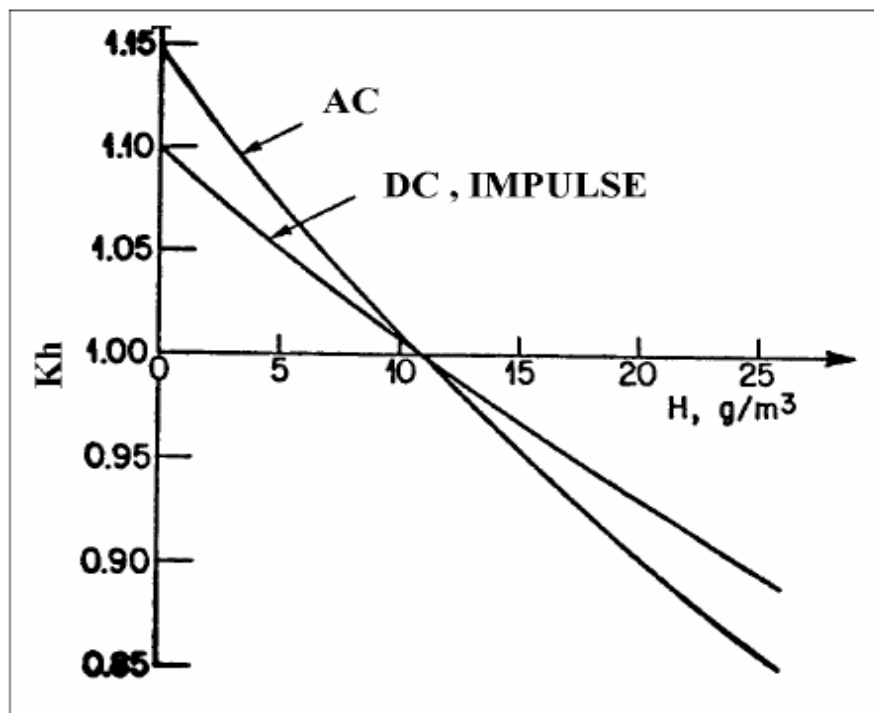
Για να μπορέσουν οι μηχανικοί να τυποποιήσουν τις τάσεις διασπάσεως των διακένων αλλά και να μπορούν να κάνουν υπολογισμούς αυτών των τάσεων κάτω από κάποιες συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες υπάρχει η ανάγκη να ορισθεί ένα σημείο αναφοράς ώστε να ανάγονται οι διάφορες τάσεις σ' αυτό. Η I.E.C. όρισε ως σημείο αναφοράς τις λεγόμενες **κανονικές** ατμοσφαιρικές **συνθήκες**, αυτές είναι οι εξής: θερμοκρασία περιβάλλοντος  $t_0=20^{\circ}C$ , ατμοσφαιρική πίεση  $p_0=101.3kPa$  ή  $1013mbar$  ή  $760mmHg$  και απόλυτη υγρασία  $H_0=11g/m^3$ .

Η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στη τάση διάσπασης καθορίζεται με το λόγο της τάσης διάσπασης ενός διακένου κάτω από κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες προς την τάση διάσπασης του ίδιου διακένου κάτω από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ο λόγος αυτός εκφράζεται με ένα συντελεστή με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί η τάση διάσπασης που προκύπτει κάτω από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες για να προκύψει η τάση διάσπασης κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες. Υπάρχουν δύο συντελεστές διόρθωσης ατμοσφαιρικών συνθηκών ένας για την πυκνότητα του αέρα και ένας για την υγρασία.

Ο συντελεστής διόρθωσης της τάσης για την πυκνότητα του αέρα για σχετικά μικρά διάκενα (<2m) είναι ίσος με:

$$\delta = \frac{PT_0}{P_0T} \quad (3.23)$$

Η διόρθωση της τάσης διάσπασης για την επίδραση της υγρασίας είναι πολύπλοκη και αβέβαιη. Παρ' όλα αυτά έχουν καθοριστεί πειραματικοί συντελεστές που καλύπτουν τις πιο συνήθεις περιπτώσεις. Οι συντελεστές φαίνονται στο σχήμα (3.8):



**Σχήμα 3.8** Συντελεστής διόρθωσης υγρασίας  $K_h$  σαν συνάρτηση της απόλυτης υγρασίας. (Πηγή: Διπλωματική Εργασία-Αλεξόπουλος Ελευθέριος )

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $K_h$ , λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο η απόλυτη υγρασία και η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης. Από πειράματα διαπιστώθηκε επίδραση του συντελεστή  $K_h$  από την μεταβολή της πυκνότητας, σε καταπονήσεις διακένων αέρα με κρουστική τάση. Όταν μειώνεται η σχετική πυκνότητα του αέρα, αυξάνεται η επίδραση της υγρασίας στην τιμή της τάσης διάσπασης. Αυτό εξηγείται και από φυσική άποψη. Όταν η απόλυτη υγρασία παραμένει σταθερή, μια μείωση της σχετικής πυκνότητας του αέρα θα έχει σαν αποτέλεσμα μια αύξηση του ποσοστού των μορίων του νερού στον αέρα. Έτσι για κάθε σύγκρουση μεταξύ ηλεκτρονίων και μορίων, η πιθανότητα δημιουργίας αρνητικών ιόντων θα αυξηθεί. Επομένως αναμένεται εντονότερη επίδραση της υγρασίας. Μετά από σειρά πειραμάτων με κρουστική τάση προέκυψε η παρακάτω σχέση:

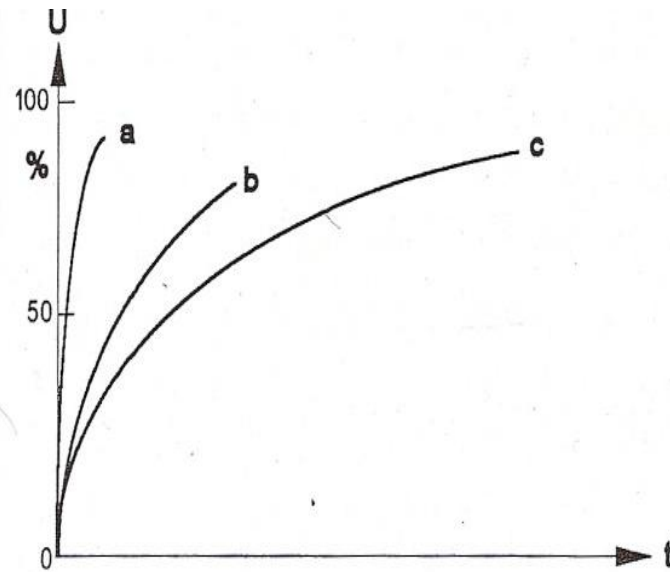
$$K_h = \frac{1}{1 + \frac{H - H_0}{100\delta}} \quad (3.24)$$

Όπου:  $H$  η απόλυτη υγρασία που επικρατεί κατά την διάρκεια της μέτρησης.

### 3.12 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Αμέσως μετά το σβήσιμο ενός τόξου το αέριο εξακολουθεί να παραμένει ιονισμένο και θερμό επομένως η διηλεκτρική αντοχή του είναι μειωμένη. Αυτό φυσικά δεν κρατάει επ' άπειρον αφού μετά από κάποιο χρονικό διάστημα το αέριο απιονίζεται και ψύχεται μέχρι που αποκτά την τιμή που είχε πριν από την έναυση του τόξου. Έτσι εδώ προκύπτει ένας καινούργιος ορισμός, που σχετίζεται με τα προαναφερόμενα, η **διηλεκτρική αποκατάσταση**. Διηλεκτρική αποκατάσταση είναι η ικανότητα για την επανάκτηση της αρχικής διηλεκτρικής αντοχής και είναι ένα χαρακτηριστικό των αερίων μονωτικών.

Το σχήμα 3.9 που ακολουθεί δείχνει την τυπική μορφή των καμπυλών της διηλεκτρικής αποκατάστασης δηλαδή της σχέσης που συνδέει την τάση διάσπασης (% επί της αρχικής) ως συνάρτηση του χρόνου από το σβήσιμο του τόξου. Οι καμπύλες της ομάδας *a* προήλθαν από τόξα μικρής διάρκειας και υψηλής έντασης, για την ομάδα *b* οι καμπύλες προήλθαν από τόξα μέσης έντασης και διάρκειας και τέλος οι καμπύλες της ομάδας *c* από τόξα μικρής έντασης και μεγάλης διάρκειας.



**Σχήμα 3.9** Καμπύλες διηλεκτρικής αποκατάστασης (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλου)

Από τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα της διηλεκτρικής αποκατάστασης εξαρτάται κυρίως από τη διάρκεια παρά από την ένταση του τόξου.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις στα διηλεκτρικά, στα υγρά, με την διάσπαση, δημιουργούνται ακαθαρσίες και κατάλοιπα που παραμένουν είτε διαλυμένα είτε σαν αιωρήματα μέσα στο διηλεκτρικό, τα στερεά διηλεκτρικά καταστρέφονται από την διάσπαση και έτσι δεν παρουσιάζουν διηλεκτρική αποκατάσταση. Και κλείνοντας στα αέρια διηλεκτρικά το τόξο ενδεχομένως να προκαλέσει αλλοιώσεις στα ηλεκτρόδια προκαλώντας έτσι μόνιμη παραμόρφωση του πεδίου, αυτό είναι πολύ πιο έντονο στα ομοιογενή πεδία.

### 3.13 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ

#### 3.13.1 ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΔΙΑΚΕΝΟ

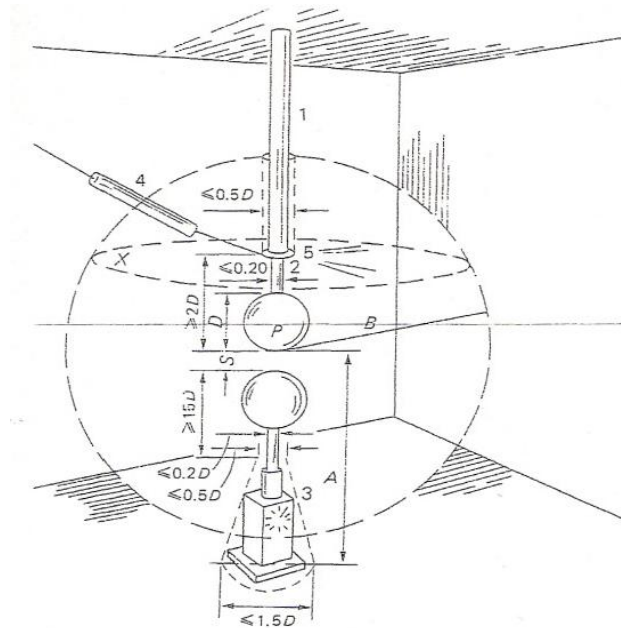
Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα διάφορα είδη των διακένων που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα εργαστήρια υψηλών τάσεων, και που επίσης μπορούν να μελετηθούν με την κατασκευή, στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Η μέτρηση των υψηλών τάσεων μπορεί να γίνει με το γνωστό, διάκενο σφαιρών. Το σφαιρικό διάκενο είναι στην ουσία μια συσκευή βαθμονόμησης παρά μια συσκευή μετρήσεως. Η βασική ιδέα στηρίζεται στο ότι ένα συγκεκριμένο διάκενο διασπάται σε ορισμένη τάση. Μετρήσεις που γίνονται σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο δίνουν αποτελέσματα που μπορούν να συγκριθούν και να έχουν απόκλιση  $\pm 3\%$  μεταξύ τους, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη και τους συντελεστές διόρθωσης για την πίεση και τη θερμοκρασία. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πίνακες που περιέχουν τις τάσεις διασπάσεως για διάφορα διάκενα μεταξύ των σφαιρών, και για διαμέτρους των σφαιρών από 20 mm έως 2 m. Να σημειωθεί εδώ ότι η σφαίρες πρέπει να έχουν την ίδια διάμετρο. Επίσης με σφαιρική διάταξη μεγάλης διαμέτρου και μικρού διακένου επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν ομοιογενές πεδίο και μικρή διασπορά των τιμών των τάσεων διασπάσεως. Η διάταξη αυτή όμως δίνει ακριβή αποτελέσματα για διαστάσεις διακένου έως και το ήμισυ της διαμέτρου των σφαιρών, γιατί μετά την τιμή αυτή τα αποτελέσματα καθίστανται ανακριβή λόγω της αλλοιώσεως του ηλεκτρικού πεδίου.

Το διάκενο σφαιρών είναι κατάλληλο για μετρήσεις εναλλασσομένων, κρουστικών και συνεχών τάσεων. Όπως έχει είδη προαναφερθεί, η τάση διάσπασης ενός διακένου παρουσιάζει στατιστική διασπορά και εξαρτάται από τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης, τη γεωμετρική μορφή του διακένου, την υγρασία, την θερμοκρασία την πίεση κ.λ.π. όμως, επιπλέον, η τάση αυτή παρουσιάζει μικρότερη στατιστική διασπορά για εναλλασσόμενη και κρουστική τάση εάν τα σφαιρικά διάκενα έχουν διάμετρο αρκετά μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Χρησιμοποιούνται δύο διατάξεις σφαιρικών διακένων, το κάθετο και το οριζόντιο. Στο σχήμα 3.10 που ακολουθεί φαίνεται το κάθετο διάκενο και οι διαστάσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να γίνουν αξιόπιστες και σωστές μετρήσεις. Οι διαστάσεις A και B στο σχήμα καθορίζουν τις απαιτούμενες αποστάσεις από γειωμένα αντικείμενα που πρέπει να τηρούνται έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των σφαιρών και κατά συνέπεια ούτε και η διάσπαση μεταξύ τους. Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί φαίνονται αυτές οι διαστάσεις για διάφορες διαμέτρους σφαιρών .





Σχήμα 3.10 Κάθετο διάκενο σφαιρών

Πίνακας 3.1 Αποστάσεις A και B για διάφορες διαμέτρους των σφαιρών.

Διάμετρος σφαιρών  D (mm)	Ελάχιστη τιμή του A	Μέγιστη τιμή του A	Ελάχιστη τιμή του B
62.5	7D	9D	14S
125	6	8	12
250	5	7	10
500	4	6	8
750	4	6	8
1000	3.5	5	7
1500	3	4	6
2000	3	4	6

Η αντίσταση που εμφανίζεται σε σειρά (σχήμα 3.10 με τον αριθμό 4) συνδέει την πηγή της τάσης με το διάκενο και ο σκοπός της είναι να

περιορίσει το ρεύμα κατά τη διάσπαση και να αποτρέψει ταλαντώσεις στην πηγή της τάσης κατά την διάσπαση. Η τιμή αυτής της αντίστασης ποικίλει από 100 έως 1 ΜΩ για εναλλασσόμενες και συνεχείς τάσεις ενώ δεν είναι μεγαλύτερη από 500 Ω για κρουστικές τάσεις.

Για να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των σφαιρών θα πρέπει να τηρούνται ορισμένες σημαντικές προϋποθέσεις όπως: Η επιφάνεια των σφαιρών θα πρέπει να είναι καθαρή. Αυτό σημαίνει ότι δεν πρέπει να υπάρχουν στην επιφάνεια προεξοχές ή παραπροϊόντα λόγω συχνής χρήσης. Ειδικά κατά την μέτρηση συνεχών τάσεων δεν θα πρέπει να υπάρχει καθόλου σκόνη. Γιατί αν υπάρχουν σωματίδια σκόνης, αυτά υπό την επίδραση συνεχούς τάσεως, θα έλθουν σε επαφή με ένα από τα ηλεκτρόδια θα φορτισθούν και θα οδεύσουν προς το αντίθετο ηλεκτρόδιο λόγω των δυνάμεων του πεδίου και έτσι είναι δυνατόν η διάσπαση να επέλθει νωρίτερα.

Για μετρήσεις με σφαιρικό διάκενο, σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, η τάση διάσπασης δίνεται από πίνακες, διαφορετικά θα πρέπει να γίνει αναγωγή των τιμών του πίνακα στην πραγματική τιμή της τάσης διάσπασης. Συνοψίζοντας η διαδικασία μέτρησης με σφαιρικό διάκενο έχει ως εξής:

- Εφαρμόζεται τάση στο διάκενο με αργό ρυθμό, ώστε να αποφευχθεί τυχών εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων.
- Φθάνοντας στην επιθυμητή τάση αρχίζει η μείωση του μήκους του διακένου μέχρι την διάσπαση.
- Όταν γίνει η διάσπαση μετρείται το μήκος διακένου  $d$ .
- Από τους πίνακες στο παράρτημα γνωρίζοντας την διάμετρο των σφαιρών  $D$  και το μήκος του διακένου  $d$  βρίσκεται η τάση διάσπασης. Η τιμή αυτή είναι μέγιστη και αναφέρεται σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (βλέπε παράγραφο 3.11).
- Παράλληλα μετρείται η πίεση και η θερμοκρασία. Αν οι τιμές διαφέρουν από τις κανονικές συνθήκες ανάγεται η τιμή του πίνακα στην πραγματική τιμή της τάσης διάσπασης, υπολογίζοντας τον συντελεστή  $\delta$ , σχέση 3.23.

Ισχύει :

$$U_{S(p,0)} = \delta U_{S(K\Sigma)} \quad (3.25)$$

Η σχέση 3.23 ισχύει όταν :

$$0.95 \leq \delta \leq 1.05 \quad (3.26)$$

Αν η σχέση 3.26 δεν ικανοποιείται τότε αντί για το  $\delta$  χρησιμοποιείται ο συντελεστής  $k$ , από τον πίνακα 3.2

**Πίνακας 3.2** Συντελεστής  $k$

$\delta$	0.7	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
$k$	0.72	0.76	0.81	0.86	0.91	0.95	1.00	1.05	1.09	1.13

- f. Η τελική τιμή της τάσης προκύπτει ως ο μέσος όρος τριών διαδοχικών μετρήσεων που δεν διαφέρουν μεταξύ τους πάνω από 3%.

Κλείνοντας πρέπει να αναφερθεί ότι τα σφαιρικά διάκενα χρησιμοποιούνται επιπλέον ως διακόπτες (κρουστική γεννήτρια), ως πυκνωτές Υ.Τ. με ελάχιστες απώλειες και με δυνατότητα μεταβολής της χωρητικότητας και ως προστατευτικά διάκενα.

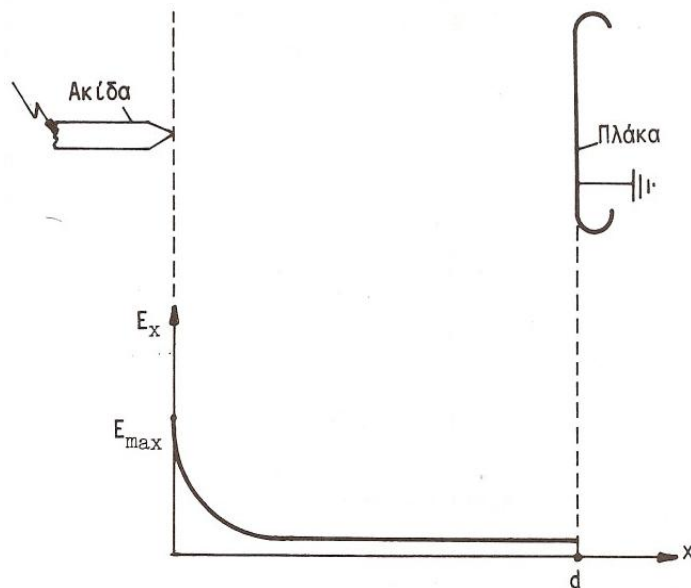
### 3.13.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΑΚΙΔΑΣ-ΠΛΑΚΑΣ

Αναφέρθηκε ότι σε ένα ανομοιογενές πεδίο η συνθήκη διάσπασης λόγω του μηχανισμού νηματίου (σχέση 3.18) απαιτεί ότι ο αριθμός των ιόντων σε μια στοιβάδα θα πρέπει να είναι ίσος ή μεγαλύτερος των  $10^8$ .

Σε μια ηλεκτροδιακή διάταξη ακίδας-πλάκας, παρατηρούνται εκκενώσεις και πριν την διάσπαση. Όταν η ακίδα είναι θετική, τα νηματία γίνονται προέκταση της ακίδας και έτσι το διάκενο διασπάτε εύκολα οπότε και η τάση διασπάσεως είναι σχετικά χαμηλή.

Όταν η ακίδα είναι αρνητική, τα ηλεκτρόνια ωθούνται σε περιοχές του ηλεκτρικού πεδίου με χαμηλότερη ένταση και απλώνονται σε σχήμα βεντάλιας ακολουθώντας τις γραμμές του πεδίου. Καινούργιες στοιβάδες είναι δύσκολο να σχηματιστούν και έτσι απαιτούνται ψηλότερες τιμές τάσεως για να επιτευχθεί η διάσπαση. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται για εργαστηριακούς σκοπούς όταν πρόκειται είτε να μελετηθεί η συμπεριφορά του αέρα (ή του αερίου) σε ανομοιογενές πεδίο είτε να μελετηθεί ο μηχανισμός διάσπασης και οι συνδεόμενοι με αυτόν παράμετροι. Τέλος, η διάταξη αυτή, χρησιμοποιείται σε συσκευές που χρησιμοποιούν συνεχή υψηλή τάση όπως συσκευές ακτίνων-Χ, γεννήτριες Van de Graaf κ.λ.π. λειτουργούν δηλαδή με αρνητική τάση.

Στο παρακάτω σχήμα 3.11 φαίνεται σχηματικά το διάκενο ακίδας-πλάκας καθώς και η πεδιακή ένταση κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του διακένου.



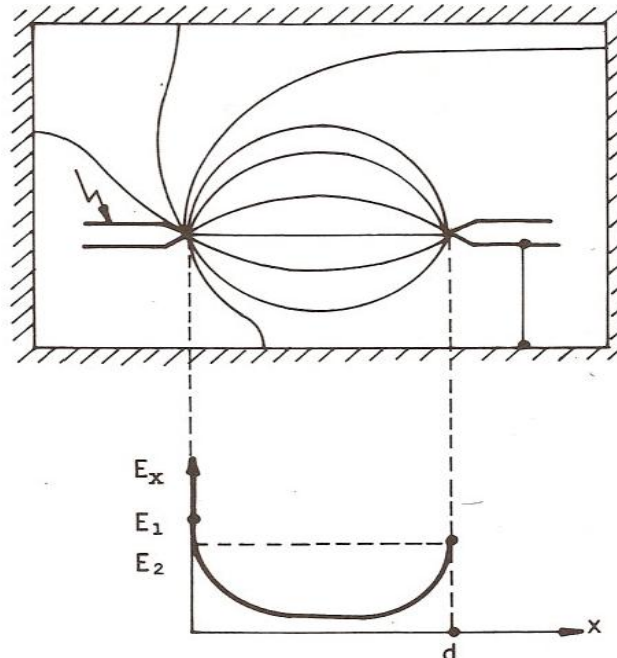
**Σχήμα 3.11** Διάκενο ακίδας-πλάκας και πεδιακή ένταση κατά μήκος του άξονα συμμετρίας διακένου. (Πηγή: Υψηλές Τάσεις Ι-Σταθόπουλος)

Όπως φαίνεται, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο άκρο του ηλεκτροδίου με τη μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας, δηλαδή στην ακίδα. Όταν απομακρυνόμαστε από την ακίδα, κινούμενοι πάνω στον άξονα συμμετρίας του σπινθηριστή, η ένταση του πεδίου μειώνεται σημαντικά, στην αρχή ταχύτατα και στη συνέχεια με πολύ βραδύτερο ρυθμό, μέχρι να φτάσει την ελάχιστη τιμή της, στην επιφάνεια της πλάκας. Εξάλλου, θα μπορέσουμε στο κεφάλαιο 6, να δούμε καλύτερα την μορφή που έχει η πεδιακή ένταση με την βοήθεια ενός υπολογιστικού πακέτου, για όλα τα είδη γεωμετριών που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή.

### 3.13.3 ΔΙΑΚΕΝΟ ΑΚΙΔΑΣ-ΑΚΙΔΑΣ

Σε μια τέτοια διάταξη, δεν παρατηρείται διαφορά στα φαινόμενα μεταξύ αρνητικής και θετικής τάσεως λόγω της συμμετρίας. Η τάση διασπάσεως είναι ψηλότερη από αυτήν της διάταξης ακίδας- πλάκας με την ακίδα θετική και χαμηλότερη από αυτήν της διάταξης ακίδας-πλάκας με την ακίδα αρνητική. Όπως η διάταξη ακίδας-πλάκας έτσι και η διάταξη ακίδας-ακίδας είναι πολύ χρήσιμη για την μελέτη του αέρα, καθώς και οποιοδήποτε άλλου μονωτικού υλικού, και του μηχανισμού διάσπασης σε ανομοιογενή πεδία.

Στο παρακάτω σχήμα (3.12) διακρίνεται σχηματικά το διάκενο ακίδας-ακίδας. Φαίνονται καθαρά οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου καθώς και η μεταβολή της έντασης  $E_x$  του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της διάταξης, συναρτήσει της απόστασης  $x$  από την αγείωτη ακίδα.

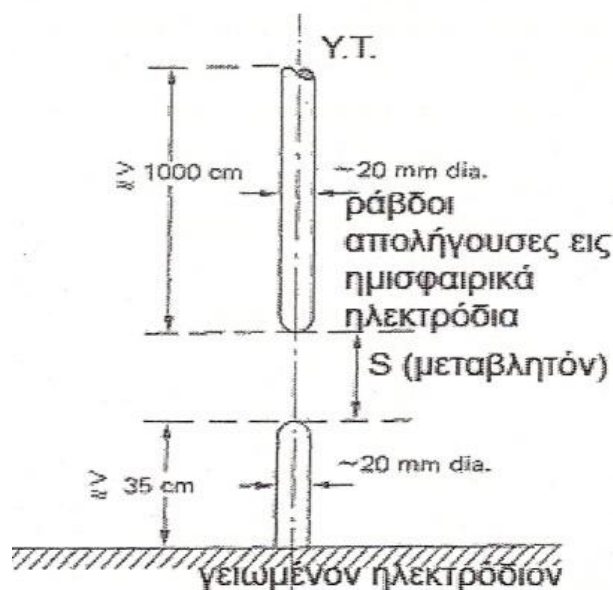


**Σχήμα 3.12** Ηλεκτρικό πεδίο διακένου ακίδας-ακίδας με γειωμένη την μία ακίδα. (Πηγή: Υψηλές Τάσεις Ι-Σταθόπουλος ),

Παρατηρείται ότι η ένταση του πεδίου παίρνει τη μέγιστη τιμή της στις απολίξεις των δύο ακίδων και την ελάχιστη στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο ακίδων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, επειδή στο εργαστήριο πρέπει να γειωθεί το ένα από τα δύο ηλεκτρόδια, το ηλεκτρόδιο γης είναι μεγάλης έκτασης, γιατί περιλαμβάνει, εκτός από την γειωμένη ακίδα και όλα τα γειωμένα αντικείμενα του εργαστηρίου, το δάπεδο, τους τοίχους κ.λ.π. Έτσι οι δυναμικές γραμμές που ξεκινάνε από την υπό τάση ευρισκομένη ακίδα δεν φτάνουν όλες στη γειωμένη, με αποτέλεσμα η ένταση  $E_2$  του πεδίου στο άκρο της τελευταίας να είναι λίγο μικρότερη από την ένταση  $E_1$  του πεδίου στο άκρο της αγείωτης ακίδας. Η  $E_1$  αποτελεί τη μέγιστη τιμή  $E_{max}$  της έντασης του πεδίου.

### 3.13.4 ΔΙΑΚΕΝΟ ΡΑΒΔΩΝ

Το διάκενο ράβδων χρησιμοποιείται είτε για την κατά προσέγγιση μέτρηση τιμών κορυφής εναλλασσομένων τάσεων είτε για μετρήσεις κρουστικών τάσεων. Η ακρίβεια του διακένου είναι στο  $\pm 8\%$ , ενώ μπορεί αυτή να γίνει και  $\pm 2\%$  για μέτρηση συνεχών τάσεων. Το μήκος των ράβδων συνίσταται να είναι από 15 έως 75 εκατοστά και το διάκενο μεταξύ τους από 2 έως 200 εκατοστά.



**Σχήμα 3.13** Διάταξη ράβδου-ράβδου για μέτρηση συνεχών τάσεων. (Πηγή: Στοιχεία Υψηλών Τάσεων-Μ.Δανίκας)

Η τάση διασπάσεως επηρεάζεται από την υγρασία και την πυκνότητα του αέρα. Όσο δε για την περίπτωση των κρουστικών τάσεων τόσο η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή όσο και το Ινστιτούτο των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών των Η.Π.Α. προτείνουν να είναι οι ράβδοι οριζόντιοι και σε απόσταση 1.5 με 2 φορές το διάκενο από το δάπεδο. Το διάκενο ράβδων χρησιμοποιήθηκε κυρίως για μετρήσεις κρουστικών τάσεων, αλλά λόγω της μεγάλης διασποράς των τάσεων διασπάσεως και της μεγάλης επιδράσεως της υγρασίας, η χρήση του έχει περιορισθεί σημαντικά.

## Βιβλιογραφία

**Κ.Α.ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ** ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις Αριστοτέλειο  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, πρώτη έκδοση

**ΜΙΧΑΗΛ ΔΑΝΙΚΑΣ** ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις ΣΜΠΙΛΙΑΣΑ.Ε.Β.Ε. Β'  
Έκδοση

**ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ** ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΟ ΔΙΑΚΕΝΟ ΑΕΡΑ/ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ  
Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Μάρτιος 2006

**Ι. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ** ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ Ι Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

Στα πλαίσια της πτυχιακής αυτής εργασίας κατασκευάστηκε, μία εργαστηριακή διάταξη με την οποία μπορεί εύκολα να γίνει η διάσπαση του αέρα, με οποιοδήποτε από τους τύπους διάκενου που προαναφέρθηκαν. Η διάταξη αυτή σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να προσφέρει και να συνδυάζει ταυτόχρονα αρκετά πλεονεκτήματα, όπως: εύκολη απλή και γρήγορη αντικατάσταση των ηλεκτροδίων (ακίδων, σφαιρών, ράβδων), τροχήλατη κατασκευή για εύκολη μετακίνηση, ικανότητα μέτρησης διάκενου, τηλεχειριζόμενη κίνηση των ηλεκτροδίων, σχετικά απλή κατασκευή με δυνατότητα μελλοντικών μετατροπών σε αυτήν για περαιτέρω βελτίωση ή εξέλιξη αυτής.

### 4.2 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ-ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Αρχικά κατασκευάστηκε ένα ξύλινο πλαίσιο το οποίο δίνει την δυνατότητα να υπάρχουν δύο επίπεδα, το πάνω όπου βρίσκονται τα ηλεκτρόδια και το κάτω που βρίσκεται ο μηχανισμός κίνησης αυτών. Χρησιμοποιήθηκαν ξύλινοι δοκοί, (τύπος ξύλου σουηδικό), διαστάσεων 60X40 mm. Ο κάτω χώρος που βρίσκεται ο μηχανισμός κίνησης περιβάλλεται από ξύλο τύπου mdf, επίσης με το ίδιο ξύλο χωρίζονται και τα δύο επίπεδα μεταξύ τους. Το πάνω επίπεδο αποτελείται μόνο από τις τέσσερις κολόνες του πλαισίου ώστε να υπάρχει η δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης του φαινομένου κατά την εξέλιξη του, αλλά και να γίνεται εύκολα αντικατάσταση των ηλεκτροδίων. Κατά μήκος των τεσσάρων κολώνων έχουν γίνει εγκοπές βάθους 4mm και πλάτους 3mm ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί μονωτικό διάφραγμα και έτσι να δίνεται η δυνατότητα πραγματοποίησης επιπλέον εργαστηριακών ασκήσεων. Η επιλογή του ξύλου έγινε με δύο κριτήρια. Το ένα είναι ότι το ξύλο είναι ένα μονωτικό υλικό και έτσι δεν επηρεάζει το ηλεκτρικό πεδίο των ηλεκτροδίων, και το δεύτερο κριτήριο είναι ότι το ξύλο είναι ένα υλικό που επεξεργάζεται εύκολα και έχει ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, ότι μπορεί εύκολα να διορθωθεί οποιοδήποτε κατασκευαστικό λάθος προκύψει κατά την πορεία υλοποίησης της εργασίας, κάτι το οποίο βέβαια αποδείχτηκε επιβεβλημένο καθώς σε μία πρωτότυπη κατασκευή συχνά επιβάλλεται να γίνονται αλλαγές στα αρχικά σχέδια αφού προκύπτουν πολλά εμπόδια.

Στο κέντρο της οροφής του πάνω επιπέδου υπάρχει βιδωμένη μία βίδα, μήκους 10cm, η οποία με την κατάλληλη επεξεργασία στον τόρνο έχει δύο διαφορετικά σπειρώματα. Το ένα σπείρωμα μέχρι την μέση είναι 8x0,75mm και χρησιμεύει για να βιδώνονται επάνω του τα ηλεκτρόδια, το άλλο σπείρωμα είναι το κλασσικό 8x1,25mm και χρησιμοποιείται για να στερεώνεται στην ξύλινη κατασκευή και για να βιδωθεί επάνω του ο αγωγός που θα φέρει την υψηλή τάση. Το υλικό κατασκευής της βίδας είναι



ανοξειδωτος χάλυβας για αντοχή στη διάβρωση και στο συχνό βίδωμα-ξεβίδωμα των ηλεκτροδίων λόγω της σκληρότητας που τον χαρακτηρίζει. Η βίδα αυτή περιβάλλεται από πολυαμίδιο (ertalon) κατάλληλα επεξεργασμένο στον τόρνο. Η επιλογή αυτού του υλικού έγινε με τρία κριτήρια. Την αισθητική, τις μονωτικές ιδιότητες, και την εύκολη επεξεργασία του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτού του υλικού είναι η καλή αντίσταση σε φθορά και καλή αντίσταση τριβής, υψηλή αντοχή σε κρούση, ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες, άριστη χημική αντίσταση, άριστες ιδιότητες αποκόλλησης, υψηλή μηχανική αντοχή, ακαμψία και αντίσταση σε ερπυσμό, πολύ καλές ηλεκτρο-μονωτικές και διηλεκτρικές ιδιότητες και τέλος άριστη μηχανουργική επεξεργασιμότητα.

Στο πάτωμα του πάνω επιπέδου, το οποίο χωρίζει και τα δύο επίπεδα, υπάρχει ένας άξονας από πολυαμίδιο στο κέντρο του οποίου είναι βιδωμένη μία βίδα ίδιας κατασκευής με την πάνω, στην οποία μπορούν να βιδώνονται οι ακίδες. Ο άξονας αυτός έχει την δυνατότητα να ανεβοκατεβαίνει χωρίς να περιστρέφεται. Αυτό επιτυγχάνεται με μια αυλάκωση που του έχει γίνει, με φρέζα, σε συνεργασία με ένα κατάλληλης κατασκευής έδρανο που βρίσκεται κάτω από το πάτωμα του επιπέδου. Στο κέντρο του άξονα και κατά μήκος αυτού έχει γίνει μια οπή κατάλληλης διαμέτρου από όπου περνάει το καλώδιο που θα συνδέσει την ακίδα με την γη, αφού η κάτω ακίδα είναι η γειωμένη

Ο άξονας αυτός παίρνει κίνηση από ένα ατέρμονα κοχλία τετραγωνικού σπειρώματος διαμέτρου 20 mm. Με κατάλληλη επεξεργασία στον τόρνο έχει επιτευχθεί η ένωση ατέρμονα-άξονα και η κίνηση και των δύο χωρίς την περιστροφή του δεύτερου. Ο ατέρμονας είναι βιδωμένος πάνω σε ένα μεγάλο περικόχλιο το οποίο με την σειρά του είναι κολλημένο πάνω σε μια λαμαρίνα διαμορφωμένη σε σχήμα 'Π', που όπως θα δούμε παρακάτω παίζει και το ρόλο του οδηγού στον κινητήρα. Έτσι με την περιστροφή του, ο ατέρμονας, αφού το περικόχλιο είναι πακτωμένο, αναγκάζεται εκτός από περιστροφική κίνηση να κάνει και παλινδρομική δηλαδή να ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με την φορά περιστροφής του, συμπαρασύροντας όμως έτσι τον άξονα μαζί του.

Η κίνηση του ατέρμονα γίνεται με την βοήθεια ενός κινητήρα. Τον κινητήρα των 'δανειστήκαμε' από ένα παλιό φορτηγό όπου ο σκοπός ύπαρξης του ήταν η κίνηση των υαλοκαθαριστήρων. Πρόκειται για ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος, μόνιμου μαγνήτη και η ισχύς του είναι 50W. Ο κινητήρας φέρει ενσωματωμένο μειωτήρα, ο μειωτήρας απαιτείται για την μείωση των στροφών του κινητήρα με ταυτόχρονο πολλαπλασιασμό της ροπής του και για την μετατροπή της γωνίας της κίνησης κατά 90°. Με κατάλληλη επεξεργασία και πάλι στον τόρνο έχει γίνει προσαρμογή του άξονα που βγαίνει από τον μειωτήρα με τον ατέρμονα. Όπως προαναφέραμε εδώ υπάρχει μια λαμαρίνα σε σχήμα 'Π' η οποία είναι πακτωμένη στο δάπεδο της κατασκευής. Αυτή εξυπηρετεί δύο σκοπούς αφενός μεν στηρίζει το περικόχλιο όπως αναφέραμε πριν αφετέρου δε παίζει το ρόλο του οδηγού του κινητήρα. Δηλαδή, μέσα στο

αυλάκι που σχηματίζει το 'Π' βρίσκεται το μισό σχεδόν κέλυφος του κινητήρα, σημειωτέο δε ότι ο κινητήρας εκτός από τη μηχανική σύνδεση που έχει με τον ατέρμονα δεν στηρίζεται κάπου αλλού. Έτσι όταν βρεθεί υπό τάση ο κινητήρας και αρχίζει να περιστρέφεται ο άξονας του, άρα και ο ατέρμονας, το όλο σύστημα δηλαδή κινητήρας-ατέρμονας-άξονας από ertalon, ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με την φορά περιστροφής του κινητήρα. Εδώ ο κινητήρας, αφού δεν έχει μηχανική στερέωση κάπου, θα έπρεπε να αρχίσει να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του αυτό όμως δεν γίνεται καθώς βρίσκεται μέσα στο αυλάκι που σχηματίζει η λαμαρίνα που προαναφέρθηκε. Το 'Π' λοιπόν για τον κινητήρα παίζει διπλό ρόλο, πρώτον δεν τον αφήνει να περιστραφεί γύρω από τον άξονα του και δεύτερον εξασφαλίζει ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση, σε συνεργασία βέβαια με το περικόχλιο αλλά και το έδρανο του άξονα.

Υπάρχει όμως και μια ηλεκτρολογική εγκατάσταση που εξασφαλίζει την σωστή λειτουργία του κινητήρα. Τα βασικά στοιχεία αυτής είναι: ένα τροφοδοτικό, δύο πίνακες ελέγχου, δύο τερματικοί διακόπτες και ένα τηλεχειριστήριο.

Αρχικά υπάρχει ένας πίνακας ελέγχου εξωτερικά της κατασκευής. Σε ένα πλαστικό κουτί έχει τοποθετηθεί μία διάταξη που σκοπό έχει την προστασία του δικτύου από τυχόν επικίνδυνες υπερτάσεις που μπορεί να έλθουν από την κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα πρώτα από όλα η τάση του δικτύου οδηγείτε σε ένα μετασχηματιστή δηλαδή 230/110V για γαλβανική απομόνωση. Στην συνέχεια οδηγείτε στις ασφαλιστικές διατάξεις που είναι μια ασφάλεια βραδείας τήξεως 4A και ένας μικροαυτόματος 6A. Αμέσως μετά παρεμβάλλονται δύο απαγωγείς υπερτάσεων<sup>1</sup>. Τέλος μετά τους απαγωγείς υπάρχει ένα ρελέ τύπου λυχνίας, με πηνίο στα 110V, που σε συνεργασία με ένα εξωτερικό διακόπτη ON/OFF παρέχει ή όχι, τάση στην έξοδο του πίνακα. Για είσοδο και έξοδο στο κιβώτιο επιλέξαμε ένα ρευματολήπτη και ένα ρευματοδότη αντίστοιχα. Από τον ρευματοδότη στην έξοδο του πίνακα τροφοδοτείτε το τροφοδοτικό της διάταξης.

Για την τροφοδοσία χρησιμοποιήθηκε ένα απλό και κοινό στην αγορά τροφοδοτικό με τα εξής χαρακτηριστικά: 100-230V AC-12VDC 100W. Η τροφοδοσία του γίνεται από τον πίνακα που προαναφέρθηκε. Ο δεύτερος πίνακας ελέγχου περιλαμβάνει δύο βυσματωτά ρελέ τύπου λυχνίας με πηνίο στα 12V DC. Το κάθε ένα ρελέ είναι για την δεξιόστροφη και αριστερόστροφη περιστροφή του κινητήρα, έτσι διαθέτουν τρεις μεταγωγικές επαφές, δύο για την αλλαγή της πολικότητας της τάσης του κινητήρα και μία για ηλεκτρική μανδάλωση. Οι τερματικοί διακόπτες είναι τοποθετημένοι κοντά στον κινητήρα με τέτοιο τρόπο ώστε να σταματούν την λειτουργία του όταν αυτός φτάνει στα δύο άκρα, πάνω και κάτω, με αυτό τον τρόπο προλαμβάνεται τυχόν

<sup>1</sup> Για τους απαγωγείς γίνεται αναφορά στην επόμενη παράγραφο 4.3

λανθασμένη χρήση από τον χρήστη. Ο κινητήρας φέρει επάνω του κατάλληλα διαμορφωμένο έλασμα ώστε αυτό να επενεργεί επάνω στους διακόπτες και να διακόπτεται η λειτουργία του. Το τηλεχειριστήριο είναι ένα κλασικό χειριστήριο βιομηχανικού τύπου με δύο κομβία UP και DOWN τα οποία διαθέτουν και μηχανική μανδάλωση. Το χειριστήριο συνδέεται με εύκαμπτο καλώδιο με τον πίνακα ελέγχου δίνοντας έτσι την δυνατότητα ελέγχου της κατασκευής από απόσταση, κάτι που θεωρείται απαραίτητο για μια εργαστηριακή κατασκευή.

Τέλος πάνω στον άξονα που βιδώνονται οι ακίδες έχει στερεωθεί μία μακριά ακίδα η οποία βγαίνει έξω από την κατασκευή μέσω μιας σχισμής που έχει γίνει στο πλαϊνό μέρος αυτής. Στο σημείο αυτό έχει βιδωθεί ένας χάρακας βαθμονομημένος σε εκατοστά, η ακίδα βγαίνει ακριβώς επάνω από το χάρακα και έτσι δίνεται η δυνατότητα μέτρησης του διακένου με σχετικά καλή ακρίβεια. Το μήκος του διακένου κυμαίνεται από 0cm μέχρι και 15,3cm. Παρακάτω υπάρχουν σχέδια και φωτογραφίες της διάταξης.

#### **4.3 ΑΠΑΓΩΓΕΙΣ ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ**

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι δυνατόν για διάφορους λόγους κάποια στιγμή να έχουμε υπερτάσεις. Οι υπερτάσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στις ηλεκτρικές συσκευές και την καταστροφή ηλεκτρονικών στοιχείων.

Για να προστατέψουμε αυτές τις συσκευές εγκαθιστούμε στην είσοδο του δικτύου παροχής ενέργειας αντιυπερτασικά φίλτρα. Τα αντιυπερτασικά φίλτρα προστατεύουν τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές από τις μεταβατικές υπερτάσεις, που προέρχονται κύρια από εκκενώσεις της ατμόσφαιρας αλλά και από την εκκίνηση ή διακοπή λειτουργίας μετασχηματιστών, κινητήρων ή γενικότερα από απότομη μεταβολή ενός φορτίου.

Η προστασία που παρέχουν αυτά μπορεί να γίνει σε δύο βαθμίδες:

- Μια βαθμίδα για γενική προστασία .
- Μια δεύτερη βαθμίδα για επιμέρους προστασία.

Τα αντιυπερτασικά γενικής προστασίας εγκαθίσταται παράλληλα στην γραμμή τροφοδοσίας και ενώνει τον αγωγό φάσης και ουδέτερου με την γείωση. Τα επιμέρους προστασίας είναι για να συμπληρώνουν τη γενική προστασία και συνδέονται σε σειρά με τις συσκευές που προστατεύουν. Αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι γενικής προστασίας.

Η προστασία των κυκλωμάτων γίνεται με στοιχεία που μειώνουν την εισερχόμενη υψηλή τάση. Αυτά τα στοιχεία μπορεί να είναι βαρύστορες, δίοδοι περιορισμού , δίοδοι ζένερ και δίοδοι αερίων. Ο τύπος του απαγωγέα

που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι με βαρύστορα. Οι βαρύστορες είναι ισχυρά μη γραμμικές αντιστάσεις. Γίνονται με βάση οξειδία του πυριτίου ή πρόσφατα με βάση οξειδία του ψευδαργύρου. Προστατεύουν κυκλώματα ονομαστικών τάσεων από 10V έως 10000V περίπου, δηλαδή εάν εμφανισθεί μία υπέρταση την μειώνουν στις επιτρεπόμενες τιμές αυτών των κυκλωμάτων. Χαρακτηριστικά τους είναι:

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας στο κύκλωμα μεταξύ των σημείων που θα συνδεθεί .
- Το ρεύμα που μπορεί να περάσει για ένα χρονικό διάστημα χωρίς να καταστραφεί.

Τα χαρακτηριστικά των απαγωγέων που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- a) Μέγιστη τάση λειτουργίας (δεν πρέπει να άγουν)  $U_c = 275V$ .
- b) Τάση στην οποία αποκόπτουν  $U_p \leq 1.5kV$
- c) Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να περάσει από τον απαγωγέα χωρίς αυτός να καταστραφεί  $I_{max} = 40kA$ .
- d) Ο χρόνος αντίδρασης  $t_A \leq 25ns$
- e) Το ονομαστικό ρεύμα εκκένωσης  $i_{sn} = 20kA$ .

#### 4.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Ξεκινώντας την εργασία αυτή υπήρχε διαθέσιμο από το εργαστήριο υψηλών τάσεων ένα σετ από ηλεκτρόδια. Σε αυτό μέσα υπήρχαν δύο ακίδες και δύο σφαίρες. Η διάμετρος των σφαιρών είναι 5.5 cm και το μήκος των ακίδων 5.5 cm. Στις ακίδες η γωνία μπροστά είναι 90° ενώ σε όλα τα ηλεκτρόδια υπήρχε σπείρωμα τύπου 8x0.75mm αυτός ήταν εξάλλου και ο λόγος που στην συνέχεια όλα έγιναν βάση αυτού του σπειρώματος.

Στην συνέχεια κατασκευάστηκαν στον τόρνο 3 ζευγάρια ακίδων και ένα ράβδων, όλα με το αυτό μήκος και σπείρωμα. Η διαφορά μεταξύ των ζευγαριών των ακίδων είναι στην γωνία μπροστά στην ακίδα. Δηλαδή κατασκευάστηκαν αντίστοιχα ένα ζευγάρι με 30° γωνία, ένα με 60° και ένα με 120°. Στο σχέδιο 12 παρακάτω φαίνεται μια ακίδα καθώς και η γωνία για την οποία γίνεται λόγος. Για τις ράβδους ισχύει το ίδιο για το μήκος με τη διαφορά ότι εδώ δεν έχουμε γωνία στο μπροστινό μέρος αλλά ομαλή καμπύλη. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των ακίδων είναι ο ανοξειδωτος χάλυβας.

Τέλος, κατασκευάστηκε με το ίδιο υλικό, μια στρογγυλή πλάκα, ώστε να δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί και άσκηση ακίδας- πλάκας, ή ράβδου-πλάκας ή σφαίρας-πλάκας.

#### 4.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ-ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

Κατά την διάρκεια των πρώτων μετρήσεων παρατηρήθηκε έντονο φαινόμενο κορόνα κατά μήκος του αγωγού που συνδέει την κατασκευή με την διάταξη υψηλής τάσης του εργαστηρίου. Έτσι κατόπιν υποδείξεων του εισηγητή τροποποιήθηκε κατασκευαστικά η διάταξη. Οι τροποποιήσεις που έγιναν περιγράφονται παρακάτω.

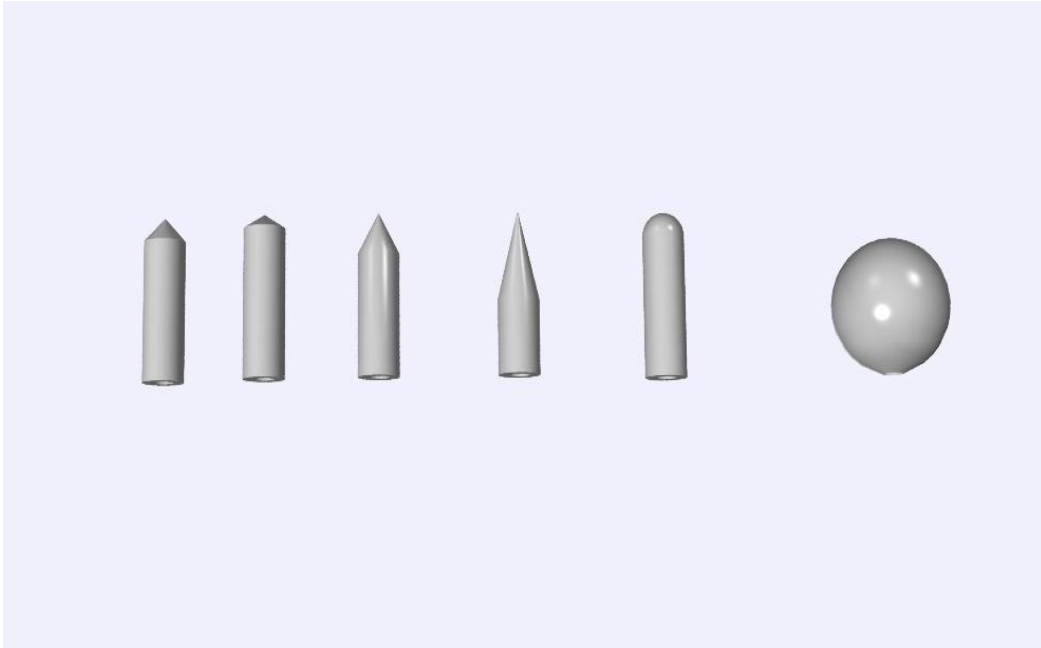
Μία σωλήνα αλουμινίου μήκους ενός μέτρου, και διαμέτρου 35x29 mm (εξωτερική-εσωτερική) διαμορφώθηκε κατάλληλα στον τόρνο ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στην διάταξη του εργαστηρίου, έτσι ώστε το πάνω άκρο της να ανέβει περίπου μισό μέτρο πάνω από την κατασκευή. Στο άκρο αυτό τοποθετήθηκαν δύο εξαρτήματα, μία στεφάνη για εξομάλυνση των πεδίων και αμέσως κάτω από την στεφάνη ένα κατάλληλα διαμορφωμένο άκρο στην φρέζα. Αντίστοιχα άλλο ένα ίδιο άκρο τοποθετήθηκε πάνω στην κατασκευή. Μεταξύ των δύο αυτών άκρων μπαίνει ένας εύκαμπτος αγωγός, που υπήρχε στο εργαστήριο, ο οποίος φέρει τα αντίστοιχα άκρα ώστε να συνδέσει την κατασκευή με την διάταξη. Αργότερα για καθαρά αισθητικούς λόγους, αντικαταστάθηκε ο εύκαμπτος αγωγός με μια σωλήνα αλουμινίου που στα άκρα της είχαμε προσαρμόσει δύο άκρα κατασκευασμένα στον τόρνο, όπως αυτά που είχε ο εύκαμπτος αγωγός.

Με αυτόν τον τρόπο αποφεύχθηκαν οι πολλές γωνίες και οι τραχιές επιφάνειες, που υπήρχαν στο όλο σύστημα σύνδεσης πριν την βελτίωση, και που σε αυτές οφειλόταν το φαινόμενο κορόνα.

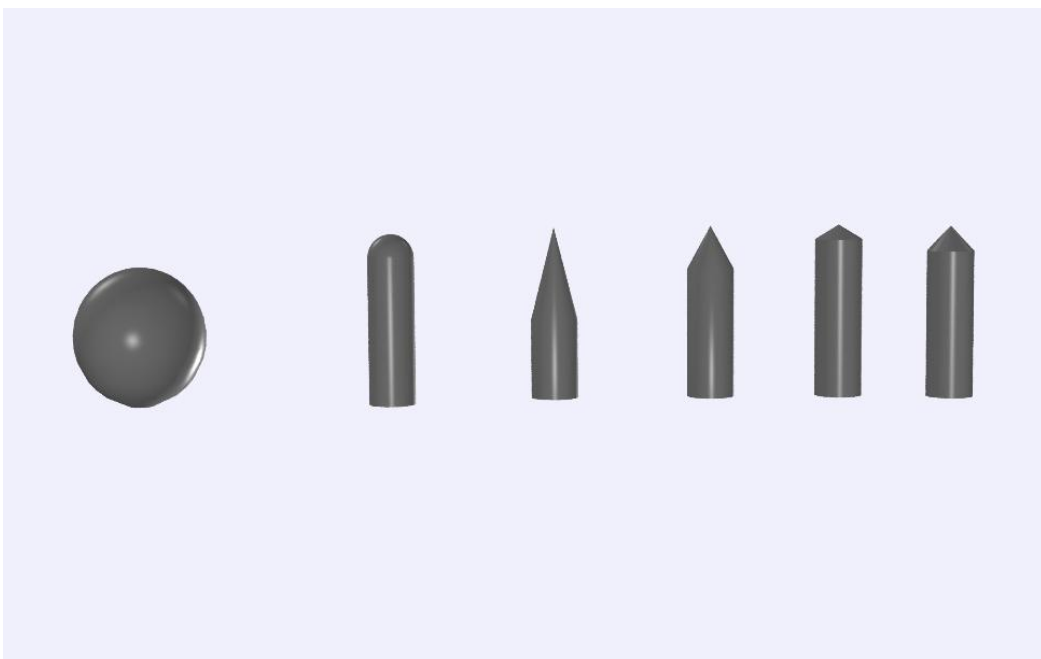
Αρχικά για την σύνδεση της κάτω ακίδας με την γη χρησιμοποιήθηκε καλώδιο τύπου H07V-R. Όμως κατά την διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκε φθορά της μόνωσης σε κάποια σημεία έτσι αυτό αντικαταστάθηκε. Στην θέση του τοποθετήθηκε καλώδιο τύπου FG4-D6.00 το οποίο χρησιμοποιείται για φωτεινές επιγραφές νέον και έχει μόνωση με πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε τάση διάσπασης. Επιπλέον για να αποκλειστεί κάθε κίνδυνος για το δίκτυο (δηλαδή μια πιθανή νέα διάσπαση της μόνωσης και να υπάρξει η επιστροφή μιας υπέρτασης στο δίκτυο όπου ενδεχομένως να προκαλούσε ζημιές) κατασκευάστηκε ο πίνακας που προηγείται του τροφοδοτικού. Έτσι, με τον μετασχηματιστή, έχουμε γαλβανική απομόνωση και με τους απαγωγείς τάσεων, πλήρη προστασία του δικτύου.

#### 4.6 ΣΧΕΔΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

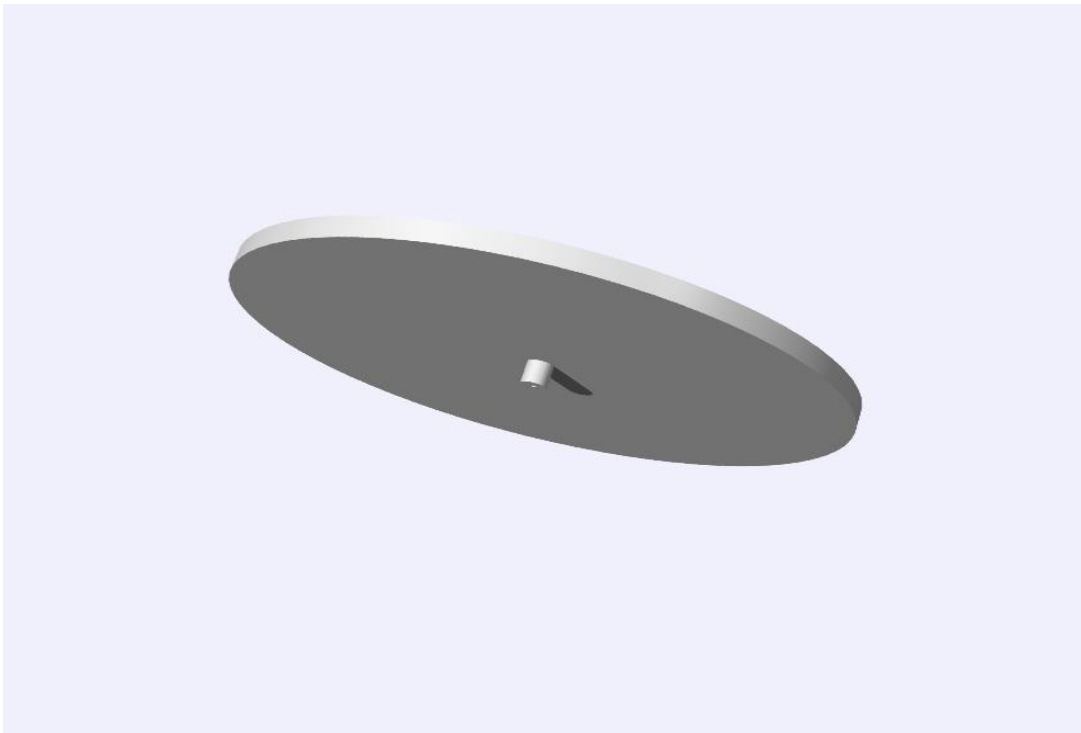
Ακολουθούν σχέδια και φωτογραφίες της κατασκευής έτσι ώστε να γίνουν κατανοητά όλα αυτά που προαναφέρθηκαν. Για τα σχέδια χρησιμοποιήθηκαν δύο προγράμματα το autoCAD και το Allplan.



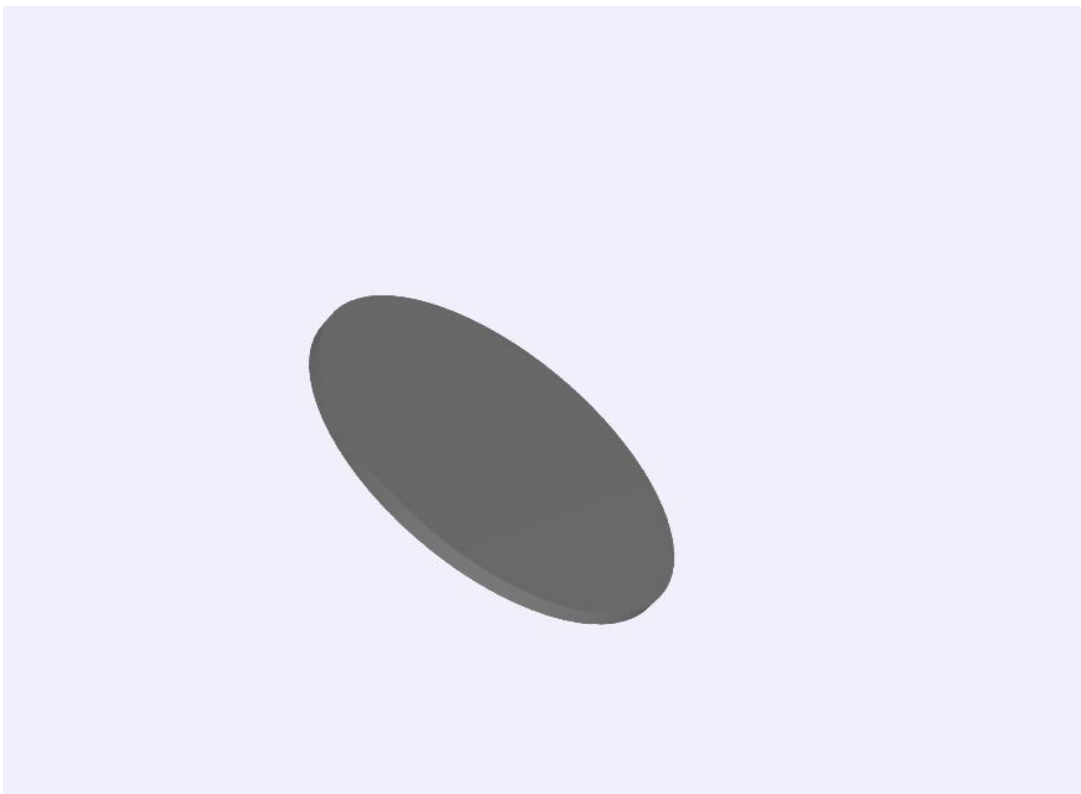
Σχέδιο 1. Ηλεκτρόδια (σφαίρα, ακίδες και ράβδος).



Σχέδιο 2. Ηλεκτρόδια (σφαίρα, ακίδες και ράβδος).



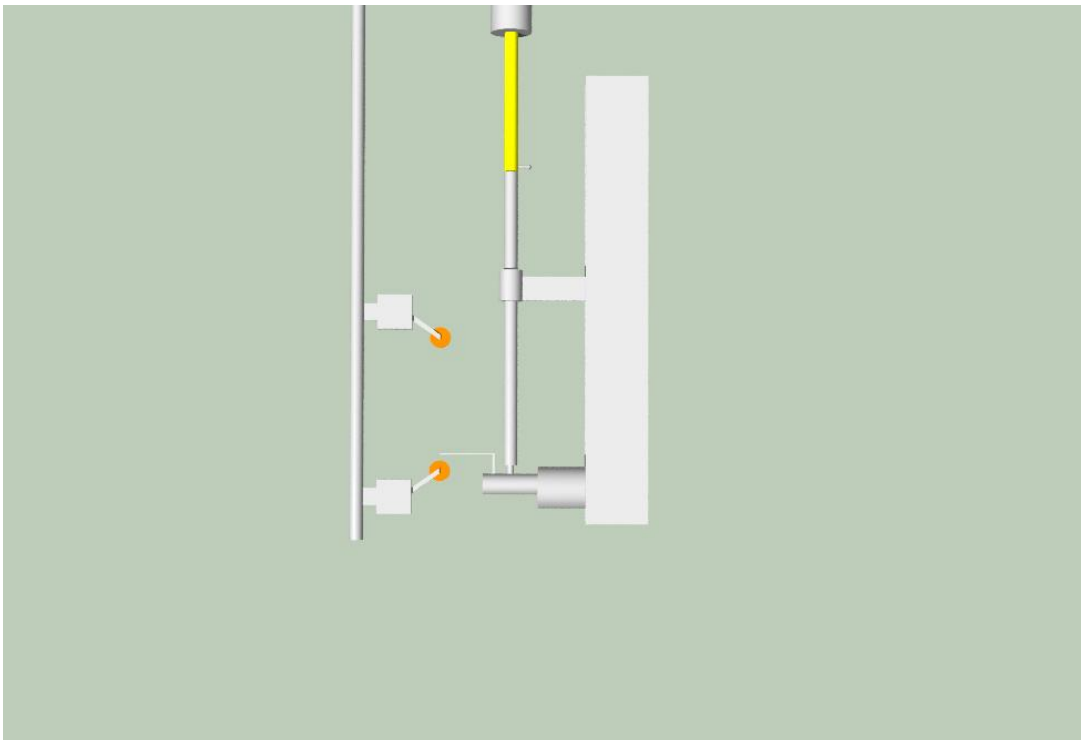
**Σχέδιο 3.** Ηλεκτρόδιο τύπου πλάκας.



**Σχέδιο 4.** Ηλεκτρόδιο τύπου πλάκας.



**Σχέδιο 5.** Μηχανισμός κίνησης ακίδας.



**Σχέδιο 6.** Μηχανισμός κίνησης ακίδας.

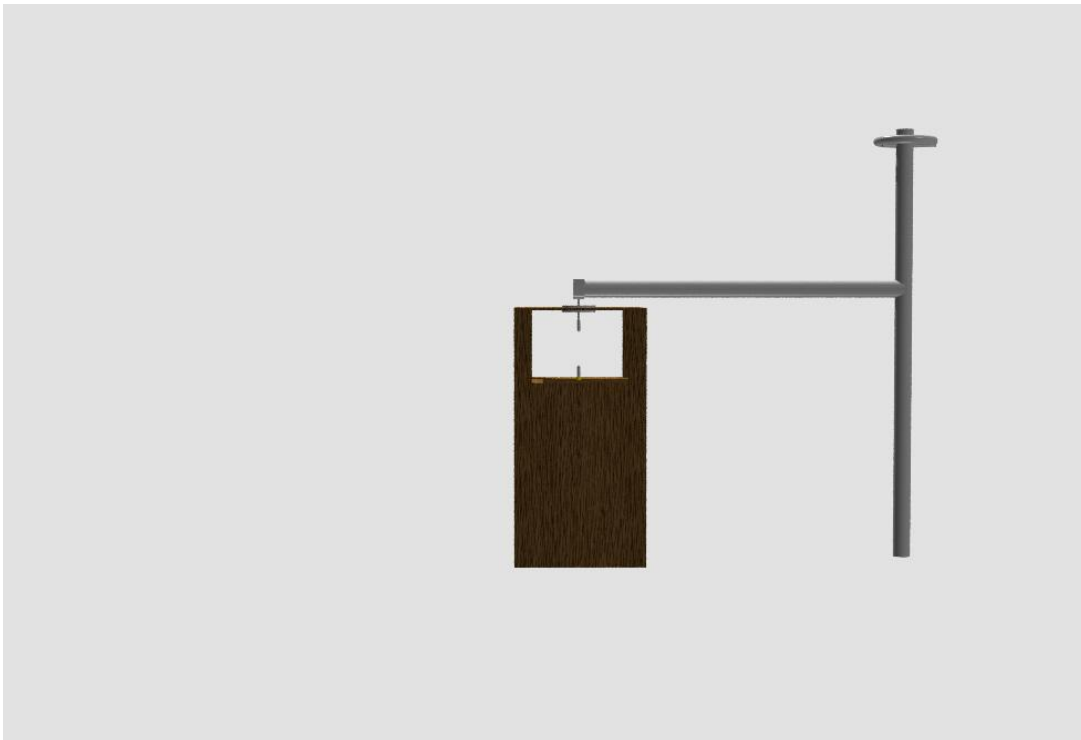




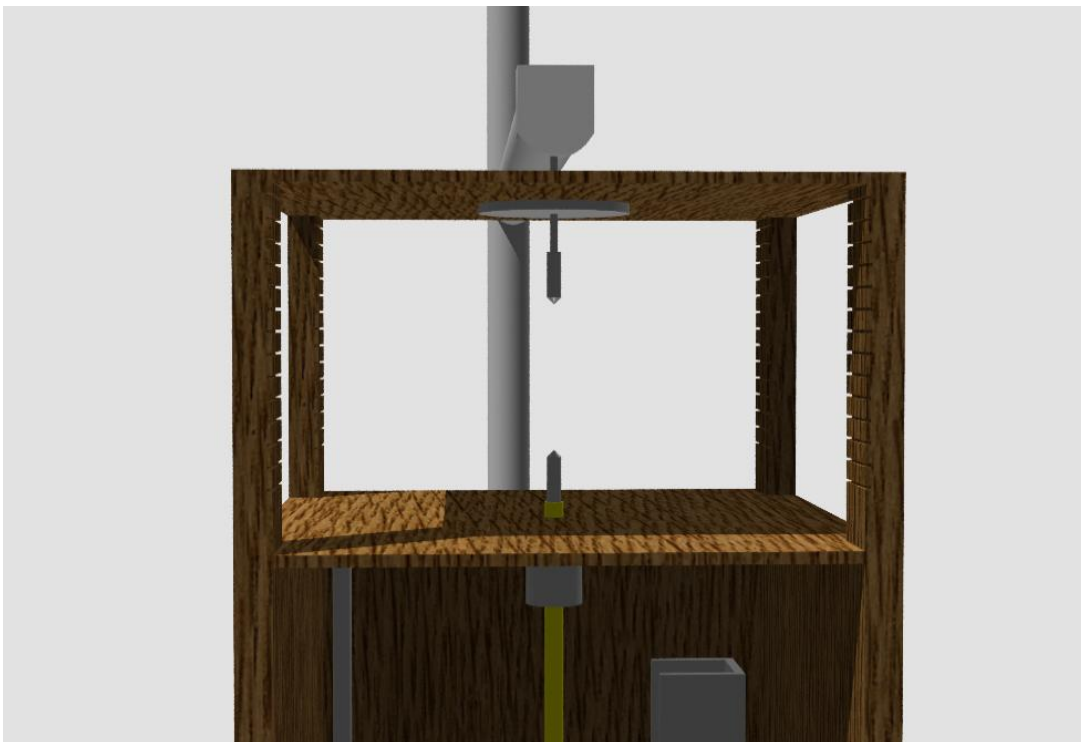
Σχέδιο 7. Γενική εικόνα της κατασκευής.



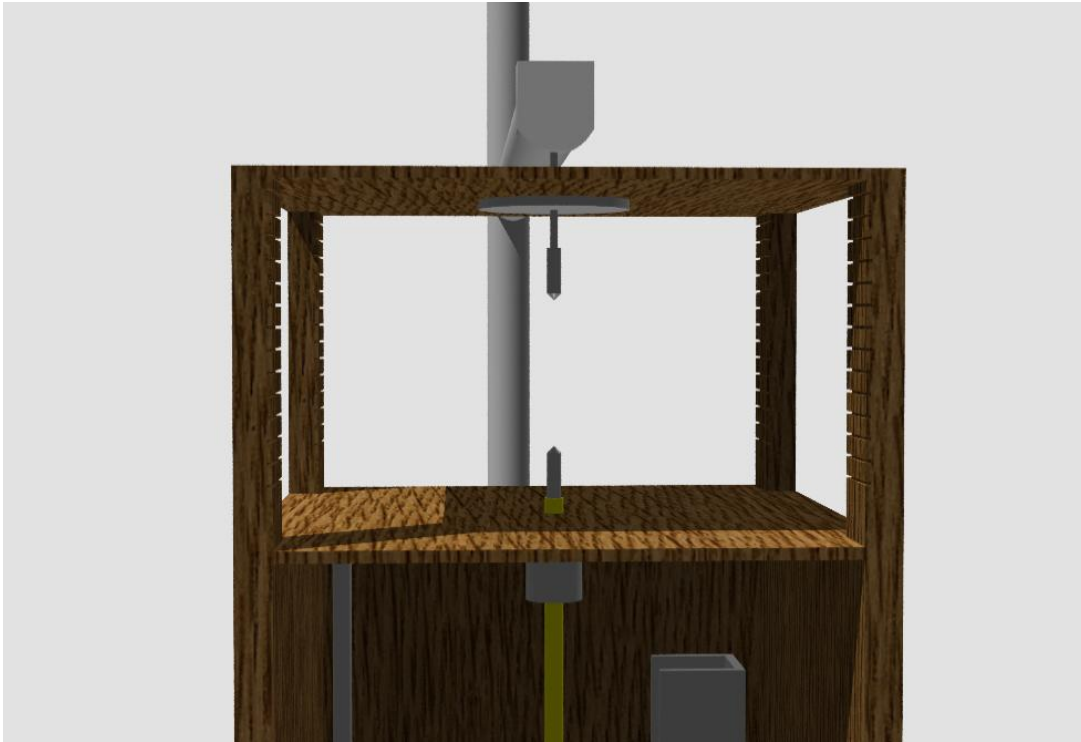
Σχέδιο 8. Γενική εικόνα της κατασκευής.



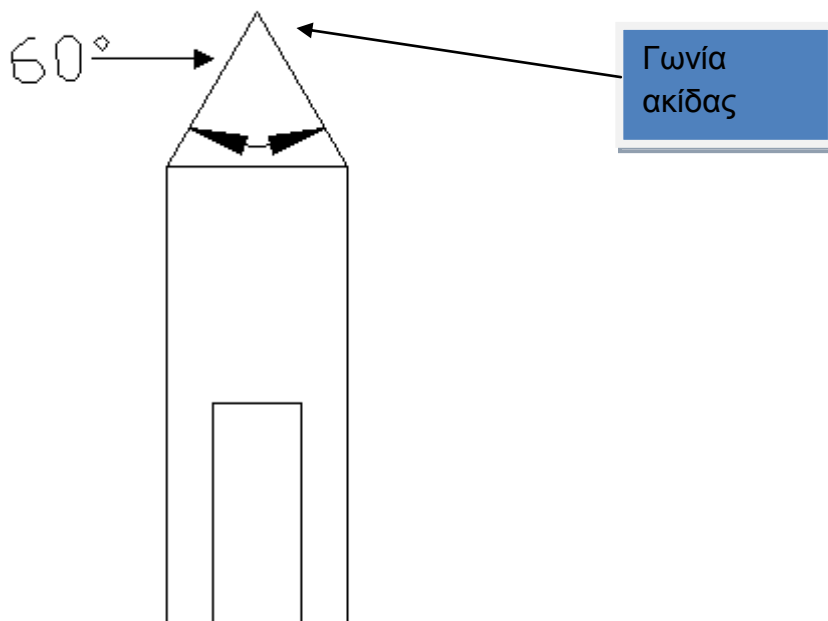
Σχέδιο 9. Γενική εικόνα της κατασκευής.



Σχέδιο 10. Σημείο τοποθέτησης ακίδων.

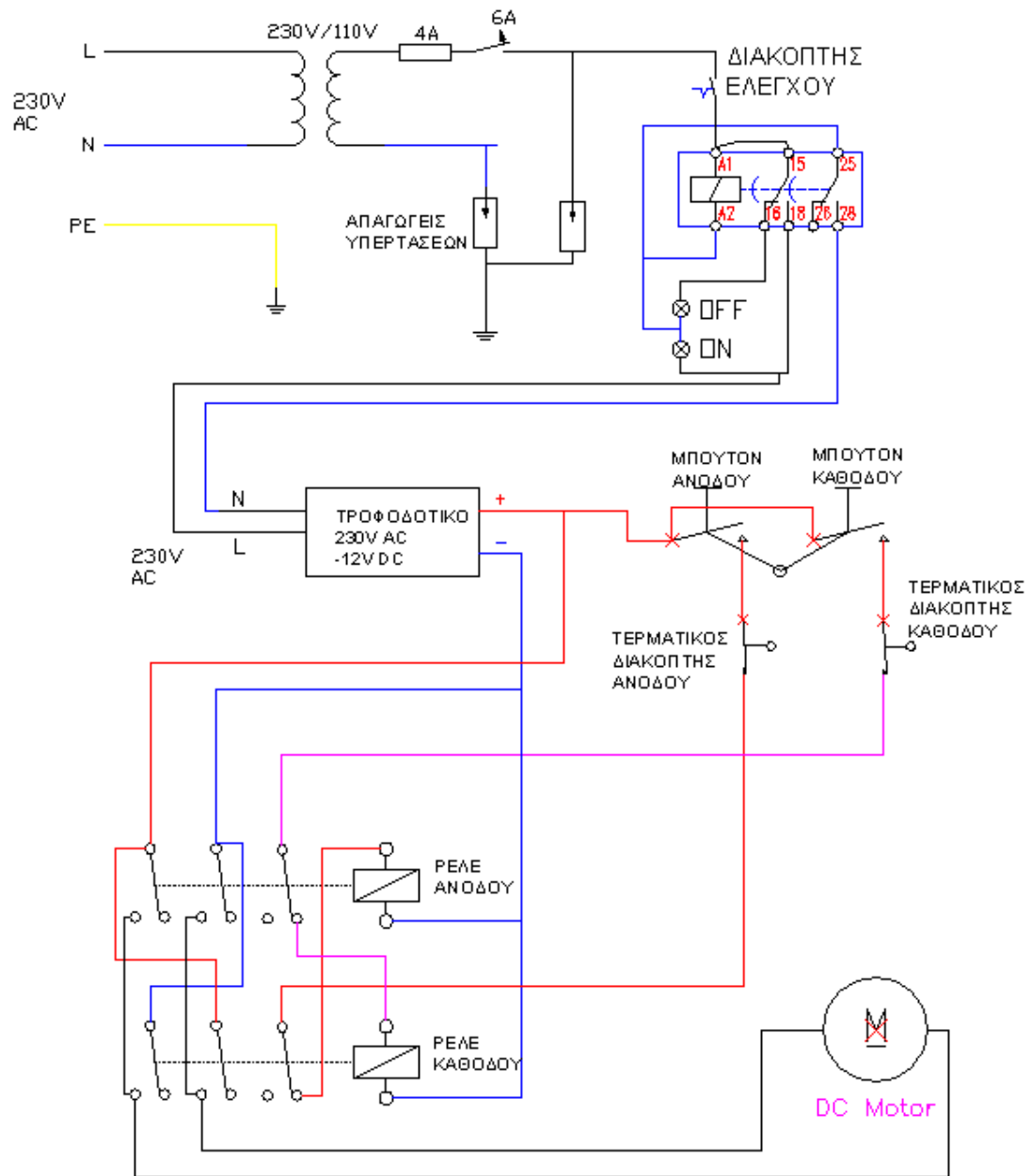


Σχέδιο 11. Σημείο τοποθέτησης ακίδων.



Σχέδιο 12. Ακίδα 60°

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ



Σχέδιο 13. Ηλεκτρική εγκατάσταση.

Ακολουθούν φωτογραφίες που δείχνουν την πορεία κατασκευής του έργου.

Αρχικά φαίνεται ο ξύλινος σκελετός πάνω στον οποίο τοποθετήθηκαν όλα τα εξαρτήματα. Διακρίνονται οι ρόδες και οι σχισμές πάνω στις κολόνες όπου μπορεί να τοποθετηθεί η βάση για το μονωτικό διάφραγμα.



**Εικόνα 1.** Ξύλινη κατασκευή.



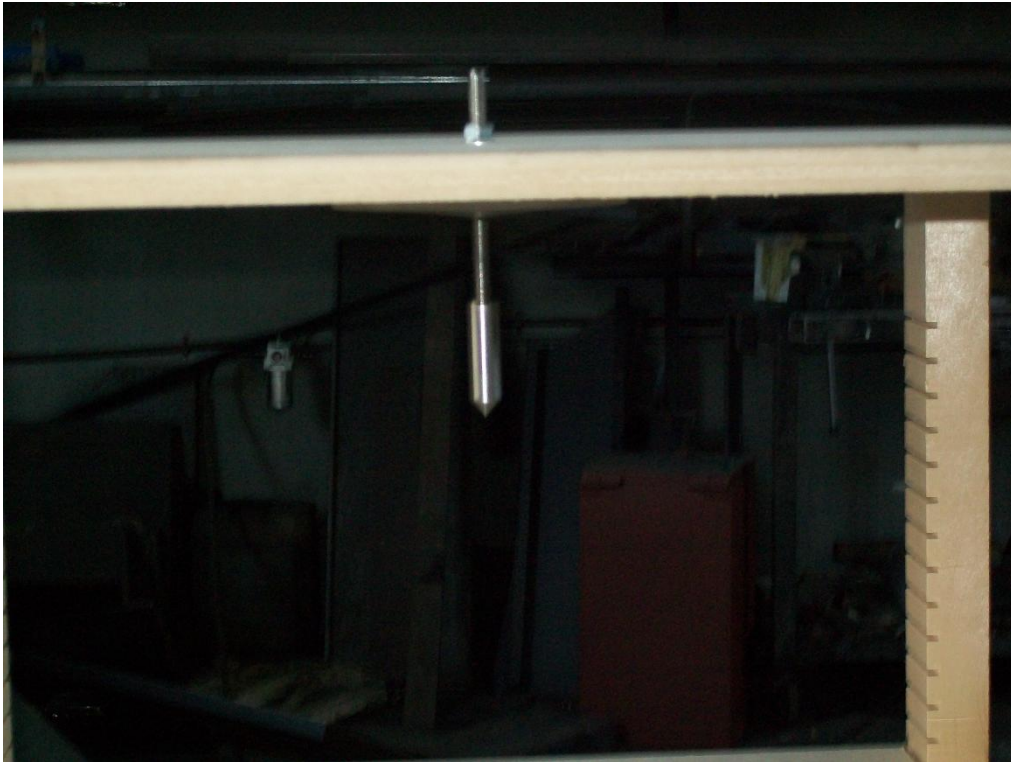
**Εικόνα 2.** Ξύλινη κατασκευή.

Αρχικά τοποθετήθηκε η άνω ακίδα.



**Εικόνα 3.** Τοποθέτηση άνω ακίδας.





**Εικόνα 4.** Άνω ακίδα.

Μετά τοποθετήθηκε η βάση και ο οδηγός της κάτω ακίδας.



**Εικόνα 5.** Βάση και οδηγός της κάτω ακίδας.

Κάτω ακίδα και ο άξονας στερέωσης αυτής.



**Εικόνα 6.** Βάση και οδηγός της κάτω ακίδας.



Στην επόμενη εικόνα διακρίνονται τρία κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Το Π μέσα στο οποίο μπορεί να κινείται το μοτέρ, τον ατέρμονα κοχλία μέσω του οποίου η κίνηση μεταδίδεται στην κάτω ακίδα και τέλος το περικόχλιο στερέωσης του ατέρμονα το οποίο αναγκάζει το σύστημα μοτέρ-ατέρμονα-ακίδα να κινούνται πάνω-κάτω.



**Εικόνα 7.** Ατέρμονας περικόχλιο και οδηγός κινητήρα.

Στην συνέχεια βλέπουμε τους τερματικούς διακόπτες.



**Εικόνα 8.** Τερματικοί διακόπτες.



**Εικόνα 9.** Τερματικοί διακόπτες, διακρίνεται επίσης και ο τρόπος σύνδεσης του κινητήρα με τον ατέρμονα.

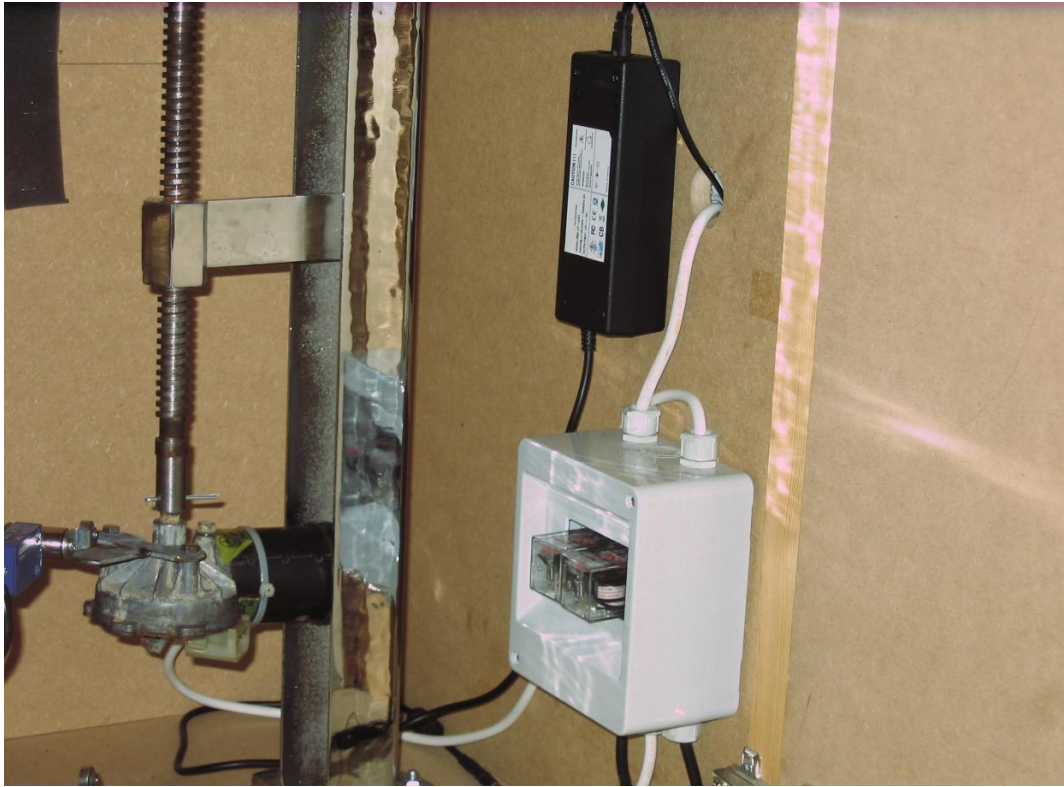
Εδώ διακρίνεται ο μηχανισμός κίνησης. Επίσης διακρίνεται το καλώδιο σύνδεσης της κάτω ακίδας με την γείωση.



**Εικόνα 10.** Μηχανισμός κίνησης.



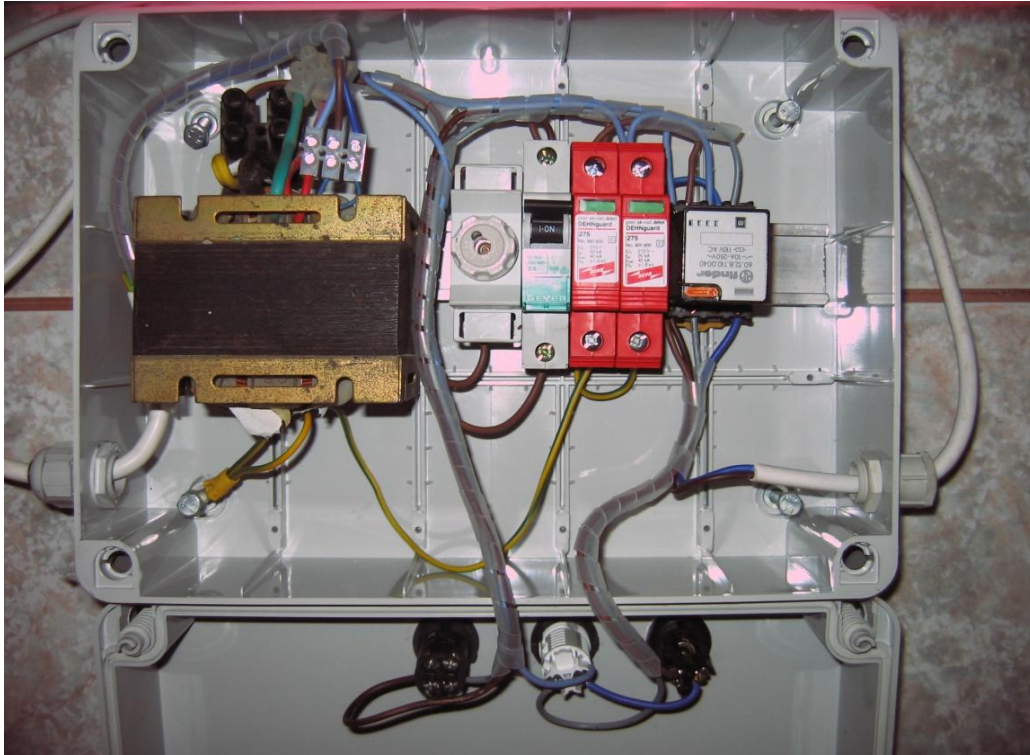
Ακολουθεί ο ηλεκτρικός πίνακας και το τροφοδοτικό.



**Εικόνα 11.** Ηλεκτρικός πίνακας με το τροφοδοτικό



**Εικόνα 12.** Πίνακας τροφοδοσίας. Περιλαμβάνει μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση και τους απαγωγείς υπερτάσεων.



Εικόνα 13. Πίνακας τροφοδοσίας.



Εικόνα 14. Σύστημα ένδειξης απόστασης μεταξύ των ακίδων.





**Εικόνα 15.** Χειριστήριο ελέγχου κινητήρα.

Ακολουθεί μια σειρά φωτογραφιών που δείχνουν τον τρόπο σύνδεσης της κατασκευής με την διάταξη του εργαστηρίου.



**Εικόνα 16.** Σύνδεση της πάνω ακίδας με την διάταξη του εργαστηρίου.



**Εικόνα 17.** Σύνδεση με την διάταξη του εργαστηρίου.



Εικόνα 18. Σύνδεση με την διάταξη του εργαστηρίου.



Εικόνα 19. Σύνδεση με την διάταξη του εργαστηρίου.





α



β



γ



δ

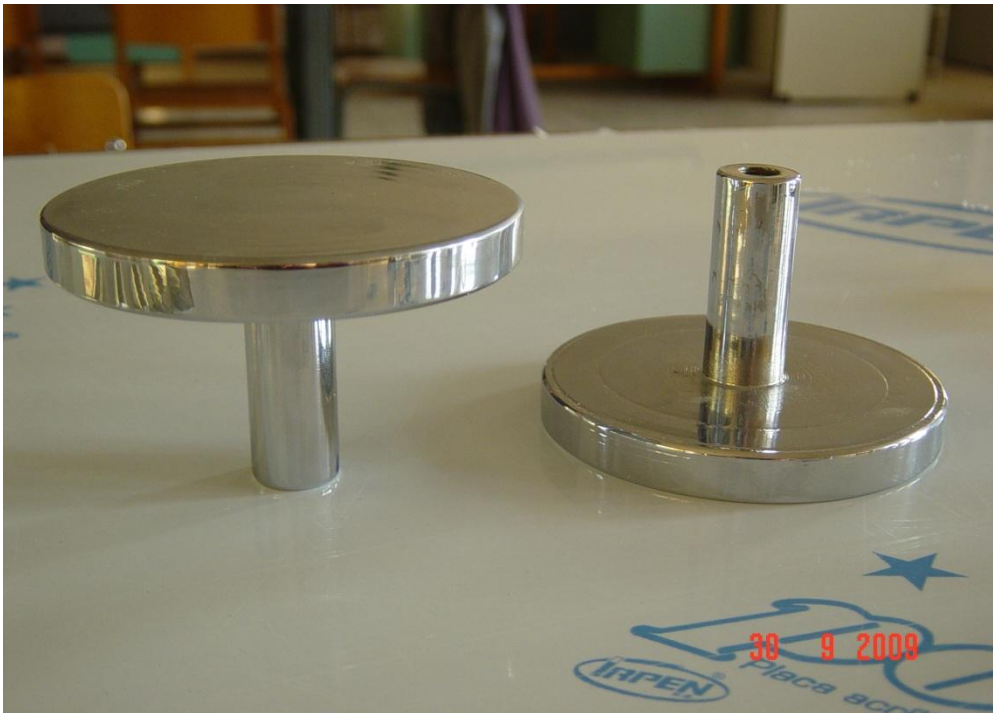


ε

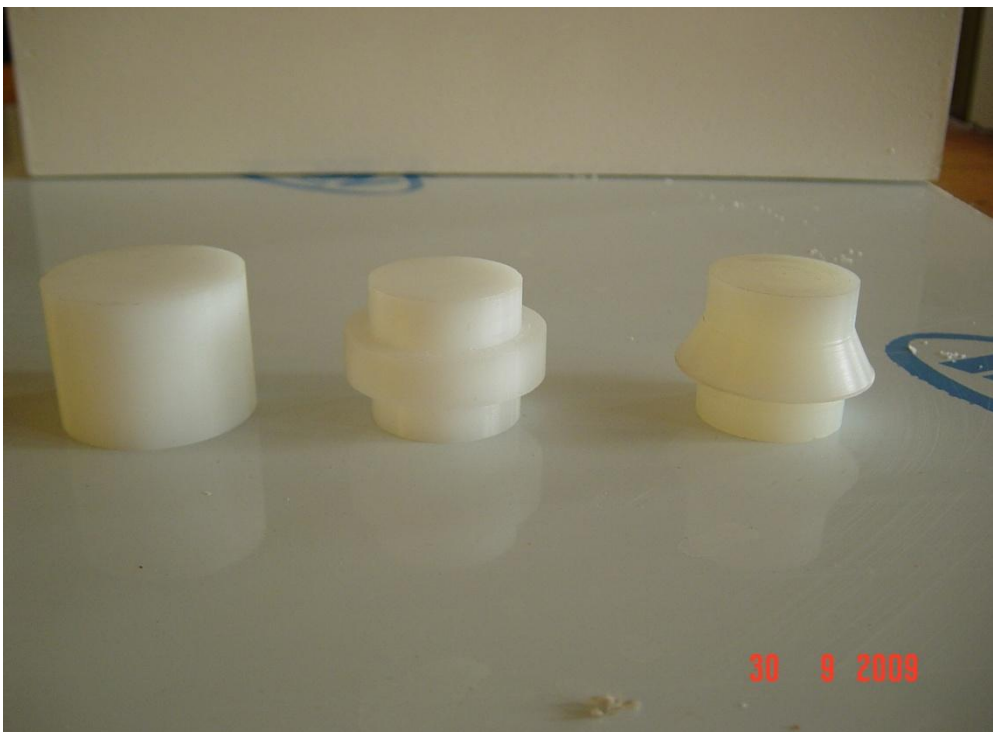


στ

**Εικόνα 20.** α. Ηλεκτρόδια οβάλ β. Ηλεκτρόδια με γωνία μύτης  $120^\circ$  γ. Γωνία μύτης  $90^\circ$   
δ. Γωνία μύτης  $60^\circ$  ε. Γωνία μύτης  $30^\circ$  στ. Σφαίρα



**Εικόνα 21.** Ηλεκτρόδια τύπου πλάκας.



**Εικόνα 22.** Δοκίμια από πολυαμίδιο που παρεμβάλλονται ανάμεσα στις δύο πλάκες της προηγούμενης εικόνας και μελετάται η διηλεκτρική τους αντοχή.

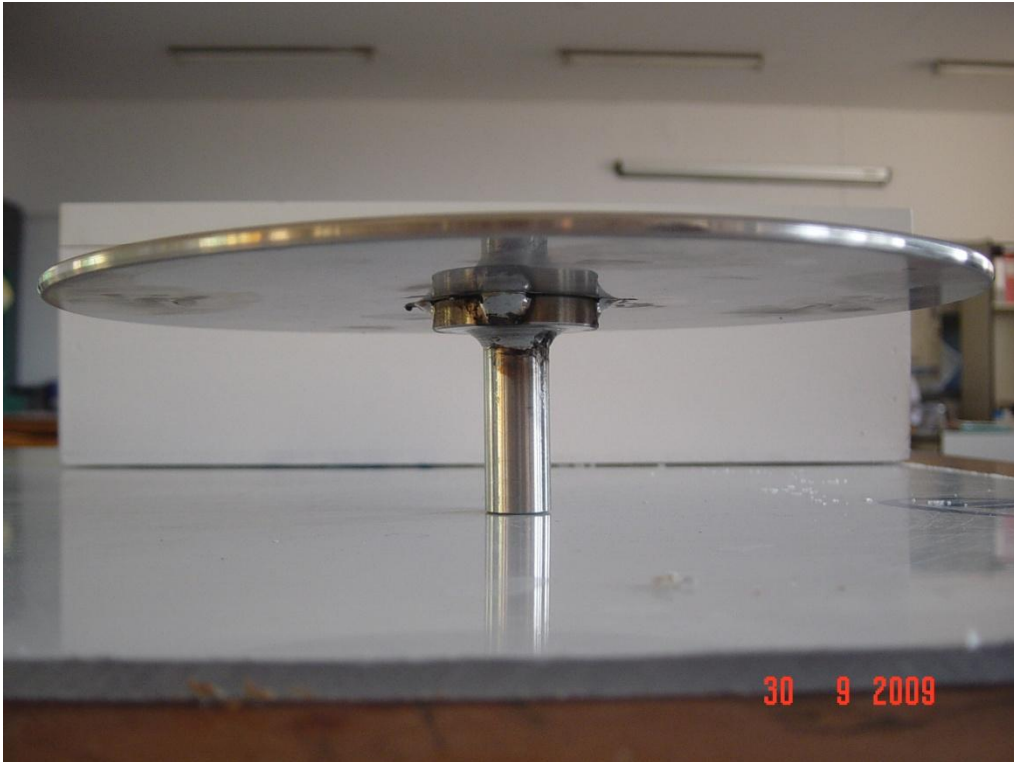


Εικόνα 23. Σφαίρες.



Εικόνα 24. Ηλεκτρόδιο τύπου πλάκας.





Εικόνα 25. Ηλεκτρόδιο τύπου πλάκας.



Εικόνα 26. Συγκεντρωμένα τα διάφορα ηλεκτρόδια.



Εικόνα 27. Όλα τα ηλεκτρόδια συγκεντρωμένα.



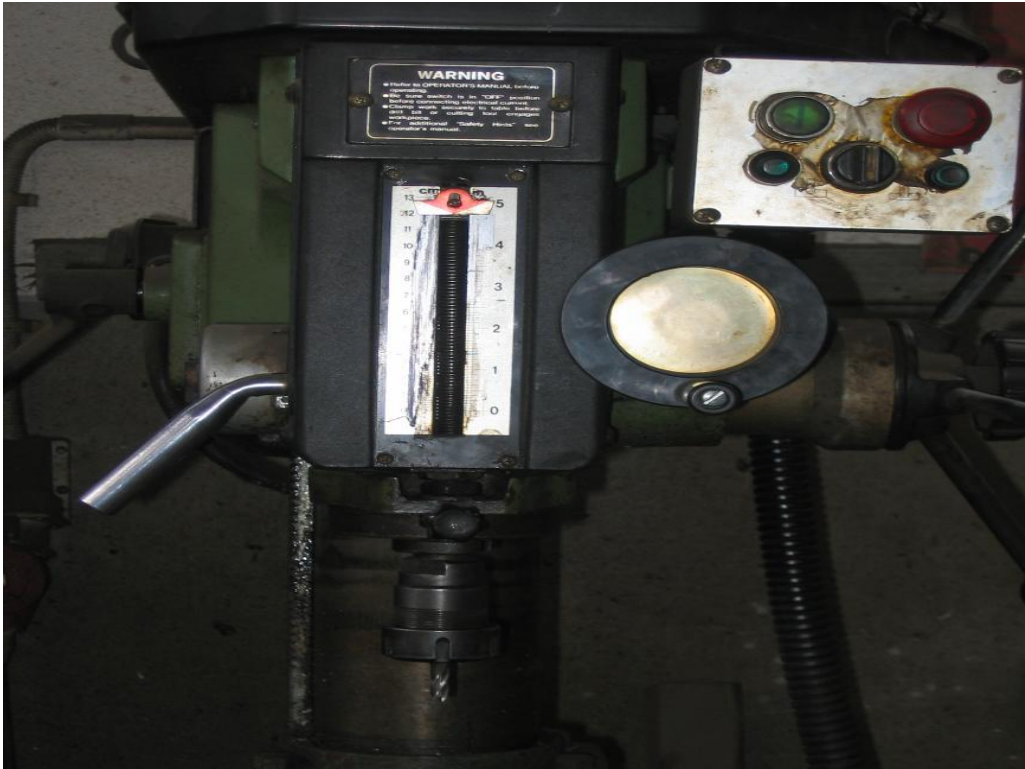
Εικόνα 28. Ηλεκτρόδιο πλάκας σε συνδυασμό με ακίδα 90°.

Ακολουθούν φωτογραφίες από τα βασικά μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της διάταξης όπως είναι η φρέζα ο τόννος.

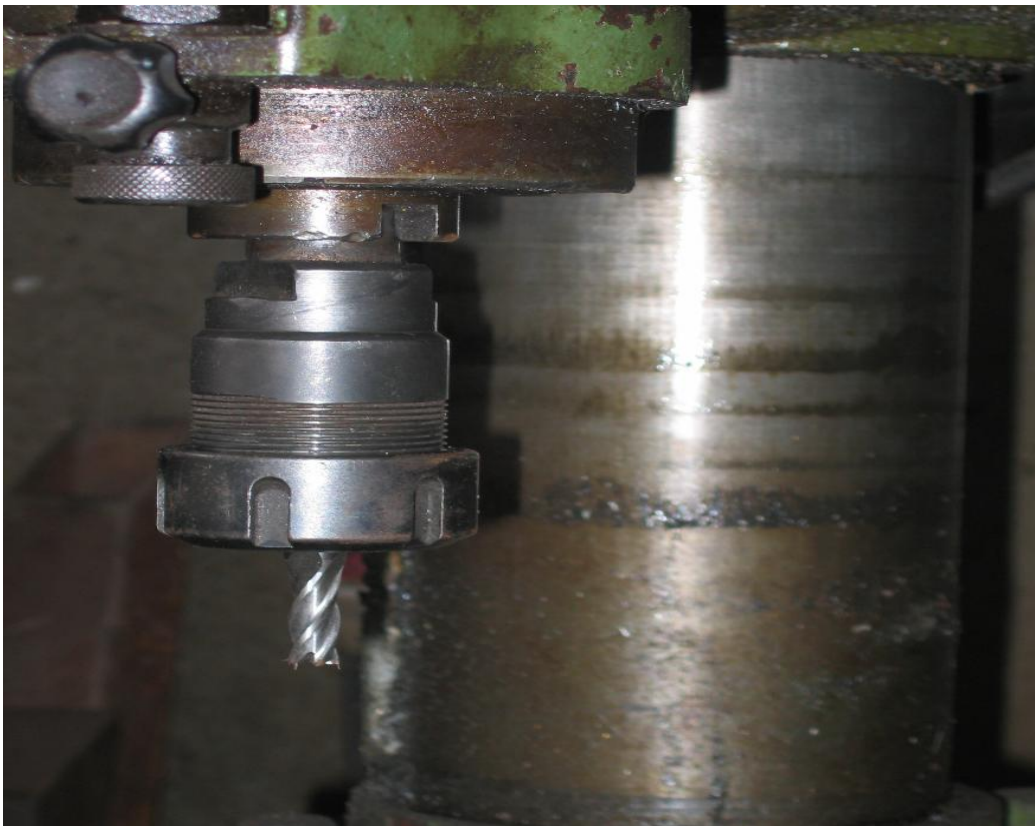


Εικόνα 29. Φρέζα.

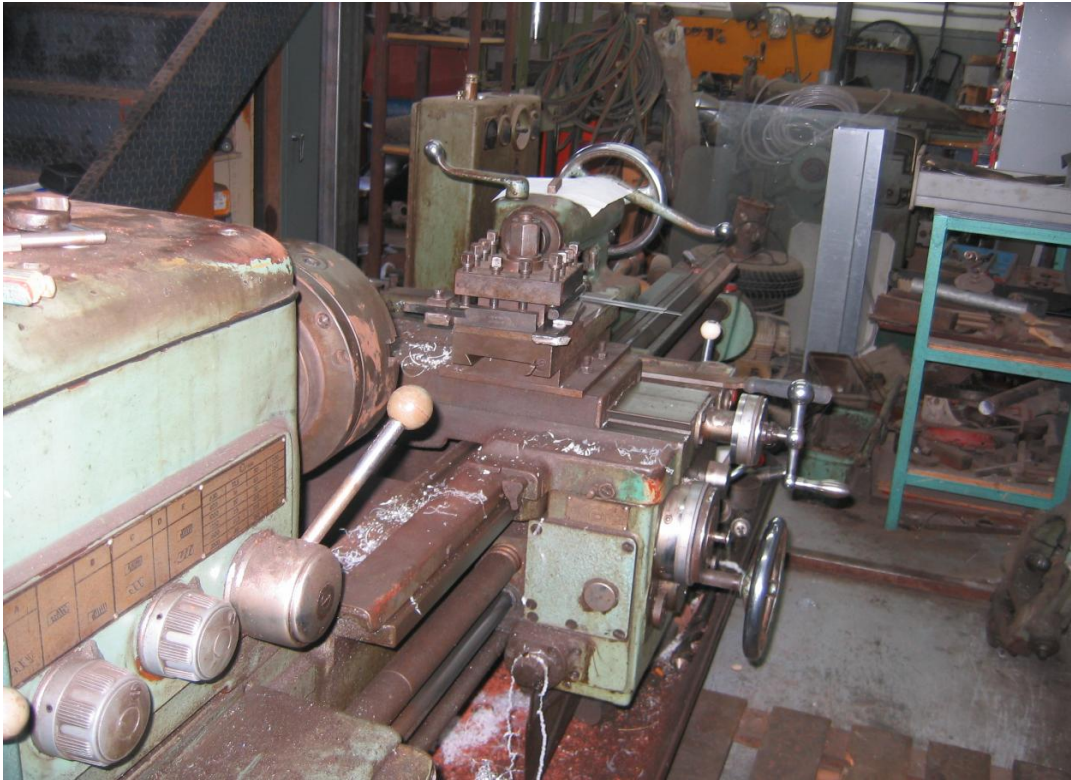




Εικόνα 30. Φρέζα.



Εικόνα 31. Φρέζα.



Εικόνα 32. Τόρνος.



Εικόνα 33. Τόρνος.



## Βιβλιογραφία

**ΚΥΡΙΑΚΟΣ Γ.ΣΙΔΕΡΑΚΗΣ** Σημειώσεις εργαστηρίου υψηλών τάσεων ΣΤΕΦ  
Τ.Ε.Ι. Κρήτης

**ΠΕΤΡΟΣ ΝΤΟΚΟΠΟΥΛΟΣ** Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών  
Εκδόσεις ΖΗΤΗ

**Υ.Π.Ε.Π.Θ.** Εργαστήριο Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων Τ.Ε.Ε. 2<sup>ος</sup> κύκλος  
Ο.Ε.Δ.Β.

Άλλες πηγές από το διαδίκτυο

- [www.namex.gr](http://www.namex.gr)
- [www.google.com](http://www.google.com)
- [www.neoniordanis.gr](http://www.neoniordanis.gr)
- [www.r3alimited.com](http://www.r3alimited.com)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΡΦΗ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

### 5.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

#### 5.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η παραγωγή των εναλλασσομένων τάσεων στα εργαστήρια υψηλών τάσεων γίνεται με διαφορετικά κριτήρια, άρα και προδιαγραφές, από ότι στην παραγωγή και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Μέσα σε ένα εργαστήριο Υ.Τ. αρχικά γίνεται παραγωγή εναλλασσομένων Υ.Τ., αυτή η μορφή στην συνέχεια χρησιμοποιείται και για την παραγωγή άλλων μορφών τάσεων (όπως θα δούμε στην συνέχεια) όπως συνεχών Υ.Τ. ή και κρουστικών Υ.Τ.

Στην τεχνολογία των εναλλασσομένων υψηλών τάσεων ενδιαφέρει όχι μόνο η γνώση της ενεργού τιμής  $U_{rms}$  ή  $U$ , αλλά και της μέγιστης τιμής  $U_{max}$  της τάσεως. Να θυμηθούμε όμως τον ορισμό της ενεργού τιμής μιας εναλλασσόμενης τάσης, που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$U = \sqrt{\left[ \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt \right]} \quad (5.1)$$

Όπου αν η τάση είναι καθαρά ημιτονοειδής τότε η εξίσωση 5.1 δίνει ενεργό ως τιμή:

$$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (5.2)$$

Προκειμένου να γίνει μια τάση δεκτή για δοκιμές από την I.E.C. ως ημιτονοειδής πρέπει η  $U_{max}$  να μην αποκλίνει περισσότερο από  $\pm 5\%$  από το γινόμενο  $\sqrt{2} U_{rms}$ . Όμοια η παραμόρφωση της τάσης σε αρμονικές, δηλαδή η ενεργός τιμή των αρμονικών, πρέπει να μην διαφέρει πιο πολύ από  $\pm 5\%$  από την ενεργό της θεμελιώδους.

#### 5.1.2 Μετασχηματιστές δοκιμής

Οι εναλλασσόμενες Υ.Τ. συνήθως παράγονται μέσα στα εργαστήρια Υ.Τ. από τους **μετασχηματιστές δοκιμής** που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μόνοι τους είτε, για υψηλότερες τάσεις, συνδεδεμένοι κατά **βαθμίδες**.

Οι Μ/Σ δοκιμής είναι Μ/Σ υψηλής τάσεως που διαφέρουν από τους κοινούς Μ/Σ ισχύος στα εξής:

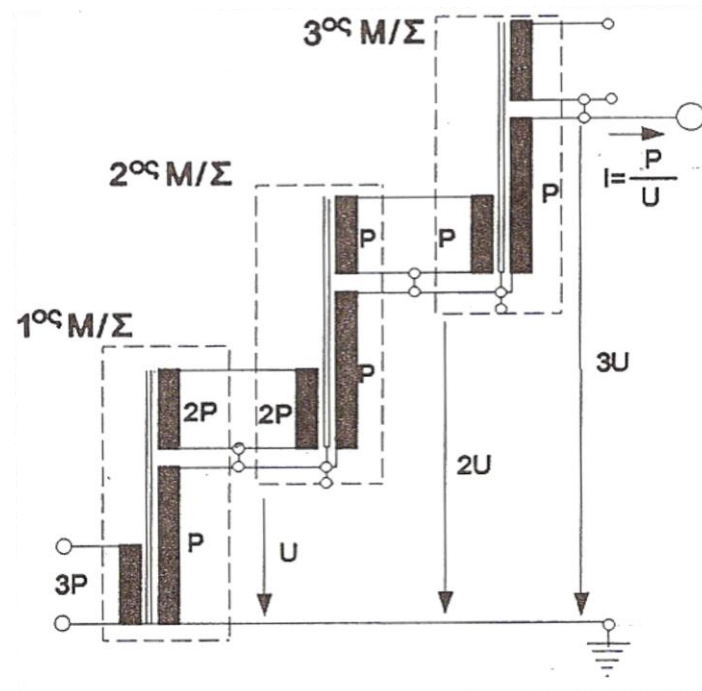
1. Είναι συνήθως μονοφασικοί, οι περισσότερες δοκιμές σε Ε.Υ.Τ. είναι μονοφασικές, στην περίπτωση που θα χρειαστεί κάποια τριφασική

δοκιμή μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις μονοφασικοί Μ/Σ κατάλληλα συνδεδεμένοι.

2. Η ισχύς τους, επειδή χρησιμοποιούνται μόνο για δοκιμές, είναι μικρή, και συναντιούνται από 1÷2 kVA μέχρι και 100 kVA.
3. Η τάση εξόδου ενός Μ/Σ δοκιμής πρέπει να μπορεί να μεταβάλλεται κατά το δυνατόν συνεχώς, από το μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή της.
4. Οι μονώσεις τους, επειδή δεν υφίστανται μεγάλες υπερτάσεις(κεραυνούς, χειρισμούς κτλ.) , υπολογίζονται για να αντέχουν μόνο στην μέγιστη τάση λειτουργίας τους, με κάποιο συντελεστή ασφαλείας λίγο μεγαλύτερο από την μονάδα.
5. Τέλος ο πυρήνας τους πρέπει να έχει σχετικά μεγάλη διατομή ώστε να αποφεύγεται ο κορεσμός και κατά συνέπεια η αλλοίωση της παραγόμενης τάσης.

### 5.1.2 Σύνδεση Μ/Σ δοκιμής κατά βαθμίδες

Η σύνδεση κατά βαθμίδες είναι μια δυνατότητα που συναντάται γενικότερα στον εργαστηριακό εξοπλισμό Υ.Τ.. Προσφέρεται με σκοπό να καλυφθεί η ανάγκη ευελιξίας, που υπάρχει σε ένα εργαστήριο. Έτσι αντί για παράδειγμα να επιλεγεί ένας Μ/Σ 300 kV επιλέγονται τρεις των 100 kV οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτόνομα ώστε να υλοποιηθούν τρεις ανεξάρτητες διατάξεις των 100 kV ή σε σύνδεση κατά βαθμίδες για μια διάταξη των 300 kV. Στο σχήμα 5.1 κάτω φαίνεται η σύνδεση κατά βαθμίδες τριών Μ/Σ. Όπως φαίνεται, αυτή είναι εφικτή διότι υπάρχει ένα τριτεύων τύλιγμα, 1:1 σε σχέση με το δευτερεύων στο οποίο όμως ο ένας ακροδέκτης είναι σε δυναμικό  $U$  σε σχέση με τη γη (δυναμικό μηδέν). Το τύλιγμα αυτό χρησιμοποιείται για να τροφοδοτηθεί η επόμενη βαθμίδα οπότε, η επόμενη βαθμίδα τροφοδοτείται με την ίδια διαφορά δυναμικού στην είσοδο (τύλιγμα 1:1) και η ανύψωση προκύπτει με τον ίδιο λόγο μετασχηματισμού. Αλλά το δυναμικό αναφοράς στην δεύτερη βαθμίδα είναι είδη σε δυναμικό  $U$  σε σχέση με τη γη, οπότε και τάση εξόδου είναι  $2U$ .



**Σχήμα 5.1** Συνδεσμολογία τριών Μ/Σ δοκιμής συνδεδεμένων κατά βαθμίδες. (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασινόπουλος )

Ανάλογα υπολογίζεται η τάση εξόδου και για τις άλλες βαθμίδες. Έτσι για την περίπτωση των  $n$  βαθμίδων προκύπτει:

$$U_i = nU \quad (5.3)$$

$$P_i = (n+1-i) \frac{P_t}{n} \quad (5.4)$$

$$U_i = (i-1)U \quad (5.5)$$

Όπου  $P_i$  η ισχύς κάθε βαθμίδας,  $P_t$  η συνολική ισχύς  $U_i$  η τάση εξόδου,  $U$  η μέγιστη τάση κάθε βαθμίδας και  $U_i$  η τάση ως προς γη του κοινού σημείου κάθε βαθμίδας.

Η σύνδεση κατά βαθμίδες, επιτρέπει την παραγωγή Ε.Υ.Τ. μεγαλύτερων από την ονομαστική τάση της κάθε βαθμίδας. Αυτό όμως δεν μπορεί να συμβαίνει επ' άπειρο. Υπάρχει δηλαδή κάποιο μέγιστο πλήθος βαθμίδων λόγω του φαινομένου Ferranti. Επιπλέον κάθε Μ/Σ αποτελεί ένα LC κύκλωμα. Βάζοντας πολλούς μαζί η πιθανότητα να προκύψουν ταλαντευόμενα LC κυκλώματα είναι μεγαλύτερη, αλλοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την τάση εξόδου.

#### 5.1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ Σ.Υ.Τ.

Οι εφαρμογές των Σ.Υ.Τ. είναι πολλές, τόσο στην μεταφορά και διανομή Η.Ε. όσο και σε άλλα πεδία, όπως στα ιατρικά μηχανήματα, στο περιβάλλον κ.α.. Συνεπώς υπάρχουν φαινόμενα με Σ.Υ.Τ., που χρήζουν διερεύνησης αλλά και εξοπλισμός που πρέπει να δοκιμασθεί και να πιστοποιηθεί. Επιπλέον σε ένα εργαστήριο Υ.Τ., η Σ.Υ.Τ. χρησιμοποιείται για τον έλεγχο δοκιμών με μεγάλη χωρητικότητα, όπου λόγω του φαινομένου Ferranti δεν είναι δυνατός ο έλεγχος με Ε.Υ.Τ., π.χ. τα καλώδια. Επιπλέον χρησιμοποιείται για την μελέτη συμπεριφοράς διαφόρων μονωτικών.

Οι Σ.Υ.Τ. παράγονται με δύο τρόπους :

1. Με ανόρθωση, μονοβάθμια ή με πολλαπλασιασμό, εναλλασσομένων τάσεων.
2. Με ηλεκτροστατικές γεννήτριες.

Η συνεχής τάση δοκιμής  $U_{DC}$  ορίζεται :

$$U_{DC} = U = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (5.6)$$

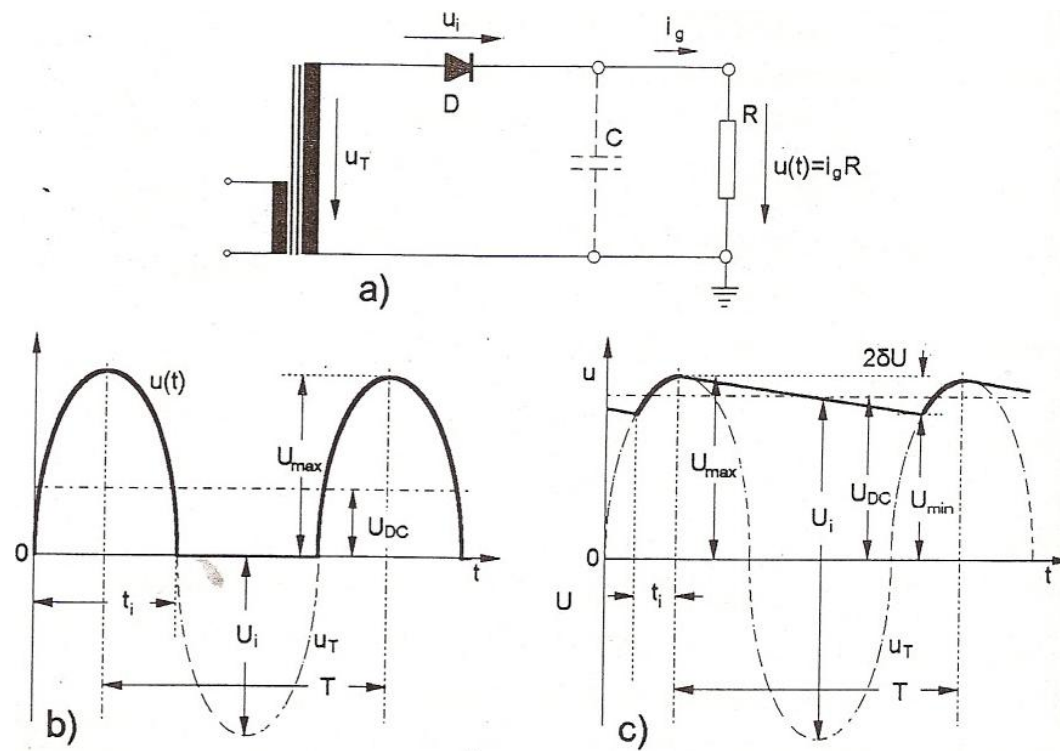
Περιοδικές διακυμάνσεις της συνεχούς τάσεως μεταξύ μιας μέγιστης  $U_{max}$  και μιας ελάχιστης τιμής  $U_{min}$  καλούνται **κυμάτωση** που ορίζεται ως:

$$\delta U = \frac{1}{2}(U_{max} - U_{min}) \approx u(t) - U \quad (5.7)$$

**Συντελεστής κυμάτωσης** ονομάζεται ο λόγος  $\delta U/U$ . Μερικές φορές χρησιμοποιείται και η ενεργός τιμή  $U_{rms}$ . Για μια συνεχή τάση με μικρή κυμάτωση που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα ισχύει:  $U_{DC} = U_{max} = U_{rms}$ .

Σύμφωνα με την I.E.C., ο συντελεστής κυματώσεως δεν πρέπει να υπερβαίνει το  $\pm 3\%$ . Για δοκιμές με διάρκεια μικρότερη από 60sec η αναλογία της τιμής της τάσης είναι  $\pm 1\%$ , ενώ για δοκιμές με διάρκεια μεγαλύτερη των 60sec είναι  $\pm 3\%$ .

Ο πιο απλός τρόπος παραγωγής Σ.Υ.Τ. είναι η διάταξη μονοβάθμιας ανόρθωσης ημίσεως κύματος, η οποία φαίνεται στο σχήμα 5.2.a παρακάτω:



**Σχήμα 5.2** Διάταξη απλής ανόρθωσης α. Κύκλωμα, β. Τάσεις χωρίς πυκνωτή εξομαλύνσεως, γ. Τάσεις με πυκνωτή εξομαλύνσεως. (Πηγή: Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων-Στασιινόπουλος )

Μια αντίσταση R φορτίζεται από ένα Μ/Σ Υ.Τ. μέσω ενός ανορθωτή D. Αν θεωρηθεί ότι η τάση εξόδου του Μ/Σ  $u_T(t)$  είναι ημιτονοειδής και ότι ο D είναι ιδανική δίοδος, δηλαδή με μηδενική αντίσταση κατά τη φορά που άγει και άπειρη κατά την ανάστροφη, τότε ο D θα άγει μόνο κατά την μία ημιπερίοδο, η κυματομορφή της τάσεως εξόδου της ανορθωτικής διατάξεως (κατά μήκος της R), φαίνεται στο σχήμα 5.2.b. Οι σχέσεις που μας δίνουν την τάση στην αντίσταση είναι :

$$U_{\max} = \sqrt{2}U_{EYT\_RMS}, U_{DC} = \frac{\sqrt{2}U_{EYT\_RMS}}{\pi}, \delta U = \sqrt{2}U_{EYT\_RMS}, U_{RMS} = \frac{\sqrt{2}U_{EYT\_RMS}}{T} \text{ και}$$

$$\text{η μέγιστη ανάστροφη τάση στη δίοδο είναι } U_i = \sqrt{2}U_{EYT\_RMS}.$$

Για να γίνει η τάση εξόδου της ανορθωτικής διατάξεως πιο ομαλή, μπορεί όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2.c που αναφέρεται σε αυτήν την περίπτωση, να τοποθετηθεί παράλληλα προς την αντίσταση R ένας πυκνωτής C, που ονομάζεται χαρακτηριστικά πυκνωτής εξομαλύνσεως, τότε είναι :

$$U_{\max} = \sqrt{2}U_{EYT\_RMS}, \quad U_{DC} = U_{\max} - \delta U, \quad \delta U = \frac{I_g}{2fC}, \quad U_{RMS} = \frac{\sqrt{2}U_{EYT\_RMS}}{T},$$

$U_i = 2\sqrt{2}U_{EYT\_RMS}$ . Όπου  $I_g$  η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου.

Όπως είναι εμφανές από το σχήμα 5.2, στην περίπτωση απουσίας του πυκνωτή εξομαλύνσεως, ο χρόνος  $t_i$  που άγει η δίοδος είναι ίσος με όλη την ημιπερίοδο. Στην περίπτωση όμως που υπάρχει πυκνωτής C ο χρόνος  $t_i$  είναι πολύ μικρότερος, έτσι αν ο πυκνωτής εξομαλύνσεως έχει αρκετά μεγάλη χωρητικότητα μπορούμε να πούμε ότι  $\delta U \ll U$ . Κάτω από αυτές τις συνθήκες η καμπύλη εκφόρτισης του C, μπορεί να θεωρηθεί ευθεία. Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εξισώσεις οι συνηθισμένοι τρόποι ελάττωσης της κυμάτωσης είναι είτε μέσω της αύξησης της τιμής της C, είτε μέσω της αύξησης της τιμής της συχνότητας. Εδώ όμως όπως φαίνεται από τις εξισώσεις προκύπτει ένα πρόβλημα, δηλαδή η δίοδος καταπονείται σχεδόν με την διπλάσια τάση από αυτήν που είχαμε χωρίς τον πυκνωτή. Αυτό το πρόβλημα λύνεται αν τοποθετήσουμε άλλη μια δίοδο  $D_2$  σε σειρά με την πρώτη. Εξάλλου αυτό ακριβώς είναι και το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, στις εργαστηριακές δοκιμές. Με την τοποθέτηση της δεύτερης διόδου επιτυγχάνονται δύο στόχοι. Αφ' ενός η ανάστροφη τάση μοιράζεται στις δύο διόδους αφετέρου αυξάνεται η ολική αντίσταση του κυκλώματος και έτσι επιτυγχάνεται μείωση του ολικού ρεύματος άρα και λιγότερη καταπόνηση της διάταξης. Κλείνοντας αυτήν την παράγραφο πρέπει να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την παραγωγή της Σ.Υ.Τ. αυτά είναι τα εξής: ενεργός τάση στο δευτερεύον του Μ/Σ  $U_{\text{sec RMS}}=100\text{kV}$ , μέγιστη τάση στις διόδους  $U_{\max}=140\text{kV}$  και αντίσταση ανάστροφης πόλωσης  $100\text{k}\Omega$ , ο πυκνωτής εξομαλύνσεως έχει χωρητικότητα  $C=10000\text{pF}$  ενώ το φορτίου για την γεννήτρια είναι μια αντίσταση, η τιμή της οποίας είναι στα  $280\text{M}\Omega$ .

## 5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΔΙΑΣΠΑΣΕΩΣ

### 5.2.1 ΓΕΝΙΚΑ-ΟΡΙΣΜΟΙ

Ο όρος **προσδιορισμός ή μέτρηση της τάσεως διασπάσεως** της  $U_s$  ενός διακένου είναι γενικός και θα μπορούσε να ειπωθεί ότι είναι ελλιπής επειδή ο μηχανισμός της διασπάσεως είναι εξαιρετικά πολύπλοκος εξαρτώμενος από πολλούς παράγοντες έτσι ώστε να μπορεί να λεχθεί ότι η τάση διασπάσεως είναι μέγεθος στατιστικό και έτσι έχει ανάγκη στατιστικής αναλύσεως.

Για τη στατιστική ανάλυση της τάσεως διασπάσεως χρησιμοποιούνται οι παρακάτω ορισμοί: **Πιθανότητα διασπάσεως** ή **p** ενός δοκιμίου είναι η πιθανότητα που έχει η εφαρμογή μιας τάσεως δεδομένης τιμής και

κυματομορφής να προκαλέσει τη διάσπαση του. Η παράμετρος  $p$  εκφράζεται είτε ως κλάσμα είτε επί της εκατό. **Πιθανότητα αντοχής** ή  $q$  ενός δοκιμίου η πιθανότητα η παραπάνω αναφερθείσα τάση να μην προκαλέσει διάσπαση του δοκιμίου. Προφανώς είναι:

$$p + q = 1 \quad (5.8)$$

**$p\%$  τάση διασπάσεως** ή  $U_p$  ενός δοκιμίου είναι η τάση που έχει πιθανότητα  $p\%$  να προκαλέσει διάσπαση. Προφανώς  $U_{50}$  είναι η τάση που προκαλεί διάσπαση στο 50% των περιπτώσεων. **Συμβατική απόκλιση** ή  $z$  είναι η διαφορά της τάσης διασπάσεως 50% και 16% δηλαδή:

$$z = U_{50} - U_{16} \quad (5.9)$$

Η καμπύλη  $p(U)$  είναι αυτή που συνδέει την τάση με την πιθανότητα διασπάσεως. Η καμπύλη αυτή ακολουθεί ολοκληρωμένη Γκαουσιανή ή αλλιώς κανονική κατανομή. Μια τέτοια καμπύλη χαρακτηρίζεται από μια μέση τιμή  $U_{50}$  και μια τυπική απόκλιση  $\sigma$  που εδώ συμπίπτει με τη συμβατική απόκλιση  $z$ .

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της  $p(U)$  αρκεί η παραδοχή ότι αυτή ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη κατανομή, και ακολούθως η εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων, συνήθως της  $U_{50}$  και της  $z$ . Αυτό μπορεί να γίνει με κάποια μέθοδο δοκιμών μετά από έναν αριθμό επιβολών της τάσεως ανάλογο με τη ζητούμενη ακρίβεια.

Στην πράξη ο αριθμός των επιβολών της τάσεως είναι περιορισμένος αλλά και η προσομοίωση της καμπύλης  $p(U)$  με κάποια κατανομή παρουσιάζει αβεβαιότητες πράγμα που καθιστά απαραίτητη την ανάλυση των αποτελεσμάτων με τη χρήση στατιστικών μεθόδων.

Σύμφωνα με την I.E.C. η τάση διασπάσεως μπορεί να προσδιοριστεί μέσω τριών κατηγοριών δοκιμών:

1. Μέθοδος επιπέδων τάσεως.
2. Μέθοδοι αυξομείωσης τάσεως.
3. Μέθοδοι διαδοχικών διασπάσεων.

Οι μέθοδοι αυτές αναφέρονται στη γενική περίπτωση ανομοιογενών, κυρίως, διακένων και δεν πρέπει να συγχέονται με τις αυστηρά περιορισμένης χρήσεως μεθόδους καθορισμού της τάσεως διασπάσεως που χρησιμοποιούνται κατά τις μετρήσεις με βοηθητικά σφαιρικά διάκενα. Θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή της τρίτης κατηγορίας δηλαδή της μεθόδου διαδοχικών διασπάσεων. Εξάλλου αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή αυτής της εργασίας, στο εργαστήριο υψηλών τάσεων.



### 5.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΔΙΑΣΠΑΣΕΩΝ

Σ' αυτήν την μέθοδο ακολουθείται μια διαδικασία που συνίσταται στην επιβολή «n» φορές μιας τάσεως που είτε αυξάνεται συνεχώς μέχρι να προκαλέσει διάσπαση, ή παραμένει σταθερή πάλι μέχρι να προκαλέσει διάσπαση. Τα αποτελέσματα είναι η τιμές της τάσεως « $U_i$ » ή του χρόνου « $t_i$ » διασπάσεως.

Για μια κανονική κατανομή οι παράμετροι  $U_{50}$  και  $z$  δίνονται από:

$$U_{50} = \frac{\sum U_i}{n} \quad (5.10)$$

και:

$$z = \sqrt{\left[ \frac{\sum (U_i - U_{50})^2}{(n-1)} \right]} \quad (5.11)$$

Οι ίδιες εκφράσεις χρησιμοποιούνται και για όπου αντί των τάσεων  $U_{50}$  ενδιαφέρουν οι χρόνοι διασπάσεως  $t_i$ .

### 5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Στην παράγραφο αυτήν περιγράφονται όλες οι λεπτομέρειες, η διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και οι συνθήκες που επικρατούσαν στο εργαστήριο κατά την διάρκεια διεξαγωγής της εργασίας.

Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι στο εργαστήριο εκτός από την γεννήτρια παραγωγής Σ.Υ.Τ. υπάρχει και μια κονσόλα ελέγχου, όπου υπάρχουν τα απαραίτητα όργανα ένδειξης (βολτόμετρα και αμπερόμετρα) και ελέγχου της γεννήτριας. Η γεννήτρια καθώς και η κατασκευή μας βρίσκονται εντός περιφραγμένου με πλέγμα χώρου (για ευνόητους λόγους) και η κονσόλα βρίσκεται εκτός αυτού του χώρου. Με διακόπτες που υπάρχουν στην κονσόλα αυξομειώνεται η τάση στο πρωτεύων τύλιγμα του μετασχηματιστή της γεννήτριας. Έτσι μεταβάλλεται ανάλογα και η συνεχής τάση στην έξοδο της γεννήτριας, όπου εκεί συνδέεται η εργαστηριακή διάταξη.

Η διαδικασία των μετρήσεων έχει ως εξής: για κάθε γεωμετρία και μήκος διακένου που μελετάται η τάση στο διάκενο αυξάνεται σταδιακά ανά 5kV περίπου. Μόλις γίνει η διάσπαση του διακένου η τροφοδοσία του μετασχηματιστή πρέπει να διακοπή αμέσως. Ο λόγος είναι ότι έχουμε την εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων και πρέπει να προφυλαχτεί η διάταξη. Ωστόσο η τάση διάσπασης έχει καταγραφεί και η τάση τροφοδοσίας του μετασχηματιστή μηδενίζεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται δέκα φορές για κάθε διάκενο. Οι τιμές στο τέλος των μετρήσεων αποθηκεύονται σε υπολογιστικό

φύλλο (Excel) όπου αργότερα θα επεξεργαστούν για να προκύψουν τα τελικά συμπεράσματα.

Για το διάκενο ακίδα-ακίδα ξεκινήσαμε από τις 30 μοίρες μύτη ακίδας και το μήκος διακένου να μεταβάλλεται από τα 2 cm έως τα 8 cm ανά δύο εκατοστά. Για κάθε μήκος διακένου γίνονταν η παραπάνω περιγραφείσα διαδικασία. Στα 8 cm σταματούσε η περαιτέρω αύξηση του μήκους διακένου καθώς η τάση διάσπασης αυξανόταν σε επικίνδυνα για την ασφάλεια του εξοπλισμού επίπεδα. Κριτήριο για την συνέχιση ή όχι της αύξησης του μήκους διακένου ήταν η τάση διάσπασης να μην ξεπερνάει τα 60 kV. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε και για τα άλλα ηλεκτρόδια δηλαδή για τις 60°, 90°, και 120°.

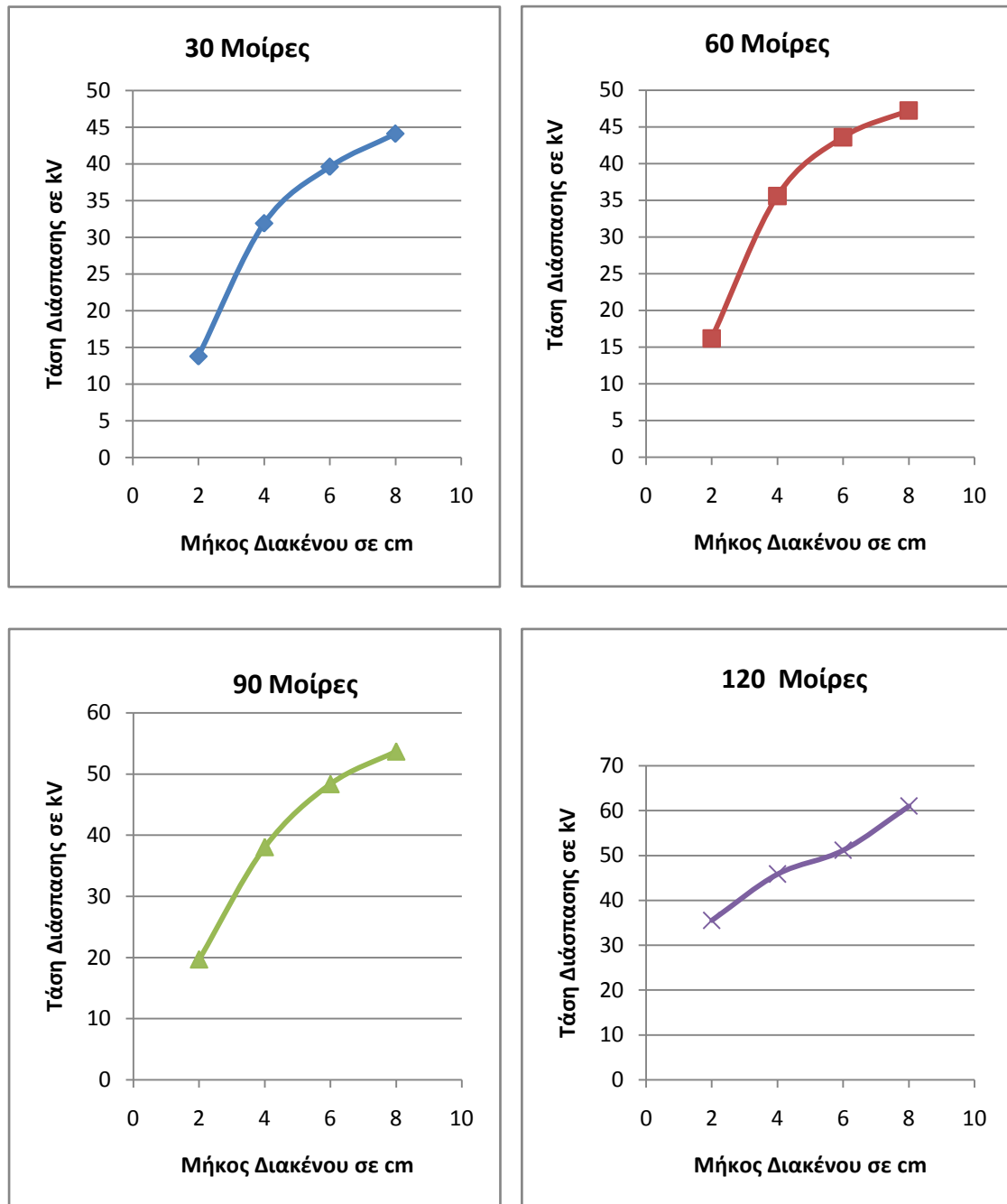
Για τα διάκενα ακίδα-πλάκα, σφαίρα-πλάκα και σφαίρα-σφαίρα η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια με την διαφορά εδώ ότι το μήκος διακένου ξεκινούσε από 0,5 cm, αυξανόταν κατά 0,5 cm και σταματούσε στα 3 cm για το ακίδα-πλάκα και 2 cm για τα άλλα δύο. Ομοίως και εδώ για λόγους ασφάλειας της διάταξης. Σε αυτά τα διάκενα η πλάκα είχε πάντα την αρνητική πολικότητα.

Για να είναι πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα θα έπρεπε να μετριέται σε κάθε διάσπαση, ατμοσφαιρική πίεση, υγρασία, θερμοκρασία και τα τελικά αποτελέσματα-συμπεράσματα να βγαίνουν συναρτήσει αυτών των μεγεθών. Όμως δυστυχώς το εργαστήριο δεν μπορούσε να μας παράσχει όργανα για την μέτρηση αυτών των δεδομένων. Το μόνο όργανο που είχαμε στην διάθεση μας ήταν ένα θερμόμετρο. Όμως αυτό το στοιχείο από μόνο του δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επεξεργασία των μετρήσεων. Έτσι εντελώς πληροφοριακά η θερμοκρασία στο χώρο των μετρήσεων κατά την διάρκεια διεξαγωγής κυμαινόταν από 28,5 έως 31 °C.

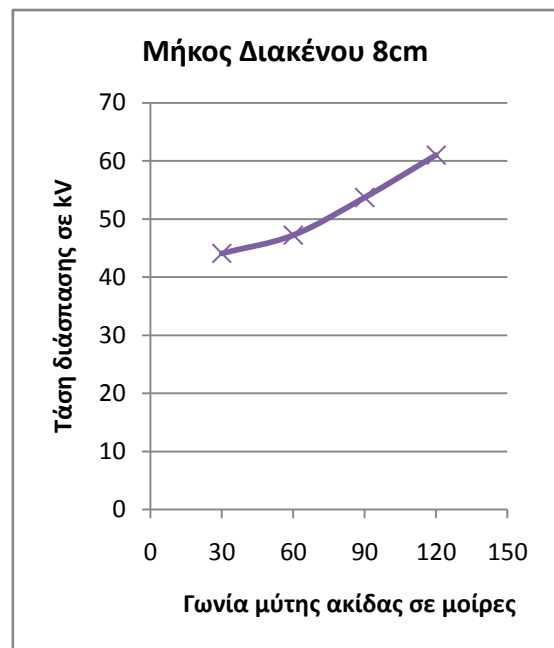
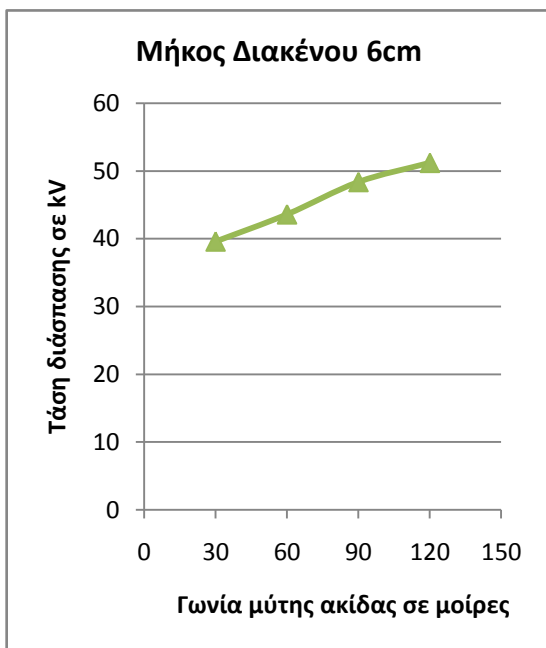
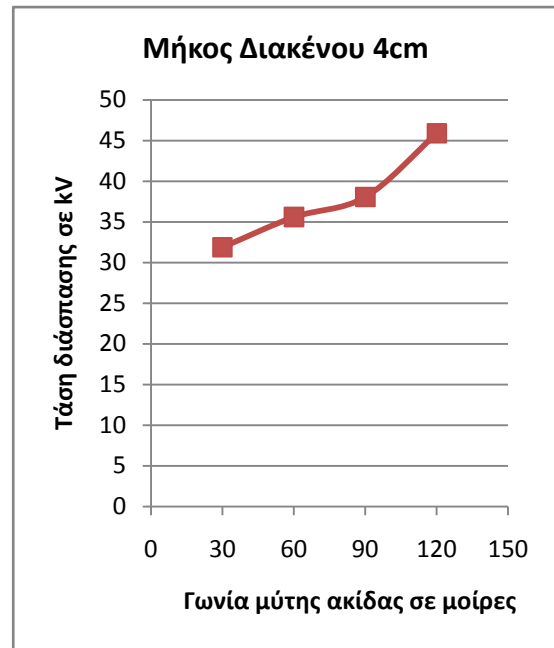
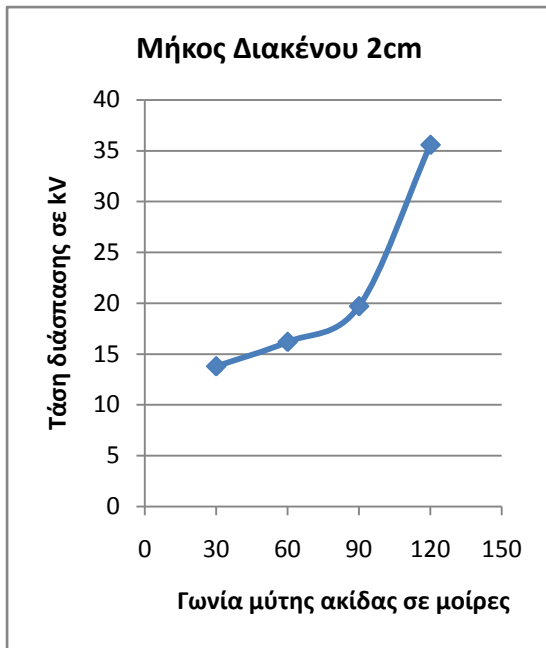
#### **5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ**

Αφού έγιναν οι μετρήσεις στο χώρο του εργαστηρίου, τα αποτελέσματα αυτών καταχωρήθηκαν και επεξεργάστηκαν στο υπολογιστικό φύλλο Excel. Από την επεξεργασία των δεδομένων αυτών προέκυψαν κάποια γραφήματα που παρέχουν μια πιο εποπτική εικόνα και για την καλύτερη κατανόηση των δεδομένων. Αρχικά παρουσιάζονται τα γραφήματα για το διάκενο ακίδα-ακίδα στην συνέχεια το διάκενο ακίδα-πλάκα και τέλος τα διάκενα σφαίρα-σφαίρα και σφαίρα-πλάκα.

### 5.4.1 Πειραματική διερεύνηση διακένου τύπου ακίδα-ακίδα

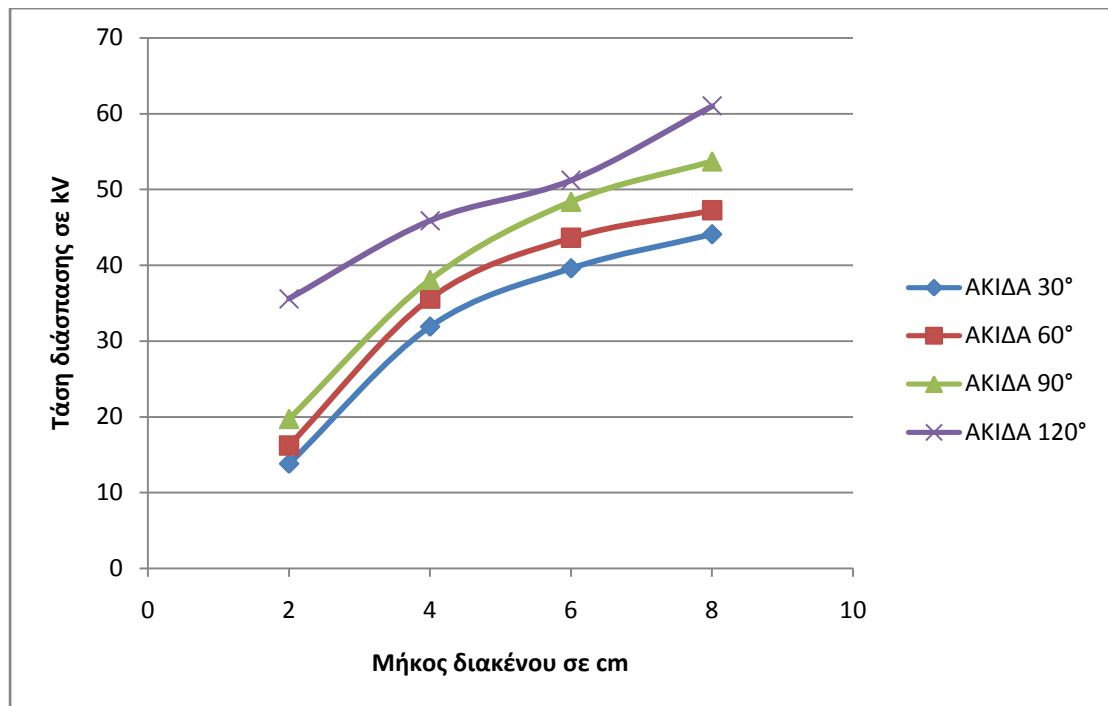


**Σχήμα 5.1** Γραφήματα της τάσης διάσπασης συναρτήσει του μήκους διακένου για το διάκενο ακίδα-ακίδα.

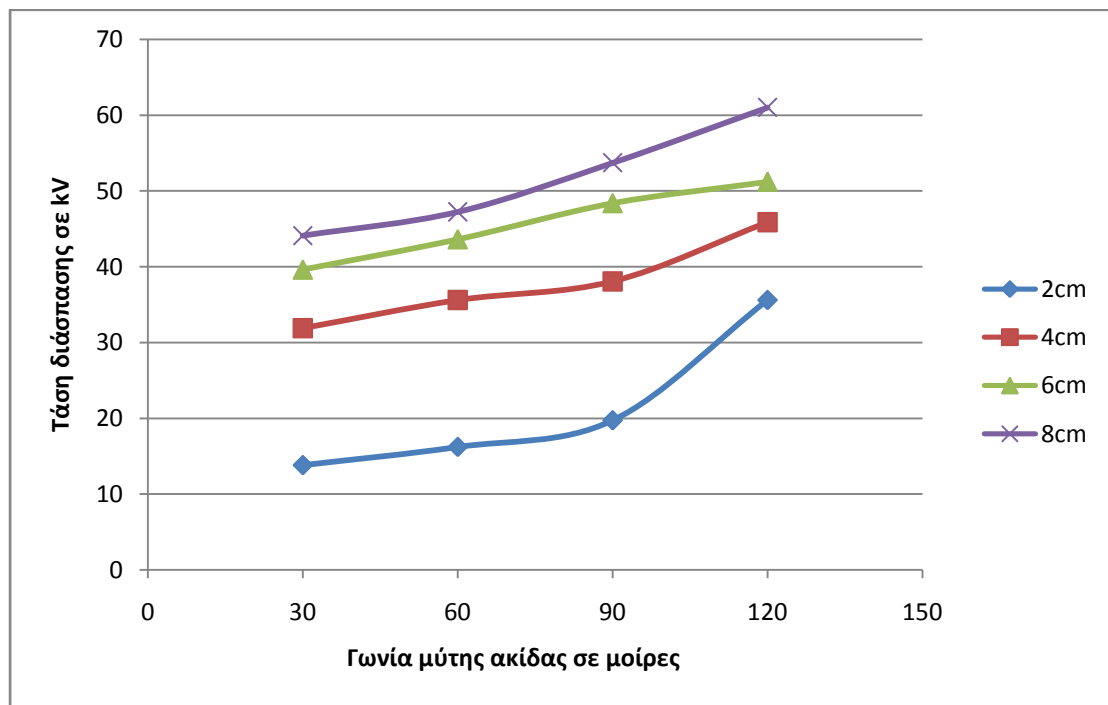


**Σχήμα 5.2** Γραφήματα της τάσης διάσπασης συναρτήσεως της γωνίας των ακίδων για το διάκενο ακίδα-ακίδα.

Και συγκεντρωμένα τα προηγούμενα σε ένα γράφημα



**Σχήμα 5.3** Αποτελέσματα τάσης διάσπασης συναρτήσει του μήκους διακένου, τύπος διακένου ακίδα-ακίδα.



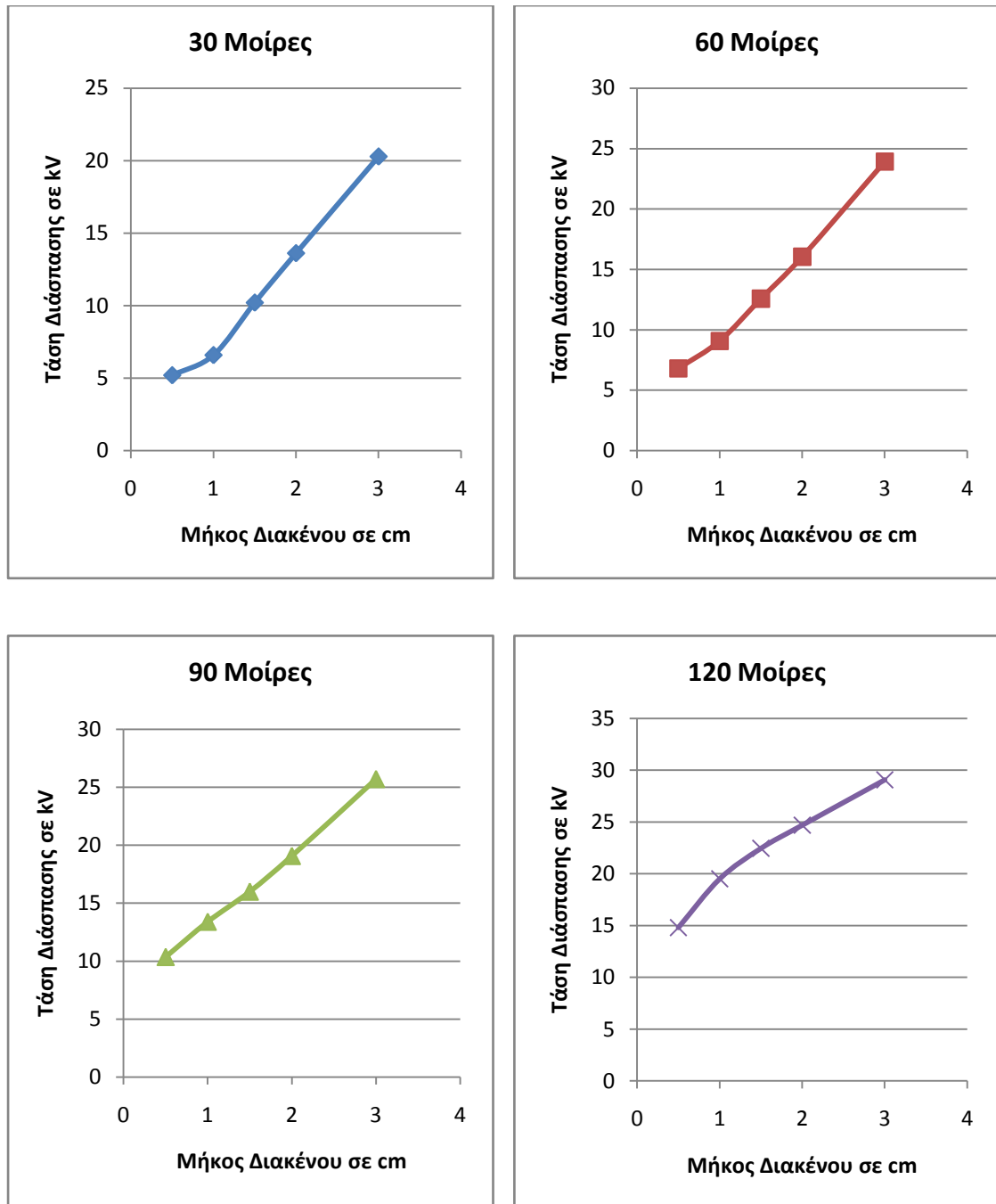
**Σχήμα 5.4** Αποτελέσματα τάσης διάσπασης συναρτήσει της γωνίας των ακίδων, τύπος διακένου ακίδα-ακίδα.

## Συμπεράσματα.

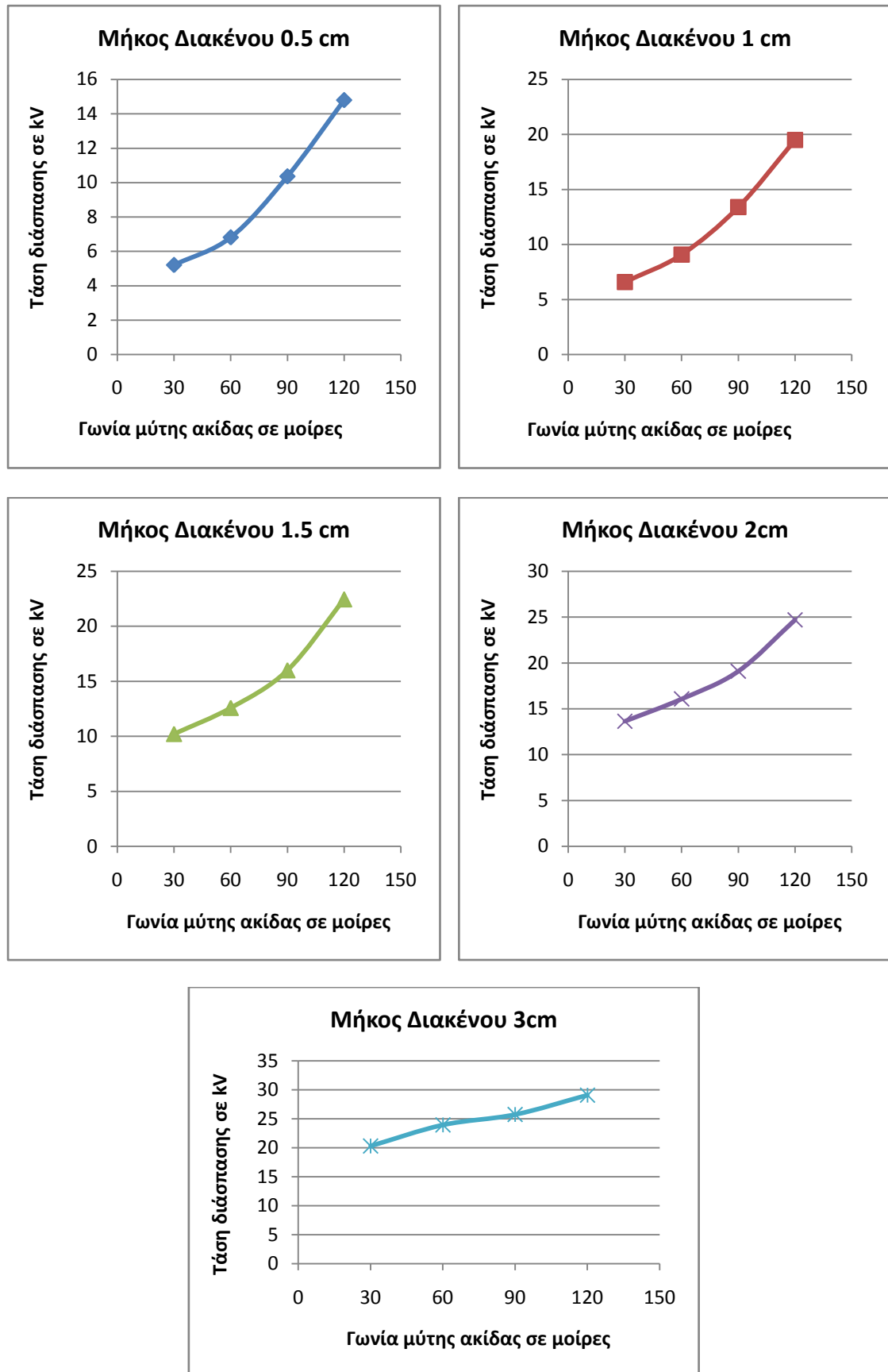
Παρατηρώντας τα παραπάνω γραφήματα προκύπτουν κάποια συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά επαληθεύουν, την θεωρία. Οι παράμετροι που καθορίζουν το επίπεδο της τάσης διάσπασης, στα ανομοιογενή διάκενα είναι πάρα πολλοί. Στην εργασία αυτή θα γίνει μελέτη δύο εξ αυτών. Πρώτον το μήκος διακένου και δεύτερον τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων. Όσον αφορά το μήκος του διακένου, από το γράφημα του σχήματος 5.3 (τάση διάσπασης συναρτήσεως του μήκους διακένου), φαίνεται καθαρά ότι η τάση διάσπασης αυξάνεται με την αύξηση του μήκους της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επίσης, με την αύξηση της γωνίας των ηλεκτροδίων, έχουμε και αύξηση της τάσης διάσπασης. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στα διάκενα με μήκος 6 και 8 εκατοστά. Τέλος για τα ηλεκτρόδια των  $120^\circ$  βλέπουμε ότι η τάση διάσπασης αυξάνεται σημαντικά, σε σχέση με τα άλλα ηλεκτρόδια, και για όλα τα μήκη των διακένων. Αυτό οφείλεται στο ότι στις  $120^\circ$  τα ηλεκτρόδια έχουν μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας με αποτέλεσμα να έχουμε ένα λιγότερο ανομοιογενές πεδίο άρα και μεγαλύτερη τάση διάσπασης.

Κλείνοντας, το διάκενο ακίδα-ακίδα, έχει το πιο ανομοιογενές πεδίο από τις διατάξεις που μελετήθηκαν. Επομένως είναι και πιο δύσκολο να βγουν ασφαλή συμπεράσματα αφού οι παράγοντες που επηρεάζουν την τάση διάσπασης είναι πολλοί. Επιπλέον υπήρχε μία κατασκευαστική ατέλεια στην διάταξη που ενδεχομένως να αλλοίωσε κατά ένα βαθμό τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας. Η ατέλεια αυτή ήταν το ότι δεν στάθηκε δυνατό να ευθυγραμμιστούν πλήρως οι ακίδες μεταξύ τους. Έτσι τα όποια συμπεράσματα εξάγονται από αυτό το πείραμα προκύπτουν με κάθε επιφύλαξη.

### 5.4.2. Πειραματική διερεύνηση διακένου τύπου ακίδα-πλάκα

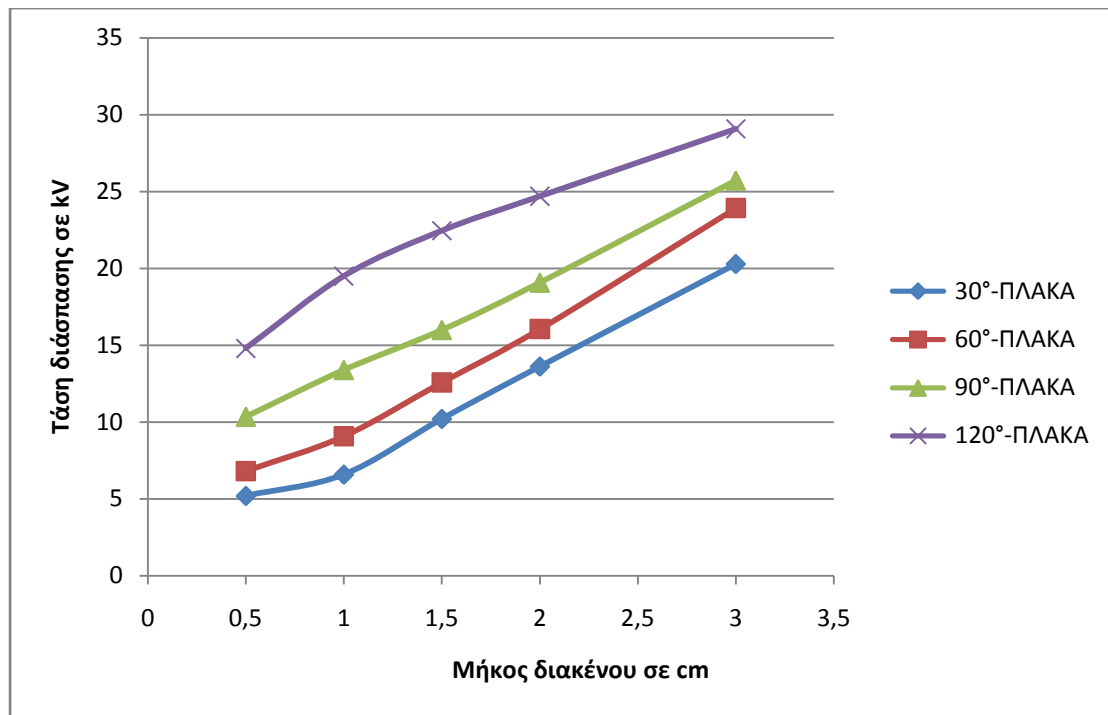


**Σχήμα 5.5** Γραφήματα της τάσης διάσπασης συναρτήσει του μήκους διακένου για το διάκενο ακίδα-πλάκα.

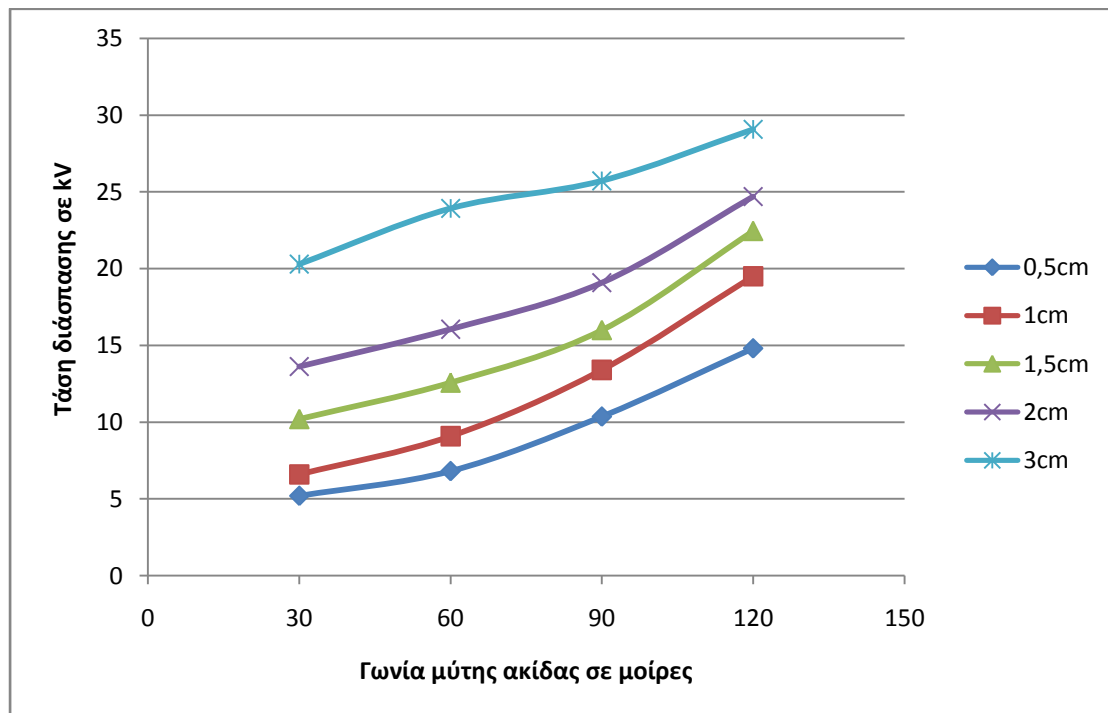


**Σχήμα 5.6** Γραφήματα της τάσης διάσπασης συναρτήσεϊ της γωνίας των ακίδων για το διάκενο ακίδα-πλάκα.





**Σχήμα 5.7** Αποτελέσματα τάσης διάσπασης συναρτήσεϊ του μήκους διακένου, τύπος διακένου ακίδα-πλάκα.



**Σχήμα 5.8** Αποτελέσματα τάσης διάσπασης συναρτήσεϊ της γωνίας των ακίδων, τύπος διακένου ακίδα-πλάκα.

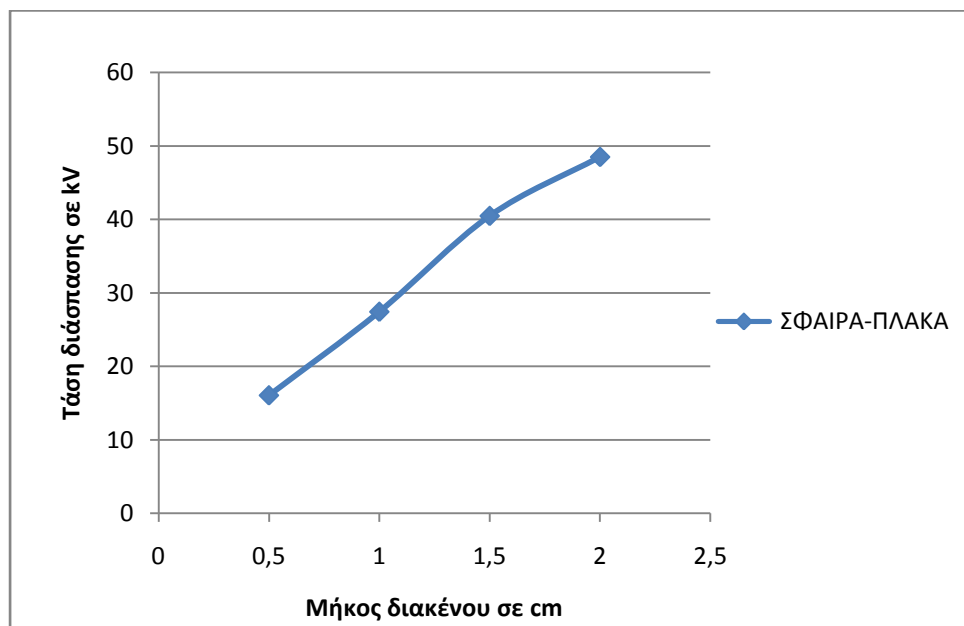
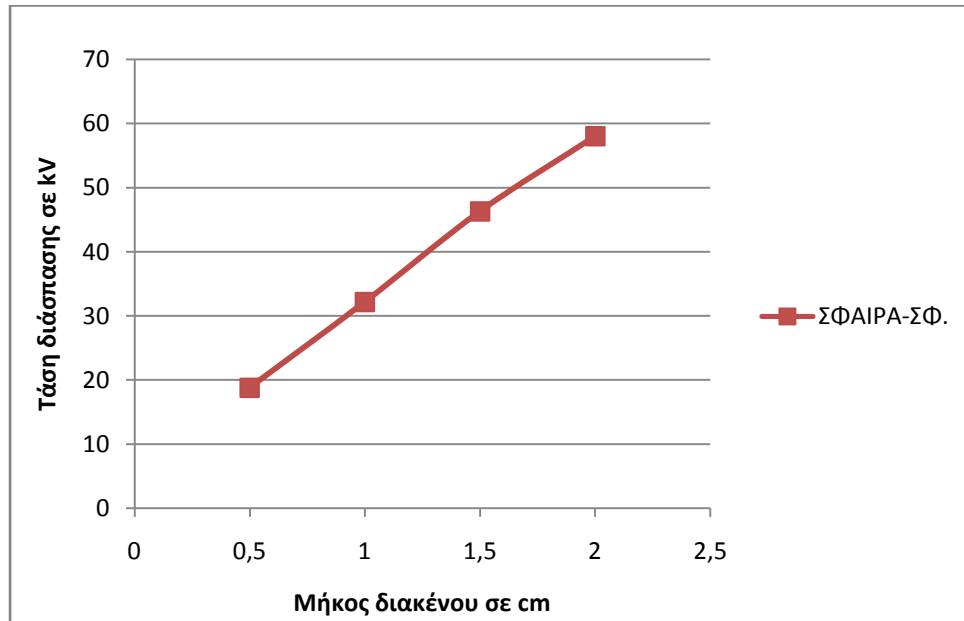
## Συμπεράσματα

Παρόμοια συμπεράσματα με το διάκενο ακίδα-ακίδα προκύπτουν και εδώ. Εδώ τα πράγματα είναι καλύτερα με την έννοια ότι το διάκενο ακίδα-πλάκα είναι λιγότερο ανομοιογενές, ενώ η ακίδα με την πλάκα ευθυγραμμίζονται ευκολότερα, επομένως υπήρχαν και λιγότερα προβλήματα σε σχέση με το διάκενο ακίδα-ακίδα. Έτσι εξάγονται πιο ασφαλή συμπεράσματα.

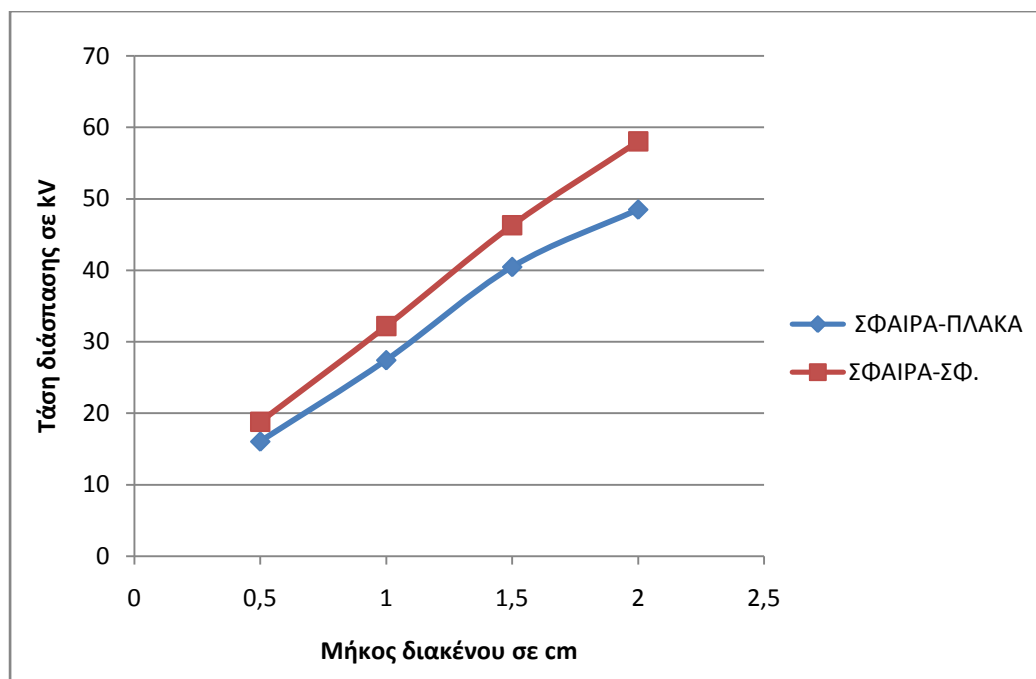
Μελετώντας τα γραφήματα στα σχήματα 5.7 και 5.8 παραπάνω, προκύπτει ότι όσο αυξάνεται το μήκος του διακένου αυξάνεται και η τάση διάσπασης, ενώ φαίνεται ότι και με αύξουσα μεταβολή της γωνίας της ακίδας αυξάνεται η τάση διάσπασης, αφού το πεδίο γίνεται λιγότερο ανομοιογενές.

Συγκρινόμενο το διάκενο αυτό με το διάκενο ακίδα-ακίδα προκύπτει μια ουσιαστική διαφορά. Εδώ τα γραφήματα έχουν μια πιο γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με πριν και αυτό οφείλεται στο ότι εδώ η πλάκα είναι ένα ηλεκτρόδιο με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας. Έτσι ο βαθμός ανομοιογένειας είναι μικρότερος άρα και η γραμμική συμπεριφορά στην τάση διάσπασης είναι εμφανής. Το κοινό σημείο που έχουν τα δύο διάκενα (ακίδα-ακίδα και ακίδα-πλάκα), και που μπορούν να συγκριθούν, είναι το διάκενο με μήκος 2 εκατοστά. Εδώ ενώ θα έπρεπε, το ακίδα-πλάκα, να έχει υψηλότερη τάση διάσπασης, λόγο λιγότερης ανομοιογένειας, αντιθέτως αυτό δεν ισχύει. Αυτό όμως επιβεβαιώνεται και από την θεωρία (Μ. Δανίκας Στοιχεία Υψηλών Τάσεων) όπου τα διάκενα ακίδα-πλάκα με την ακίδα θετική, όπως ήταν και στο πείραμα, έχουν χαμηλότερη τάση διάσπασης από τα διάκενα ακίδα-ακίδα. Από την άλλη, σύμφωνα με την θεωρία, το ακίδα-πλάκα με την ακίδα αρνητική έχει την υψηλότερη τάση διάσπασης από τα άλλα δύο διάκενα. Έχουμε δηλαδή:  $U_{SAΠ(-)} > U_{S AA} > U_{SAΠ(+)}$ , όπου  $U_S$  η τάση διάσπασης. Αυτό εξηγείτε ως εξής: στο ακίδα-πλάκα με την ακίδα αρνητική, ΑΠ(-), τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αέρα απομακρύνονται από το υψηλό πεδίο της ακίδας προς την πλάκα και έτσι απαιτείται περισσότερη ενέργεια από το πεδίο για να επέλθει η διάσπαση. Στο ΑΠ(+) τα ηλεκτρόνια κινούνται (έλκονται) προς το υψηλό πεδίο της θετικής ακίδας, κάτι που απαιτεί λιγότερη ενέργεια. Για το ακίδα-ακίδα έχουμε μια συμμετρία ως προς την πολικότητα και έτσι υπάρχει πάντα μια περιοχή που ευνοεί τις συνθήκες για διάσπαση. Αν στο διάκενο ακίδα-ακίδα χαρακτηί ο οριζόντιος άξονας συμμετρίας, σχηματίζονται δύο διάκενα ακίδα-πλάκα με το μισό αρχικό μήκος διακένου. Έτσι έχουμε την εμφάνιση δύο κορόνων λήντερ, από τα δύο ηλεκτρόδια, και την διάσπαση να συμβαίνει όταν οι δύο λήντερ συναντηθούν κάπου στη μέση. Συνυπάρχουν δύο εκκενώσεις αρνητική και θετική, πειραματικά λοιπόν αποδεικνύεται ότι η τάση διάσπασης αυτού του διακένου είναι μεταξύ των άλλων δύο. Για καλύτερη περιγραφή του φαινομένου βλέπε παράγραφο 3.9 (Διάσπαση του αέρα σε ανομοιογενές πεδίο).

### 5.4.3 Πειραματική διερεύνηση διακένου τύπου σφαίρα-πλάκα και σφαίρα-σφαίρα



**Σχήμα 5.9** Αποτελέσματα τάσης διάσπασης συναρτήσει του μήκους διακένου, τύπος διακένου **α.** σφαίρα- σφαίρα **β.** σφαίρα-πλάκα.



**Σχήμα 5.10** Αποτελέσματα τάσης διάσπασης συναρτήσεως του μήκους διακένου, τύπος διακένου σφαίρα-πλάκα και σφαίρα-σφαίρα.

### Συμπεράσματα

Τα διάκενα αυτά εξετάζονται μόνο ως προς μια μεταβλητή, το μήκος τους.

Τα διάκενα αυτά ονομάζονται και κατά σύμβαση ομοιογενή διάκενα, και έχουν γραμμική και προβλέψιμη συμπεριφορά. Αυτό φαίνεται και στις τιμές της τάσης διάσπασης όπου το εύρος της διαφοράς μεταξύ τους είναι πάρα πολύ μικρό. Παρατηρήθηκε μεταξύ των δέκα διαδοχικών διασπάσεων διαφορά μόνο στο πρώτο ή και στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο, έτσι και η τυπική απόκλιση σε αυτές τις μετρήσεις (βλέπε παράρτημα) είναι πολύ μικρή. Τα στοιχεία που παρατηρούνται είναι οι πολύ υψηλές τάσεις διάσπασης, το μικρό μήκος διακένου και η γραμμική συμπεριφορά. Μια μικρή διαφορά που υπάρχει, μεταξύ των δύο διακένων, είναι ότι το διάκενο σφαίρα-πλάκα (σχήμα 5.10 μπλε γραμμή) έχει μικρότερες τάσεις διάσπασης, αφού είναι πιο ανομοιογενές το πεδίο σε αυτό το διάκενο, ειδικά σε μεγάλα μήκη διακένου.

## 5.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Στην άσκηση αυτή, πέρα από την προσομοίωση στο QuickField και από τα πειραματικά αποτελέσματα, υλοποιήθηκαν και κάποια μοντέλα παλινδρόμησης. Πιο συγκεκριμένα, με την χρησιμοποίηση υπολογιστικού πακέτου (SPSS Statistics 17.0) και μέσα από τα πειραματικά δεδομένα, προέκυψε η εξαγωγή κάποιων συναρτήσεων. Για κάθε μοντέλο διακένων δηλαδή, ακίδα-ακίδα, ακίδα-πλάκα, σφαίρα-πλάκα και σφαίρα-σφαίρα προκύπτει μια συνάρτηση που δίνει την τάση διάσπασης συναρτήσει δύο ή μίας μεταβλητής. Αν υπάρχει ακίδα στην γεωμετρία οι μεταβλητές είναι η γωνία και το μήκος διακένου, ενώ αν υπάρχει σφαίρα η μεταβλητή είναι μόνο το μήκος του διακένου.

Γενικά στις θετικές επιστήμες δύο ποσοτικές μεταβλητές,  $X$ ,  $Y$  είναι δυνατόν να συνδέονται με μια **ακριβή σχέση**, έτσι ώστε για **κάθε τιμή** της μεταβλητής  $X$  να αντιστοιχεί **μία τιμή** της μεταβλητής  $Y$ . Σε επιστήμες όμως όπως αυτή των υψηλών τάσεων ακριβείς συναρτησιακές σχέσεις, όπως τις περιγράψαμε, δεν υπάρχουν. Έτσι, ενώ είναι λογικό να υποθέσουμε ότι οι μεταβλητές, μήκος διακένου, γωνία ακίδας και τάση διάσπασης συνδέονται έντονα, δεν συνδέονται με μια ακριβή συναρτησιακή σχέση αλλά με σχέση στοχαστική ή στατιστική. Για να βρούμε λοιπόν πια είναι η μεταξύ τους σχέση (των μεταβλητών) πρέπει να προσδιοριστεί ο κατάλληλος μαθηματικός τύπος  $Y=f(X)$  που αποκαλείται εξίσωση παλινδρόμησης της  $Y$  επί της  $X$ . Έτσι, με το μοντέλο παλινδρόμησης δίνεται η δυνατότητα να υπάρχει μια εκτίμηση ή μια εικόνα της τάσης διάσπασης, συναρτήσει των μεταβλητών, για διαφορετικές τιμές μεταβλητών, πέρα από τις τυποποιημένες που χρησιμοποιήθηκαν στην άσκηση, με σχετικά καλή ακρίβεια. Για καλύτερη ακρίβεια οι τιμές των μεταβλητών θα πρέπει να είναι μεταξύ των ακραίων τιμών των μεταβλητών που ίσχυαν στην πειραματική διαδικασία ( $30^\circ$ - $120^\circ$  και  $0.5\text{cm}$  έως  $8\text{cm}$ ). Για τα διάκενα που υπάρχει ακίδα οι εξισώσεις θα είναι της μορφής  $Y= b_0+b_1X_1+b_2X_2$  και  $Y= b_0+b_1X_1$  για τα διάκενα με σφαίρες, όπου  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , σταθερές,  $Y$  η ανεξάρτητη μεταβλητή και  $X_1$ ,  $X_2$  οι εξαρτημένες μεταβλητές δηλαδή γωνία ακίδας και μήκος διακένου. Τέλος, θα αναφερθούμε σε κάποιες στατιστικές παραμέτρους οι οποίες όμως θα εξηγηθούν στην πορεία.

Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες από την ανάλυση των δεδομένων καθώς και η συνάρτηση που προέκυψε για κάθε μοντέλο.

## 1. Διάκενο ακίδα-ακίδα.

Πίνακας 5.1

Μοντέλο ακίδα-ακίδα	Συντελεστές	Sig.	Δείκτης Προσδιορισμού R <sup>2</sup>	Τυπικό Σφάλμα
Σταθερά	1,358	0.000	0.914	3,8515
Μήκος διακένου	4,928	0.000		
Γωνία μύτης ακίδας	0,174	0.000		

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει η εξής συνάρτηση:

$$U_S = 1,358 + 4,928d + 0,174\varphi \quad \text{σε kV} \quad (5.12)$$

Όπου:  $U_S$ = η τάση διάσπασης,  $d$ =το μήκος του διακένου σε cm και  $\varphi$ = η γωνία της μύτης της ακίδας σε μοίρες

Η εξίσωση αυτή λέει ότι αν αυξηθεί το μήκος του διακένου κατά ένα εκατοστό τότε η τάση διάσπασης θα αυξηθεί κατά μέση τιμή 4,928 kV ενώ αν αυξήσουμε την γωνία κατά 1 μοίρα η τάση θα αυξηθεί κατά 0,174 kV.

Ο τρόπος υπολογισμού των συντελεστών της παραπάνω συνάρτησης που προσεγγίζει τα δεδομένα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο έγινε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ωστόσο μετά τον υπολογισμό των συντελεστών προκύπτει το ερώτημα σε ποιο βαθμό η εξίσωση προσαρμόζεται στα αριθμητικά δεδομένα; Αυτήν την πληροφορία την δίνει το **R<sup>2</sup> ή Δείκτης Προσαρμογής ή προσδιορισμού** και παρέχει το κυριότερο μέτρο για τη μέτρηση της ποιότητας προσαρμογής. Ο δείκτης προσδιορισμού R<sup>2</sup> παίρνει τιμές στο διάστημα [0, 1]. Όσο πλησιέστερη προς τη μονάδα είναι η τιμή του R<sup>2</sup>, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της προσαρμογής της εξίσωσης. Αν R<sup>2</sup>=1 (ή 100%) τότε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι μηδέν και η καμπύλη διέρχεται από όλα τα σημεία. Επιπλέον υπάρχει και το τυπικό σφάλμα το οποίο είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσο έχουν διασπαρθεί οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής γύρω από τη γραμμή που δίνει η εξίσωση, δίνοντας ουσιαστικά μια εικόνα του πόσο μπορεί να απέχει η υπολογισθείσα τιμή από την πραγματική. Επανερχόμενοι τώρα στα δεδομένα, αυτό λέει ότι κατά 91,4% η μεταβλητότητα της τάσης διάσπασης οφείλεται στην γωνία και στο μήκος του διακένου ενώ κατά 8,6% οφείλεται σε αστάθμητους παράγοντες. Οι αστάθμητοι παράγοντες όπως έχει προαναφερθεί είναι

πολλοί όπως: υγρασία, πίεση, θερμοκρασία, ευθυγράμμιση ακίδων κ.α. Όσον αφορά τη στήλη με το **Sig.** (significant σημαντικότητα), αυτή είναι μια παράμετρος που δείχνει κατά πόσο η συγκεκριμένη μεταβλητή επηρεάζει την εξίσωση στατιστικά. Εδώ είναι επιθυμητό οι τιμές αυτής της μεταβλητής να είναι μικρότερες από **Sig<0,05** για να είναι στατιστικά έγκυρα τα δεδομένα. Οπότε εδώ είναι εντάξει αφού όλες οι τιμές του Sig. πληρούν το κριτήριο αυτό. Τέλος το τυπικό σφάλμα, δείχνει ότι το αποτέλεσμα της συνάρτησης θα είναι με απόκλιση  $\pm 3,8515$  kV.

## 2. Διάκενο ακίδα-πλάκα.

Ο πίνακας για αυτό το διάκενο είναι ο εξής:

**Πίνακας 5.2**

Μοντέλο ακίδα-πλάκα	Συντελεστές	Sig.	Δείκτης Προσδιορισμού R <sup>2</sup>	Τυπικό Σφάλμα
Σταθερά	-2.909	0.000	0.933	1.3528
Μήκος διακένου	6,195	0.000		
Γωνία μύτης ακίδας	0.119	0.000		

Και έτσι εδώ προκύπτει η εξίσωση:

$$U_s = -2,909 + 6,195d + 0,119\phi \quad \text{σε kV} \quad (5.13)$$

Εδώ επαληθεύεται η γραμμικότητα που χαρακτηρίζει αυτό το διάκενο και που αναφέρεται πριν στην παράγραφο 5.4.2.. Ο δείκτης προσδιορισμού έχει πολύ μεγάλη τιμή, στο 93,3%, το τυπικό σφάλμα στο  $\pm 1,3528$  kV και οι τιμές της σημαντικότητας (Sig.) κάτω από τα επίπεδα που πρέπει να είναι. Επομένως αυτή είναι μια συνάρτηση που δίνει αποτελέσματα με πολύ καλή ακρίβεια.

### 3. Διάκενο σφαίρα-πλάκα.

Αντιστοίχως για το διάκενο αυτό έχουμε:

Πίνακας 5.3

Μοντέλο σφαίρα-πλάκα	Συντελεστές	Sig.	Δείκτης Προσδιορισμού R <sup>2</sup>	Τυπικό Σφάλμα
Σταθερά	5,515	0.000	0.991	1,19
Μήκος διακένου	22,08	0.000		

Εδώ πλέον τα πράγματα γίνονται πιο απλά, λόγο της σφαίρας που προκαλεί ομοιογενές πεδίο, και η εξίσωση είναι:

$$U_S=5,515+22,08d \quad \text{σε kV} \quad (5.14)$$

Όπως διακρίνεται η μεταβλητότητα της τάσης διάσπασης οφείλεται κατά 99,1% στο μήκος του διακένου το Sig. είναι κάτω από 0,05 και το τυπικό σφάλμα στο  $\pm 1,19\text{kV}$ .

### 4. Διάκενο σφαίρα-σφαίρα.

Ομοίως και εδώ ο πίνακας είναι:

Πίνακας 5.4

Μοντέλο σφαίρα-σφαίρα	Συντελεστές	Sig.	Δείκτης Προσδιορισμού R <sup>2</sup>	Τυπικό Σφάλμα
Σταθερά	5,905	0.000	0.998	0,6953
Μήκος διακένου	26,344	0.000		

Τέλος η εξίσωση εδώ είναι:

$$U_S=5,905+26.344d \quad \text{σε kV} \quad (5.14)$$



Επίσης, εδώ που υπάρχει ακόμα πιο ομοιογενές πεδίο, παρατηρείται ότι το ποσοστό μεταβλητότητας της τάσης διάσπασης από το μήκος του διακένου αγγίζει το 99,8%, το **Sig.** είναι κάτω από 0,05 ενώ και η τυπική απόκλιση είναι  $\pm 0,6953$  kV.

## Βιβλιογραφία

**ΚΥΡΙΑΚΟΣ Γ.ΣΙΔΕΡΑΚΗΣ** Σημειώσεις εργαστηρίου υψηλών τάσεων ΣΤΕΦ  
Τ.Ε.Ι. Κρήτης

**Κ.Α.ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ** ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, πρώτη έκδοση

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΞΑΝΘΟΣ** ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ EXCEL ΓΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ  
ΑΝΑΛΥΣΗ Εκδόσεις ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ

**ΑΝΤ.ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ-ΧΡ. ΚΟΙΛΙΑΣ** ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ  
ΑΝΑΛΥΣΗ Εκδόσεις ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

**Ι. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ** ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ Ι Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ

**ΜΙΧΑΗΛ ΔΑΝΙΚΑΣ** ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις  
ΣΜΠΙΛΙΑΣΑ.Ε.Β.Ε. Β' Έκδοση

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΚΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ**

### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε, με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, προσομοίωση του πειράματος και των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Με την βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου QuickField, έγινε γραφική ανάλυση ώστε να υπάρχει μια καλύτερη εικόνα της έντασης του πεδίου για κάθε γεωμετρία ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε.

#### **6.1.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ QUICKFIELD**

Το QuickField είναι ένα υπολογιστικό πακέτο το οποίο λειτουργεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Με την μέθοδο αυτή, τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την υποδιαίρεση της περιοχής μεταξύ των ηλεκτροδίων. Με τα τριγωνικά στοιχεία επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση των καμπύλων διαχωριστικών επιφανειών και γενικά οποιονδήποτε ορίων. Η μέθοδος έχει τη δυνατότητα δημιουργίας πολύ μικρών τριγωνικών στοιχείων εκεί όπου αναμένεται ότι το πεδίο θα είναι πολύ υψηλό καθώς και μεγαλύτερων στοιχείων εκεί όπου το πεδίο αναμένεται να είναι περισσότερο ομοιογενές. Δηλαδή πρόκειται για μιας ευέλικτης μεθόδου η οποία μπορεί να δίνει την κατανομή του πεδίου τόσο σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η κατανομή αναμένεται πιο ομοιόμορφη όσο και για περιπτώσεις κατά τις οποίες η διάταξη που μελετάται έχει πληθώρα αιχμηρών σημείων και επιφανειών, λόγω των οποίων προκύπτει ανομοιογενή κατανομή του πεδίου.

Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα επίλυσης και ανάλυσης διαφόρων προβλημάτων όπως :

- Ηλεκτροστατικά
- Γραμμικά και μη γραμμικά μαγνητοστατικά
- Γραμμικά και μη γραμμικά, σταθερής ή παροδικής κατάστασης προβλήματα μεταφοράς και διάχυσης θερμότητας
- Γραμμική μελέτη των τάσεων που ασκούνται σε κάποιο αντικείμενο
- Συνδυασμό προβλημάτων
- Προβλήματα βιομηχανικής συχνότητας

Με τις δυνατότητες που παρέχει μπορούμε, να περιγράψουμε ένα πρόβλημα (με γεωμετρίες, με ιδιότητες των υλικών, με πηγές και διάφορες

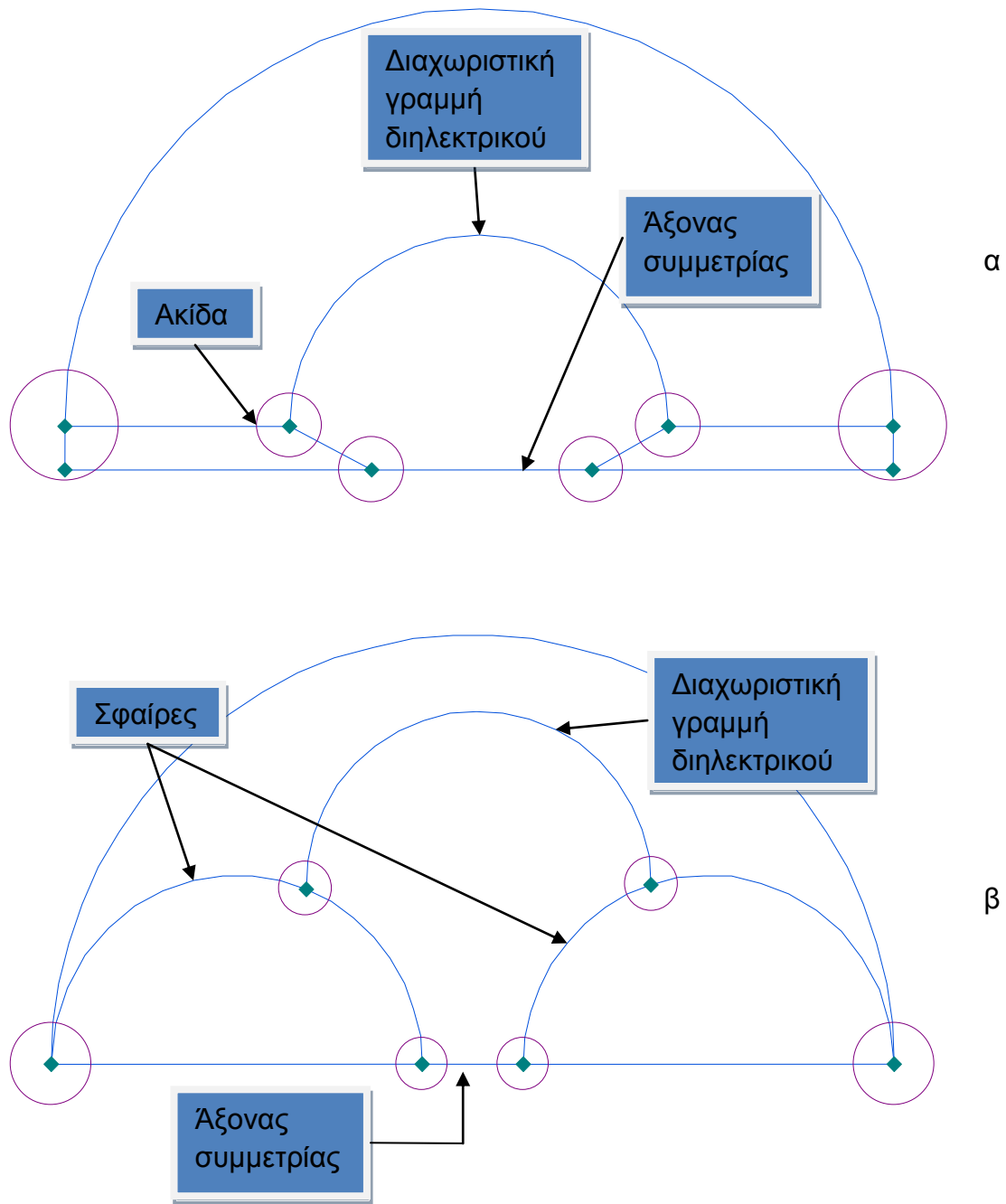
άλλες καταστάσεις) το οποίο θα λυθεί με υψηλή ακρίβεια και δίνοντας μια λεπτομερή ανάλυση του πεδίου είτε σε εικόνα με μεγάλη ανάλυση χρωμάτων είτε σε μορφή γραφήματος. Με αυτόν τον τρόπο λύνουμε περίπλοκα προβλήματα, τα οποία θα ήταν σχεδόν αδύνατον να λυθούν με χαρτί και μολύβι. Εδώ θα πρέπει βέβαια να αναφερθεί κάποια σημαντική παράμετρος. Η έκδοση του υπολογιστικού αυτού πακέτου που εμείς είχαμε στην διάθεση μας ήταν η δωρεάν ή αλλιώς η μαθητική έκδοση, η οποία έχει κάποιους περιορισμούς ως προς την ανάλυση του εκάστοτε προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα δίνει την δυνατότητα ανάλυσης του κάθε πεδίου μόνο με 255 κόμβους για κάθε διάκενο. Αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση για σχετικά μεγάλα διάκενα δεν είναι και η καλύτερη δυνατή, όμως αφ ενός η οικονομική μας δυνατότητα που δεν επιτρέπει την αγορά της κανονικής έκδοσης και αφ ετέρου για τις απαιτήσεις της εργασίας μας, σε αυτό το στάδιο, οι δυνατότητες που παρείχε αυτή η έκδοση ήταν αρκετές για την εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων. Επιπλέον για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος εφαρμόστηκε μια τεχνική. Αν παρατηρήσουμε τις εικόνες όπου υπάρχουν τα σχέδια με τις ακίδες, θα δούμε ότι γύρω από το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των ακίδων υπάρχει μια διαχωριστική γραμμή. Αυτή η γραμμή δεν κάνει τίποτα άλλο από το να μοιράζει το χώρο γύρω από τις ακίδες σε δύο μέρη. Αυτή είναι μια δυνατότητα που παρέχει το πρόγραμμα για την περίπτωση ύπαρξης διαχωριστικών επιφανειών στο μονωτικό υλικό, που σημαίνει ότι θα υπάρχουν διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά στο διάκενο. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα της ευέλικτης κατανομής για τους 255 κόμβους, δηλαδή για το χώρο γύρω από τις άκρες των ηλεκτροδίων, που είναι και το σημείο που ενδιαφέρει περισσότερο, να γίνει ανάλυση με περισσότερους κόμβους ενώ για τον απομακρυσμένο από τα ηλεκτρόδια χώρο, ανάλυση με λιγότερους κόμβους. Αυτό, βλέποντας τις εικόνες είναι εμφανές από το πλέγμα που υπάρχει γύρω από τα ηλεκτρόδια, δηλαδή, μεταξύ των ακίδων το πλέγμα είναι πιο πυκνό ενώ τριγύρω είναι αραιότερο. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνται όσο είναι δυνατότερο οι συνέπειες από τον περιορισμό των 255 κόμβων και επιτυγχάνεται η βέλτιστη ανάλυση για το σημείο που ενδιαφέρει καλύτερα.

## 6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

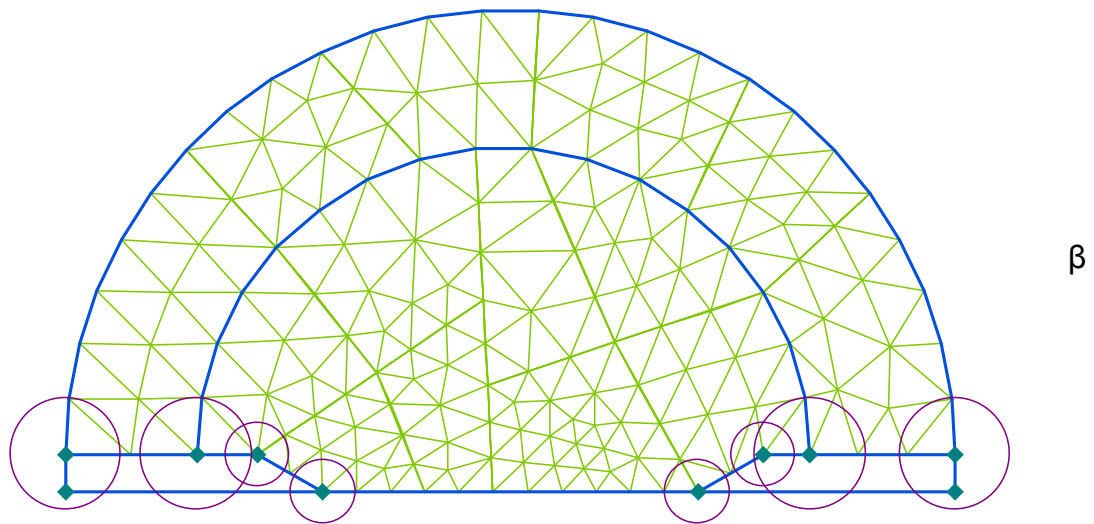
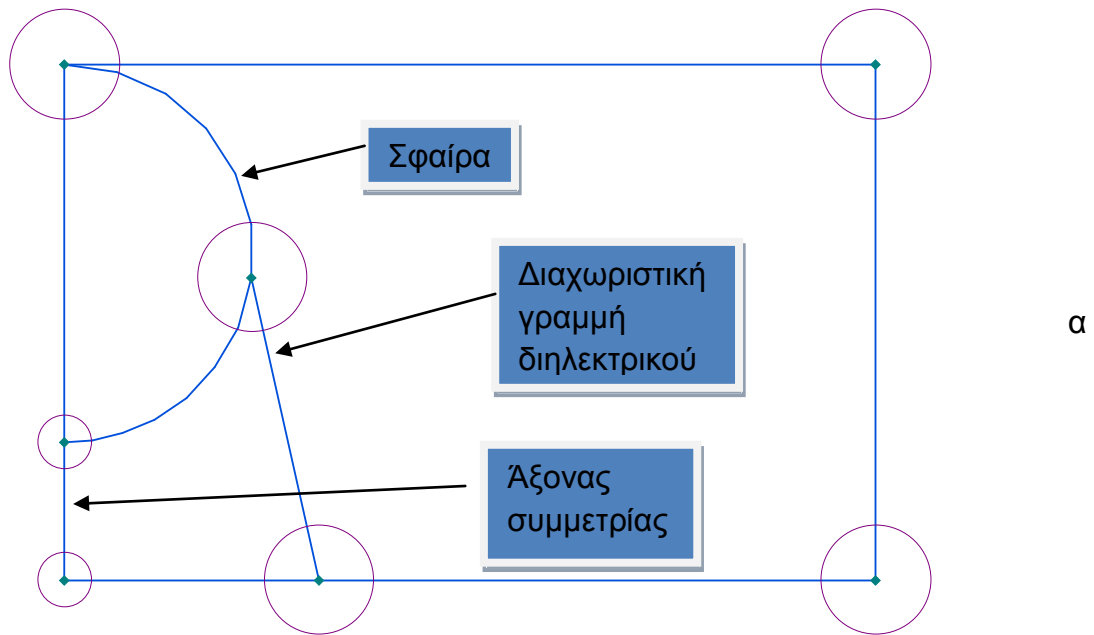
Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής. Αρχικά σχεδιάζονται οι γεωμετρίες που πρόκειται να μελετηθούν, η σχεδίαση γίνεται σε πραγματικές διαστάσεις, επιλέγεται ο άξονα συμμετρίας της διάταξης και έτσι σχεδιάζεται μόνο η μισή διάταξη. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν για αυτήν την σχεδίαση είναι στην ουσία τα ίδια για όλη την γεωμετρία, αφού μιλάμε για άξονα συμμετρίας άρα ότι ισχύει για την μια πλευρά θα ισχύει και για την άλλη. Στην συνέχεια χαρακτηρίζονται οι περιοχές που έχουν σχεδιαστεί, ακίδες, πλάκα και αέρας. Μετά ορίζονται οι τιμές των μεγεθών που χαρακτηρίζουν τα στοιχεία και πιο συγκεκριμένα δυναμικό για τις ακίδες

(σταθερή τάση ανά εκατοστό διακένου), και την πλάκα και ηλεκτρική διαπερατότητα για το μονωτικό που τα περιβάλλει (αέρας). Χωρίζεται το διηλεκτρικό σε δύο διαφορετικές επιφάνειες, εδώ ορίζεται και με πόση ακρίβεια θα γίνεται η ανάλυση στις επιφάνειες. Τέλος ζητείται από το πρόγραμμα να κάνει ανάλυση του ηλεκτρικού πεδίου και να παρουσιάσει γραφικά την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην κάθε διάταξη.

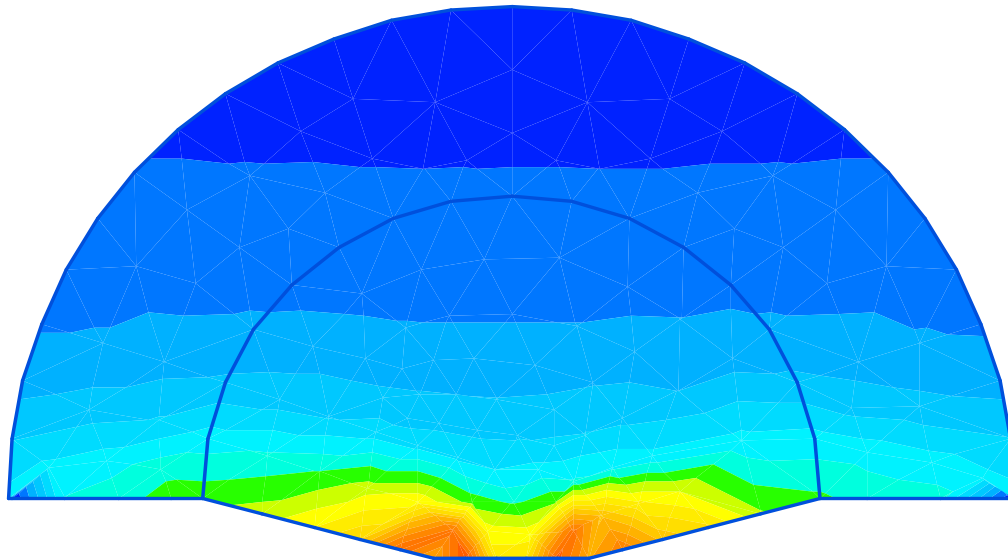
Αρχικά στα σχήματα (6.1 και 6.2), που ακολουθούν, φαίνεται και εξηγείται με πιο τρόπο σχεδιάστηκαν τα διάκενα στο πρόγραμμα QuickField. Στο σχήμα 6.2β διακρίνονται τα τριγωνικά στοιχεία με τα οποία αναλύεται το διάκενο. Οι κύκλοι στους κόμβους των σχεδίων κάτω υποδηλώνουν το μέγεθος των τριγώνων από κύκλο σε κύκλο. Είναι εμφανές ότι το πλέγμα που δημιουργείται ανάμεσα στις ακίδες είναι πυκνότερο. Αμέσως μετά ακολουθεί η ανάλυση των ηλεκτρικών πεδίων των διαφόρων γεωμετριών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Αρχικά θα φαίνονται τα γραφήματα και οι αναλύσεις για τα διάκενα ακίδα-ακίδα με όλες τις μοίρες και όλα τα μήκη που χρησιμοποιήθηκαν, στην συνέχεια τις γεωμετρίες των σφαιρών και τέλος τις γεωμετρίες ακίδα-πλάκα και σφαίρα-πλάκα.



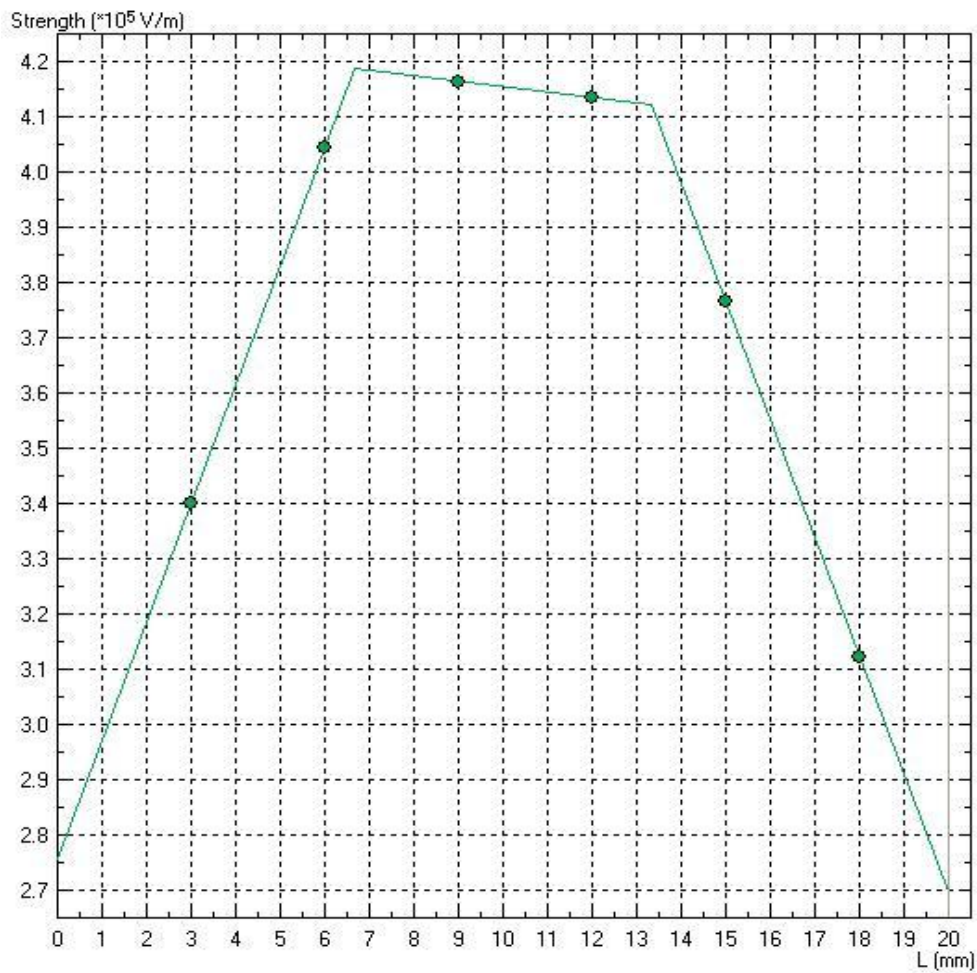
Σχήμα 6.1 α. Διάκενο ακίδα-ακίδα β. Διάκενο σφαίρα-σφαίρα



**Σχήμα 6.2 α.** Διάκενο σφαίρα-πλάκα **β.** Πλέγμα τριγωνικών στοιχείων διακένου ακίδας-ακίδας



α

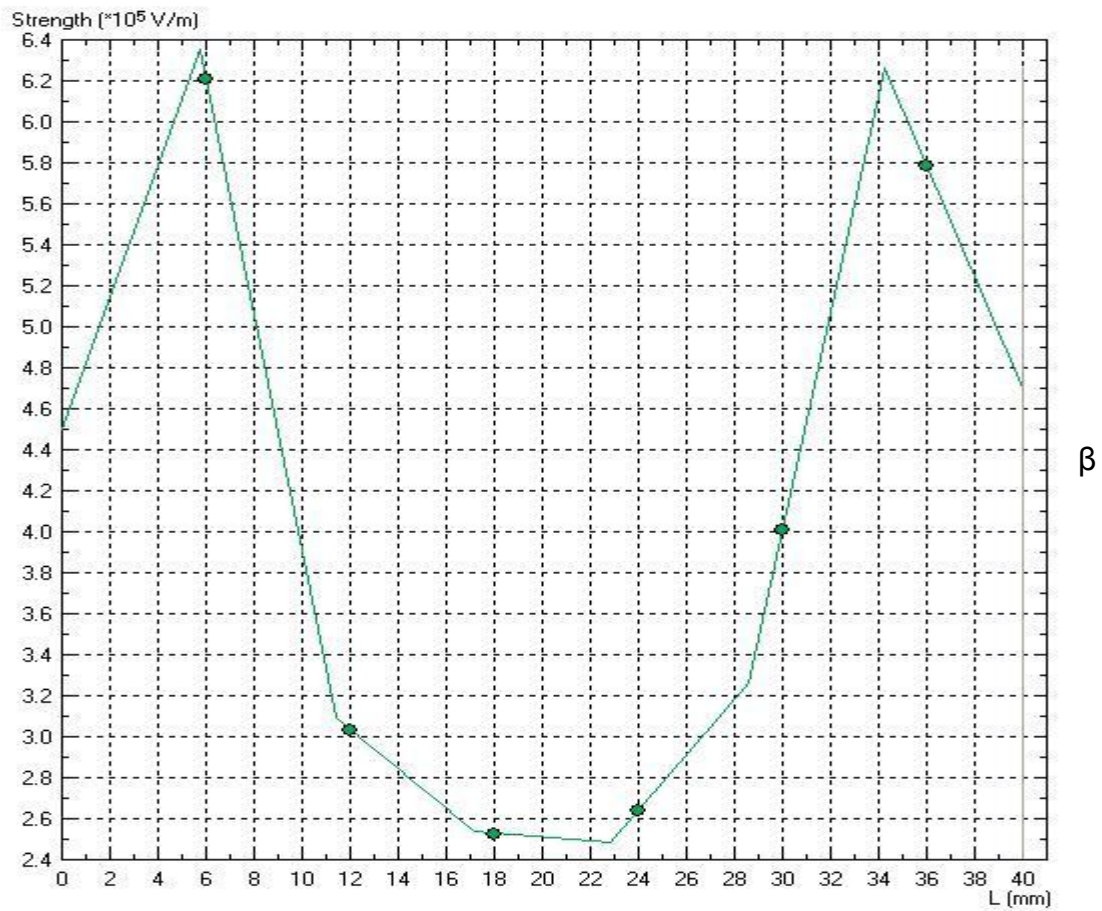
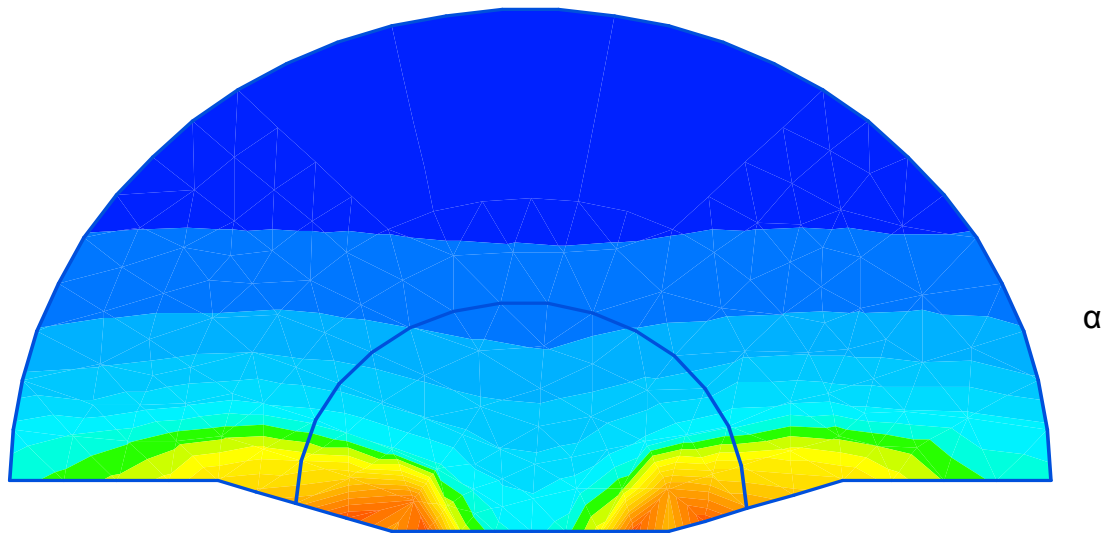


β

**Εικόνα 6.1 α)** Διάκενο ακίδα 30°- ακίδα 30° μήκος διακένου 2cm.

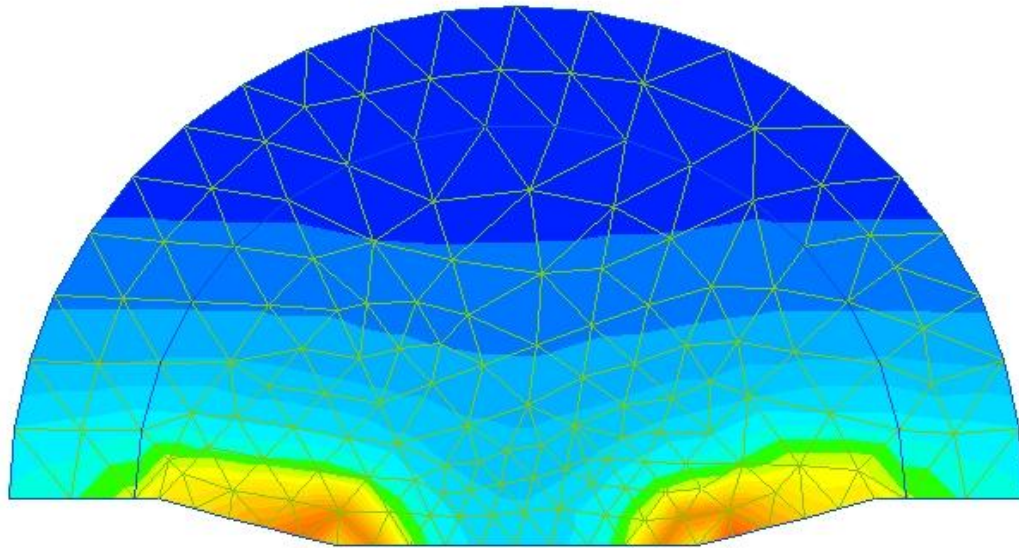
**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 30° μήκους 2cm.



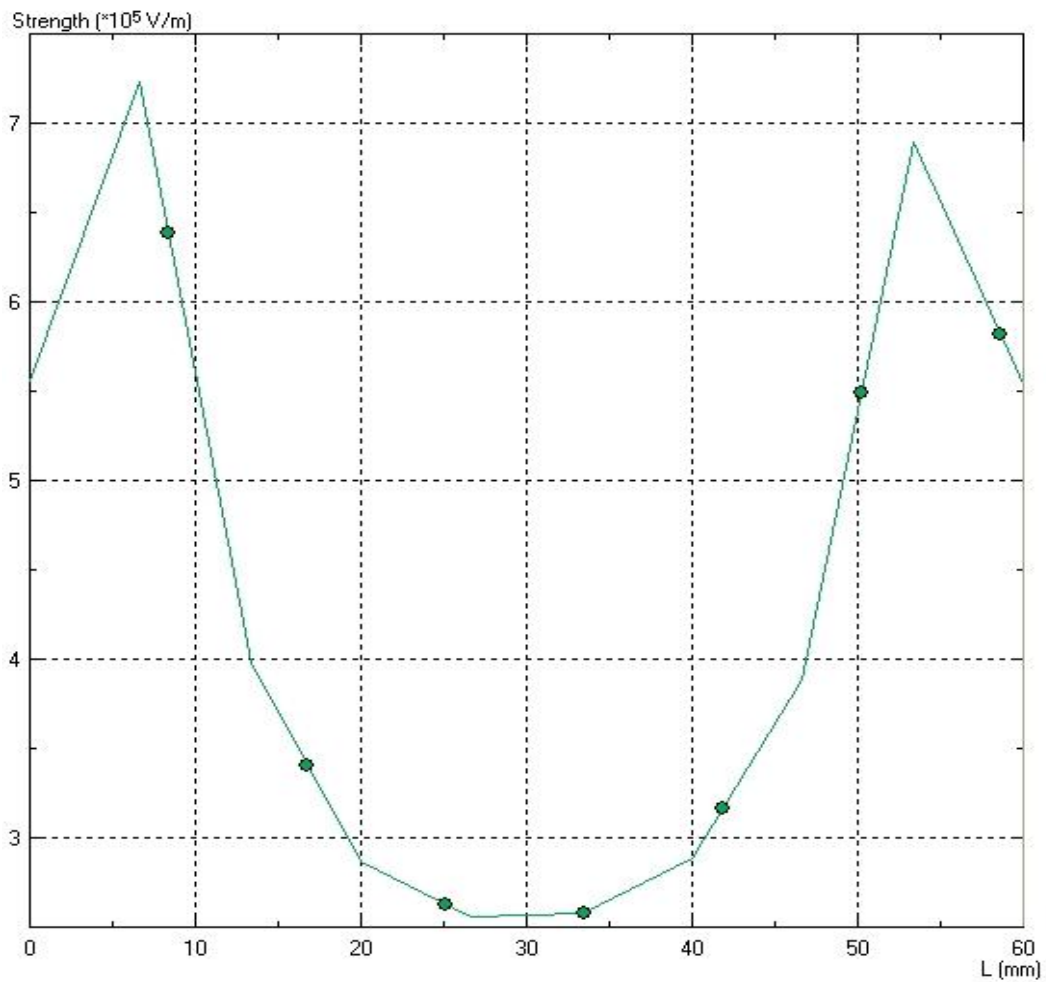


**Εικόνα 6.2 α)** Διάκενο ακίδα 30°- ακίδα 30° μήκος διακένου 4cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 30° μήκους 4cm.



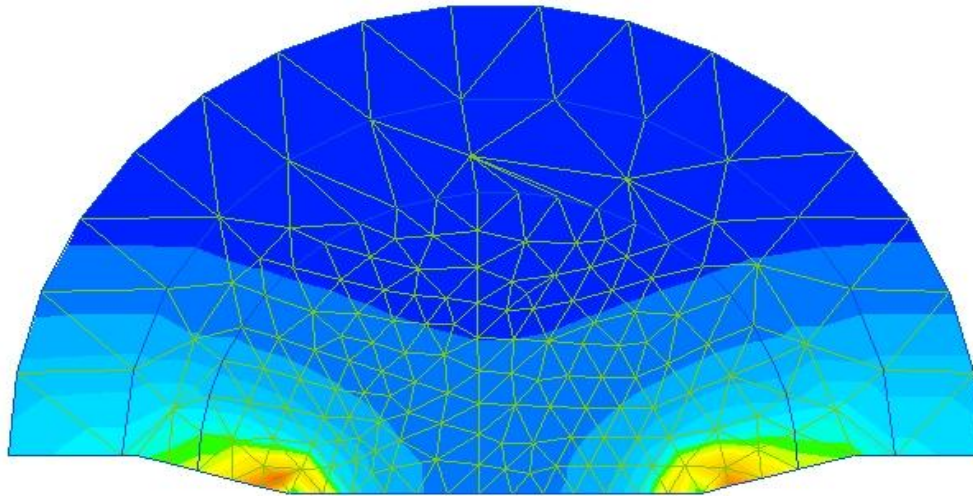
α



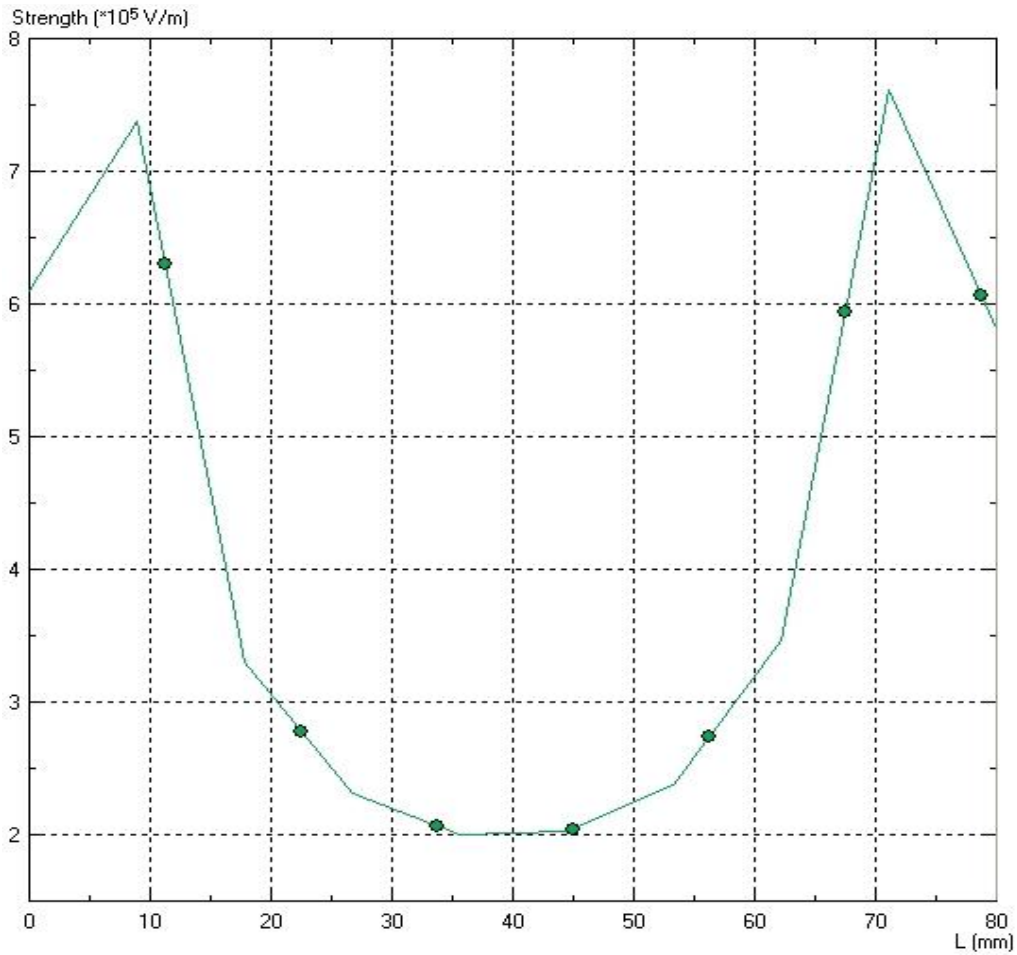
β

**Εικόνα 6.3 α)** Διάκενο ακίδα 30°- ακίδα 30° μήκος διακένου 6cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 30° μήκους 6cm.



α

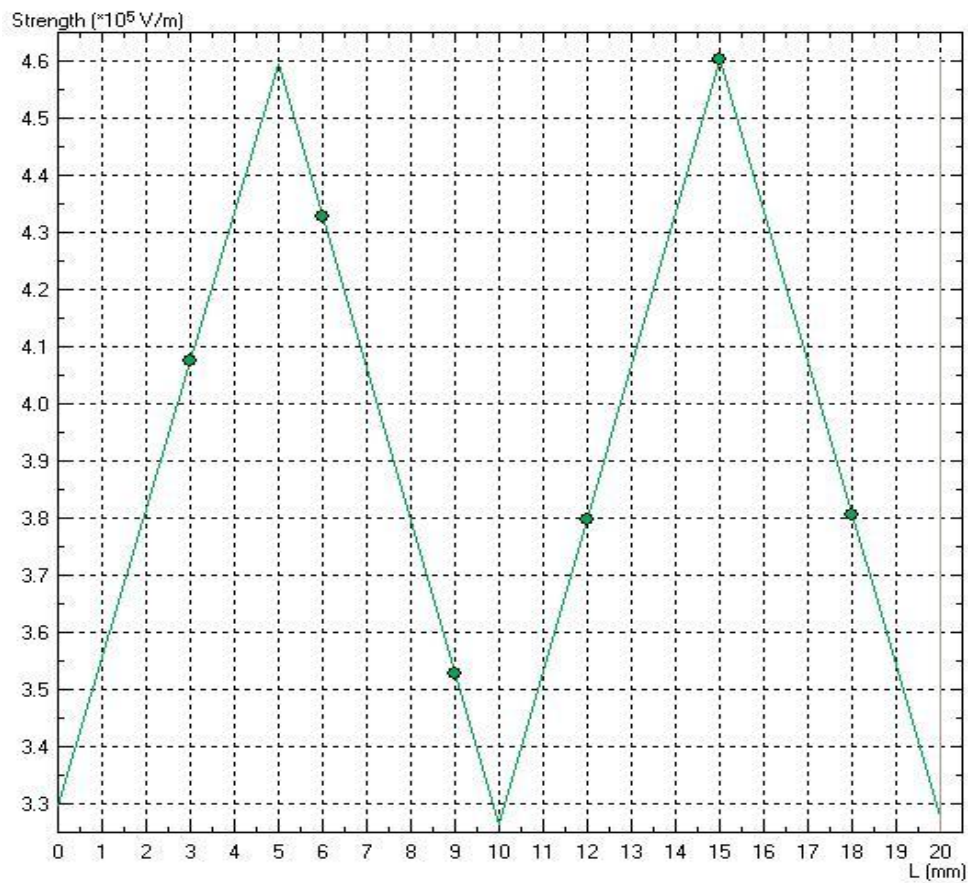
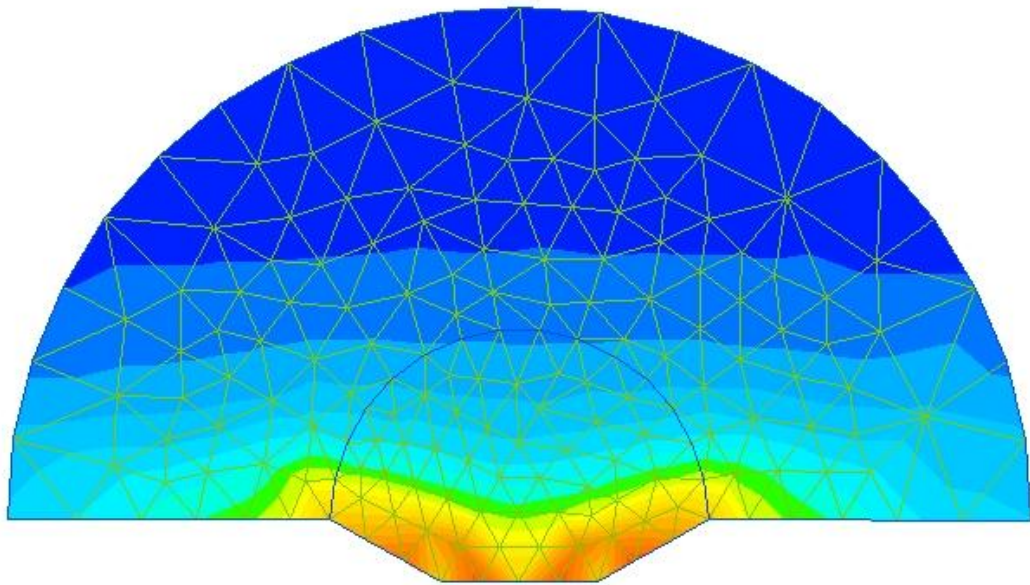


β

**Εικόνα 6.4 α)** Διάκενο ακίδα 30°- ακίδα 30° μήκος διακένου 8cm.

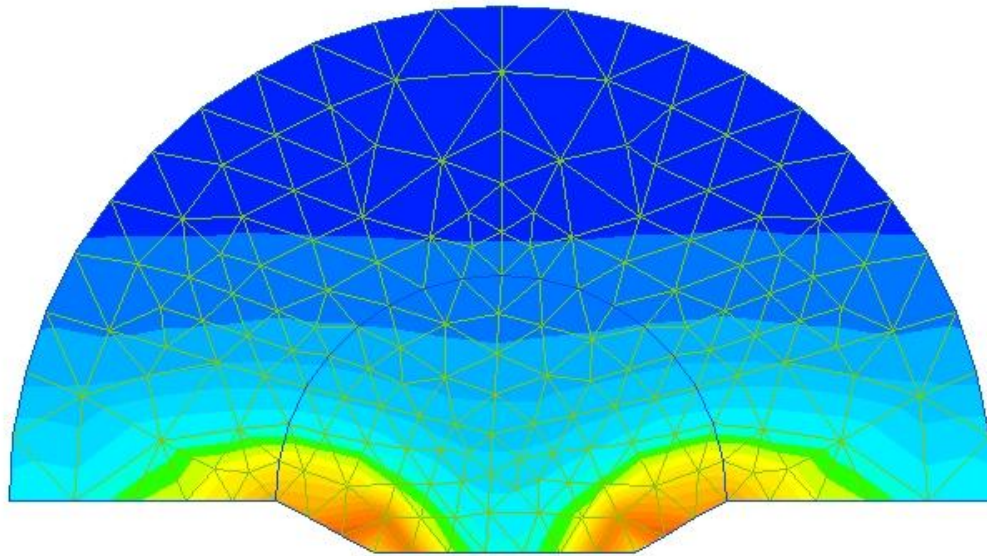
**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 30° μήκους 8cm.



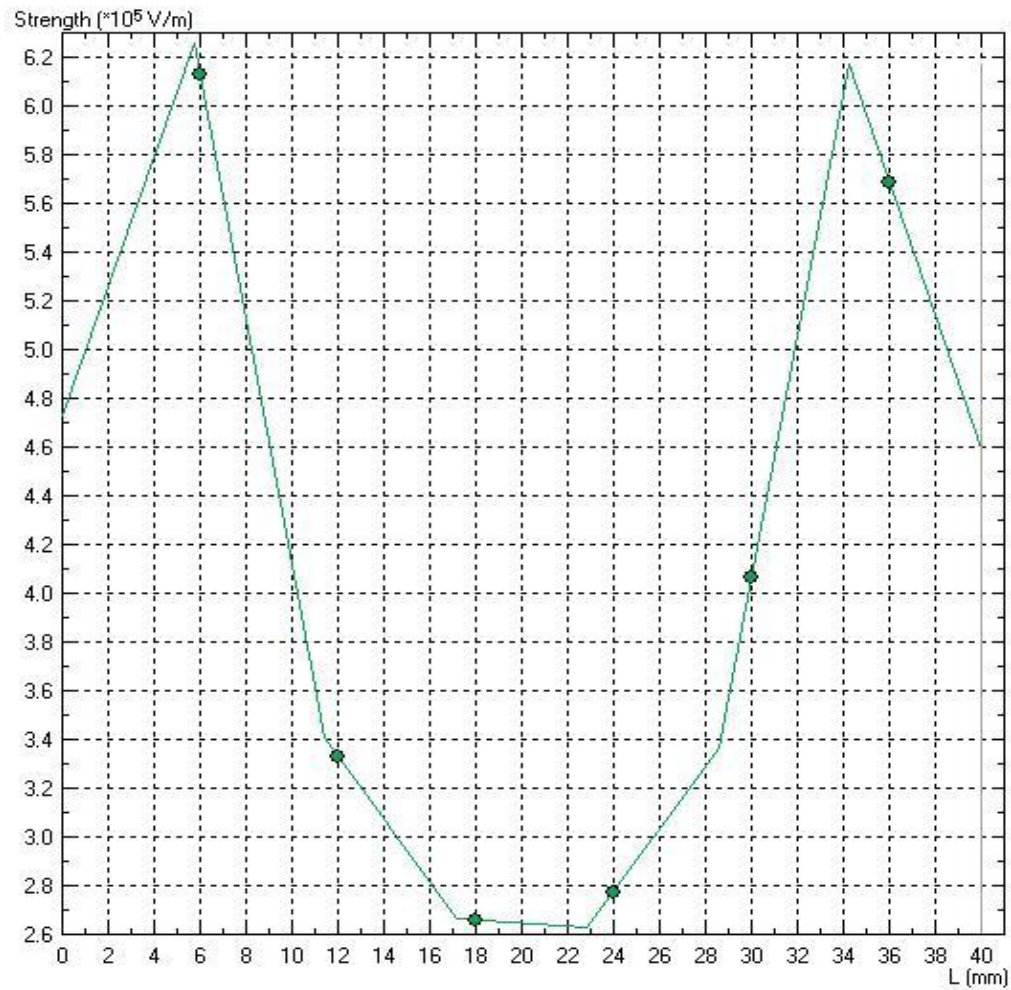


**Εικόνα 6.5 α)** Διάκενο ακίδα 60°- ακίδα 60° μήκος διακένου 2cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 60° μήκους 2cm.



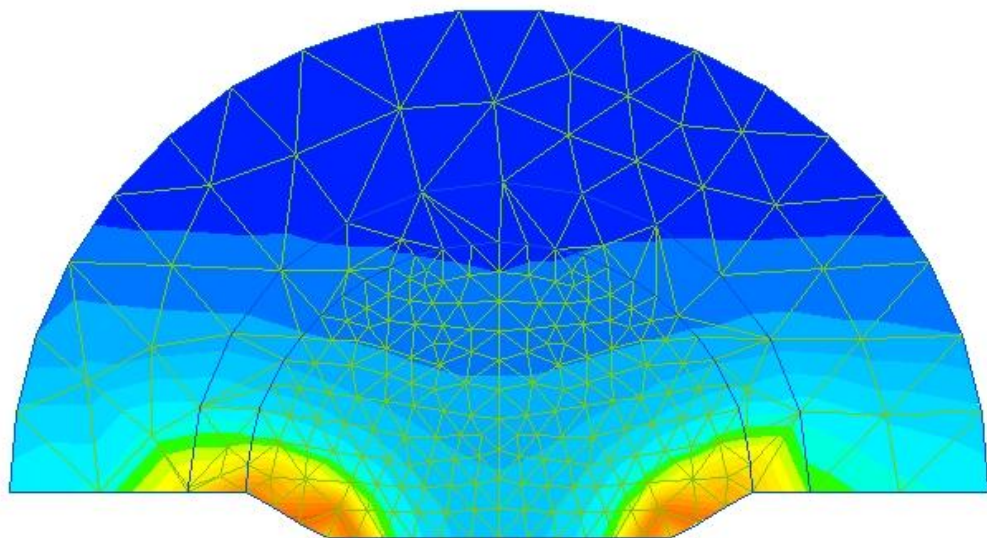
α



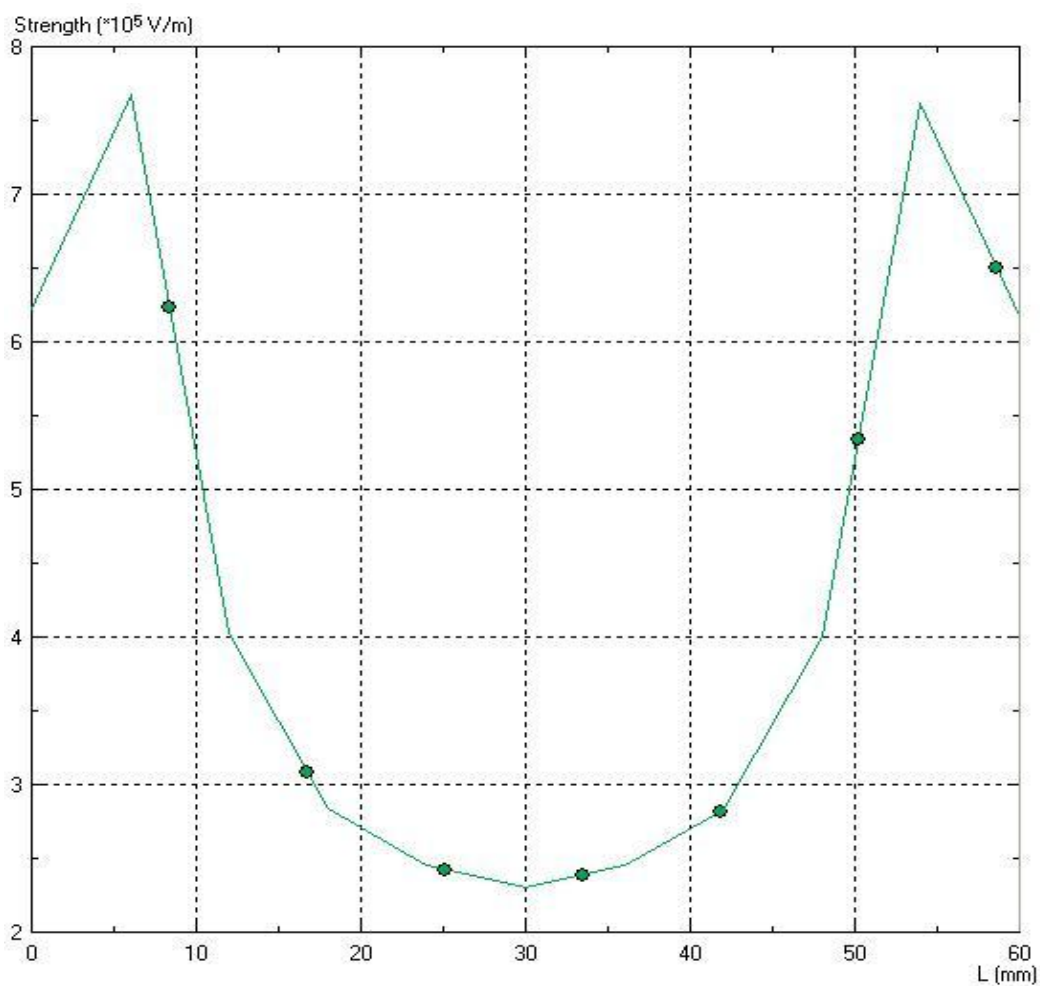
β

**Εικόνα 6.6 α)** Διάκενο ακίδα 60°- ακίδα 60° μήκος διακένου 4cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 60° μήκους 4cm.



α

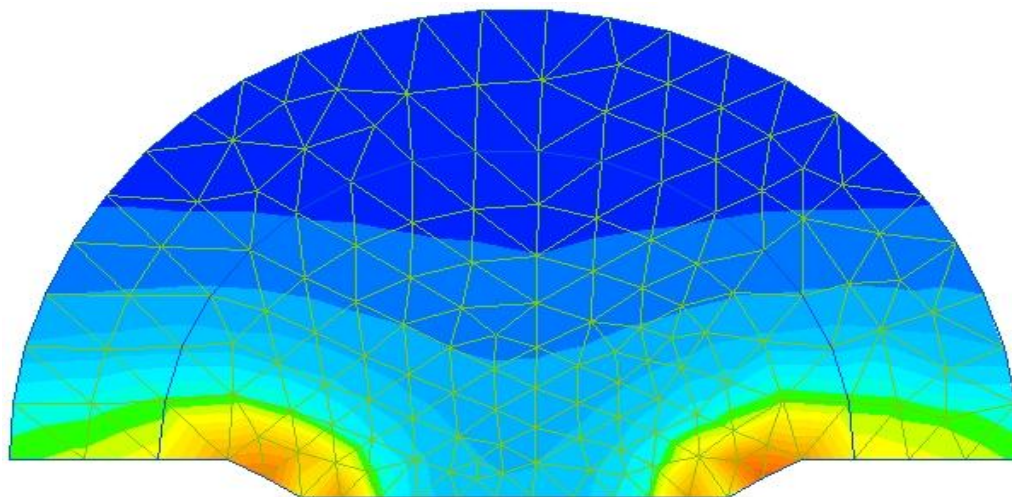


β

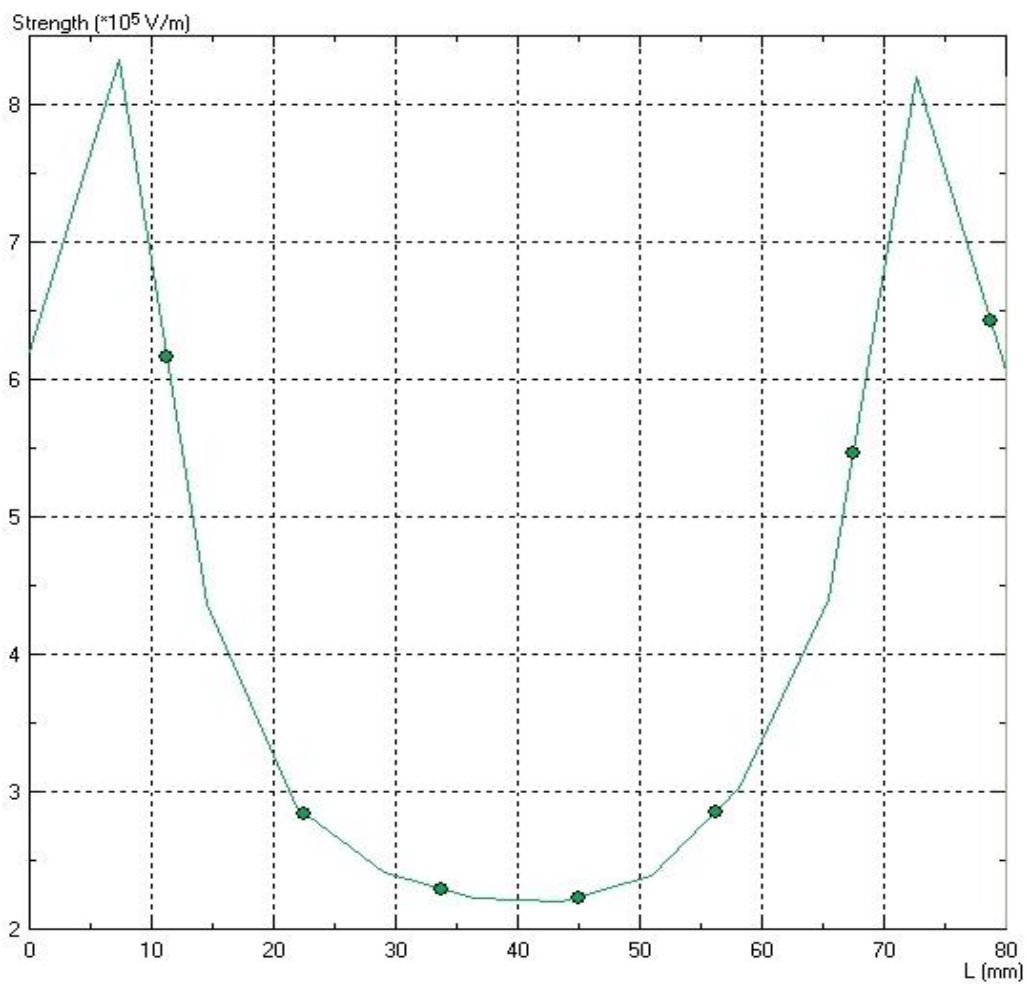
**Εικόνα 6.7 α)** Διάκενο ακίδα 60°- ακίδα 60° μήκος διακένου 6cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 60° μήκους 6cm.





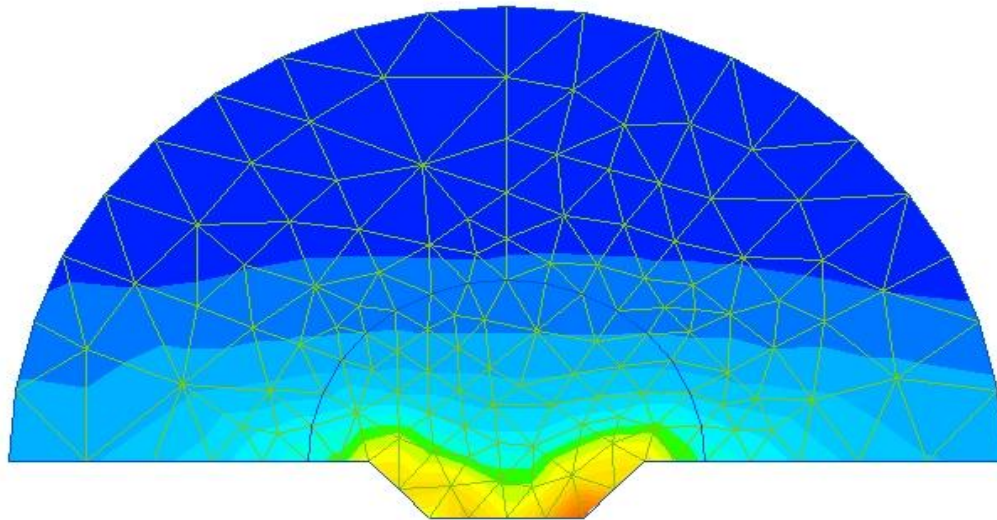
α



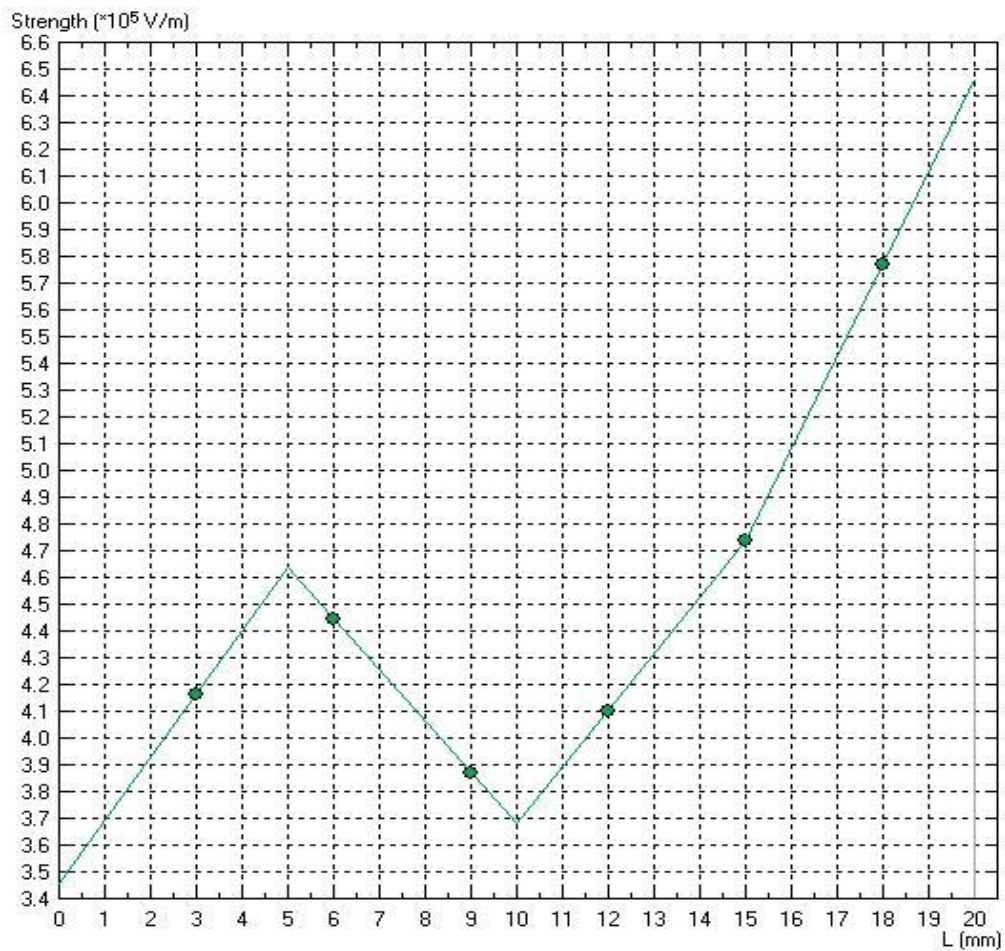
β

**Εικόνα 6.8 α)** Διάκενο ακίδα 60°- ακίδα 60° μήκος διακένου 8cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 60° μήκους 8cm.



α

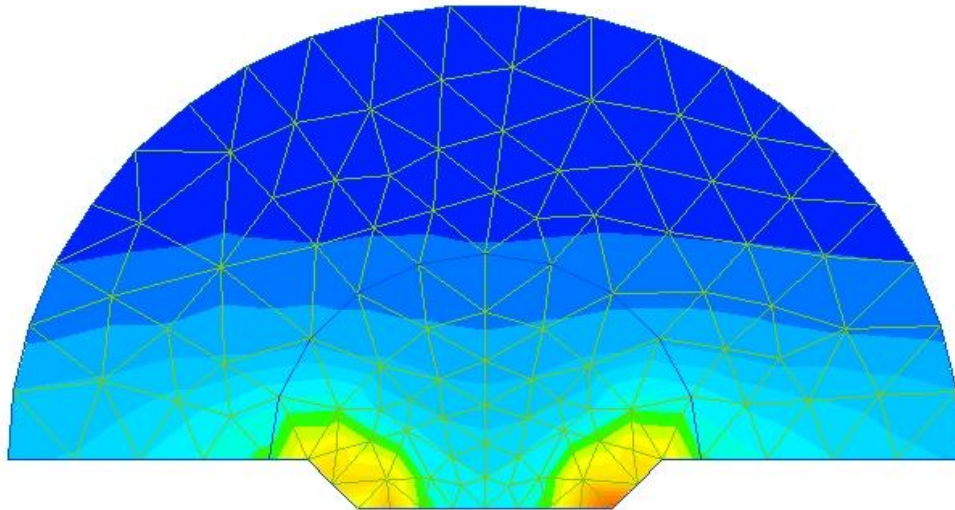


β

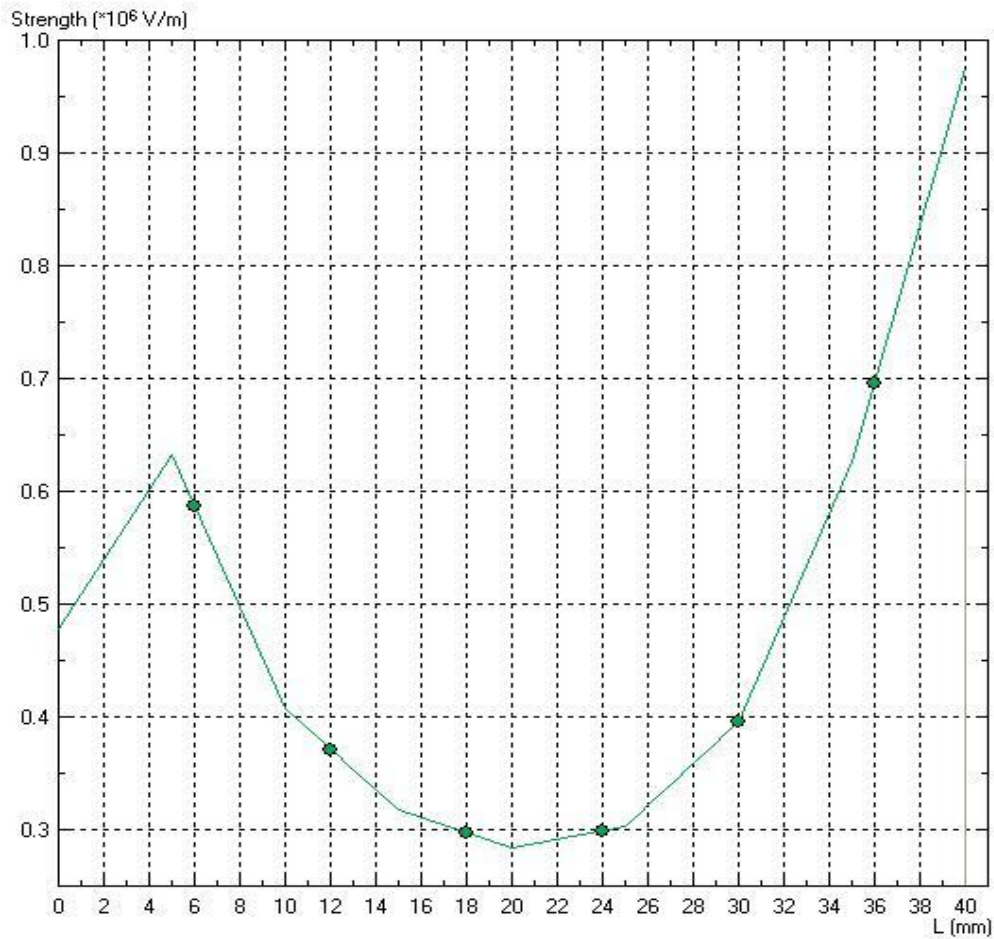
**Εικόνα 6.9 α)** Διάκενο ακίδα 90°- ακίδα 90° μήκος διακένου 2cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 90° μήκους 2cm.





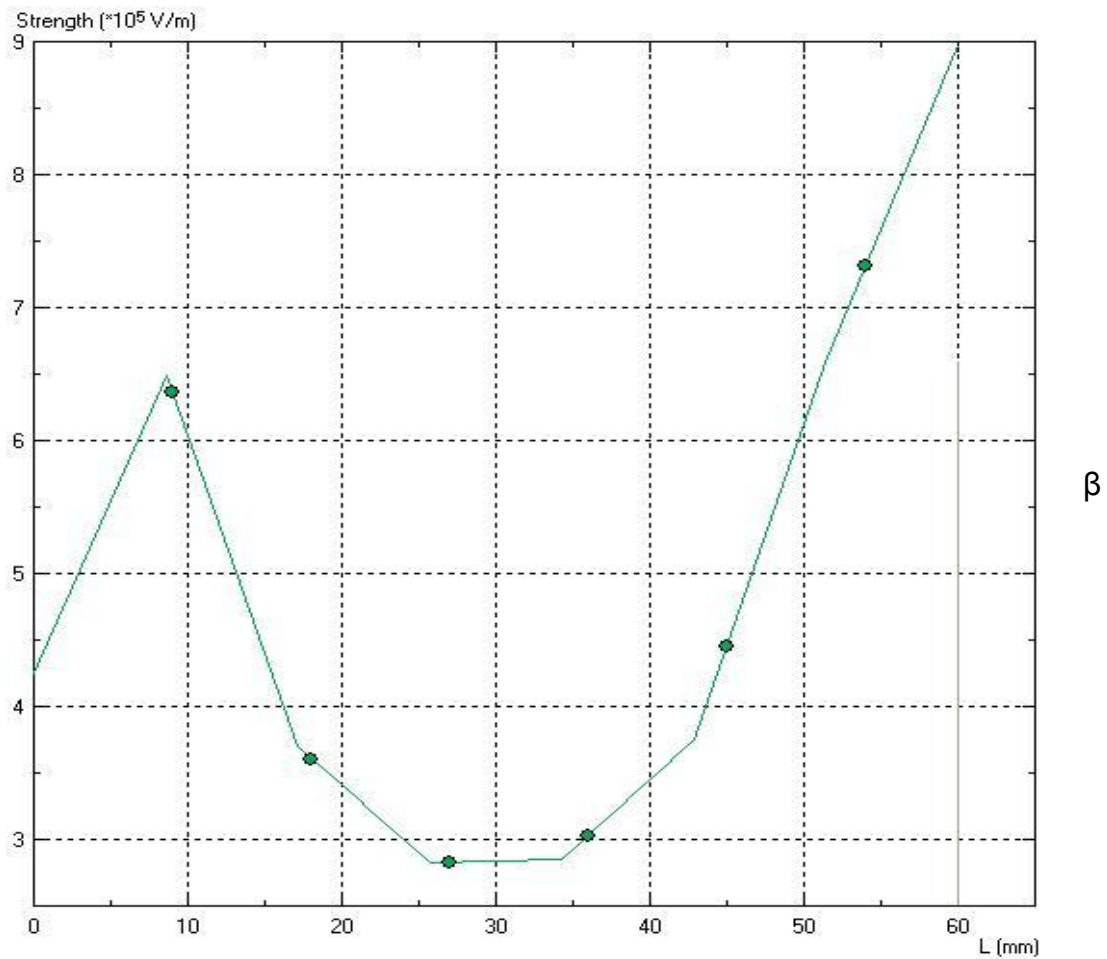
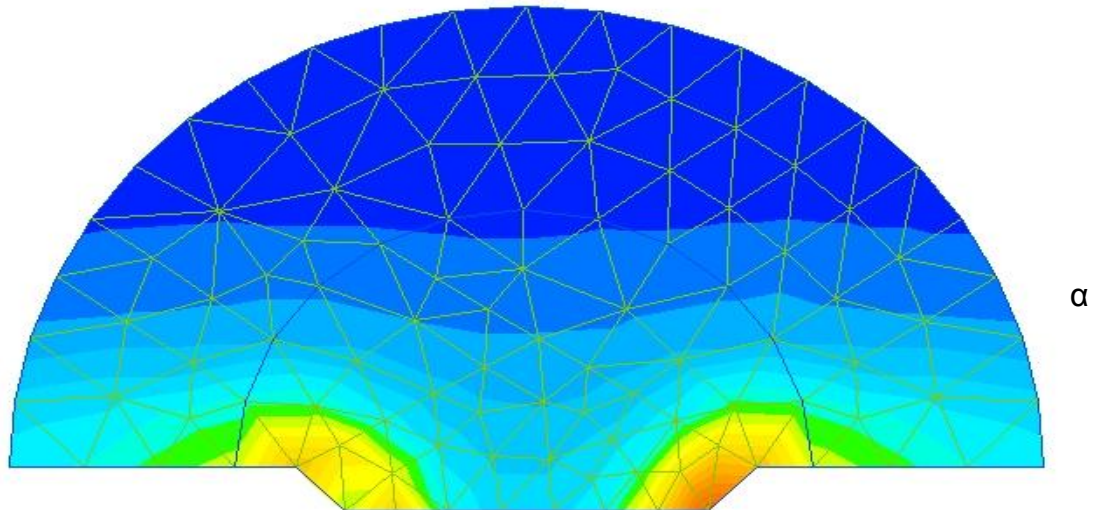
α



β

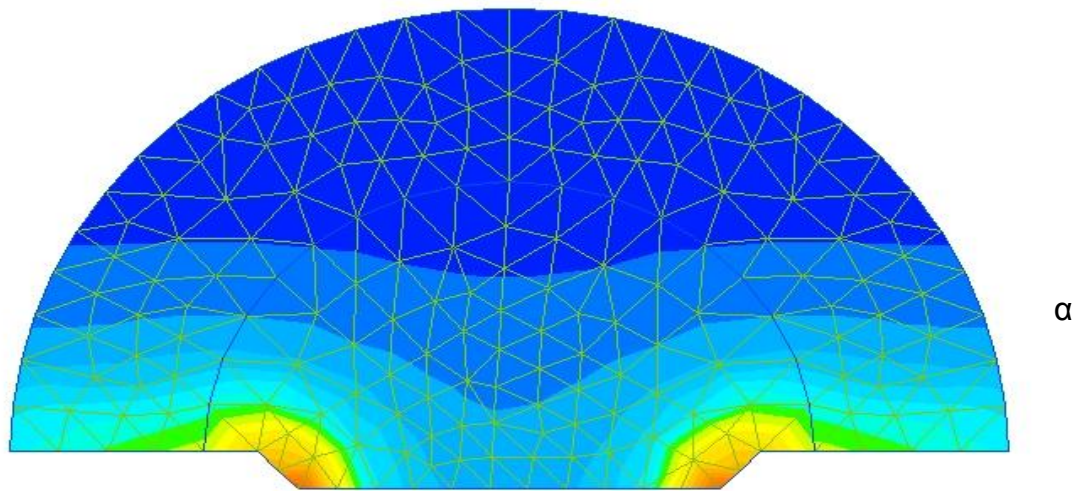
**Εικόνα 6.10 α)** Διάκενο ακίδα 90°- ακίδα 90° μήκος διακένου 4cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 90° μήκους 4cm.

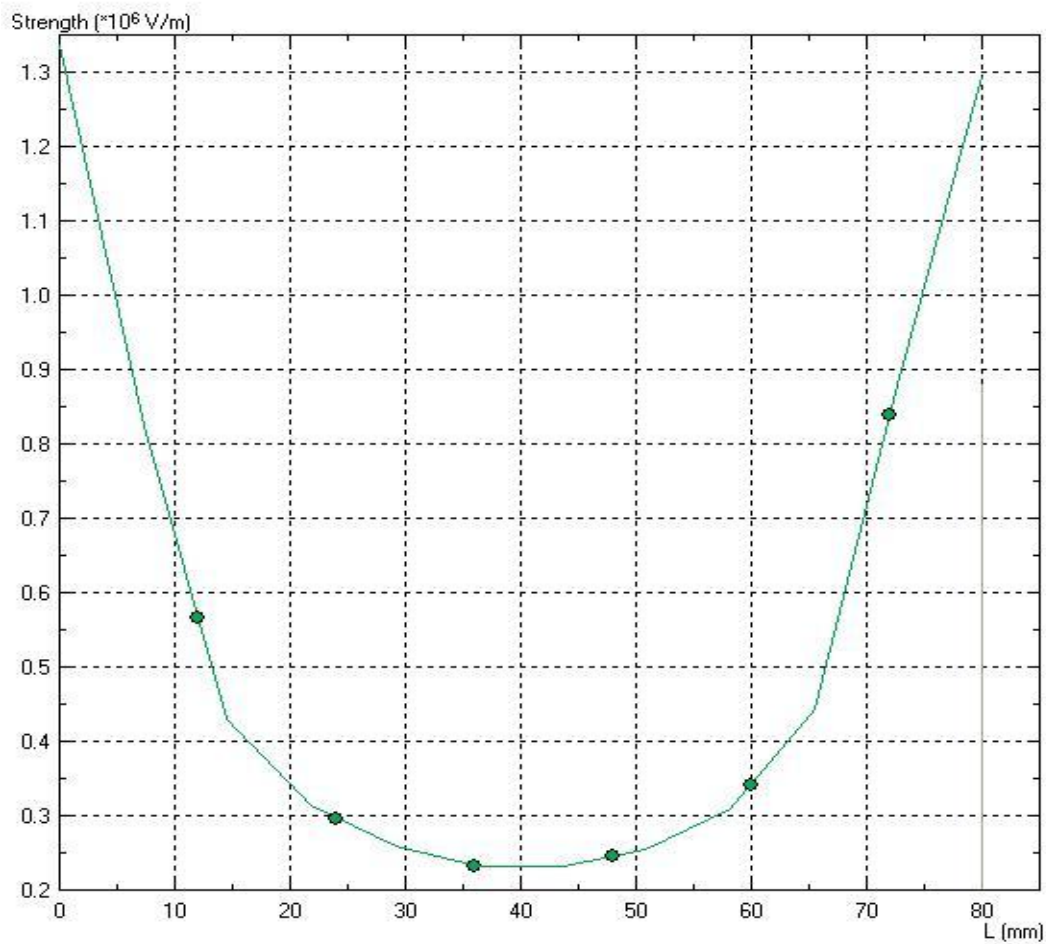


**Εικόνα 6.11 α)** Διάκενο ακίδα 90°- ακίδα 90° μήκος διακένου 6cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 90° μήκους 6cm.



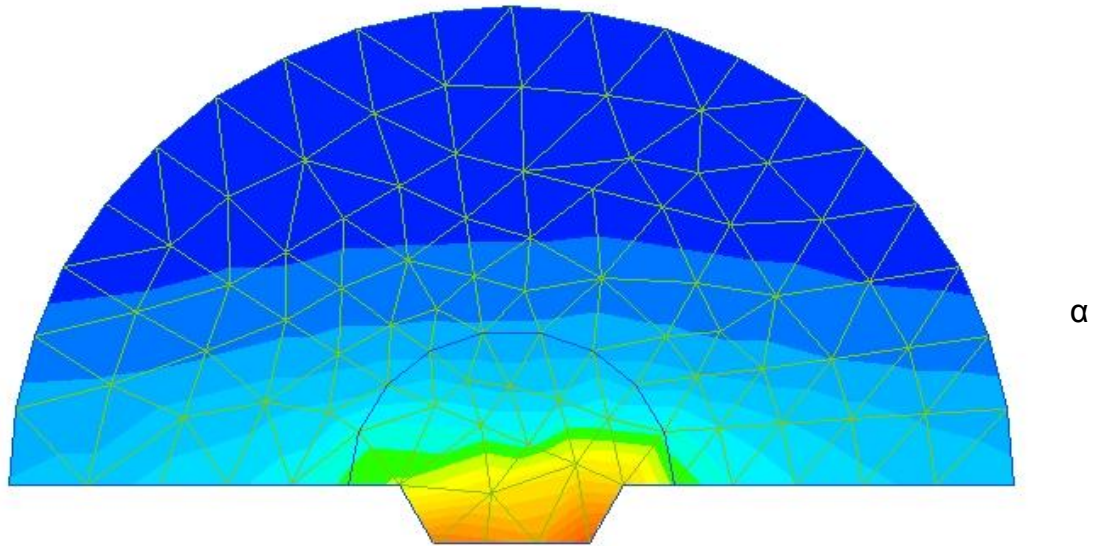
α



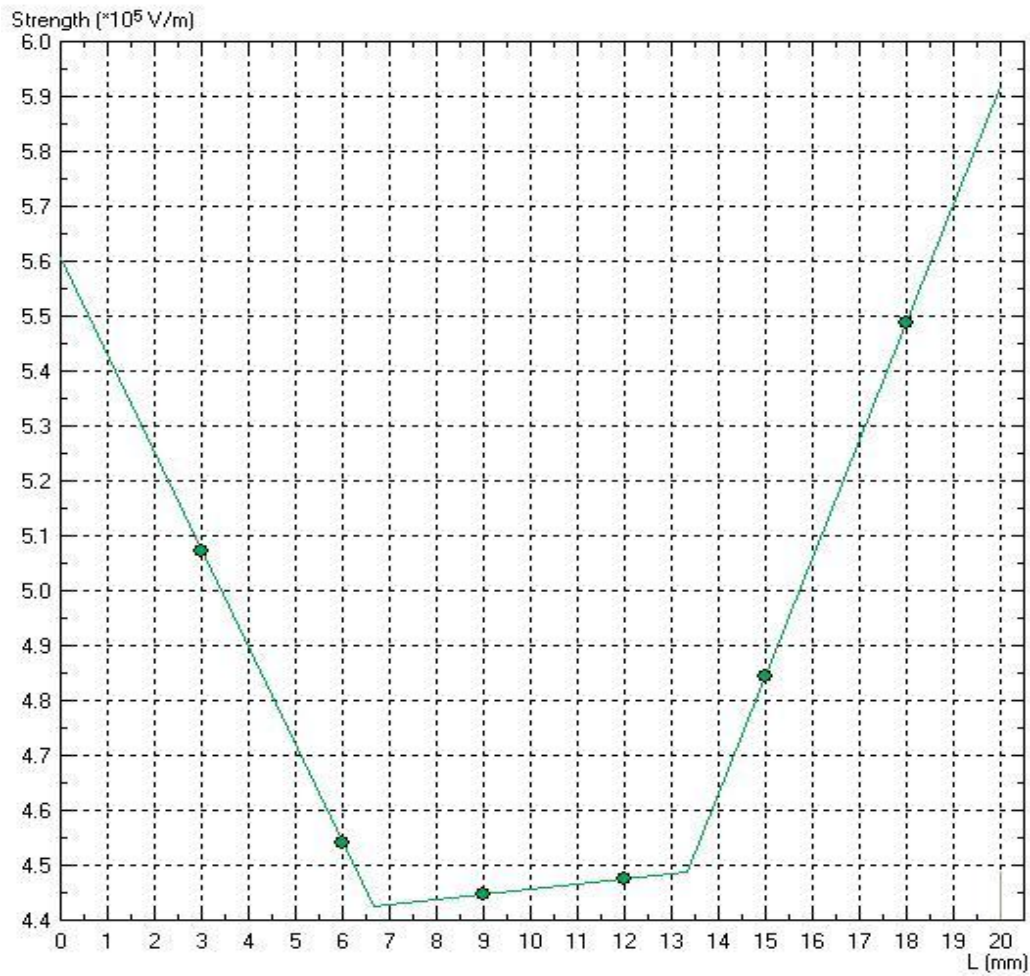
β

**Εικόνα 6.12 α)** Διάκενο ακίδα  $90^\circ$ - ακίδα  $90^\circ$  μήκος διακένου 8cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας  $90^\circ$  μήκους 8cm.



α

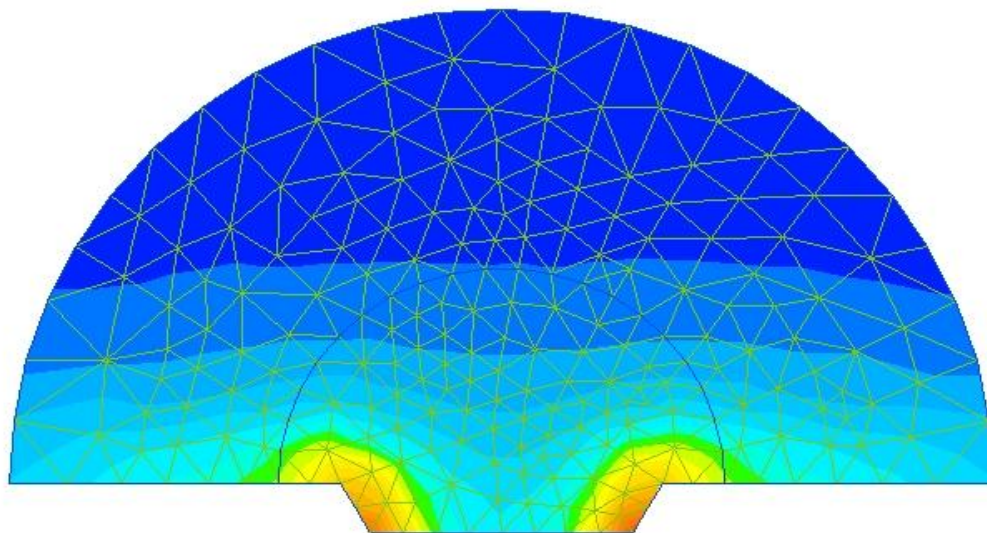


β

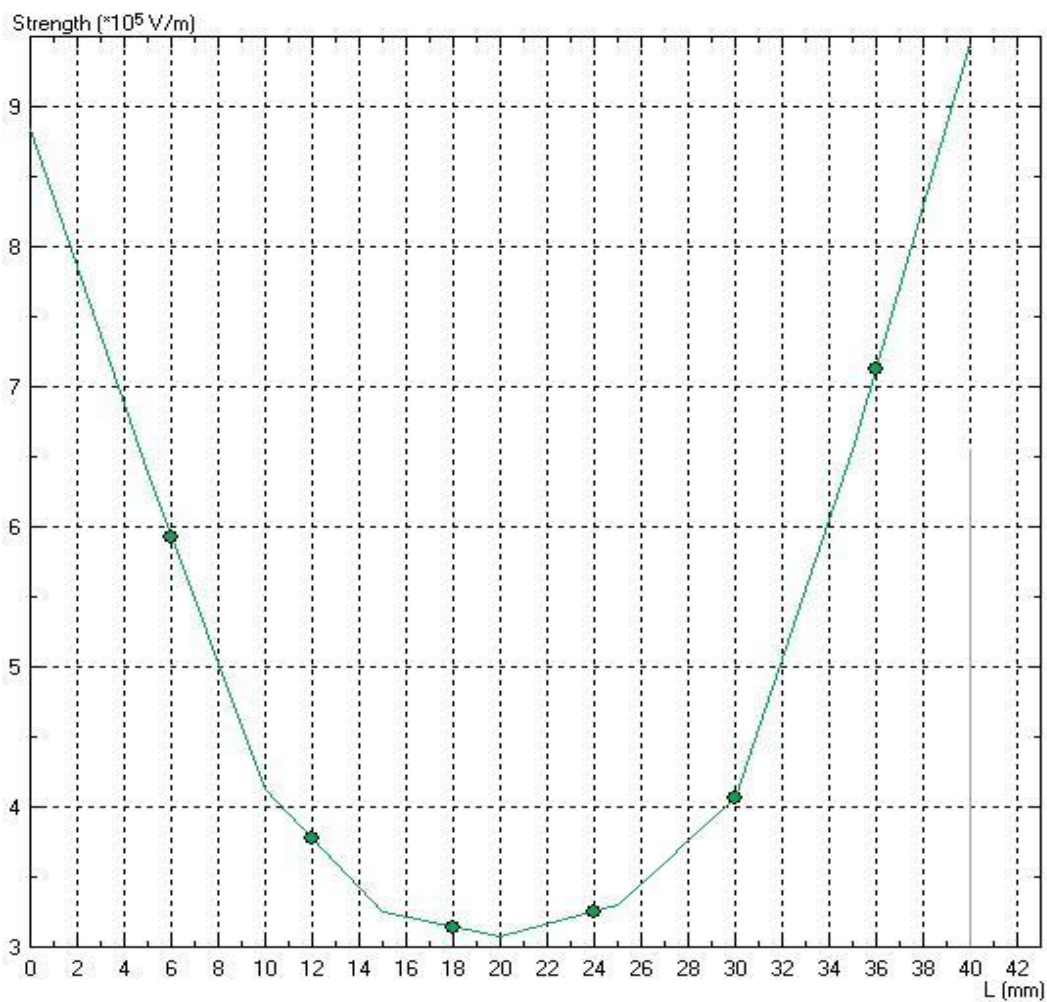
Εικόνα 6.13 α) Διάκενο ακίδα 120°- ακίδα 120° μήκος διακένου 2cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 120° μήκους 2cm.





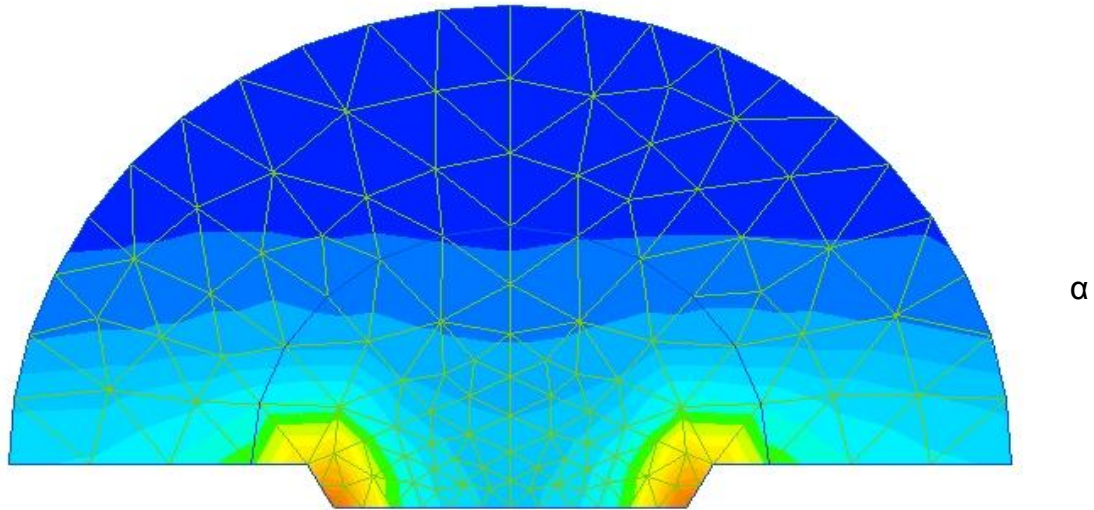
α



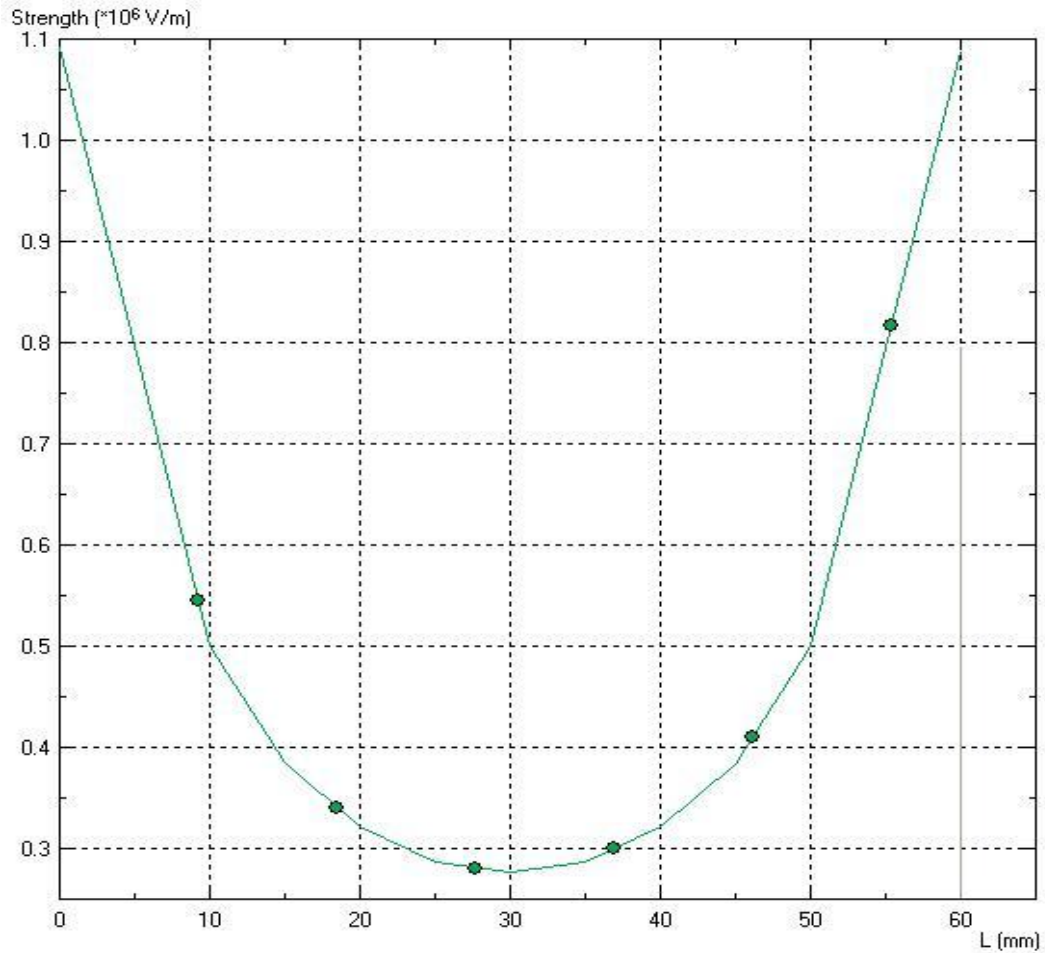
β

**Εικόνα 6.14 α)** Διάκενο ακίδα 120°- ακίδα 120° μήκος διακένου 4cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 120° μήκους 4cm.



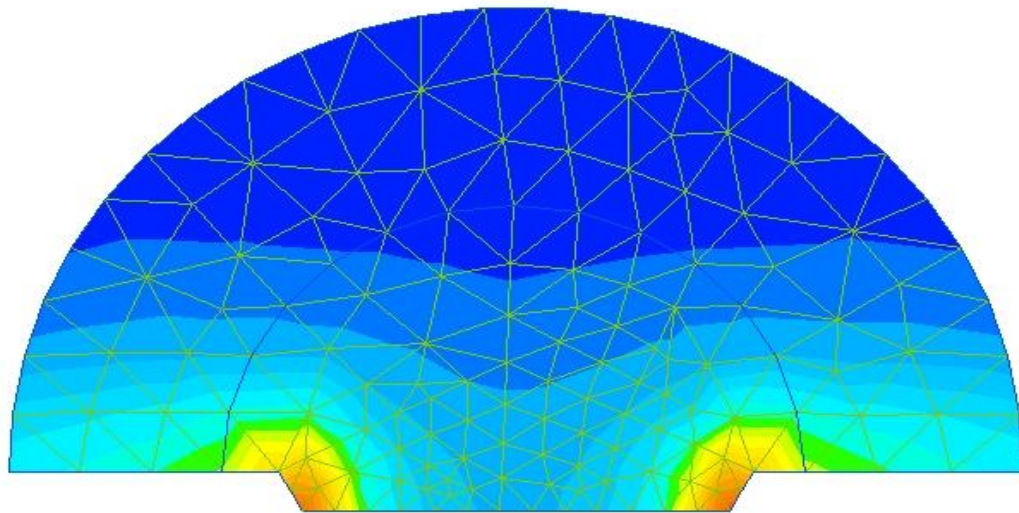
α



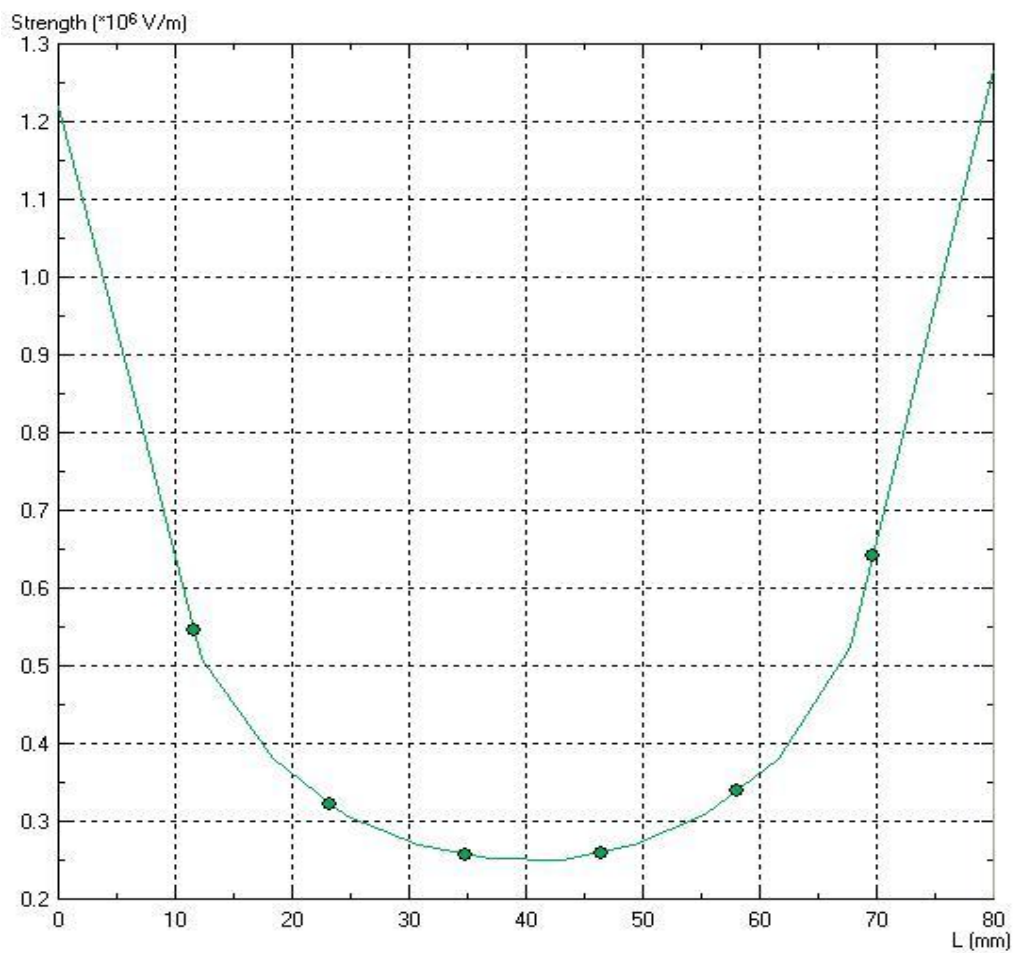
β

Εικόνα 6.15 α) Διάκενο ακίδα 120°- ακίδα 120° μήκος διακένου 6cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 120° μήκους 6cm.



α



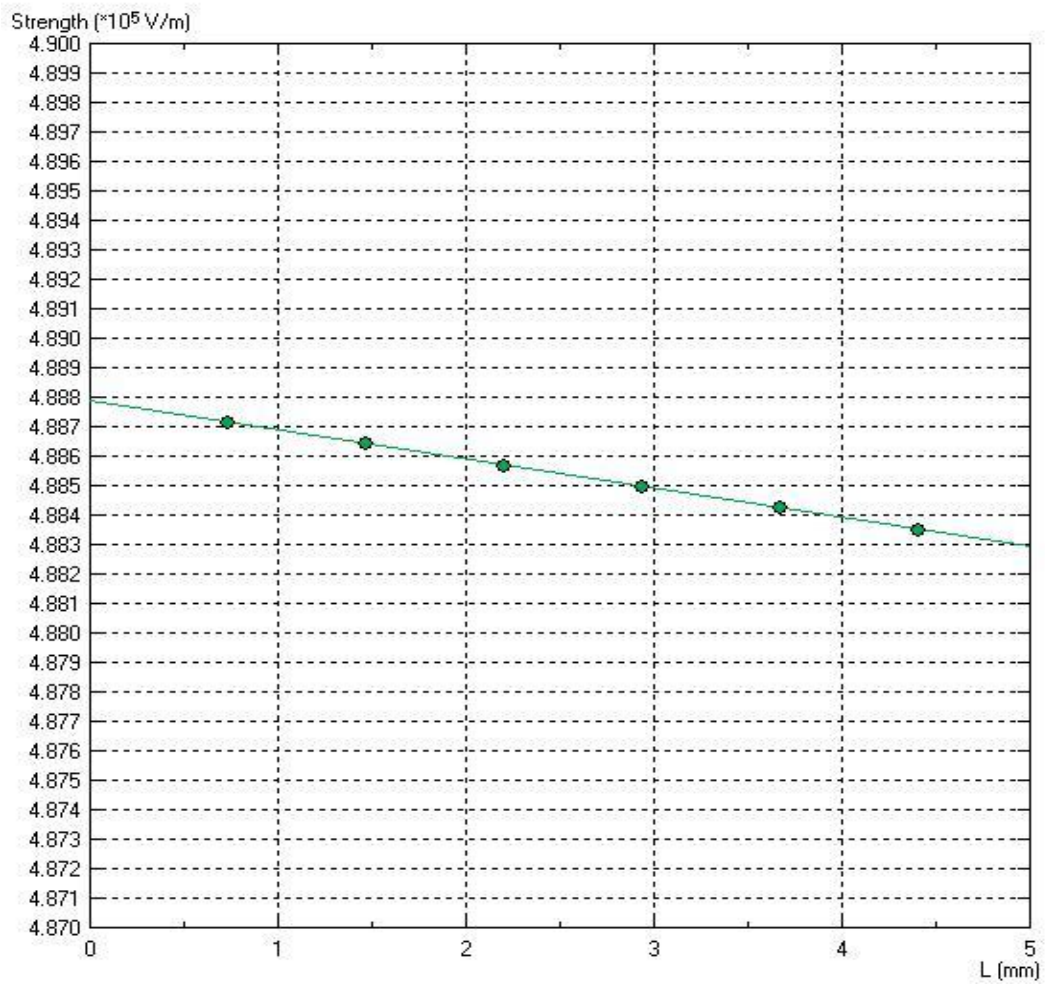
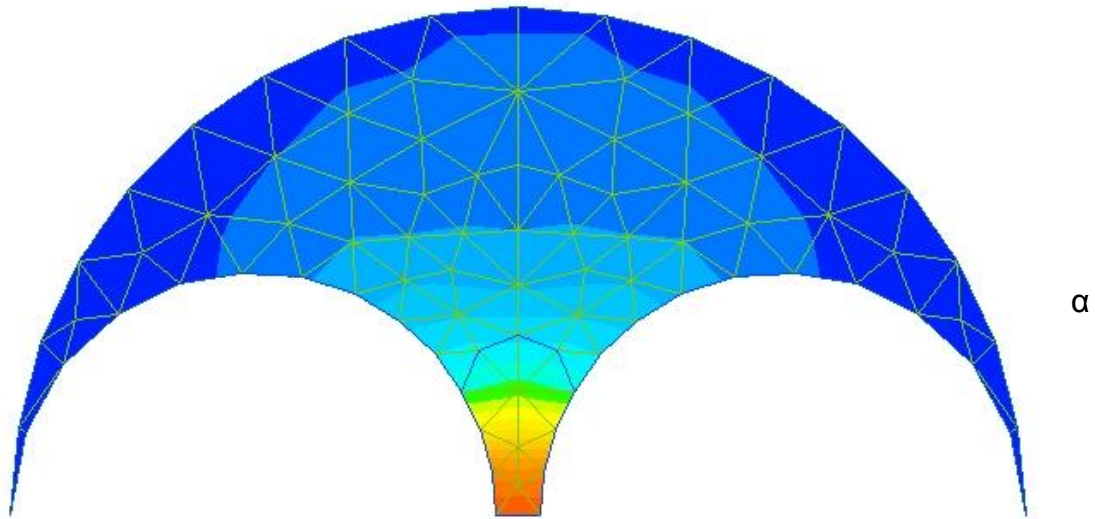
β

**Εικόνα 6.16 α)** Διάκενο ακίδα 120°- ακίδα 120° μήκος διακένου 8cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας-ακίδας 120° μήκους 8cm.

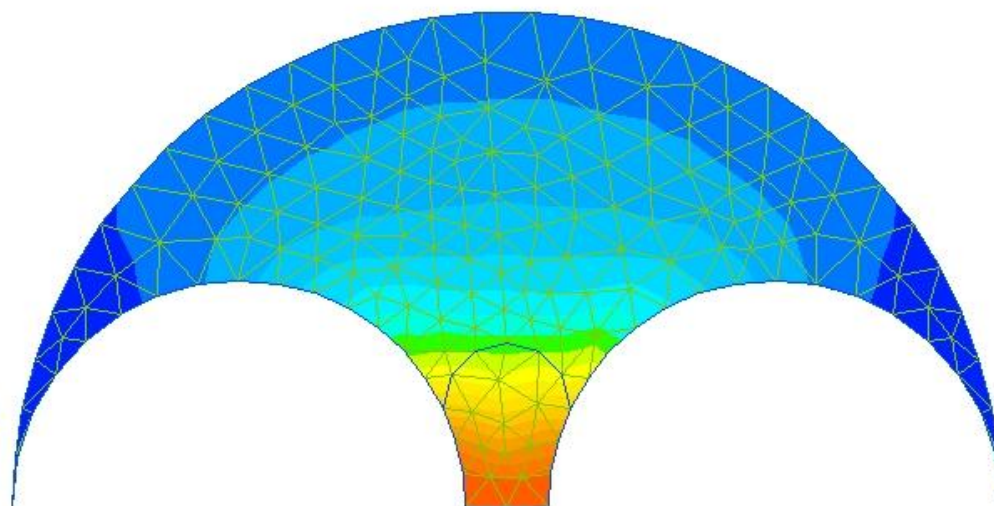
Στην συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των διακένων σφαίρα-σφαίρα. Εδώ το πεδίο αναμένεται πιο ομοιογενές. Το μήκος του διακένου πάει μέχρι τρία εκατοστά όπως υλοποιήθηκε στο εργαστηριακό μέρος για λόγους προφύλαξης και προστασίας των διατάξεων του εργαστηρίου.



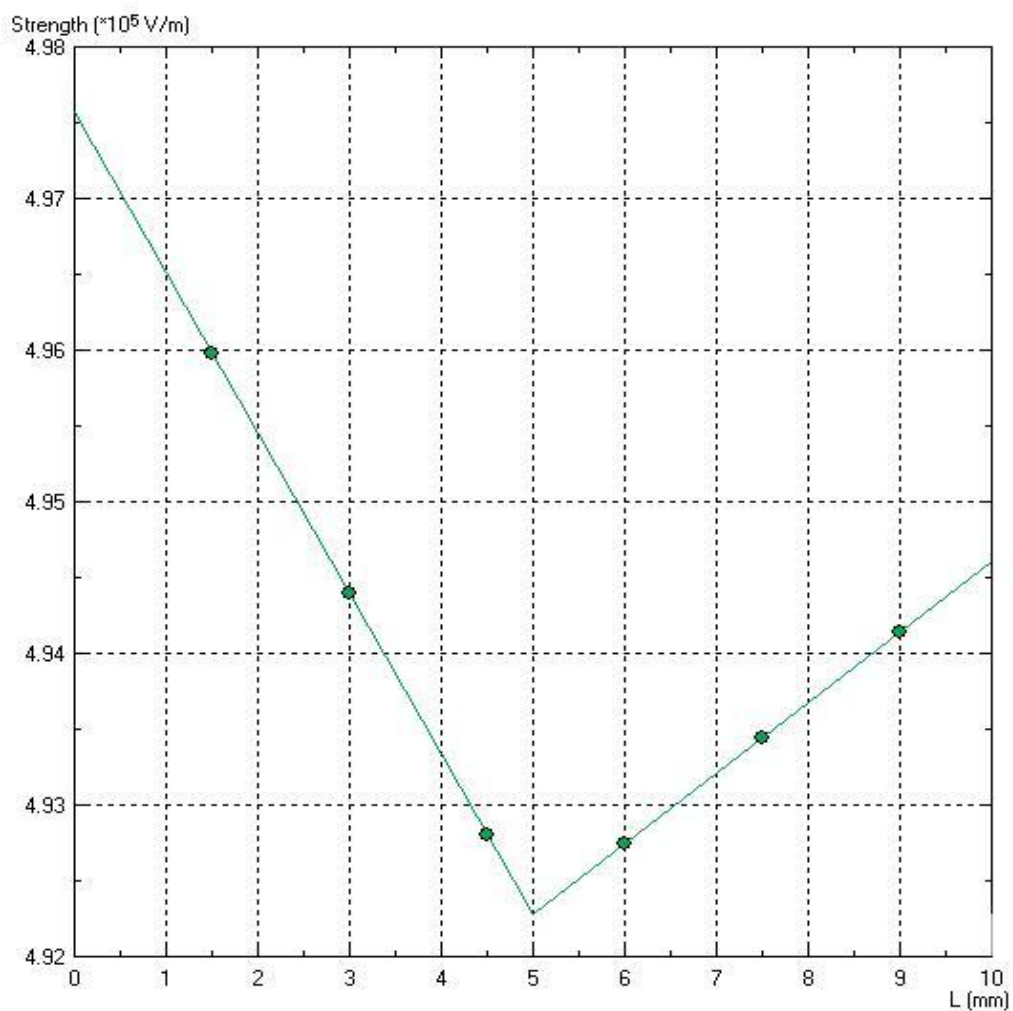


**Εικόνα 6.17 α)** Διάκενο σφαίρα-σφαίρα μήκος διακένου 0,5cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου σφαιρας-σφαιρας μήκους 0,5cm.



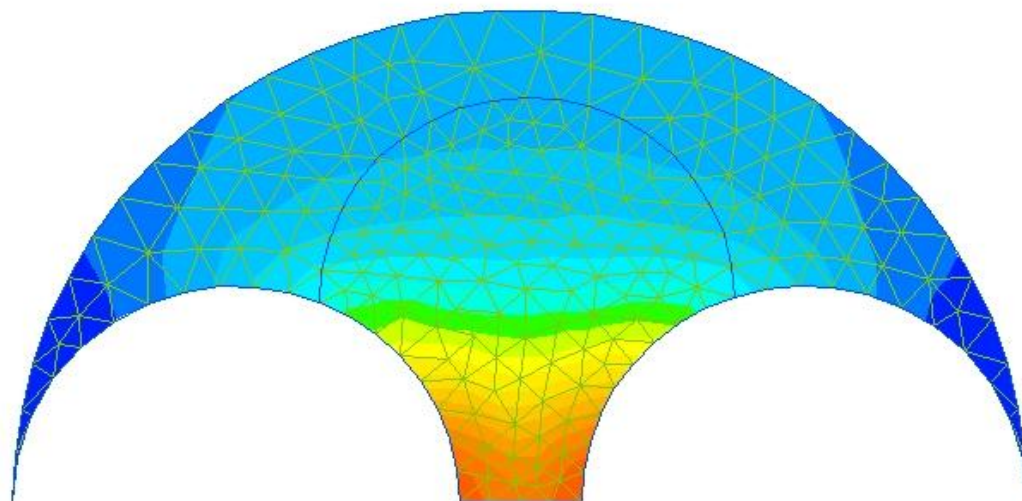
α



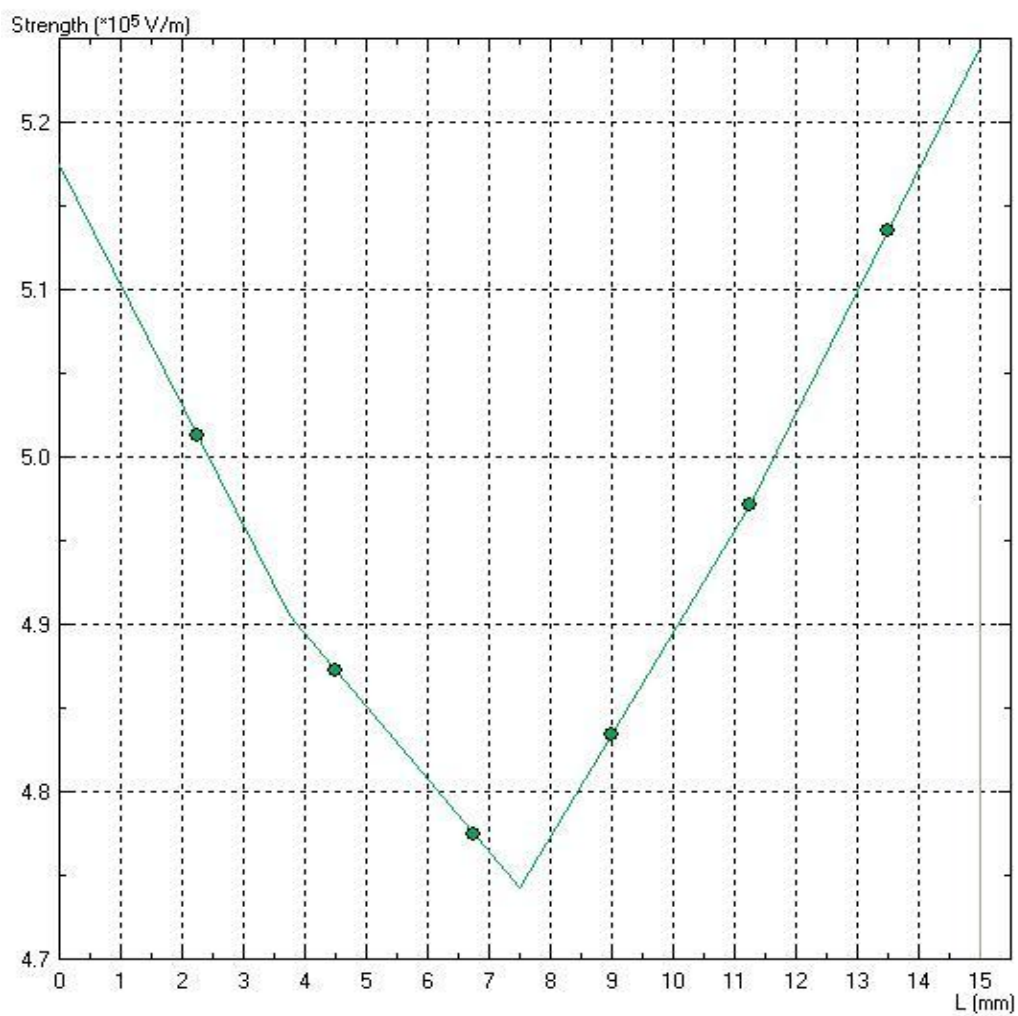
β

**Εικόνα 6.18 α)** Διάκενο σφαίρα-σφαίρα μήκος διακένου 1cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου σφαιρας-σφαιρας μήκους 1cm.



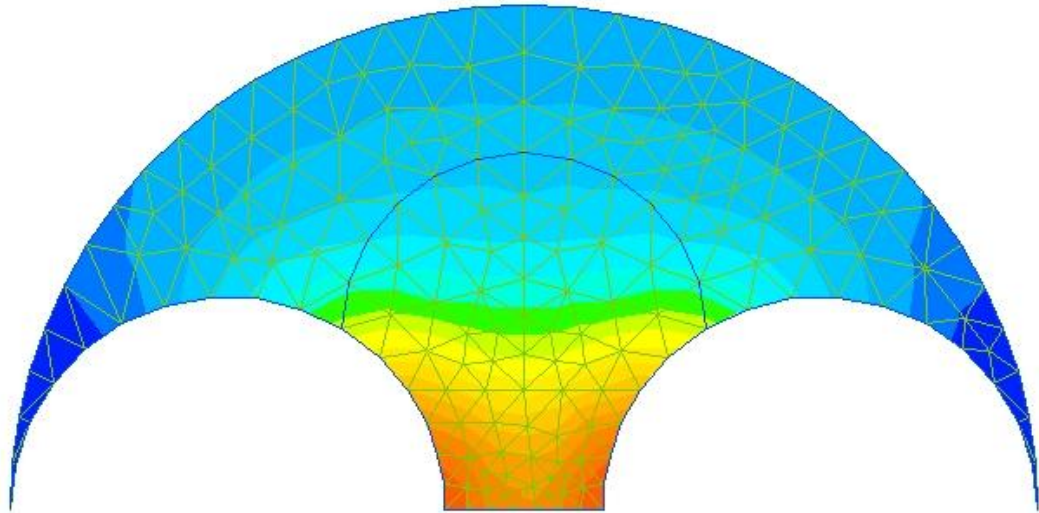
α



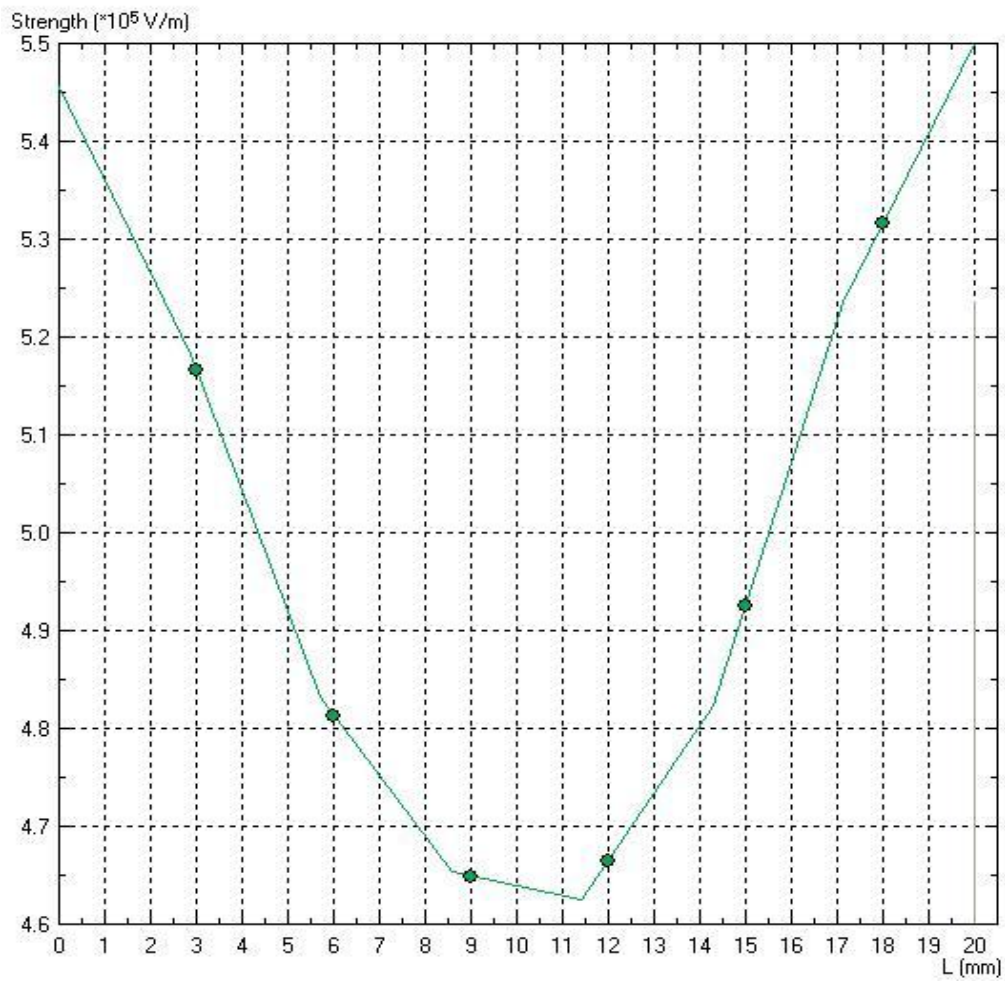
β

Εικόνα 6.19 α) Διάκενο σφαίρα-σφαίρα μήκος διακένου 1,5cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου σφαίρας-σφαίρας μήκους 1,5cm.



α

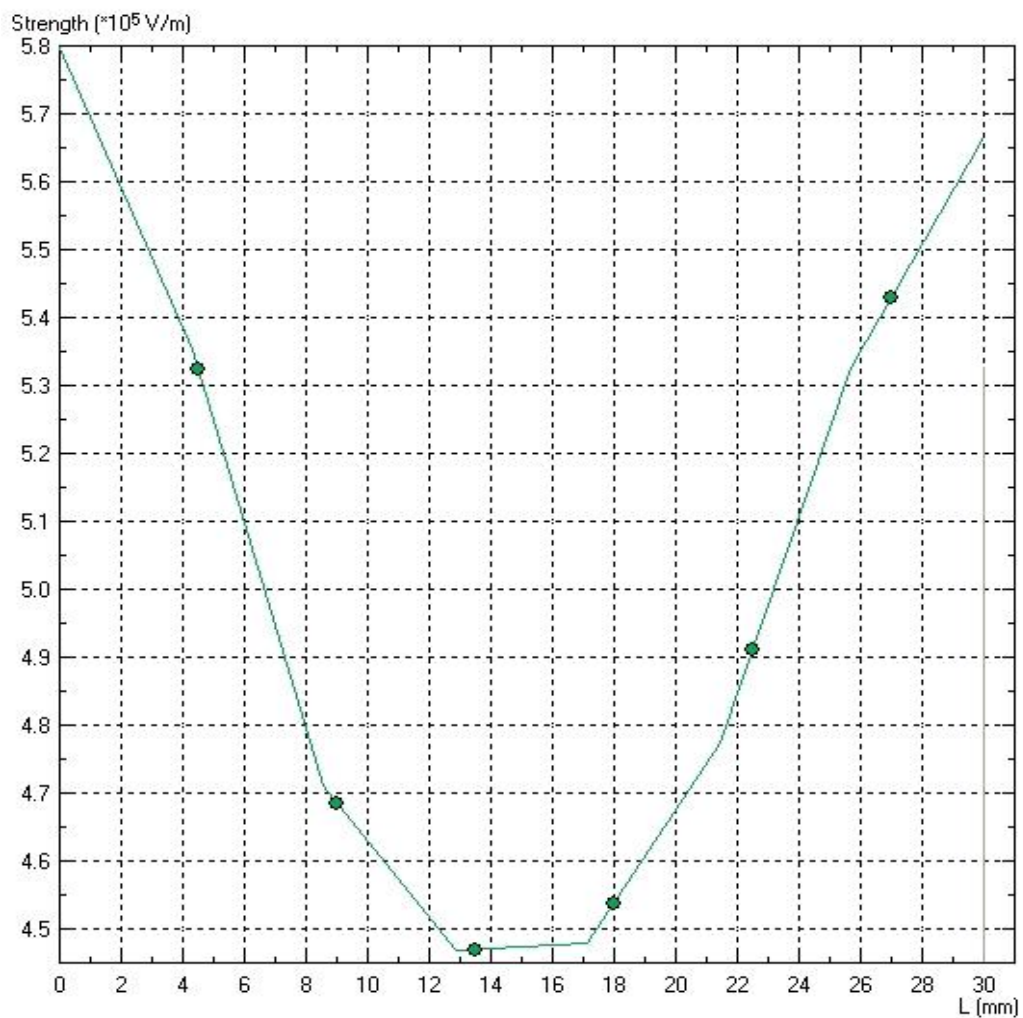
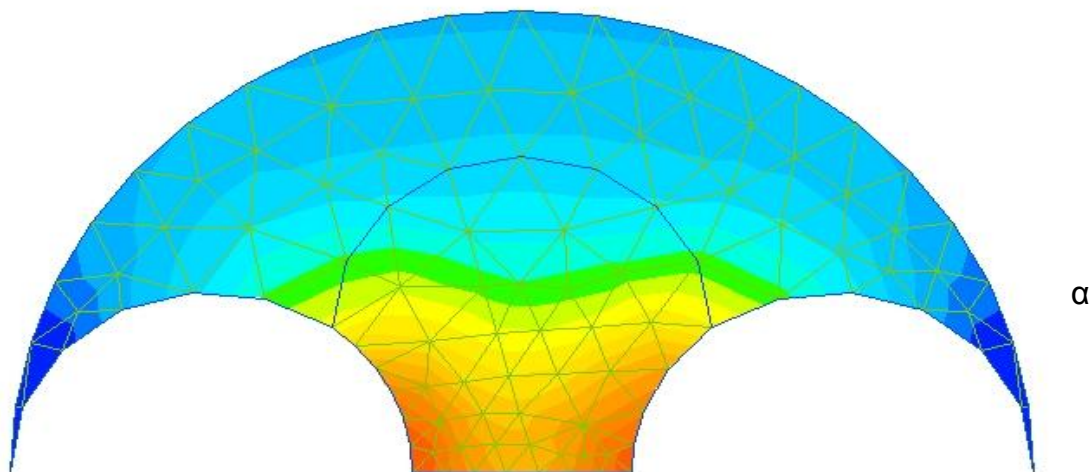


β

**Εικόνα 6.20 α)** Διάκενο σφαίρα-σφαίρα μήκος διακένου 2cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου σφαιρας-σφαιρας μήκους 2cm.

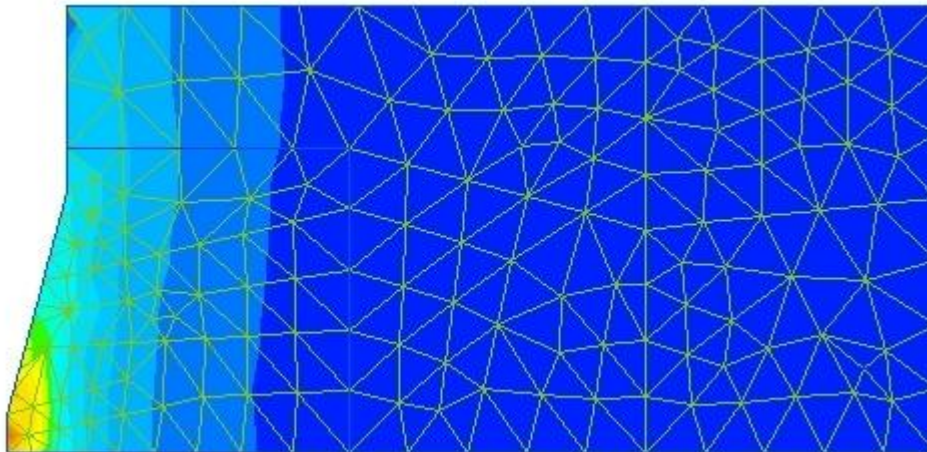




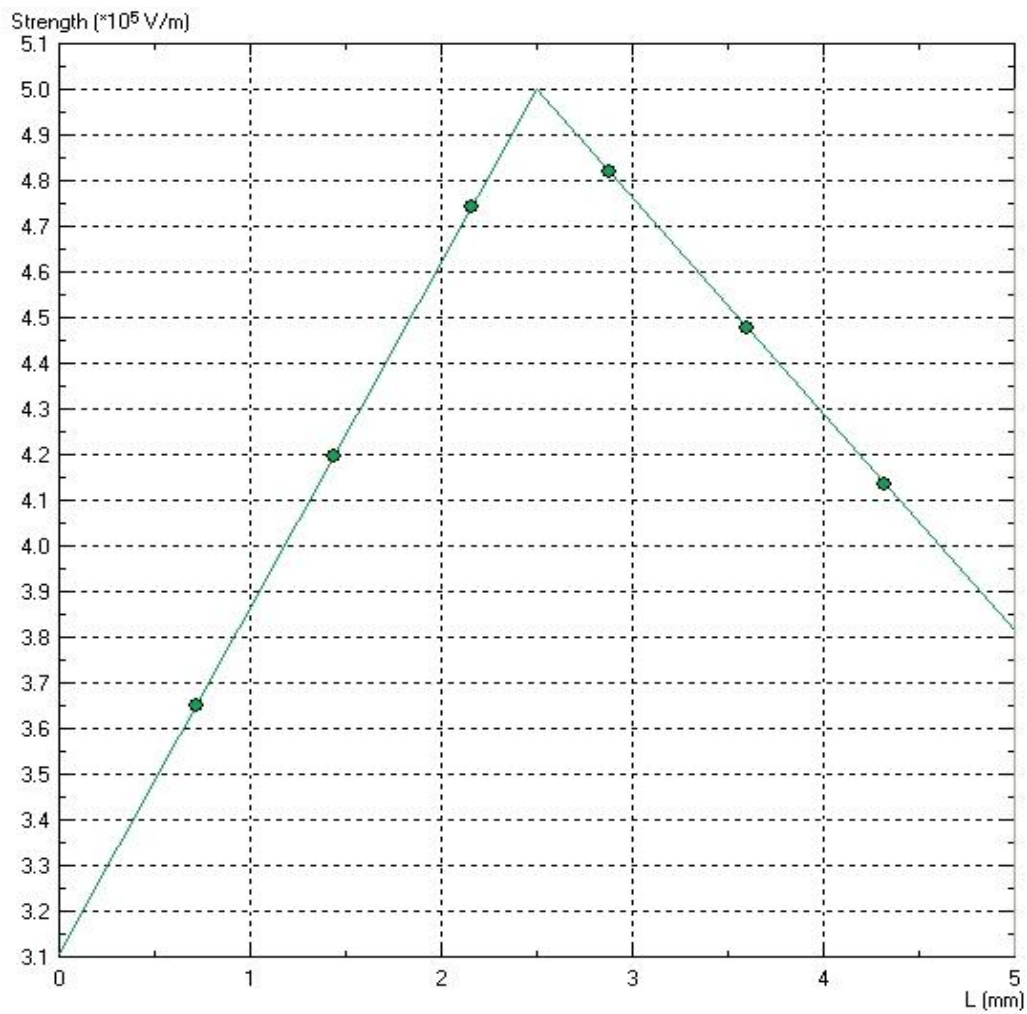
**Εικόνα 6.21 α)** Διάκενο σφαίρα-σφαίρα μήκος διακένου 3cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου σφαίρας-σφαίρας μήκους 3cm.

Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση των διακένων ακίδας-πλάκας και σφαίρας-πλάκας αντίστοιχα. Εδώ επιλέχτηκε ξανά το μήκος του διακένου να μην ξεπεράσει τα τρία εκατοστά για δύο κυρίως λόγους. Ο ένας είναι για προστασία των διατάξεων όπως προαναφέραμε και το διάκενο σφαιρών. Ο άλλος είναι ότι όσο μεγαλώνει το μήκος του διακένου, η πλάκα αρχίζει και συμπεριφέρεται σαν ακίδα.



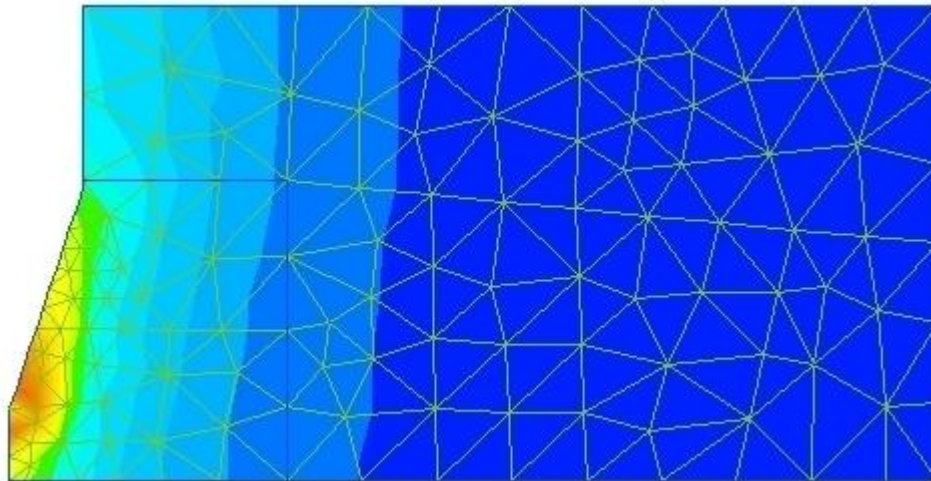
α



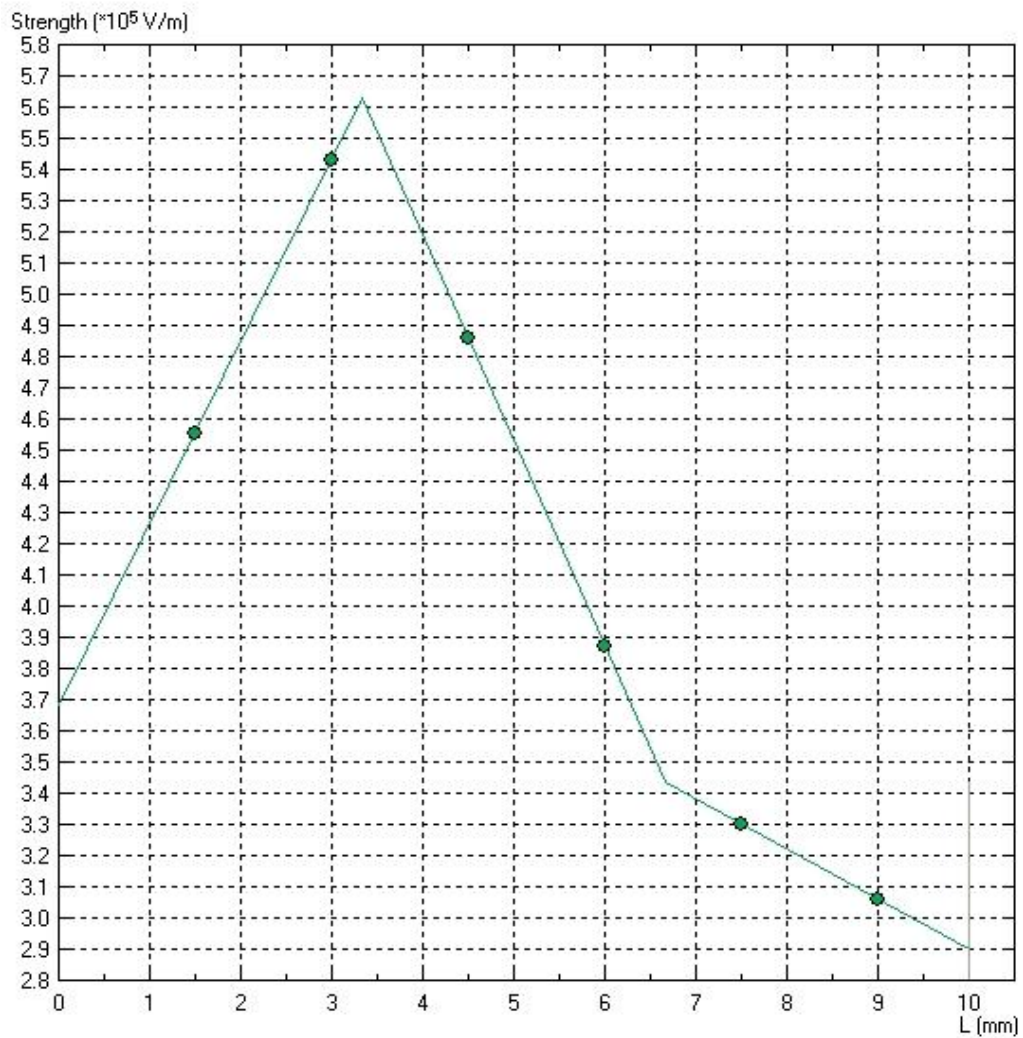
β

**Εικόνα 6.22 α)** Διάκενο ακίδας 30° -πλάκας μήκος διακένου 0,5cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 30° -πλάκας μήκους 0,5cm.



α

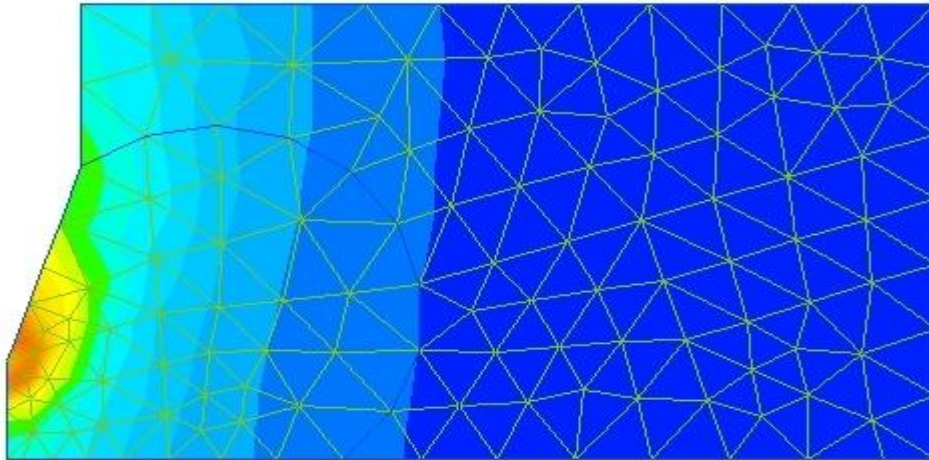


β

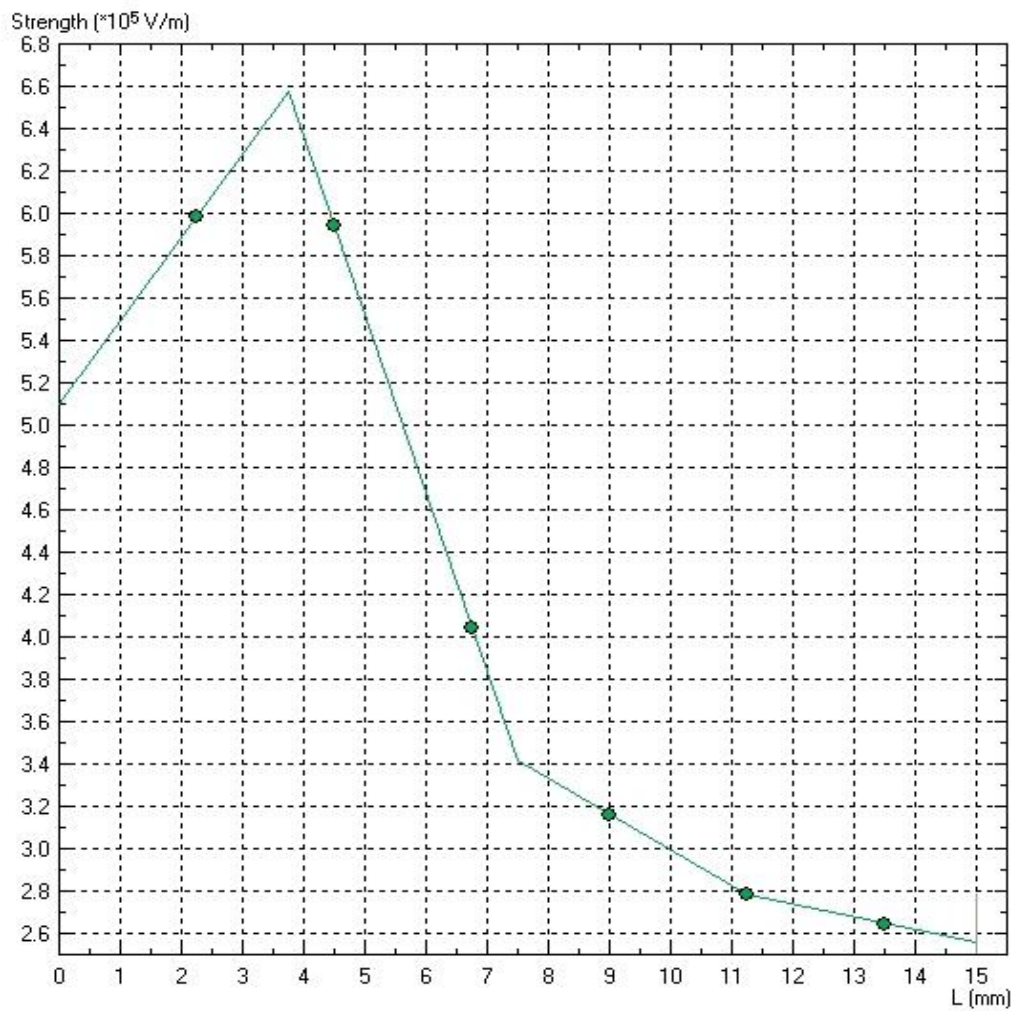
**Εικόνα 6.23 α)** Διάκενο ακίδας 30°-πλάκας μήκος διακένου 1cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 30°-πλάκας μήκους 1cm.





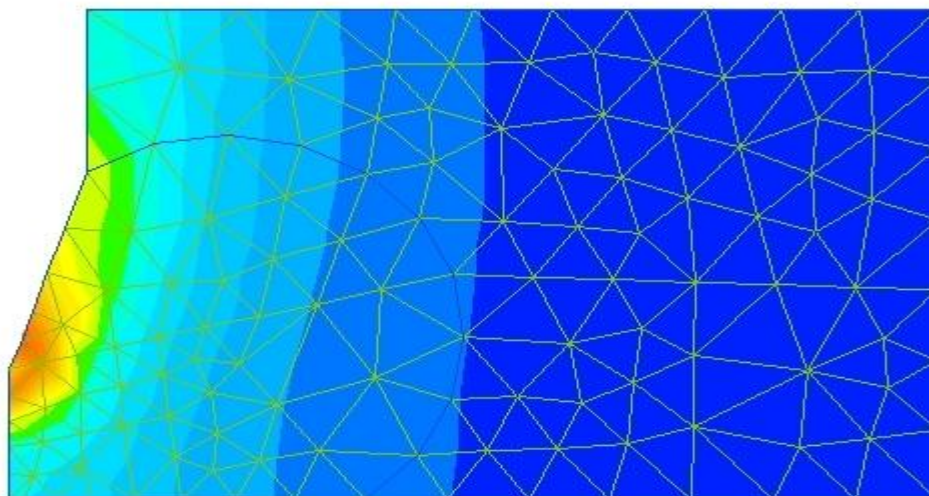
α



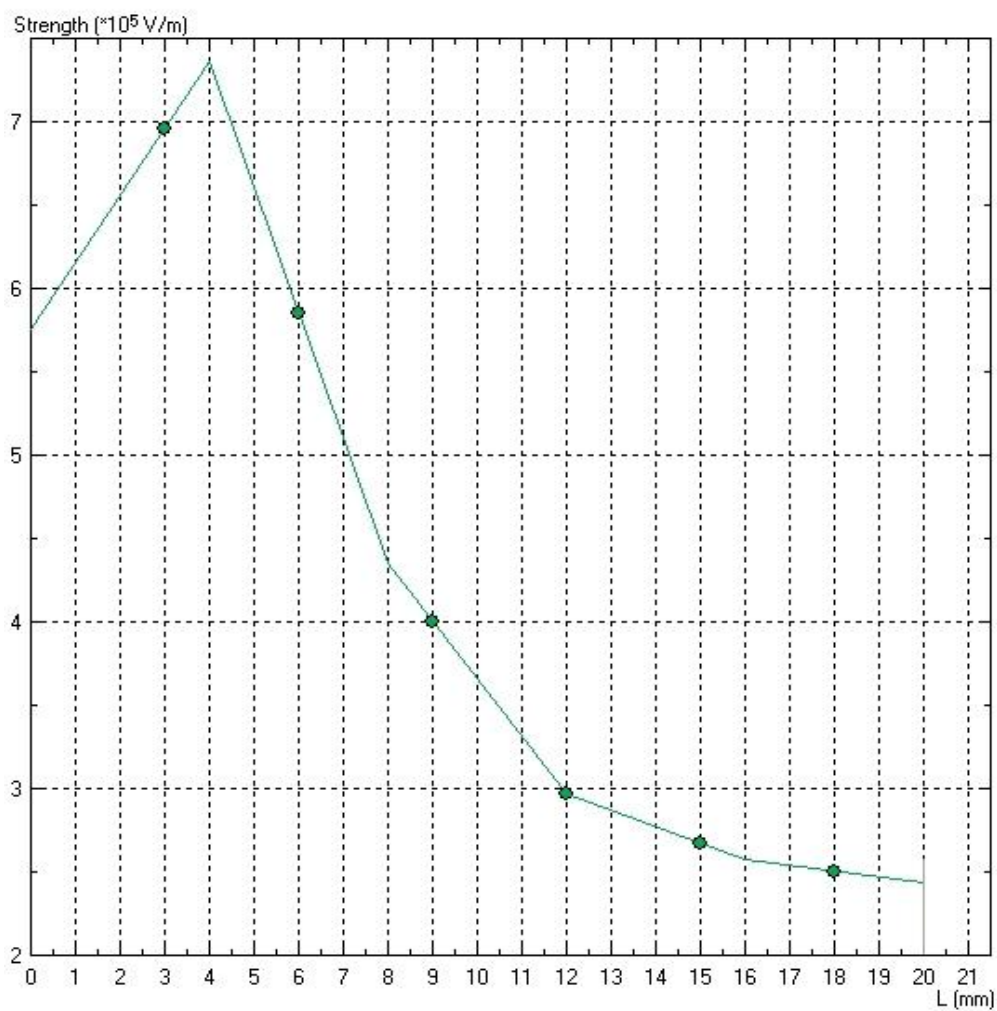
β

**Εικόνα 6.24 α)** Διάκενο ακίδας 30°-πλάκας μήκος διακένου 1,5cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 30°-πλάκας μήκος 1,5cm.



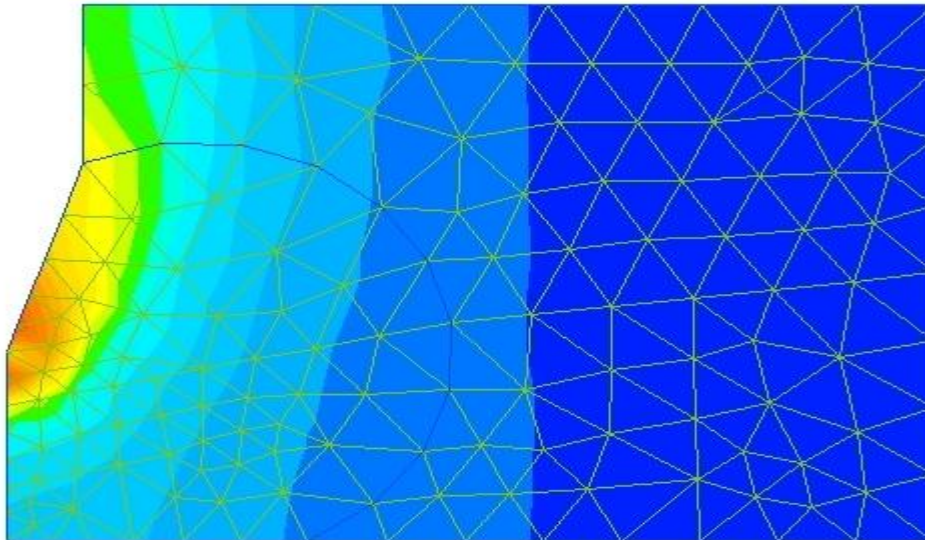
α



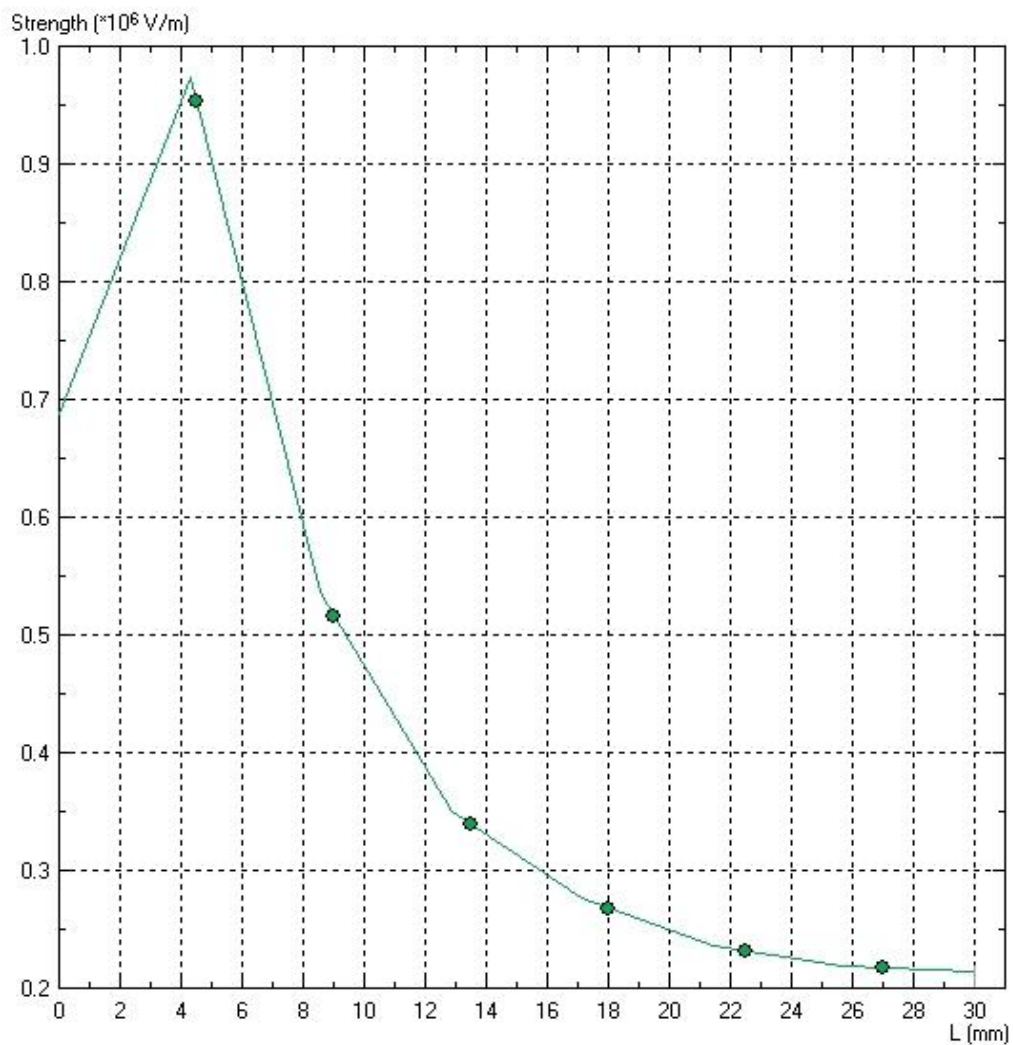
β

**Εικόνα 6.25 α)** Διάκενο ακίδας 30°-πλάκας μήκος διακένου, 2cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 30°-πλάκας μήκους 2cm.



α

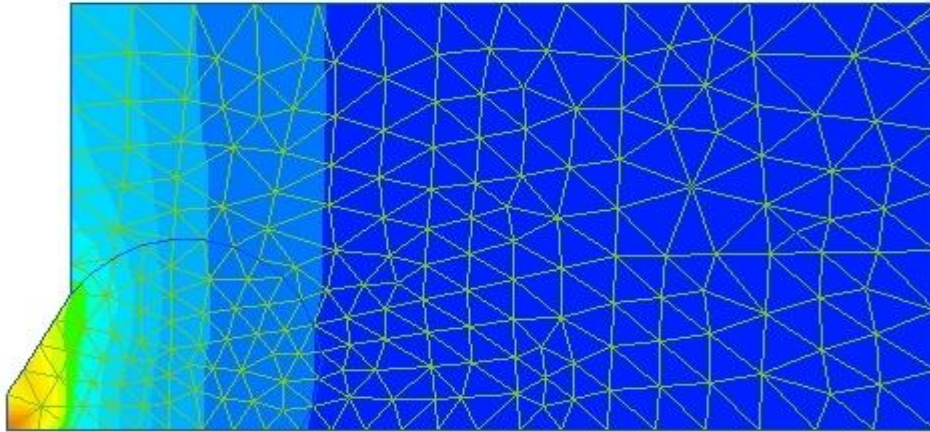


β

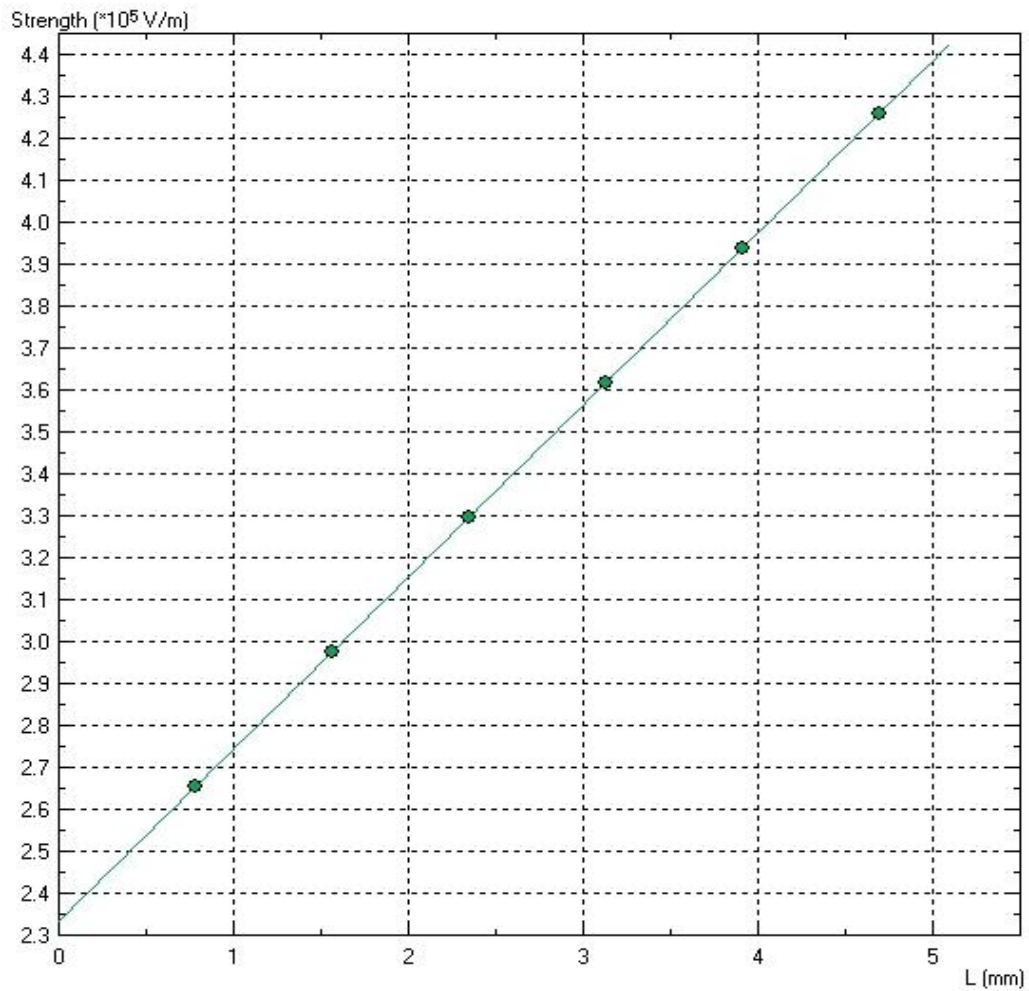
**Εικόνα 6.26 α)** Διάκενο ακίδας 30°-πλάκας μήκος διακένου, 3cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 30°-πλάκας μήκους 3cm.





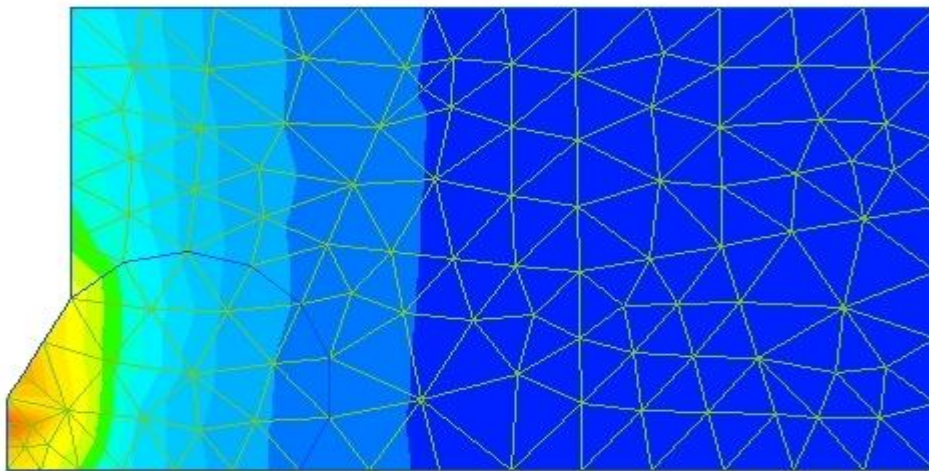
α



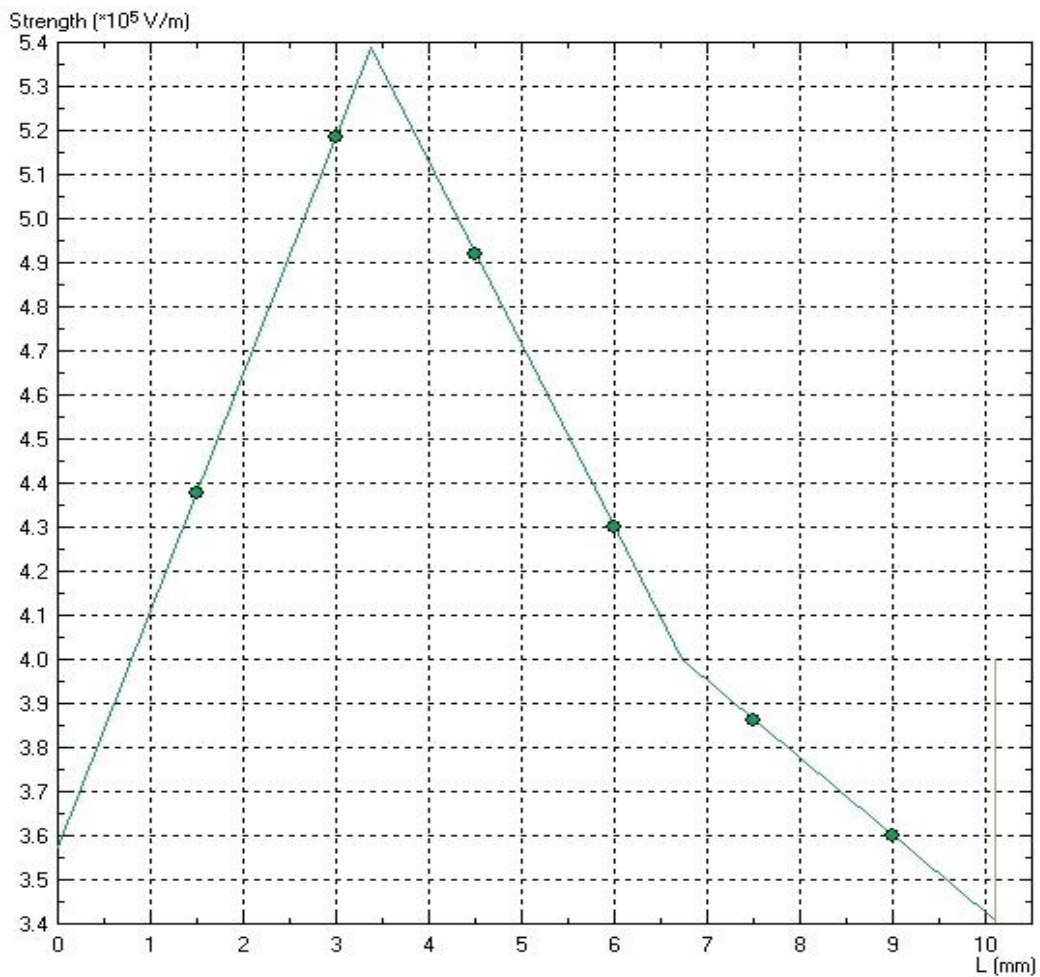
β

**Εικόνα 6.27 α)** Διάκενο ακίδας 60°-πλάκας μήκος διακένου, 0,5cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 60°-πλάκας μήκους 0,5cm.



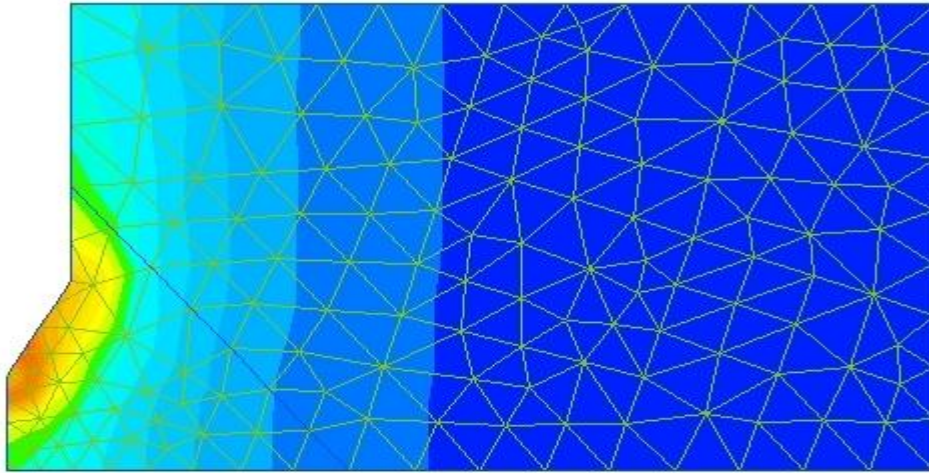
α



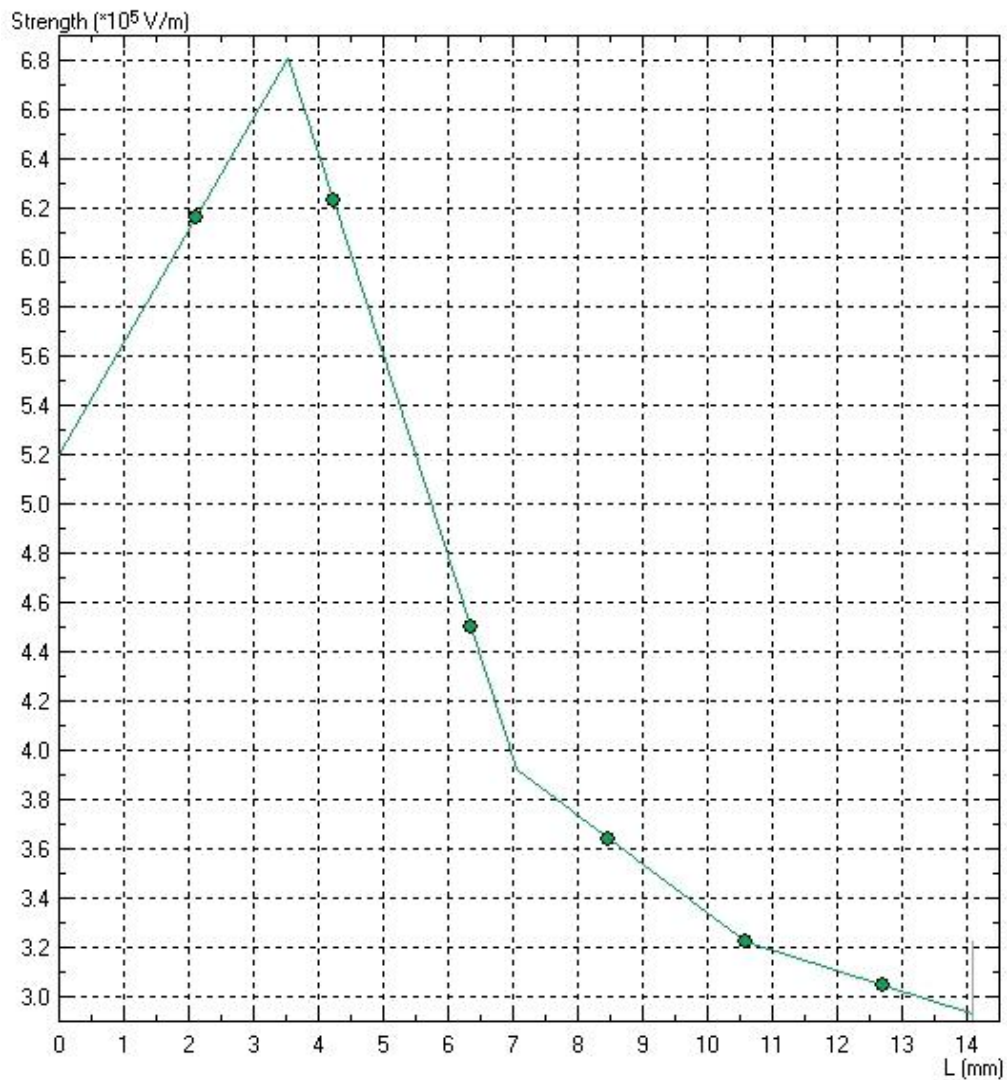
β

**Εικόνα 6.28 α)** Διάκενο ακίδας 60°-πλάκας μήκος διακένου, 1cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 60°-πλάκας μήκους 1cm.



α

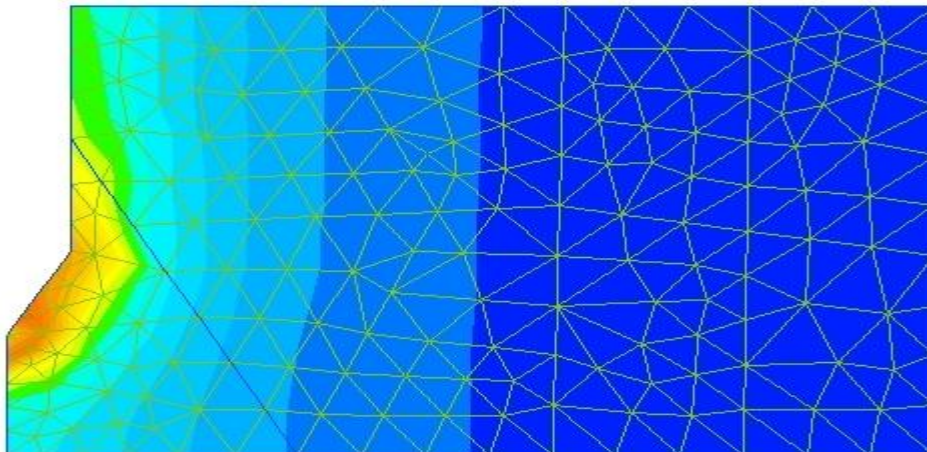


β

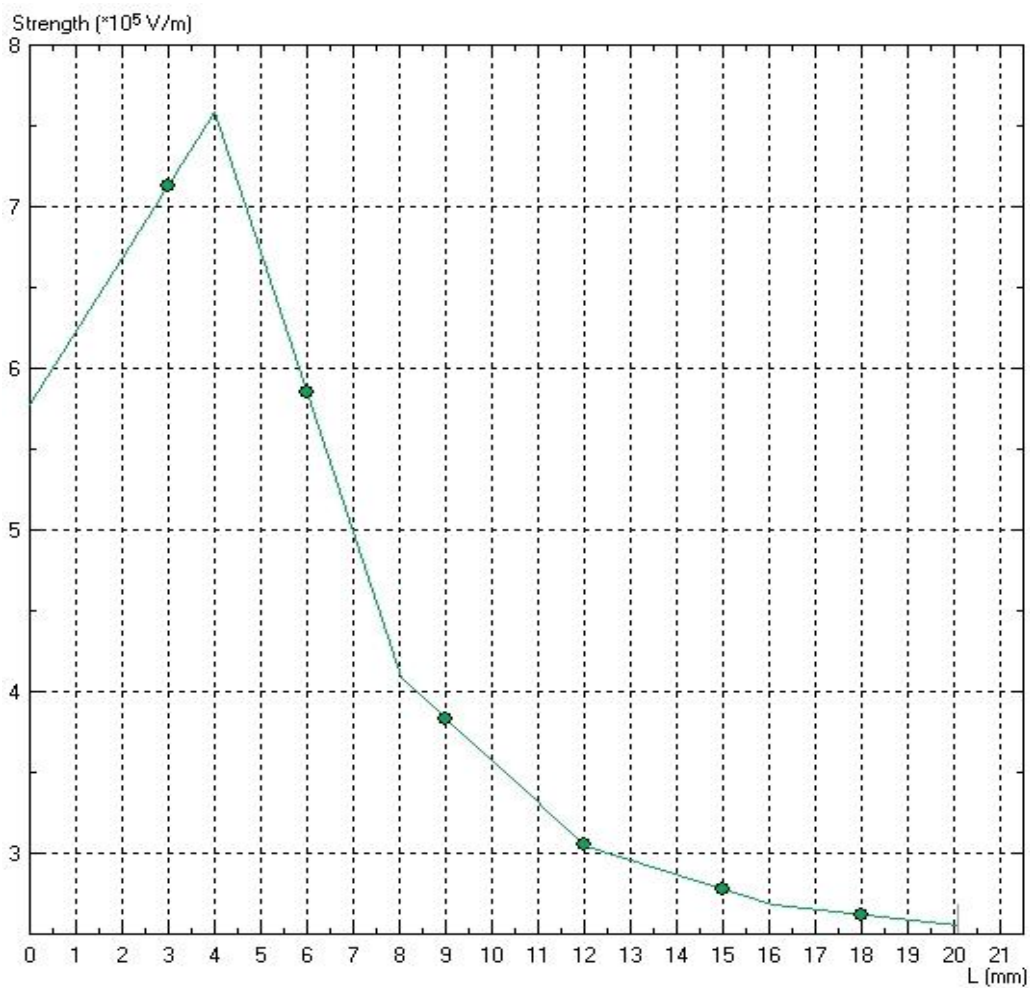
**Εικόνα 6.29 α)** Διάκενο ακίδας  $60^\circ$ -πλάκας μήκος διακένου, 1,5cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας  $60^\circ$ -πλάκας μήκους 1,5cm.





α

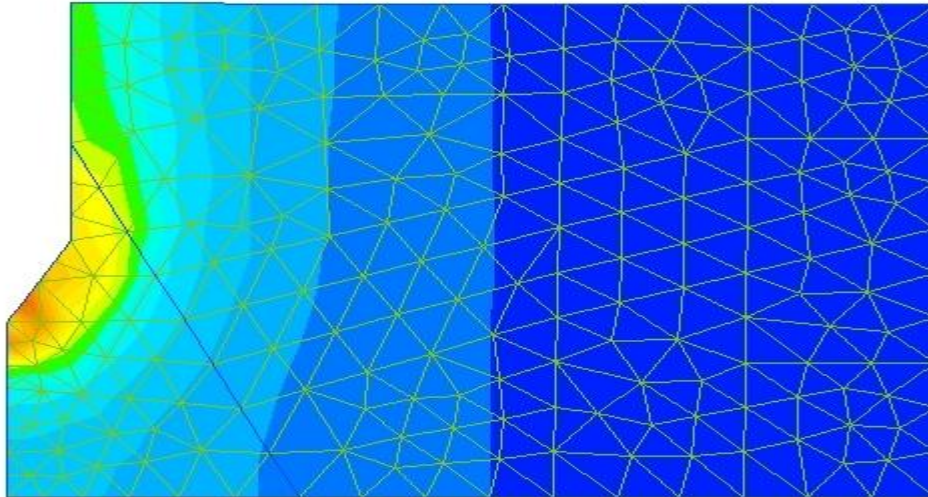


β

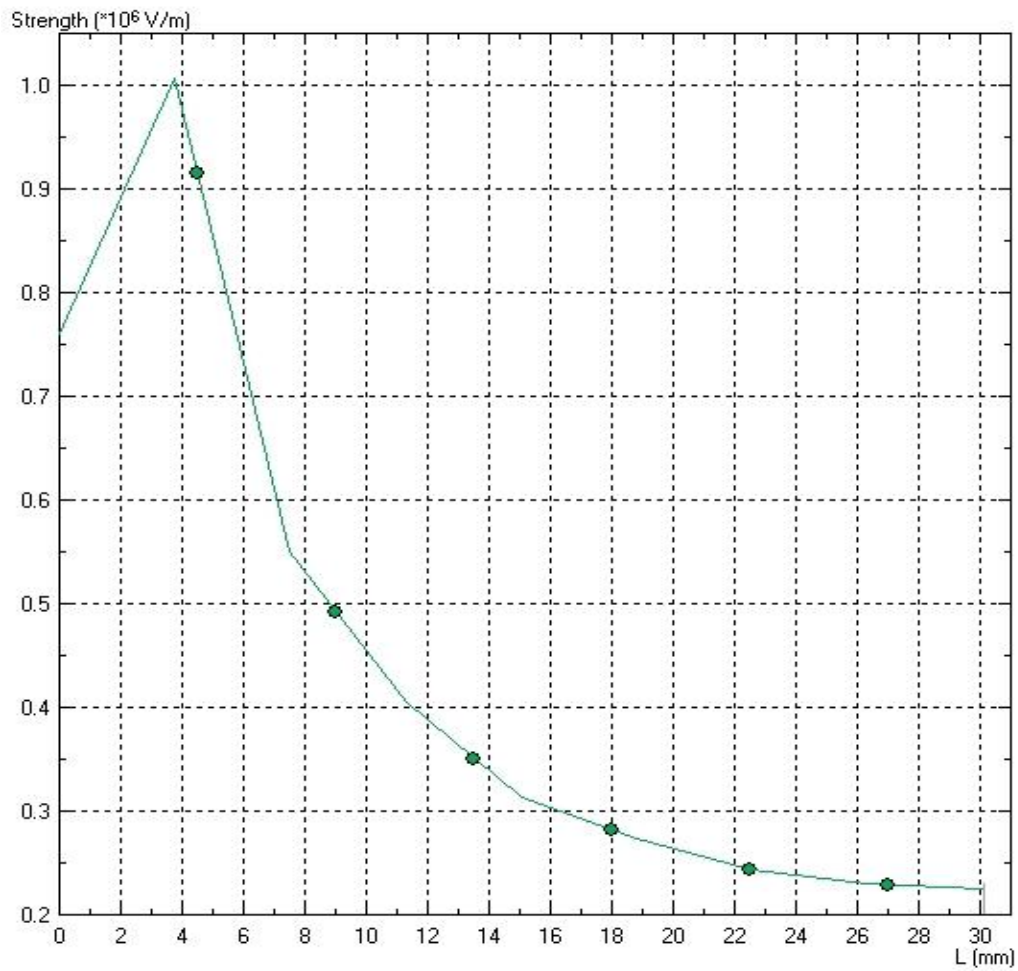
Εικόνα 6.30 α) Διάκενο ακίδας 60°-πλάκας μήκους διακένου, 2cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 60°-πλάκας μήκους 2cm.





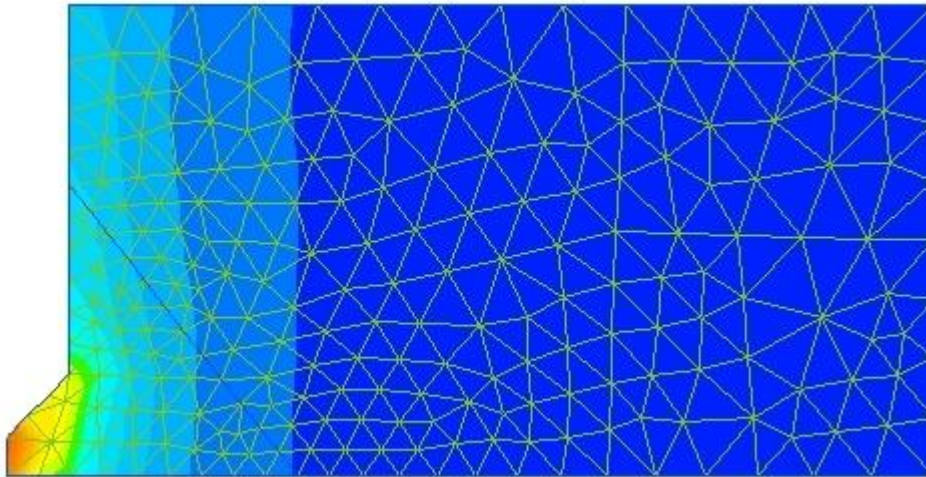
α



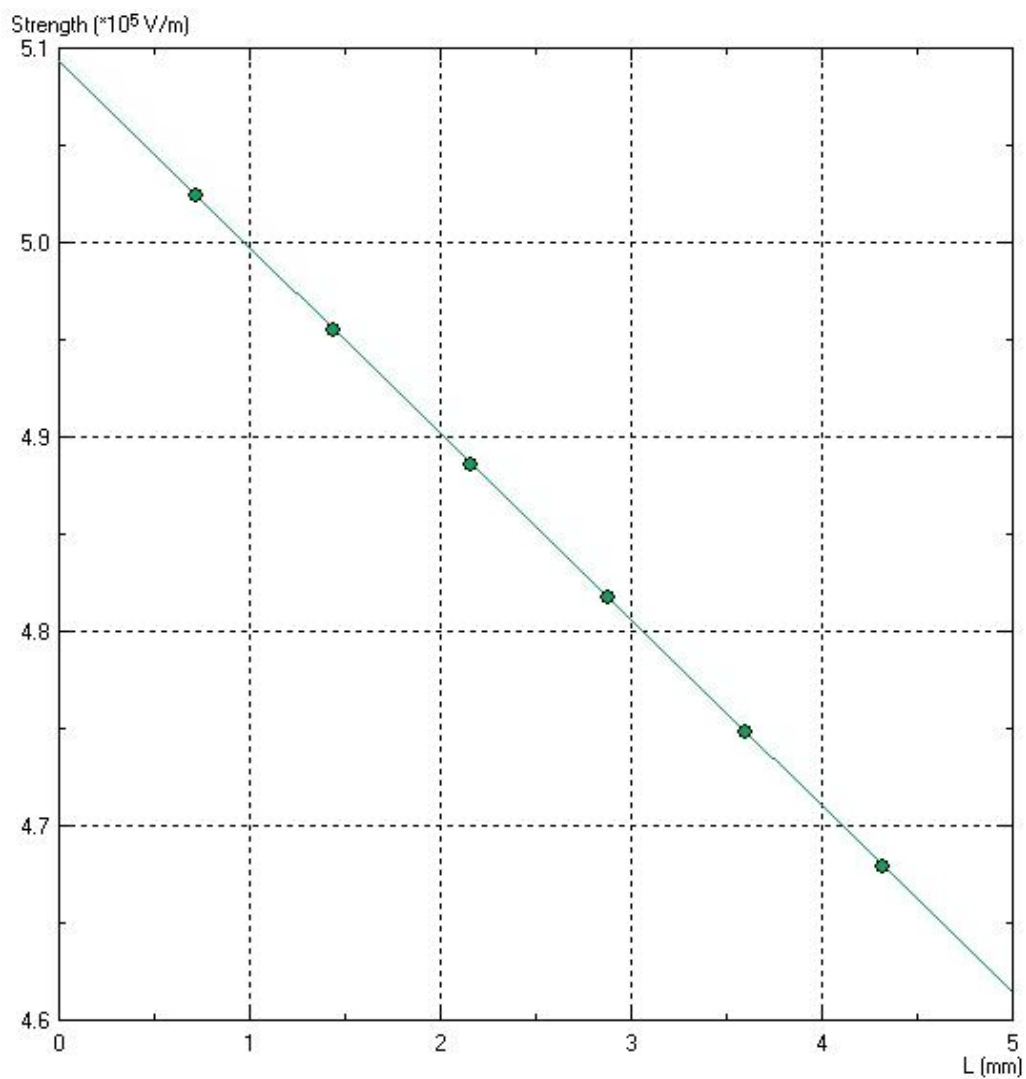
β

**Εικόνα 6.31** α) Διάκενο ακίδας 60°-πλάκας μήκος διακένου, 3cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 60°-πλάκας μήκους 3cm.



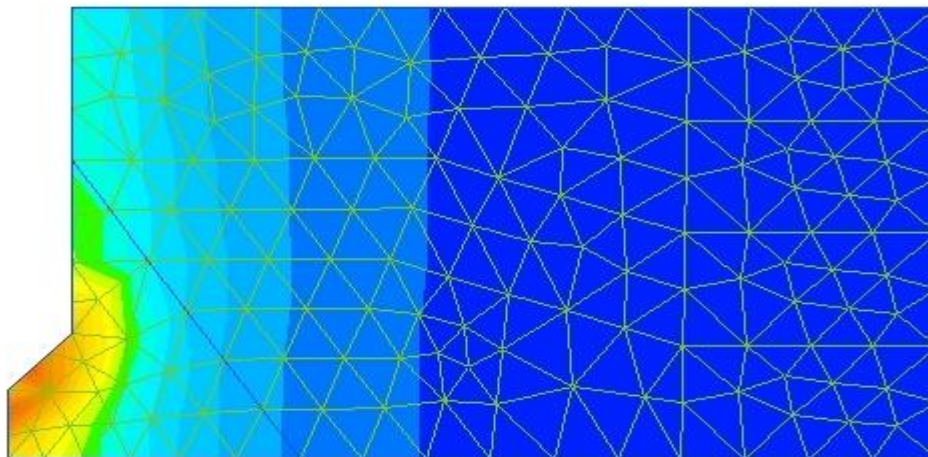
α



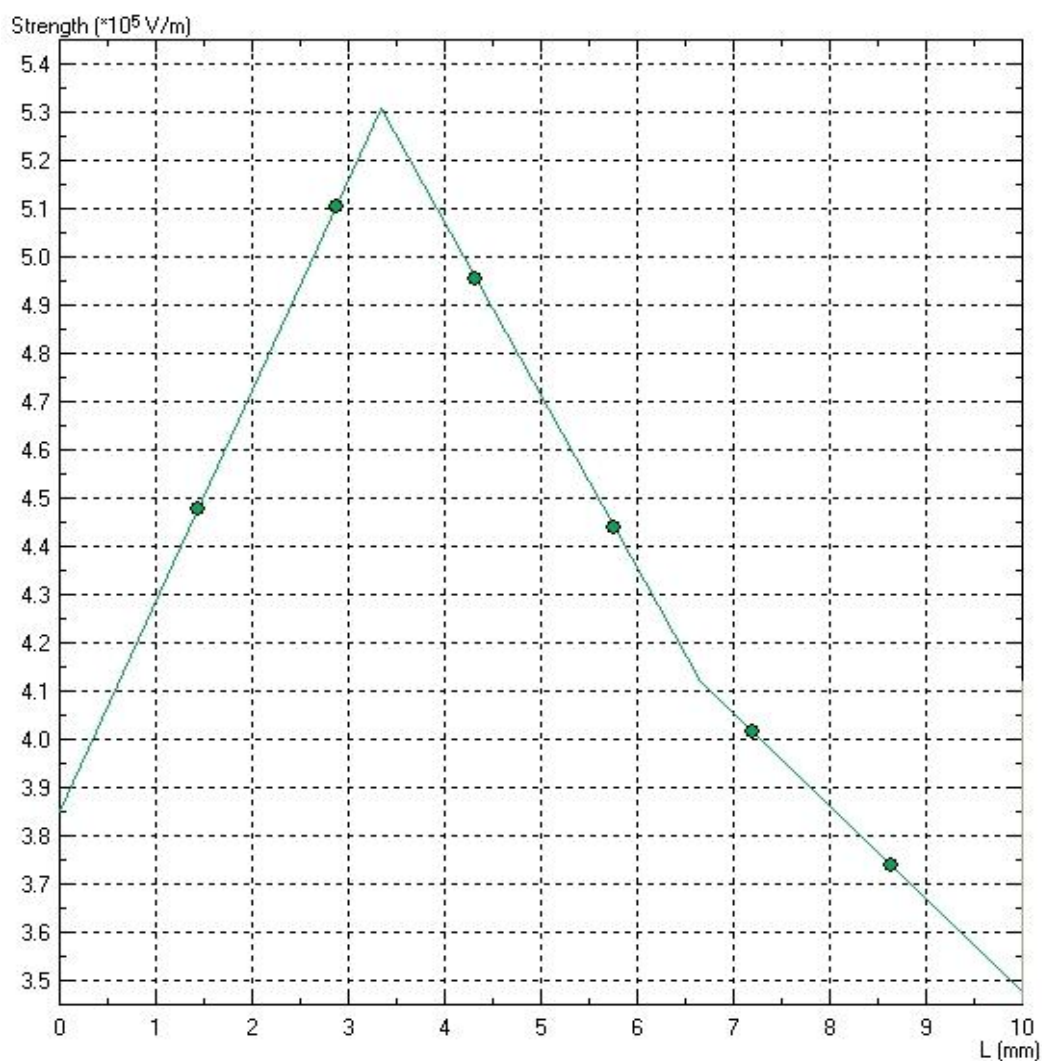
β

**Εικόνα 6.32** α) Διάκενο ακίδας 90°-πλάκας μήκος διακένου, 0,5cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 90°-πλάκας μήκους 0,5cm.



α

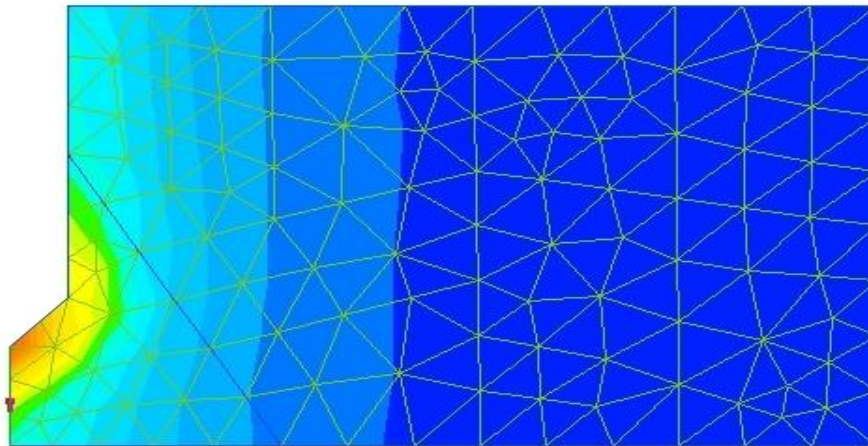


β

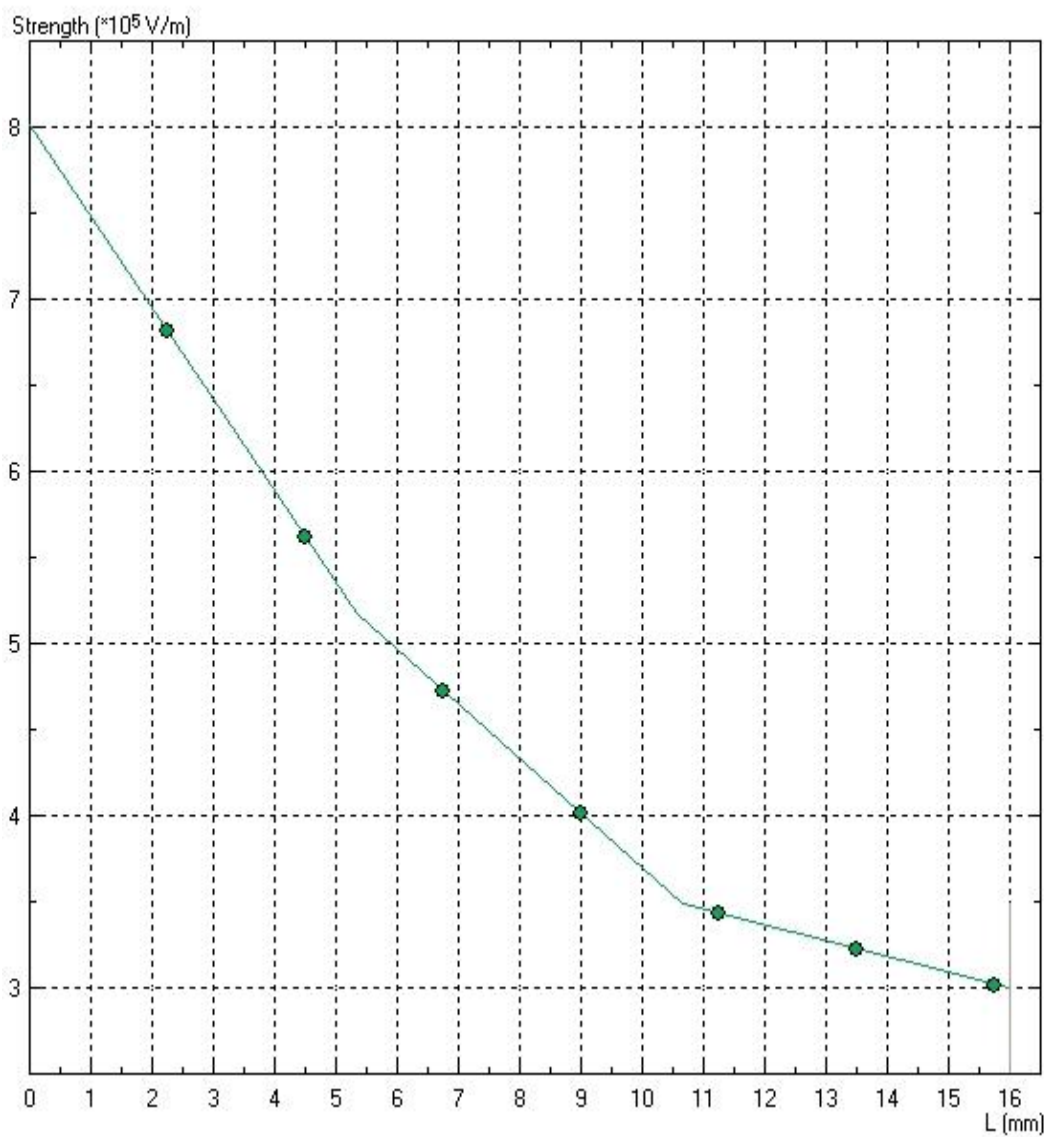
Εικόνα 6.33 α) Διάκενο ακίδας 90°-πλάκας μήκος διακένου, 1cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 90°-πλάκας μήκους 1cm.





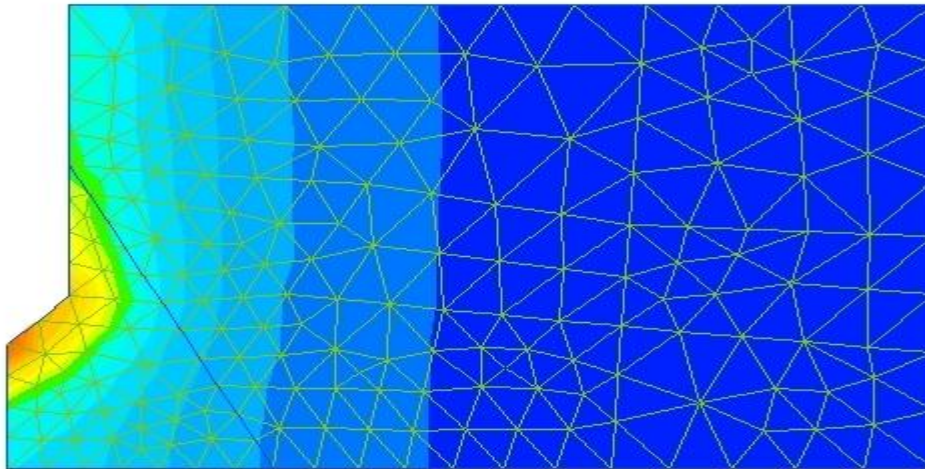
α



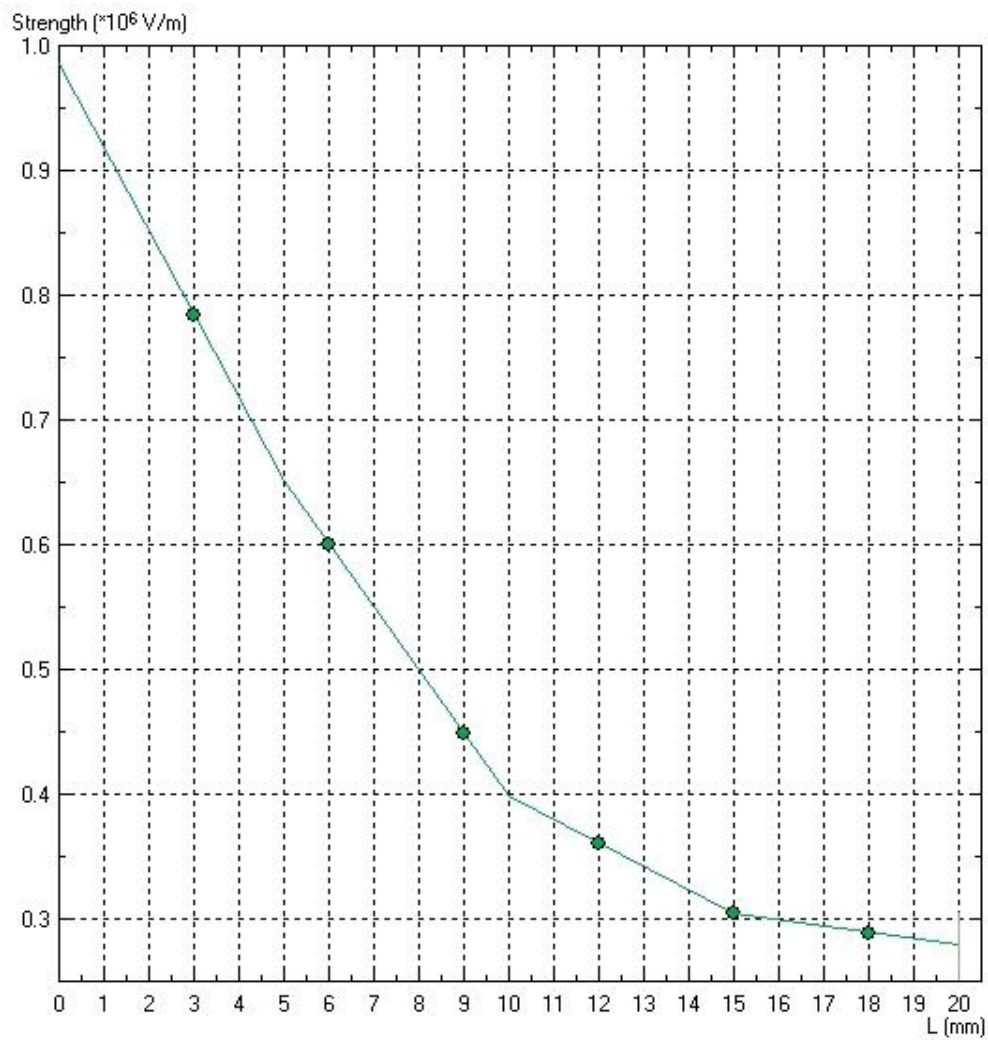
β

Εικόνα 6.34 α) Διάκενο ακίδας  $90^\circ$ -πλάκας μήκος διακένου, 1,5cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας  $90^\circ$ -πλάκας μήκους 1,5cm.



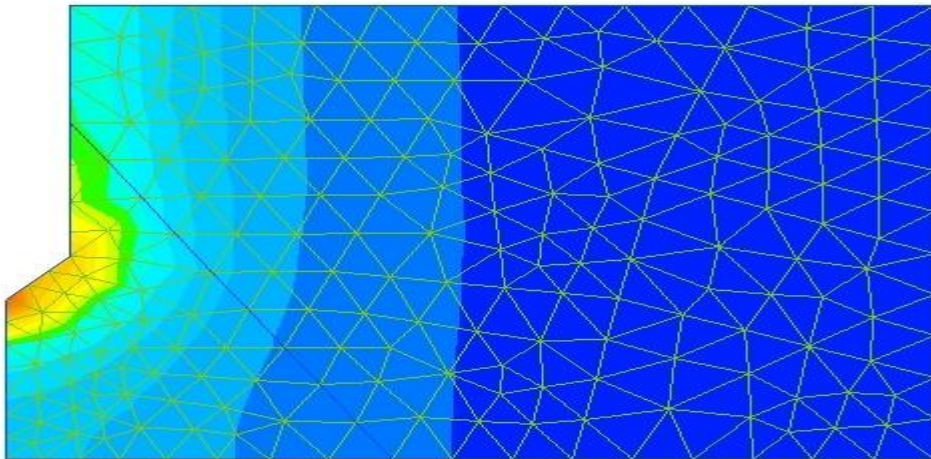
α



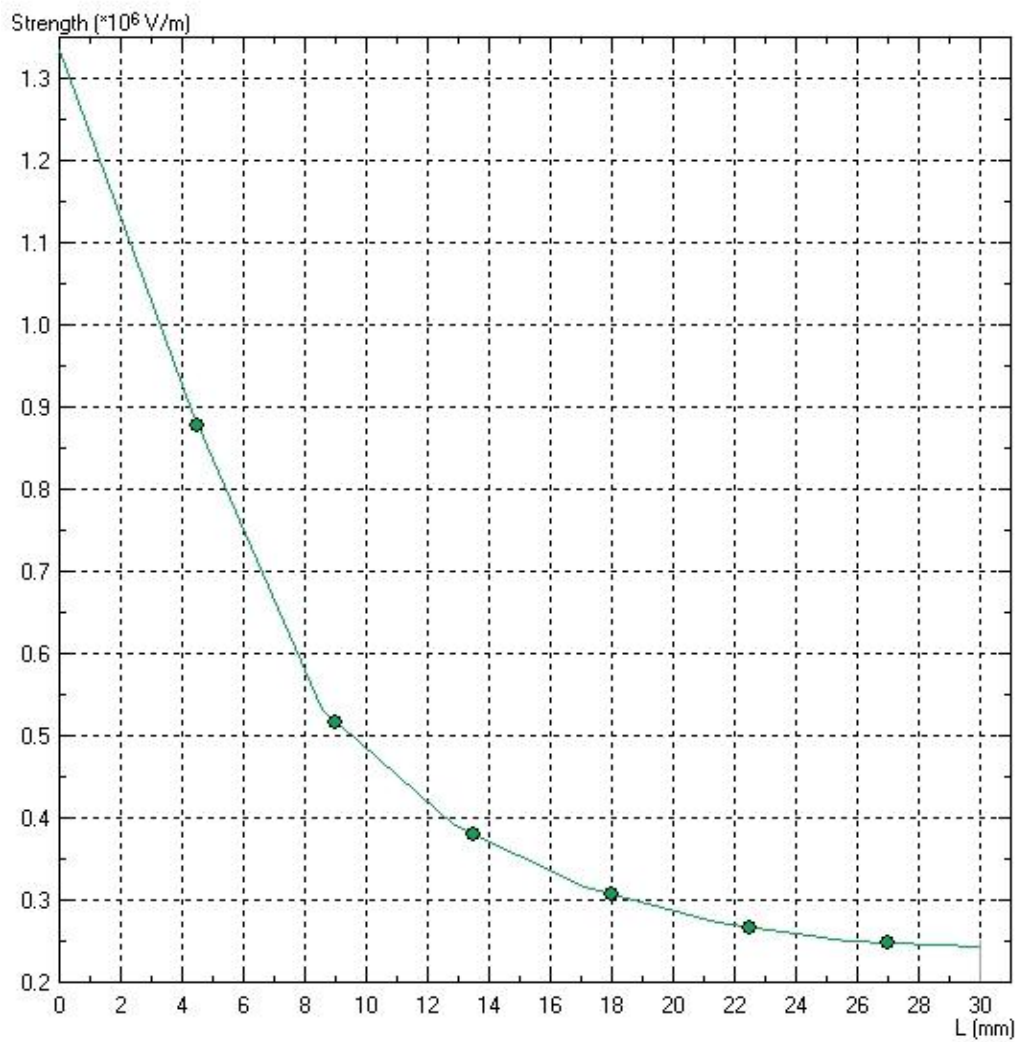
β

Εικόνα 6.35 α) Διάκενο ακίδας 90°-πλάκας μήκος διακένου, 2cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 90°-πλάκας μήκους 2cm.



α

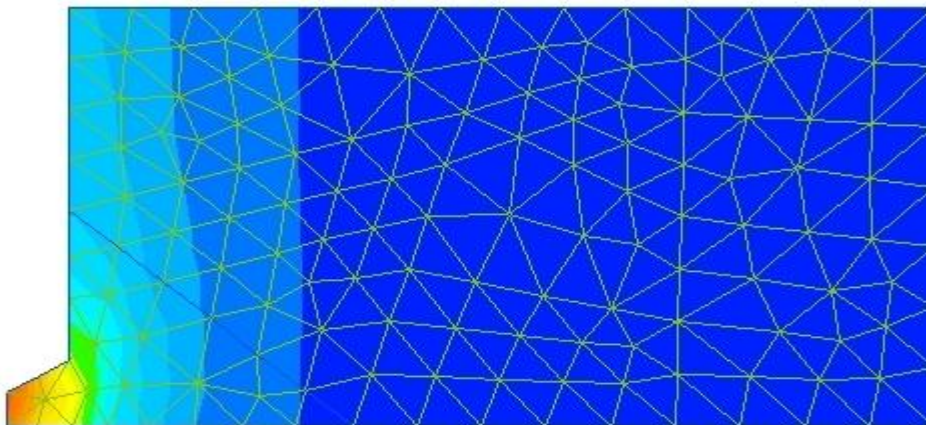


β

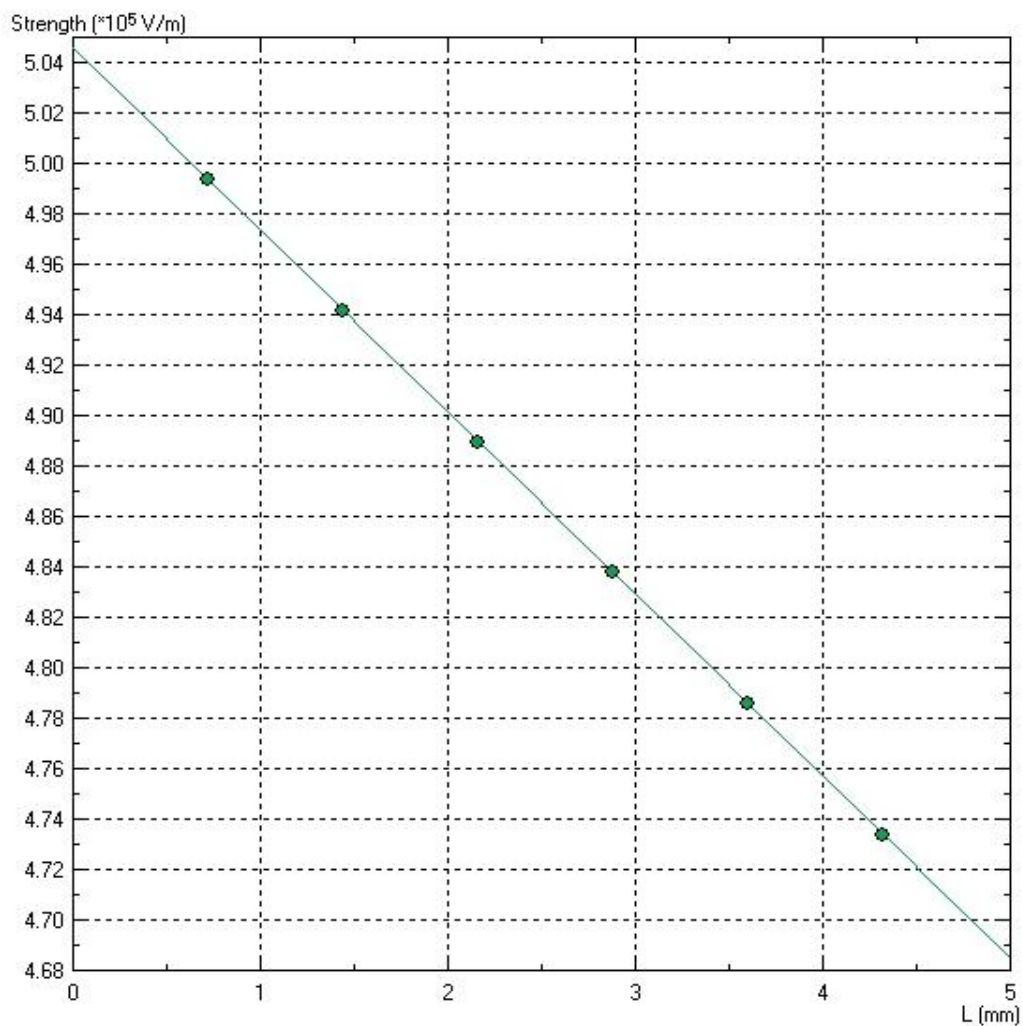
**Εικόνα 6.36** α) Διάκενο ακίδας 90°-πλάκας μήκος διακένου, 3cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 90°-πλάκας μήκους 3cm.





α

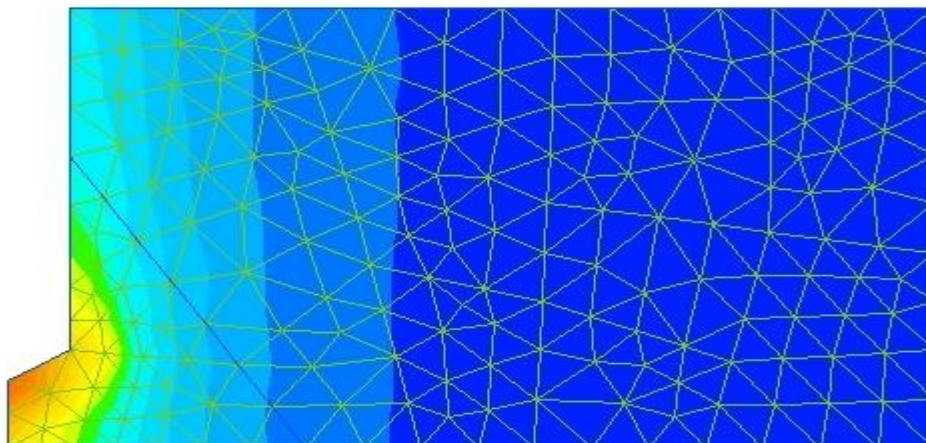


β

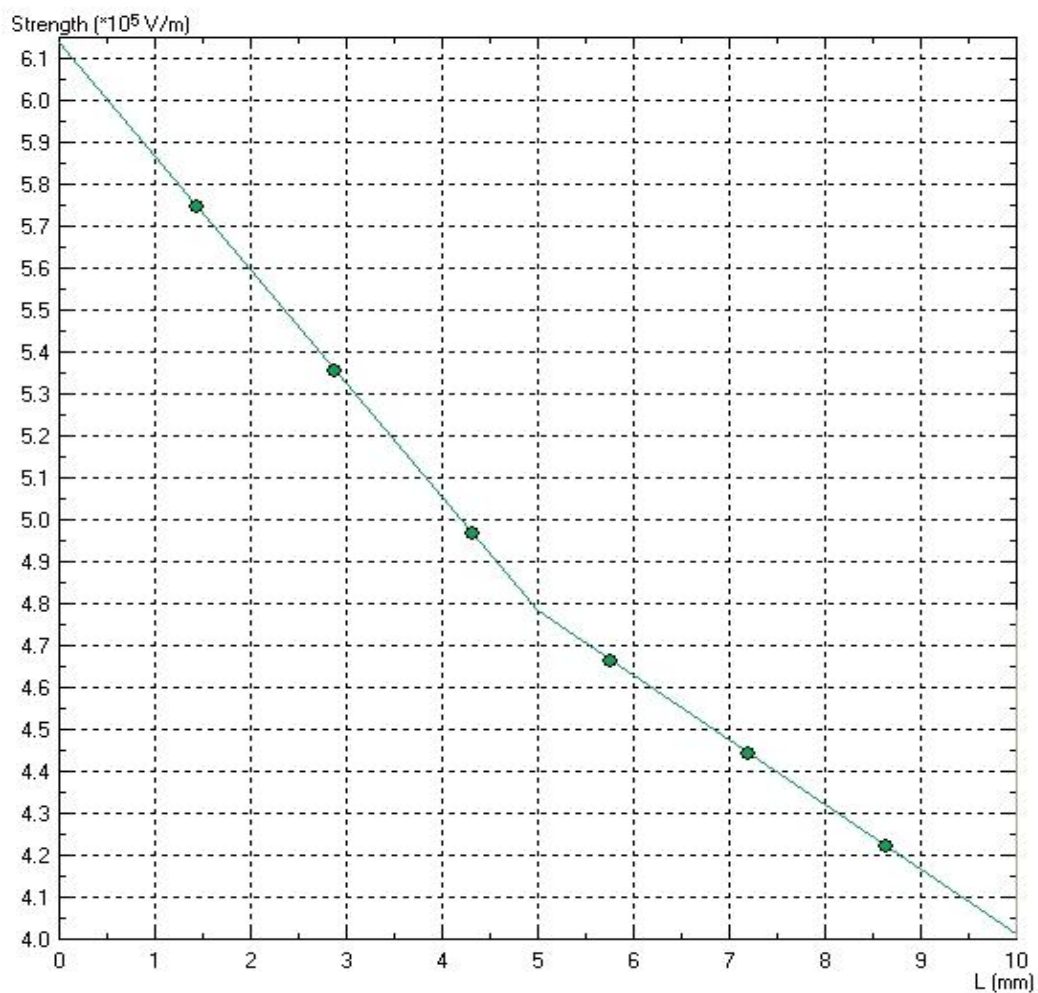
**Εικόνα 6.37** α) Διάκενο ακίδας  $120^\circ$ -πλάκας μήκος διακένου, 0,5cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας  $120^\circ$ -πλάκας μήκους 0,5cm.





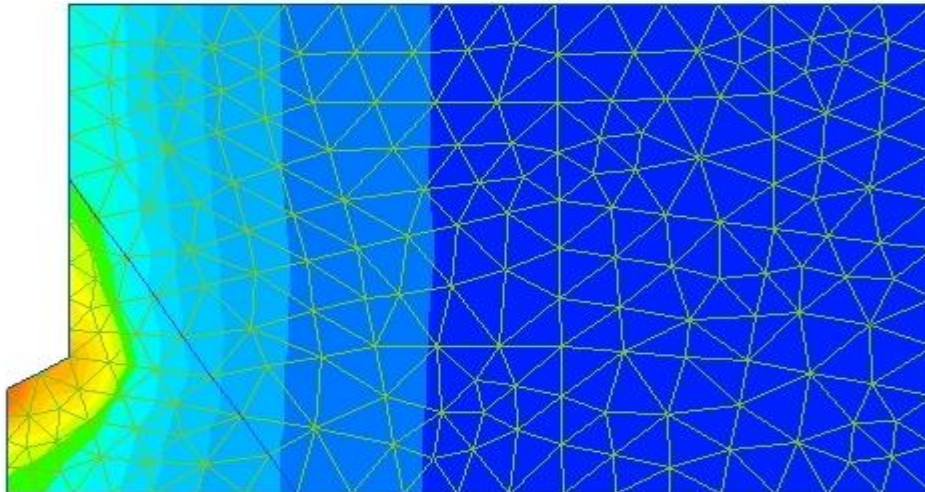
α



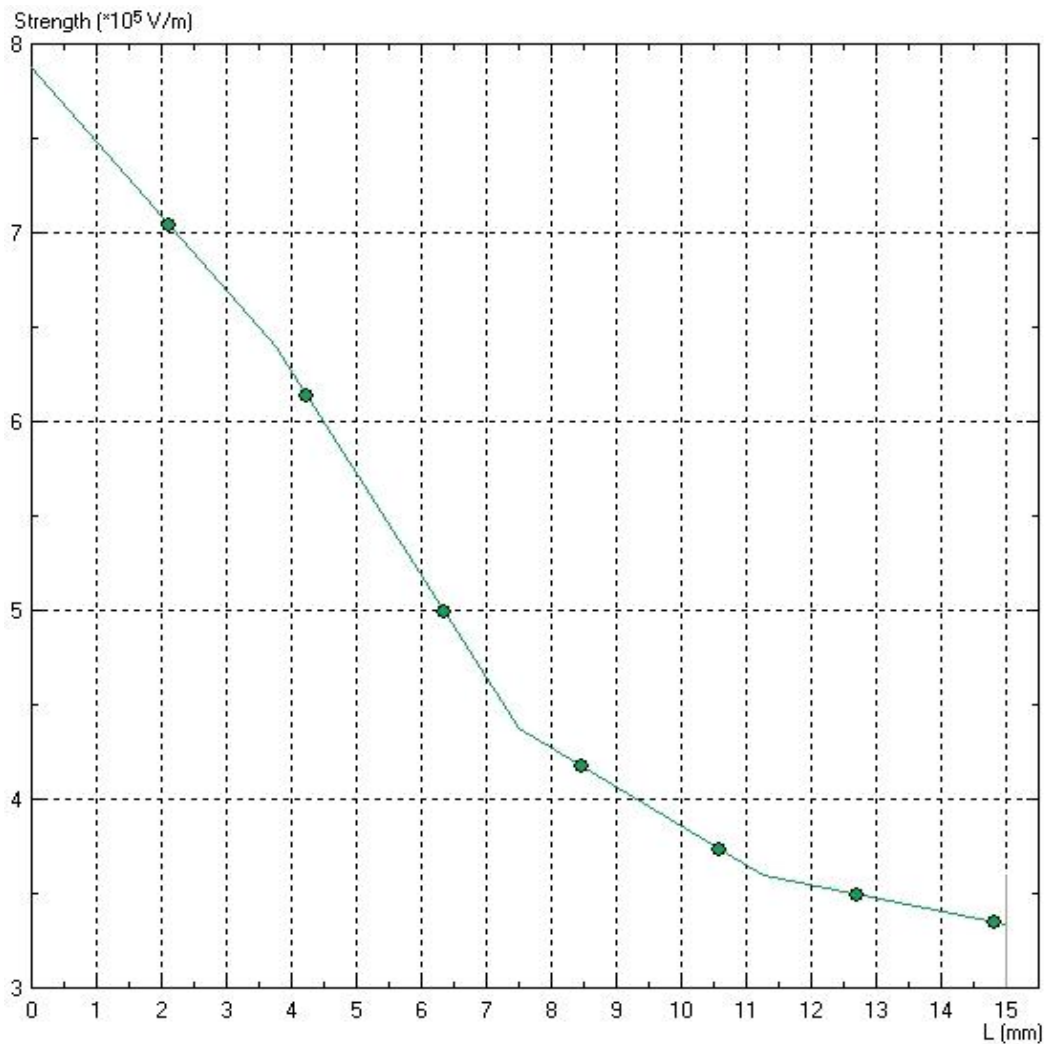
β

Εικόνα 6.38 α) Διάκενο ακίδας 120°-πλάκας μήκος διακένου, 1cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 120°-πλάκας μήκους 1cm.



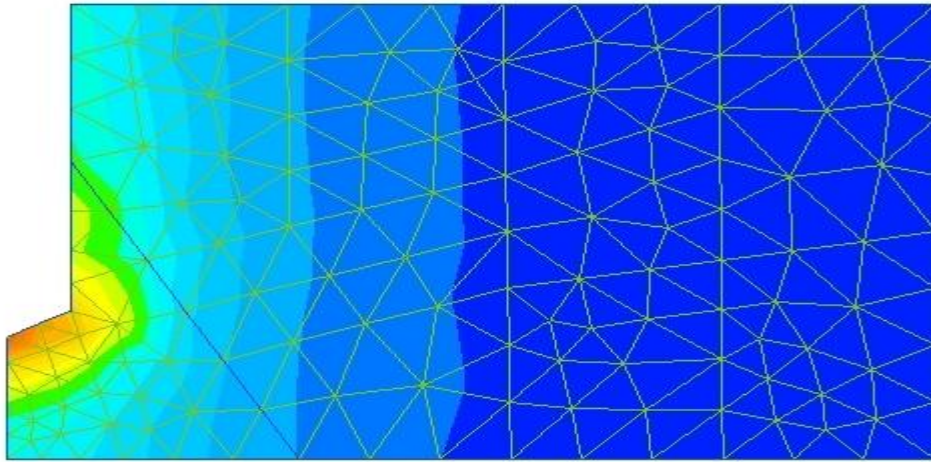
α



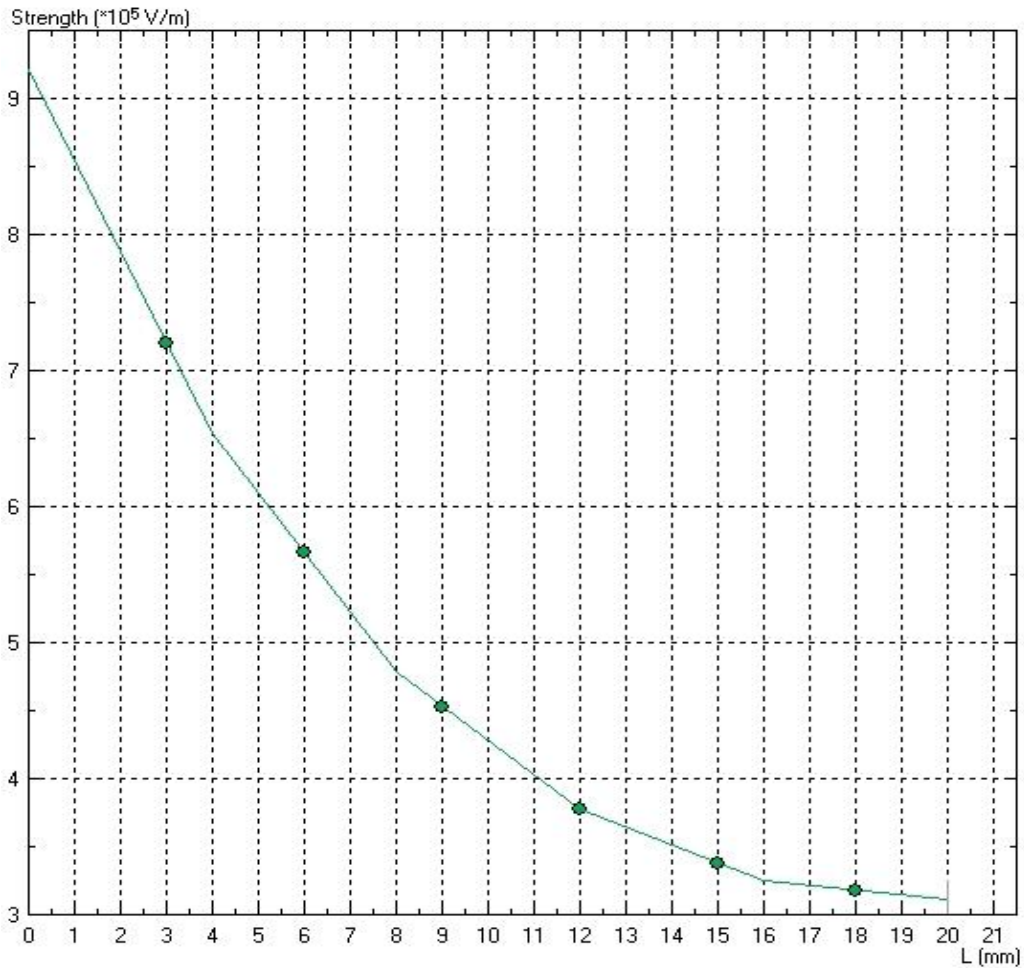
β

**Εικόνα 6.39 α)** Διάκενο ακίδας  $120^\circ$ -πλάκας μήκος διακένου, 1,5cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας  $120^\circ$ -πλάκας μήκους 1,5cm.



α

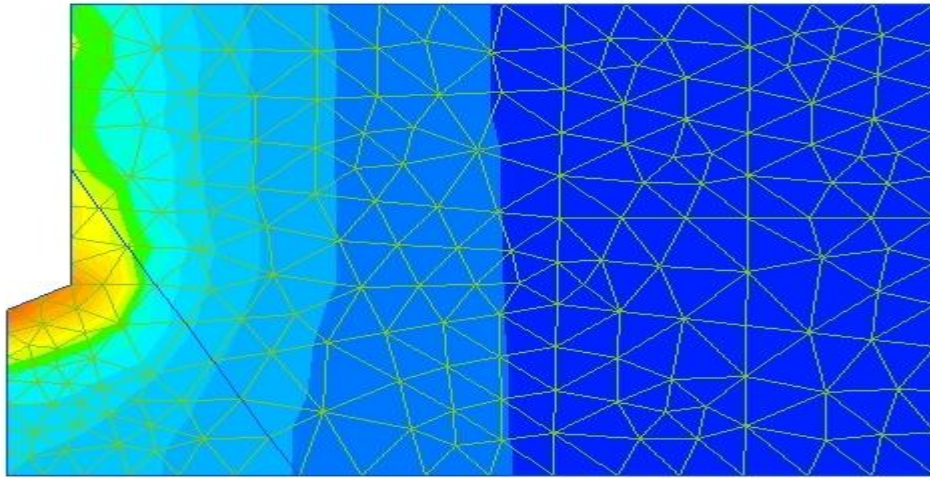


β

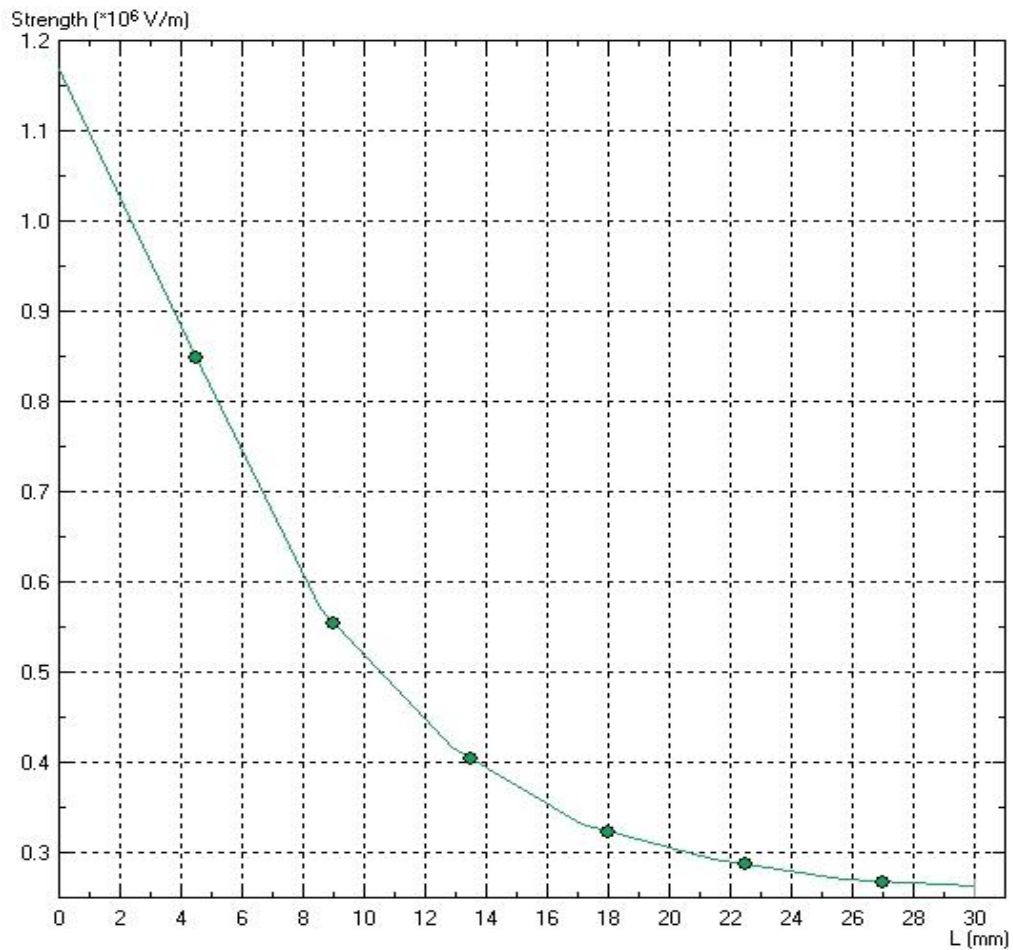
**Εικόνα 6.40** α) Διάκενο ακίδας 120°-πλάκας μήκους διακένου, 2cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας 120°-πλάκας μήκους 2cm.





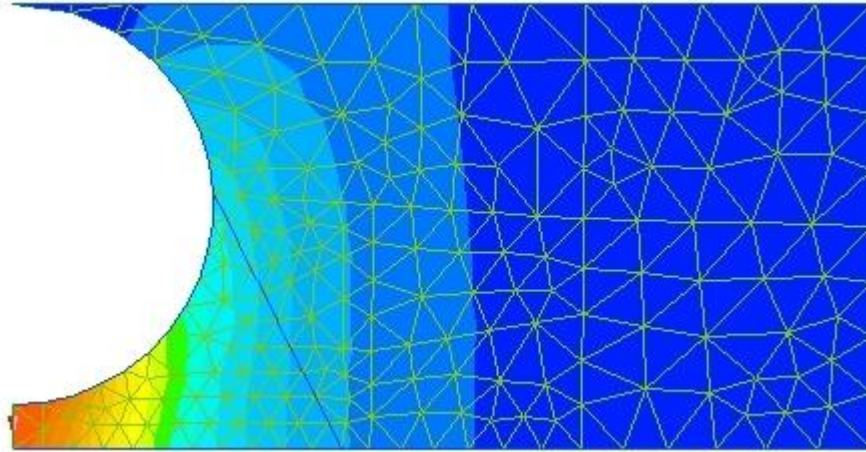
α



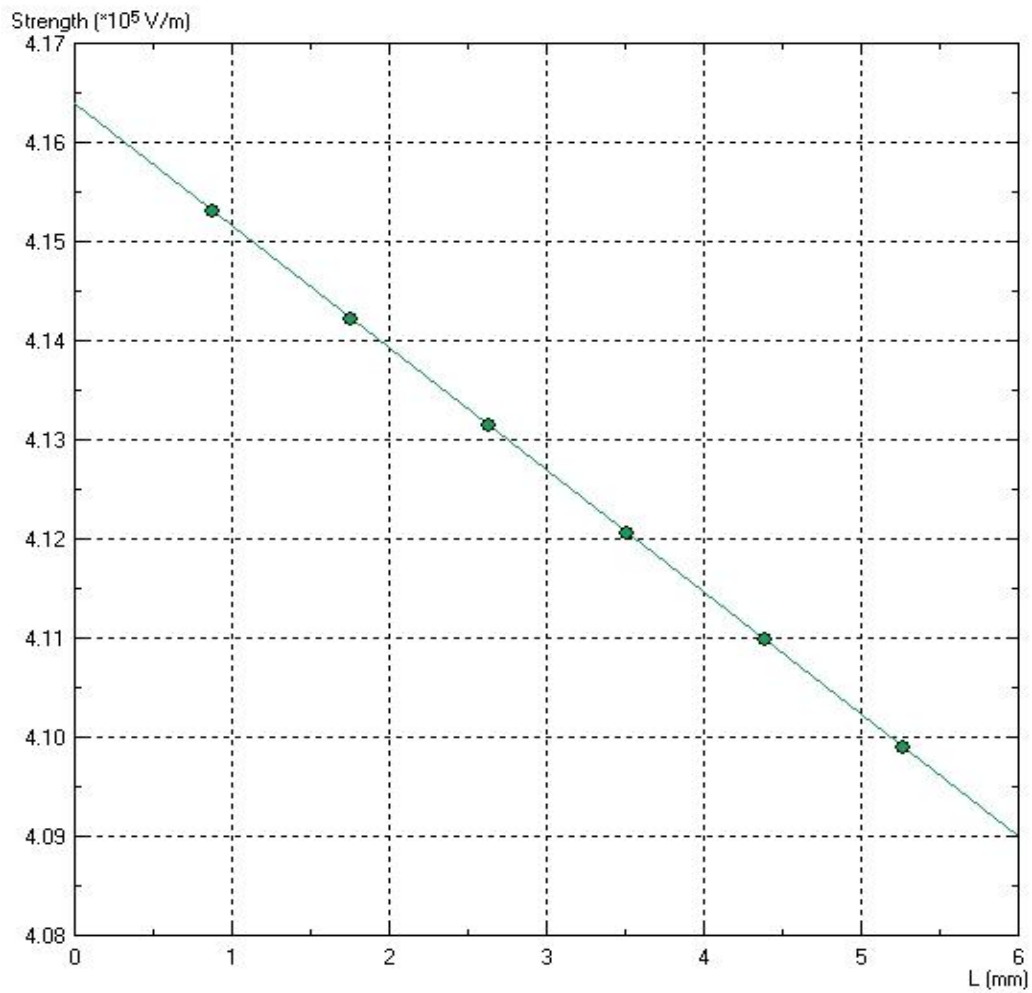
β

**Εικόνα 6.41 α)** Διάκενο ακίδας  $120^\circ$ -πλάκας μήκος διακένου, 3cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας  $120^\circ$ -πλάκας μήκους 3cm.



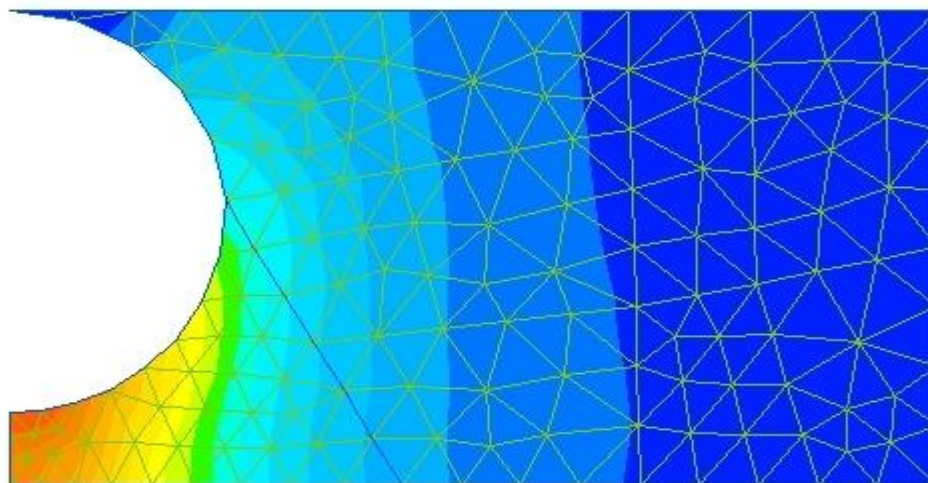
α



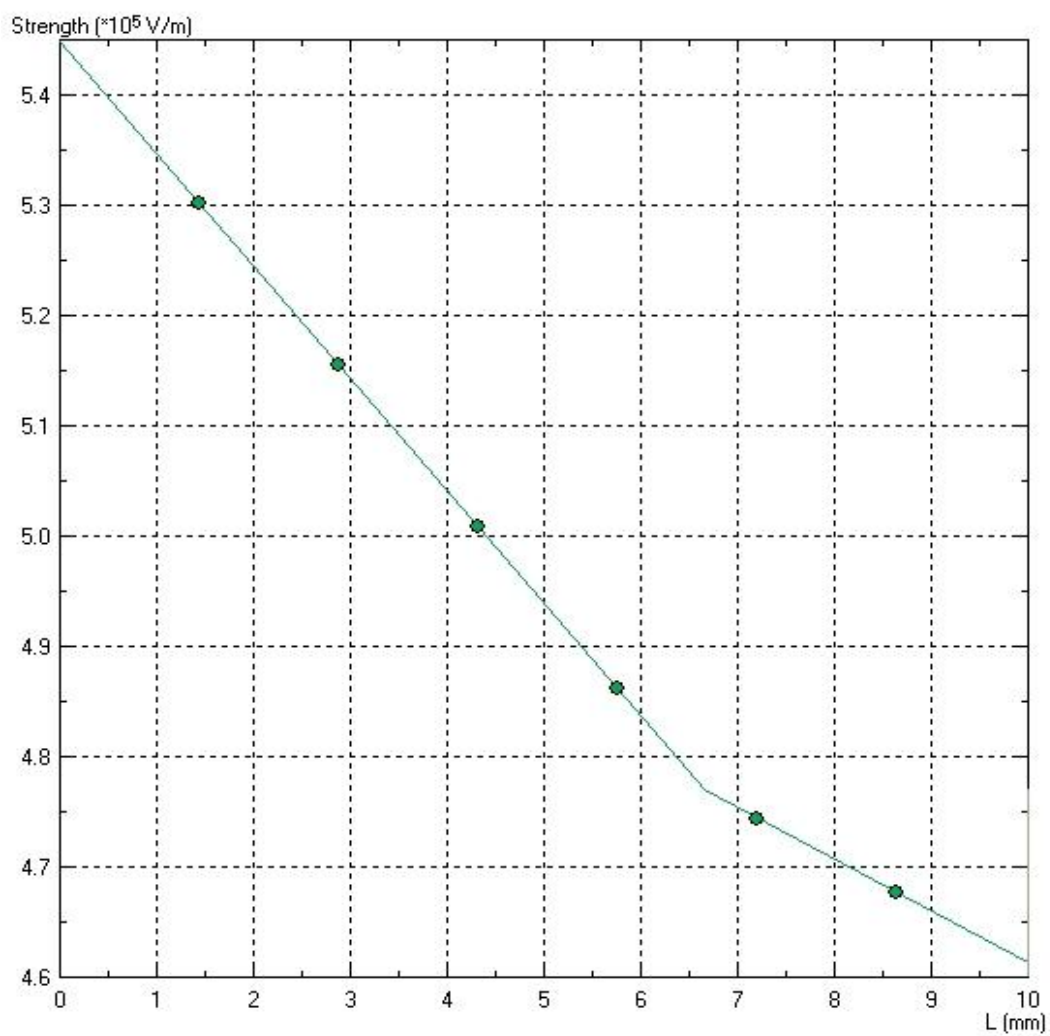
β

Εικόνα 6.42 α) Διάκενο σφαίρας-πλάκας μήκος διακένου, 0,5cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας σφαίρας-πλάκας μήκους 0,5cm.



α

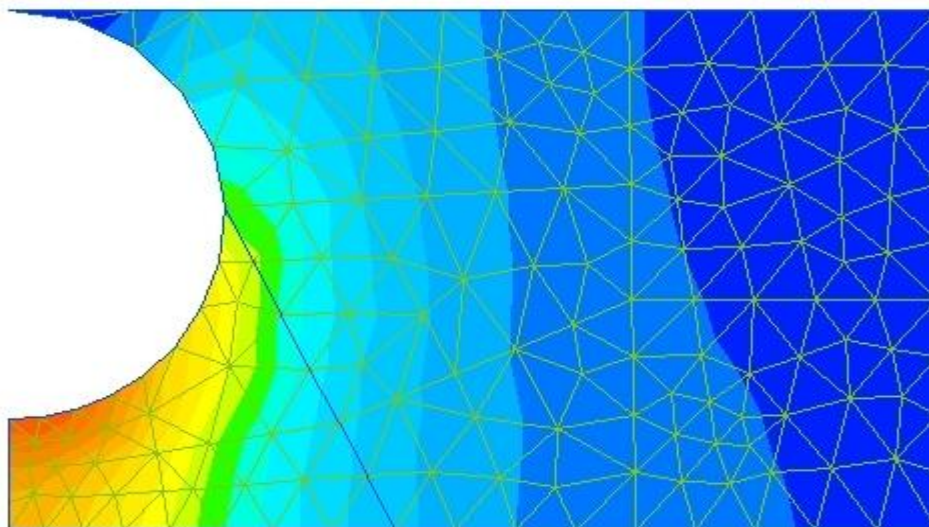


β

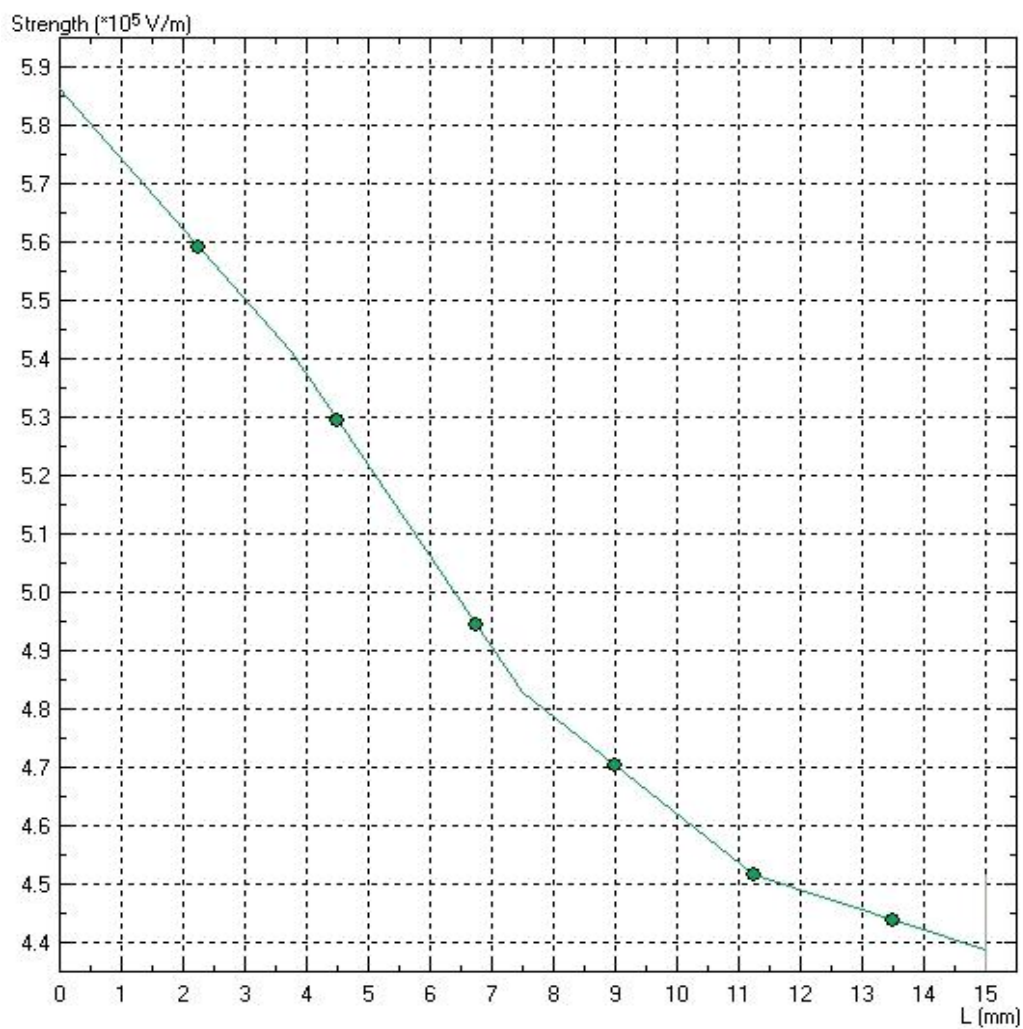
Εικόνα 6.43 α) Διάκενο σφαίρας-πλάκας μήκος διακένου, 1cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας σφαίρας-πλάκας μήκους 1cm.





α

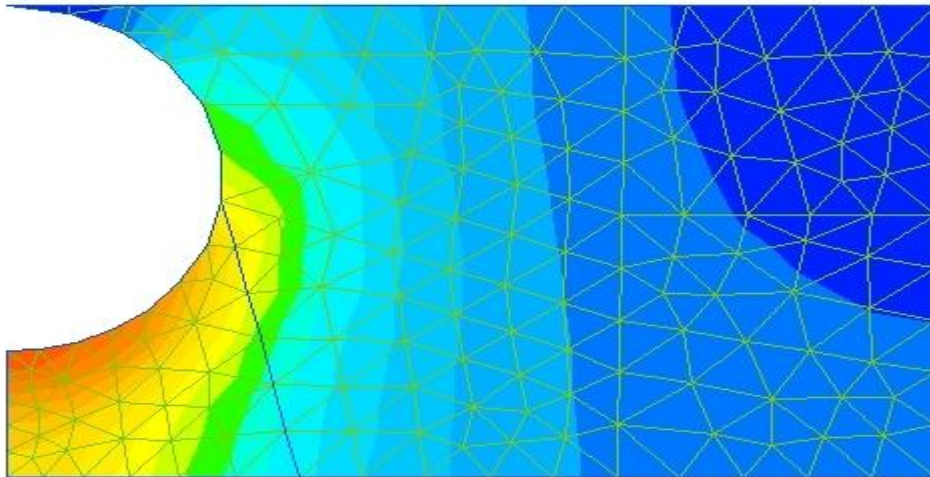


β

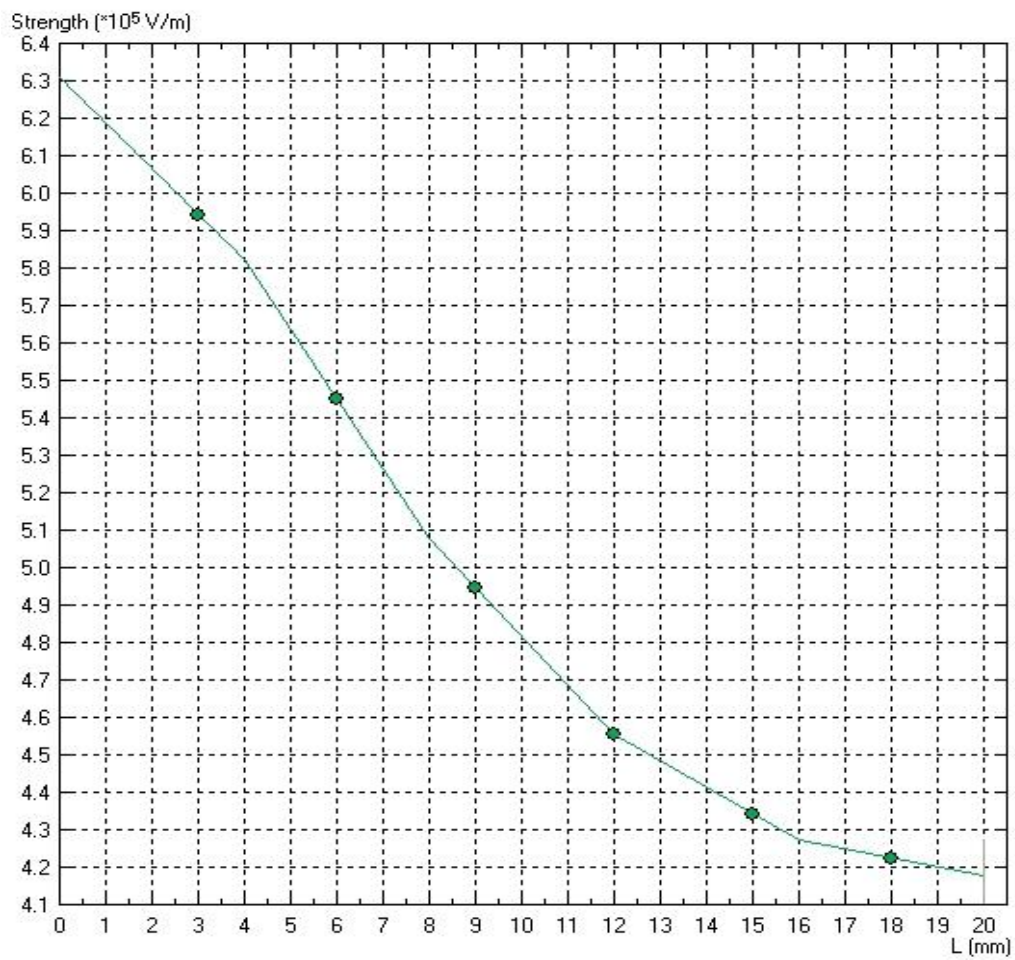
**Εικόνα 6.44 α)** Διάκενο σφαίρας-πλάκας μήκος διακένου, 1,5cm.

**β)** Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας σφαίρας-πλάκας μήκους 1,5cm.





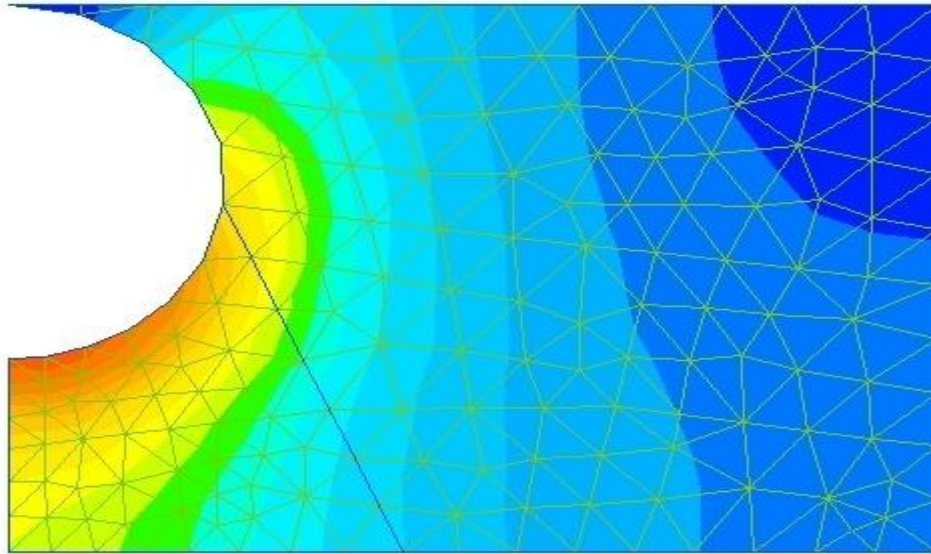
α



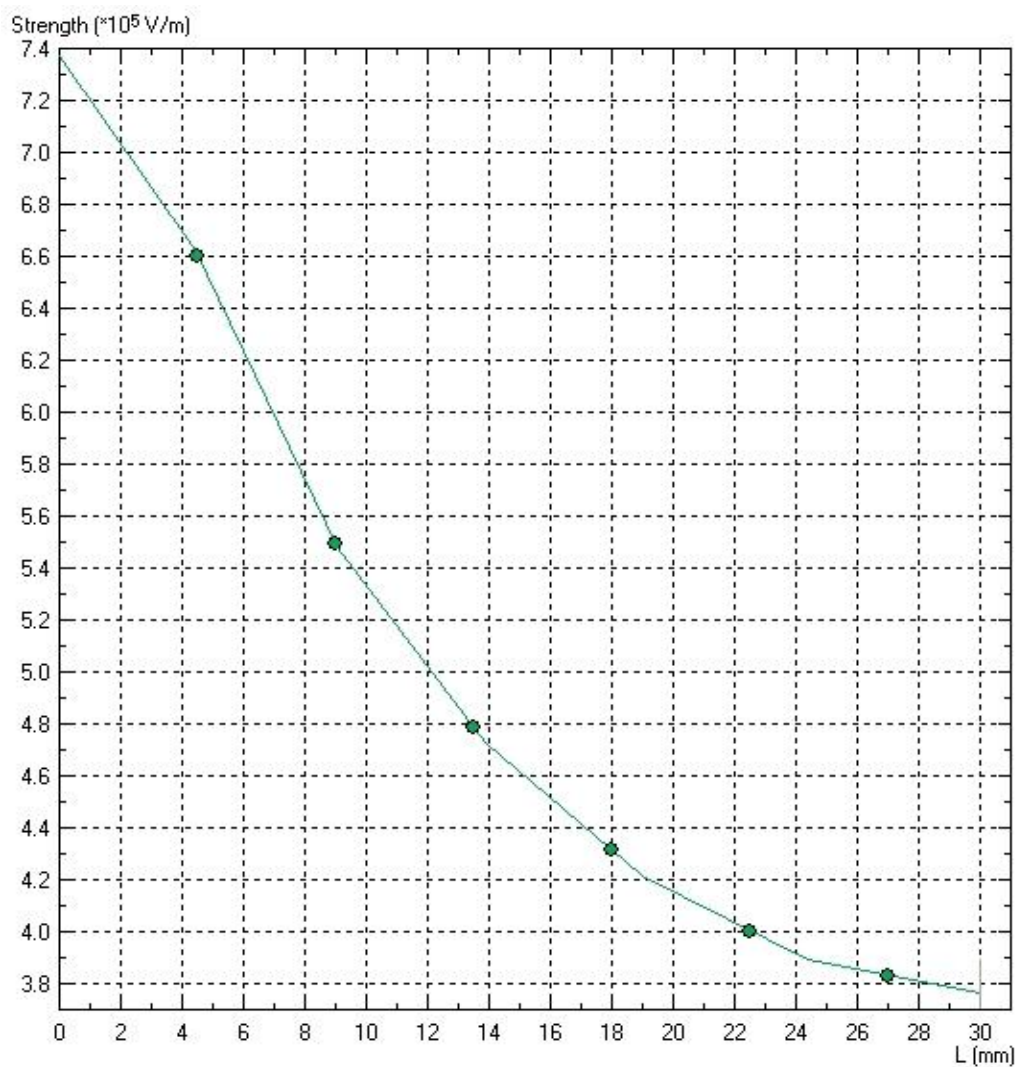
β

Εικόνα 6.45 α) Διάκενο σφαίρας-πλάκας μήκος διακένου, 2cm.

β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας σφαίρας-πλάκας μήκους 2cm.



α



β

Εικόνα 6.46 α) Διάκενο σφαίρας-πλάκας μήκος διακένου, 3cm.

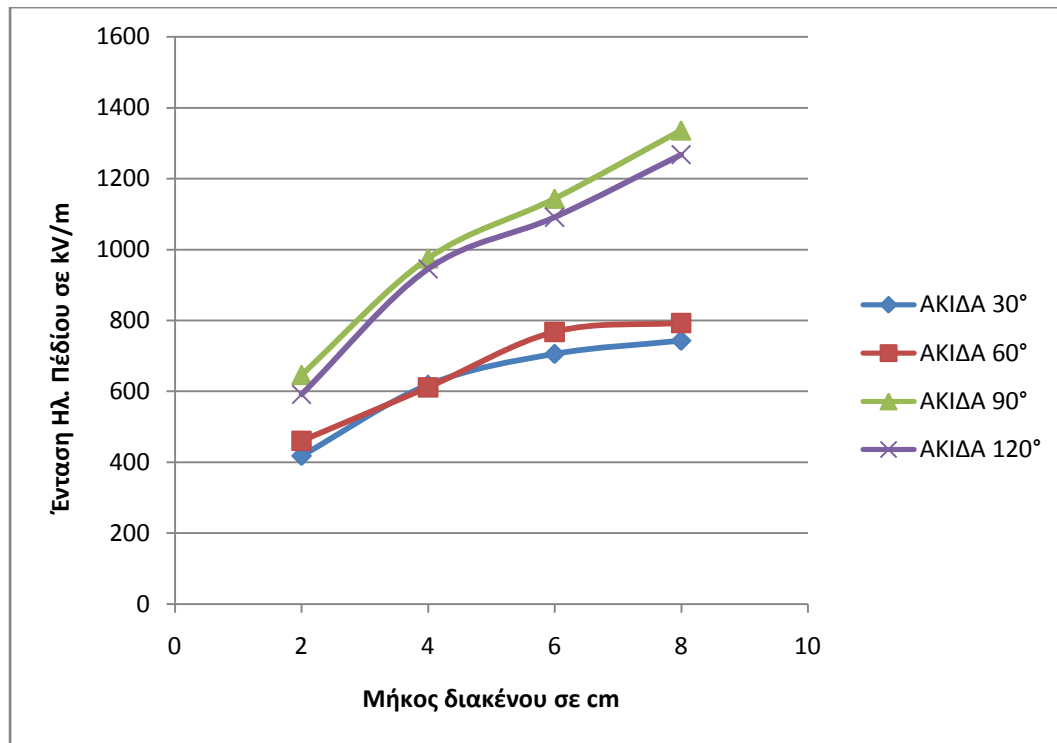
β) Γράφημα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου ακίδας σφαίρας-πλάκας μήκους 3cm.

Παρατηρώντας τα παραπάνω γραφήματα, οι πρώτη εκτίμηση που μπορεί να γίνει είναι να συγκριθούν με αυτά του κεφαλαίου 3 (3.11 και 3.12) που είναι για τα διάκενα ακίδα-πλάκα και ακίδα-ακίδα αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι τα γραφήματα της προσομοίωσης έχουν την ίδια μορφή με αυτά του κεφαλαίου 3, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο.

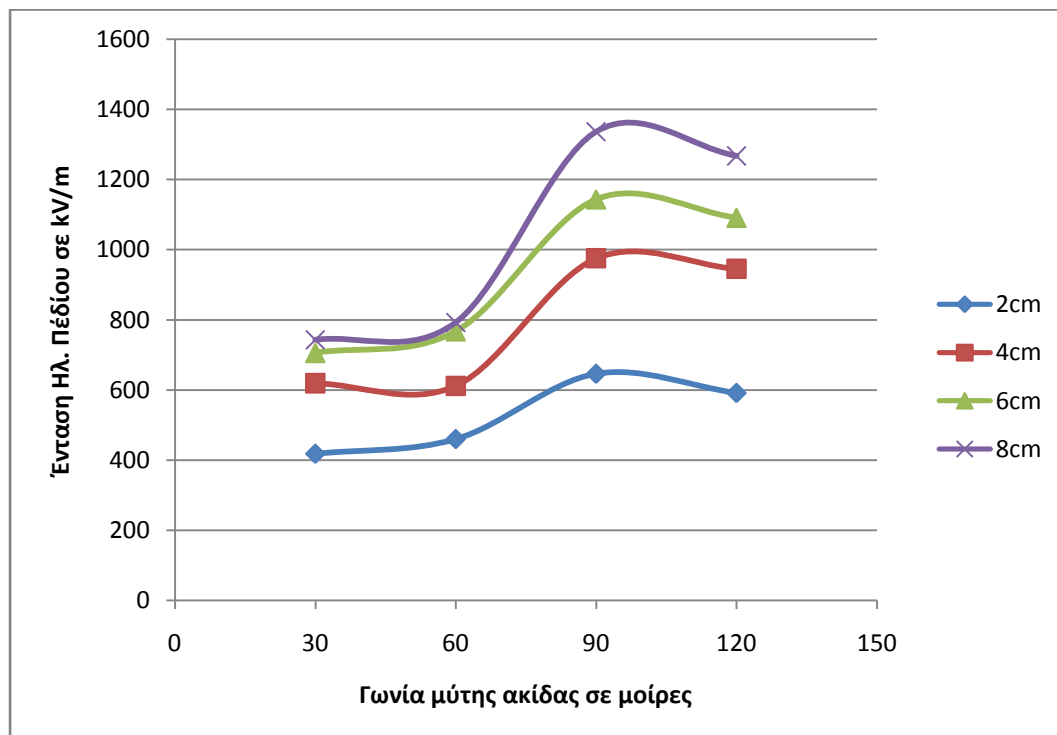
Επίσης από τα γραφήματα που προηγήθηκαν κρατήθηκε η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου από το κάθε ένα. Το QuickField δίνει την δυνατότητα να παρέχει σε αρχείο τις τιμές της κάθε γραφικής παράστασης ώστε αυτές να μπορούν να επεξεργαστούν σε κάποιο άλλο προγραμματιστικό περιβάλλον. Οι τιμές αυτές επεξεργάστηκαν στο Excel ώστε να προκύψουν γραφήματα αντίστοιχα με αυτά που θα προκύψουν από τις πειραματικές τιμές. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται αυτά τα γραφήματα.

### **6.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ QUICKFIELD**

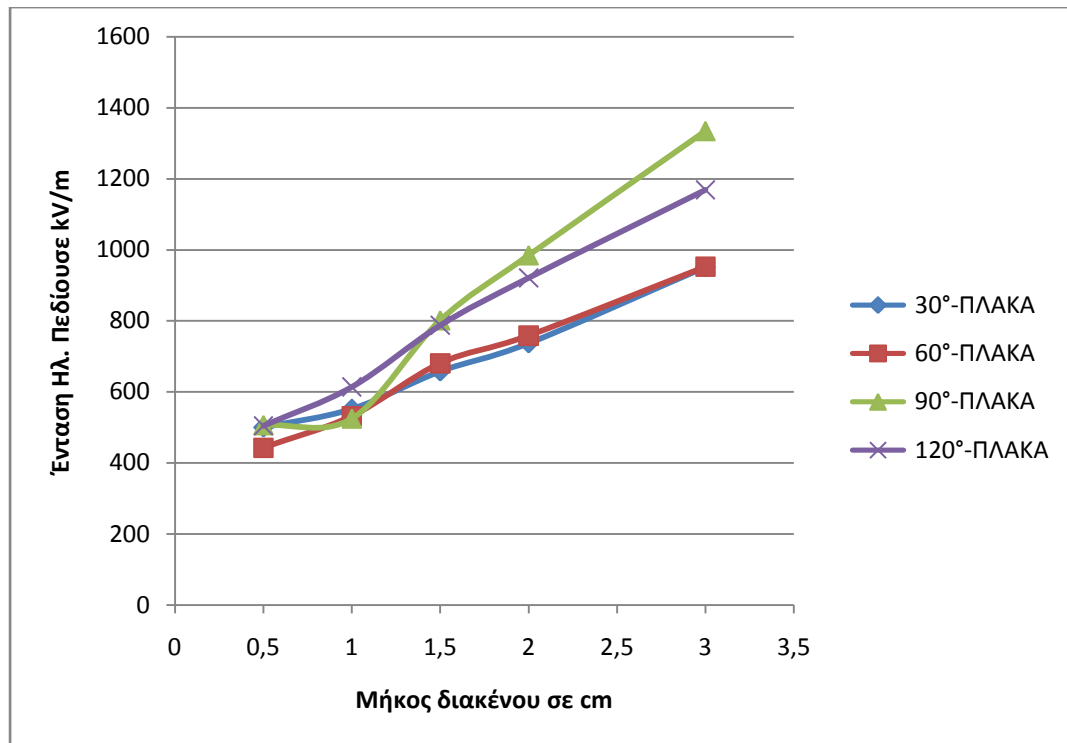
Από κάθε διάκενο που μελετήθηκε στον υπολογιστή, εκείνο που κρατήθηκε ήταν το γράφημα, η εικόνα με χρώματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η μέγιστη τιμή αυτής στο διάστημα μεταξύ των άκρων των ηλεκτροδίων. Από αυτές στην συνέχεια για κάθε διάκενο, προέκυψαν κάποια γραφήματα. Αυτά τα γραφήματα παρουσιάζονται παρακάτω.



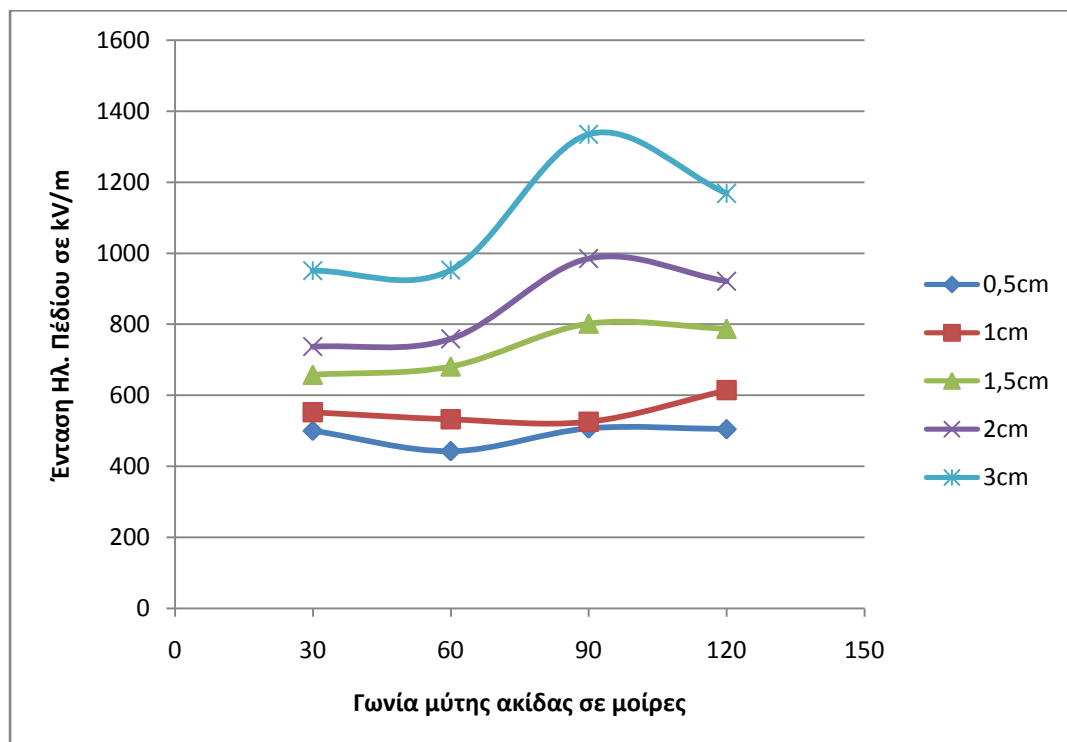
Σχήμα 6.1 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του διακένου για το διάκενο ακίδα-ακίδα.



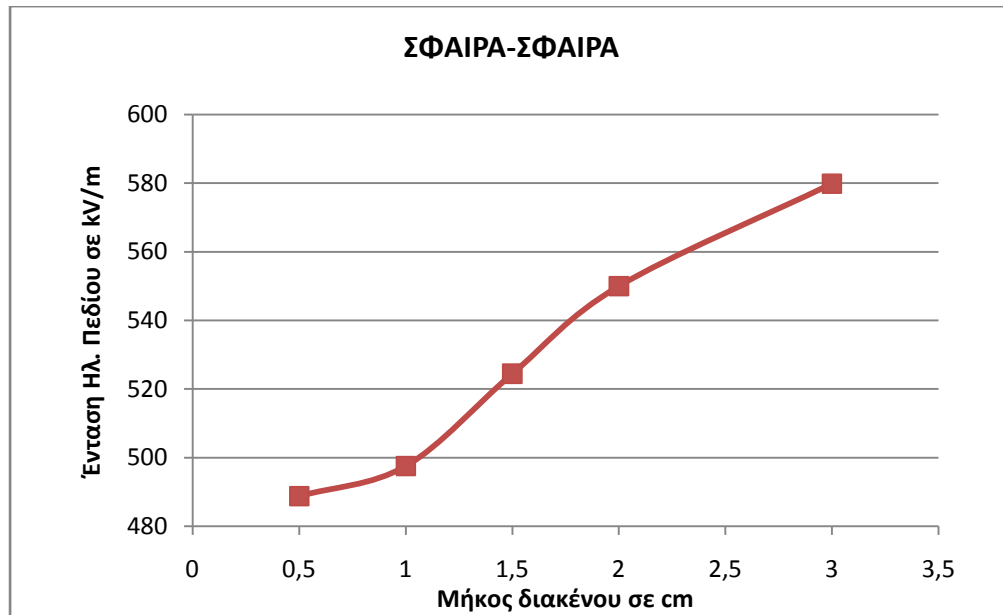
Σχήμα 6.2 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσεως της γωνίας των ακίδων για το διάκενο ακίδα-ακίδα.



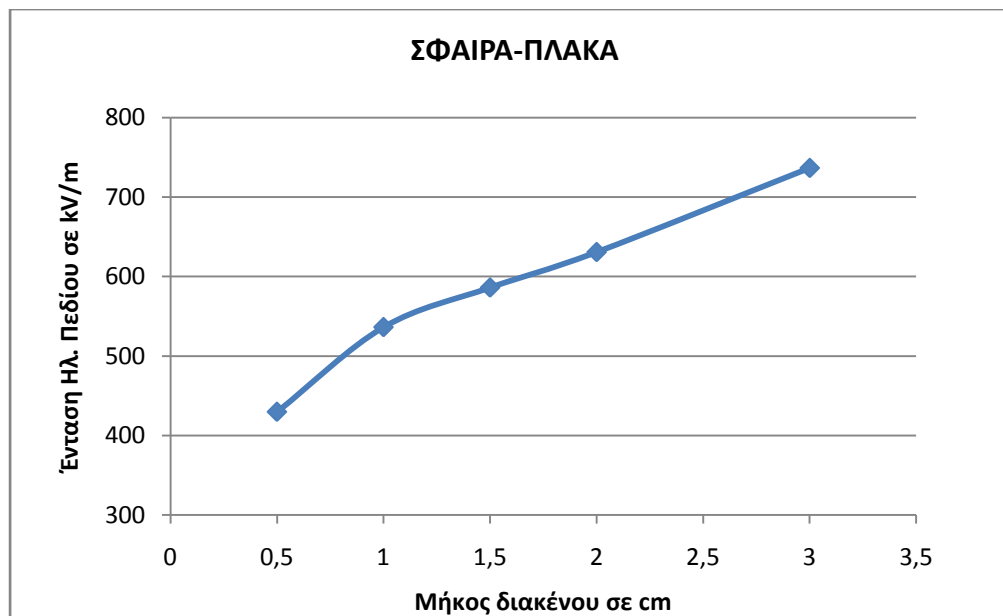
Σχήμα 6.9 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του διακένου για το διάκενο ακίδα-πλάκα.



Σχήμα 6.10 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της γωνίας για το διάκενο ακίδα-πλάκα.



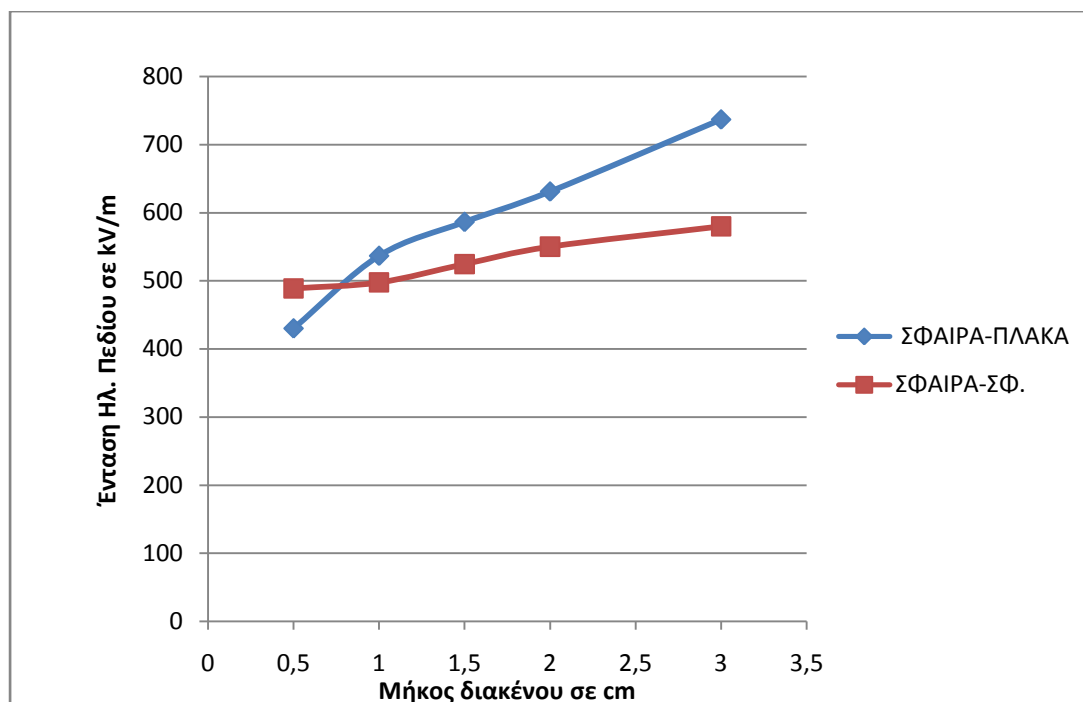
α



β

**Σχήμα 6.11** Αποτελέσματα τάσης διάσπασης συναρτήσει του μήκους διακένου, τύπος διακένου **α.** σφαίρα- σφαίρα **β.** σφαίρα-πλάκα.





**Σχήμα 6.12** Ένταση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του διακένου για το διάκενο σφαίρα-πλάκα και σφαίρα-σφαίρα.

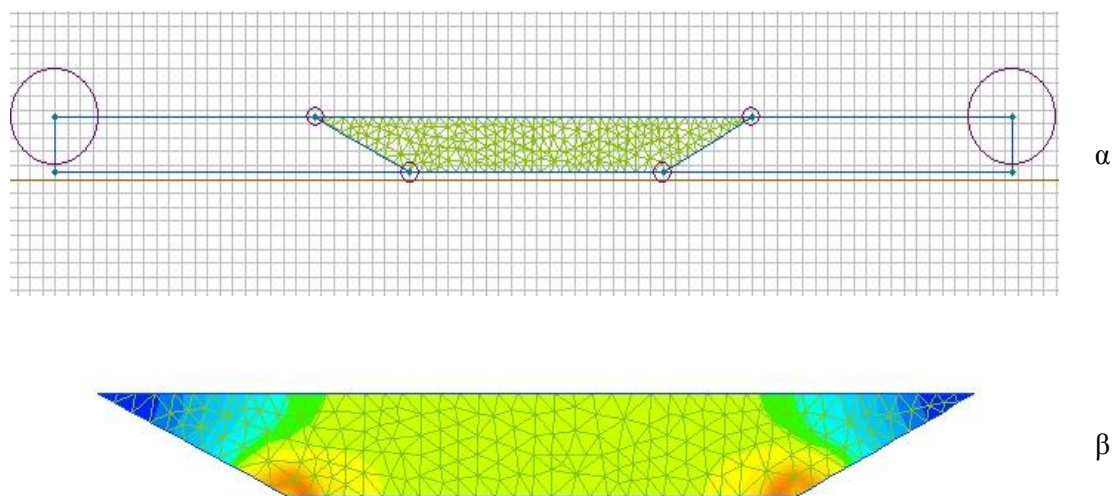
#### 6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ QUICKFIELD

Ξεκινώντας από τα γραφήματα στις εικόνες 6.1 έως 6.46 μπορούμε να επισημάνουμε κάποια στοιχεία που είναι εμφανή. Για τα διάκενα ακίδα-ακίδα βλέπουμε στα γραφήματα (6.1 έως 6.16), ότι η ένταση του πεδίου είναι μέγιστη στις απολίξεις των ακίδων και την ελάχιστη στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο ακίδων. Για τα διάκενα ακίδα-πλάκα (6.22 έως 6.41), όπως παρατηρούμε, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παίρνει την μέγιστη τιμή της στο άκρο του ηλεκτροδίου με την μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας, δηλαδή την ακίδα. Όταν απομακρυνόμαστε από την ακίδα, κινούμενοι πάνω στον άξονα συμμετρίας, η ένταση του πεδίου μειώνεται σημαντικά στην αρχή ταχύτατα και στην συνέχεια με πολύ βραδύτερο ρυθμό, μέχρι να φτάσει την ελάχιστη τιμή της στην επιφάνεια της πλάκας.

Για τα διάκενα που περιέχουν σφαίρες (6.17 έως 6.21 και 6.42 έως 6.46) βλέπουμε πολύ γραμμικά χαρακτηριστικά. Δηλαδή αυτό που βλέπουμε στα γραφήματα, που περιλαμβάνουν σφαίρες, είναι στην ουσία ευθείες με ελαφριά κλίση, με μικρότερες τιμές στην πλάκα ή στην γειωμένη σφαίρα. Παρατηρώντας τους κατακόρυφους άξονες, σε αυτά τα γραφήματα, φαίνεται ότι δεν ξεκινάνε από το μηδέν αλλά το εύρος μεταξύ των δύο ακραίων τιμών

του άξονα είναι πολύ μικρό άρα στην ουσία πρόκειται για ευθείες με μικρή κλίση.

Όσον αφορά τα γραφήματα στα σχήματα 6.1 έως 6.10, δεν μπορεί να βγει κανένα ασφαλές συμπέρασμα. Ο λόγος έχει προαναφερθεί και έχει να κάνει με την ικανότητα ανάλυσης του υπολογιστικού πακέτου που υπήρχε διαθέσιμο. Δηλαδή αφού η ανάλυση δεν γίνεται με τους απαιτούμενους κόμβους, οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου από διάκενο σε διάκενο δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Παρακάτω ακολουθεί μια εικόνα (6.47) όπου σε ένα διάκενο ( $60^\circ$  3cm) και οι 255 κόμβοι χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά στην απόσταση μεταξύ των ακίδων.



**Εικόνα 6.47** Ανάλυση διακένου ακίδα-ακίδα  $60^\circ$  με όλους τους κόμβους συγκεντρωμένους μεταξύ των ακίδων **α**. Σχηματικό διάγραμμα **β**. Εικόνα έντασης ηλεκτρικού πεδίου διακένου.

Στην παραπάνω εικόνα 6.47β, όπου η ανάλυση είναι πολύ καλύτερη από τα προηγούμενα διάκενα, φαίνεται καθαρά, με πορτοκαλί χρώμα, ότι η ένταση του πεδίου είναι μέγιστη και είναι συγκεντρωμένη κυρίως στην μύτη της ακίδας. Ενώ σε όλες τις προηγούμενες αναλύσεις αυτό δεν συνέβαινε. Αν υπήρχε διαθέσιμη η κανονική έκδοση του προγράμματος όπου έχει την ικανότητα να αναλύει με μερικές χιλιάδες κόμβους τα διάκενα, τα αποτελέσματα θα ήταν ακόμα καλύτερα και η ένταση του πεδίου θα φαινόταν συγκεντρωμένη μόνο στην μύτη της ακίδας. Οπότε θα μπορούσε να γίνει και σύγκριση των αποτελεσμάτων των γραφημάτων.

## Βιβλιογραφία

**ΜΙΧΑΗΛ ΔΑΝΙΚΑΣ** ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ Εκδόσεις  
ΣΜΠΙΛΙΑΣΑ.Ε.Β.Ε. Β' Έκδοση

**QuickField** User's Guide

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάληψη αυτής της πτυχιακής εργασίας είχε δύο στόχους, αφενός να έρθει σε πέρας ένα αξιόλογο αποτέλεσμα πάνω στο θέμα αυτό, αφετέρου να κατασκευαστεί μια πρωτότυπη εργαστηριακή διάταξη, που θα μείνει στο εργαστήριο υψηλών τάσεων του Τ.Ε.Ι. Ηρακλείου, με την βοήθεια της οποίας θα μπορούν οι σπουδαστές να πραγματοποιούν χρήσιμες εργαστηριακές ασκήσεις.

Μια σύντομη συνοπτική περιγραφή της κατασκευής έχει ως εξής: πάνω σε ένα ξύλινο πλαίσιο τοποθετήθηκε ένας τηλεχειριζόμενος μηχανισμός με τον οποίο δίνεται η δυνατότητα να μεταβάλλεται από απόσταση το μήκος διακένου δύο ηλεκτροδίων. Επίσης, την κατασκευή συμπληρώνει ένα σετ ηλεκτροδίων διαφόρων γεωμετριών, που κατασκευάστηκαν στον τόρνο, καθώς και ένα σετ δοκιμίων για την μελέτη της διηλεκτρικής τους συμπεριφοράς. Μεταξύ των ηλεκτροδίων συμπεριλαμβάνεται και μια ομάδα ακίδων, όπου σε αυτές μεταβάλλεται η γωνία της μύτης τους από 30° έως και 120°.

Τα παραπάνω ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν στο να πραγματοποιηθούν, μια σειρά από μετρήσεις με σκοπό την μελέτη της συμπεριφοράς της τάσης διάσπασης ενός διακένου αέρα με παραμέτρους την μεταβολή του μήκους του και της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων. Μελετήθηκαν λοιπόν, σύμφωνα με την γεωμετρία τους, τέσσερα διάκενα: ακίδα-ακίδα, ακίδα-πλάκα, σφαίρα-σφαίρα και σφαίρα-πλάκα. Σε όλα αυτά τα διάκενα μεταβλήθηκε η γωνία της μύτης της ακίδας και το μήκος μεταξύ των ηλεκτροδίων, από 0,5 έως και 8 εκατοστά, ανάλογα πάντα με τον τύπο του διακένου κάτω από συνεχή υψηλή τάση, και με την ακίδα πάντα θετική. Στον αρχικό σχεδιασμό της εργασίας ήταν και η μέτρηση με εναλλασσόμενη υψηλή τάση, όμως η βλάβη του εργαστηριακού βολτόμετρου υψηλής τάσης δεν το επέτρεψε.

Τα αποτελέσματα της μελέτης εξακρίβωσαν και επαλήθευσαν τα θεωρητικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα με τα σφαιρικά διάκενα προέκυψαν πολύ μικρές αποκλίσεις, της τάσης διάσπασης, στις διαδοχικές διασπάσεις που προκλήθηκαν σε αυτά, κάτι που οφείλεται στο τύπου ομοιογενές πεδίο που δημιουργούν γύρω τους οι σφαίρες. Αντιθέτως στα διάκενα που υπήρχε ακίδα, και πολύ περισσότερο στο διάκενο ακίδα-ακίδα, η διασπορά των τιμών ήταν μεγαλύτερη λόγω της ανομοιογένειας του πεδίου που προκαλεί ένα ηλεκτρόδιο ή μια επιφάνεια με έντονες ακμές. Επιπλέον αποδείχτηκε ότι η μείωση της γωνίας της ακίδας προκαλεί και μείωση στην τάση διάσπασης, λόγω έντονης ανομοιογένειας του πεδίου και αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ βέβαια η αύξηση της γωνίας έχει αντίθετα αποτελέσματα. Επίσης στο κεφάλαιο 5 προκύπτει μια πρώτη εικόνα του πως η πολικότητα, της εφαρμοζόμενης τάσης, επηρεάζει την τάση διάσπασης στο

διάκενο ακίδα-πλάκα και η σχέση της με την αντίστοιχη στα διάκενα ακίδα-ακίδα. Από την άλλη η αυξομείωση του μήκους του διακένου δρα ανάλογα στην τάση διάσπασης, δηλαδή η αύξηση του μήκους αυξάνει την τάση διάσπασης και αντίστροφα. Βέβαια, θα πρέπει να αναφερθεί, ότι απόλυτος και ακριβής υπολογισμός για τον υπολογισμό της τάσης διάσπασης, δεν μπορεί να γίνει, καθώς αυτή επηρεάζεται σημαντικά από διάφορους εξωγενείς παράγοντες, οι οποίοι δεν μπορούν να υπολογιστούν. Τέτοιοι είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, η σκόνη, η ατμοσφαιρική πίεση, καθώς και κατασκευαστικά προβλήματα της διάταξης. Έγινε προσπάθεια να περιοριστούν λαμβάνοντας μετρήσεις σε σταθερή θερμοκρασία, δηλαδή οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν καλοκαιρινή περίοδο και η θερμοκρασία στο χώρο του εργαστηρίου κυμαινόταν από 28,5 °C έως 31 °C. Δεν κατέστη δυνατόν να υπολογισθούν οι υπόλοιποι παράγοντες

Με το πέρας των μετρήσεων έγινε μια στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, ώστε να προκύψουν για κάθε διάκενο, μαθηματικές σχέσεις που να δίνουν, κατά προσέγγιση, την τάση διάσπασης συναρτήσει των δύο μεταβλητών (μήκος και γωνία) για ενδιαμέσες βέβαια τιμές, πέρα από τις τυποποιημένες που χρησιμοποιήθηκαν. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο SPSS Statistics. Με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων έγινε παλινδρόμηση και προέκυψαν οι παρακάτω σχέσεις.

Πίνακας 7.1 Συναρτήσεις υπολογισμού τάσης διάσπασης

Τύπος διακένου	Συνάρτηση	Διάστημα χρησιμοποίησης συνάρτησης	
		Μήκος σε cm	Μοίρες
<b>Ακίδα-Ακίδα</b>	$U_S = 1,358 + 4,928d + 0,174\phi$	2 έως 8	30 έως 120
<b>Ακίδα-Πλάκα</b>	$U_S = - 2,909 + 6,195d + 0,119\phi$	0,5 έως 3	30 έως 120
<b>Σφαίρα-Σφαίρα</b>	$U_S = 5,905 + 26,344d$	0,5 έως 2	-
<b>Σφαίρα-Πλάκα</b>	$U_S = 5,515 + 22,08d$	0,5 έως 2	-

Όπου:  $U_S$  η τάση διάσπασης σε kV,  $\phi$  η γωνία της μύτης της ακίδας σε μοίρες και d το μήκος του διακένου σε cm.

Πριν πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις έγινε μια προσομοίωση με ένα πρόγραμμα ανάλυσης πεδίων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, το QuickField. Σκοπός αυτής της προσομοίωσης ήταν να υπάρχει μια εικόνα, του πως είναι τα πεδία μεταξύ των ακίδων. Αλλά και η εξαγωγή γραφημάτων που θα

βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση, στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων. Παραδείγματος χάριν στα διάκενα με τις ακίδες μπορεί κάποιος να δει πως συγκεντρώνεται το πεδίο γύρω από την μύτη της ακίδας. Όλα αυτά φαίνονται καλύτερα και αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 6. Και εδώ όμως δεν έλειψαν τα προβλήματα, αφού η έκδοση του προγράμματος που υπήρχε διαθέσιμη είχε πολλούς περιορισμούς στην ανάλυση όμως παρ' όλα αυτά προέκυψαν αξιόλογα συμπεράσματα.

Κλείνοντας θεωρείται σκόπιμο, εκτός από τα συμπεράσματα να αναφερθούν κάποιες προτάσεις-θέματα που θα μπορούσαν να μελετηθούν, με την βοήθεια της διάταξης αυτής.

- a) Μελέτη της συμπεριφοράς των διακένων με εναλλασσόμενη και κρουστική υψηλή τάση.
- b) Μελέτη της επίδρασης των μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία, πίεση και υγρασία) στην συμπεριφορά των υπόψη διακένων. Αυτό είναι εφικτό με την στεγανοποίηση διάταξης δοκιμής και κατάλληλο εξοπλισμό. Στην περίπτωση αυτή θα ήταν δυνατή και η μελέτη άλλων διηλεκτρικών αερίων.
- c) Με τα ηλεκτρόδια τύπου πλάκας είναι δυνατή η μελέτη της επιφανειακής συμπεριφοράς στερεών διηλεκτρικών και ο προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης διάσπασης (έρπουσες εκκενώσεις). Στο πλαίσιο αυτό θα ήταν δυνατή η μελέτη της γεωμετρίας των υλικών (προφίλ, μήκος ερπυσμού).
- d) Ειδικά για το διάκενο ακίδα-πλάκα έχει ενδιαφέρον η επίδραση της πολικότητας της εφαρμοζόμενης τάσης (ΣΥΤ και Κρουστικές) στην τάση διάσπασης, σε σχέση και με την αντίστοιχη συμπεριφορά του διακένου ακίδα-ακίδα.
- e) Παράλληλα με την εργαστηριακή διερεύνηση, η εξομοίωση των διακένων με κατάλληλο λογισμικό μπορεί να προσφέρει σημαντική πληροφορία σε σχέση με την επίδραση της γεωμετρίας, του υλικού αλλά και της παρουσίας χωρικού φορτίου στην περίπτωση διηλεκτρικού διαφράγματος ή μελέτης της επιφανειακής συμπεριφοράς. Κάτι τέτοιο όμως προϋποθέτει την χρησιμοποίηση μιας πλήρους έκδοσης αντίστοιχου λογισμικού, ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ακρίβεια των υπολογισμών.

Όλα τα παραπάνω προϋποθέτουν την υποστήριξη με κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό όπως όργανα μετρήσεων, παλμογράφο με δυνατότητα σύνδεσης με υπολογιστή, όργανα μέτρησης ατμοσφαιρικών συνθηκών όπως απόλυτη υγρασία, πίεση και θερμοκρασία και μια πλήρη έκδοση προγράμματος προσομοίωσης.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ακολουθούν πίνακες με συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις και από την προσομοίωση στο QuickField. Στον πρώτο και δεύτερο πίνακα είναι συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων στο excel. Συγκεκριμένα υπάρχει η  $U_{50}$  σε kV  $U_{16}$  σε kV και η  $z$  που είναι η τυπική απόκλιση(βλέπε παράγραφο 5.2). Στους πίνακες 2 και 3 είναι συγκεντρωμένες από κάθε διάκενο, μετά την ανάλυση στο QuickField, οι μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε V/m. Ενώ στο CD που περιλαμβάνεται στην εργασία υπάρχουν και όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, καταχωρημένες σε αρχείο Excel.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα διακένου ακίδα-ακίδα				
	ΑΚΙΔΑ 30°	ΑΚΙΔΑ 60°	ΑΚΙΔΑ 90°	ΑΚΙΔΑ 120°
<b><math>U_{50}</math></b>				
<b>2 cm</b>	13,8	16,2	19,71	35,58
<b>4 cm</b>	31,9	35,6	38,07	45,87
<b>6 cm</b>	39,6	43,6	48,37143	51,2
<b>8 cm</b>	44,1	47,23	53,7	61
<b><math>z</math></b>				
<b>2 cm</b>	0,548635	0,893184	1,09894	0,982966
<b>4 cm</b>	1,389204	0,575425	1,178558	0,948742
<b>6 cm</b>	1,6959	1,79753	1,966989	1,09138
<b>8 cm</b>	1,7947	2,40511	1,520234	0,987321
<b><math>U_{16}</math></b>				
<b>2 cm</b>	13,25137	15,306816	18,61106	34,39703
<b>4 cm</b>	30,51796	36,02458	36,89144	44,92126
<b>6 cm</b>	37,9041	41,80247	46,40444	50,10862
<b>8 cm</b>	42,3053	44,82489	52,14977	60,01268

<b>Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα διακένου ακίδα-πλάκα, σφαίρα-σφαίρα και σφαίρα-πλάκα</b>						
	30°-ΠΛΑΚΑ	60°-ΠΛΑΚΑ	90°-ΠΛΑΚΑ	120°-ΠΛΑΚΑ	ΣΦΑΙΡΑ-ΠΛΑΚΑ	ΣΦΑΙΡΑ-ΣΦ.
<b>U<sub>50</sub></b>						
<b>0,5 cm</b>	5,2	6,81	10,36	14,8	16,05	18,82
<b>1 cm</b>	6,59	9,08	13,4	19,5	27,43	32,19
<b>1,5 cm</b>	10,21	12,58	16	22,45	40,48	46,31
<b>2 cm</b>	13,62	16,05	19,08	24,69	48,51	58,02
<b>3 cm</b>	20,29	23,92	25,72	29,07		
<b>z</b>						
<b>0,5 cm</b>	0,996438	0,508702	0,861781	1,146977	0,414327	0,415799
<b>1 cm</b>	0,757188	0,293636	1,162373	1,905547	0,211082	0,191195
<b>1,5 cm</b>	0,494526	0,434102	0,141421	1,041633	0,18738	0,490918
<b>2 cm</b>	1,269996	0,283823	0,698331	0,667416	0,314289	0,520256
<b>3 cm</b>	1,056672	0,782872	0,783227	0,675031		
<b>U<sub>16</sub></b>						
<b>0,5 cm</b>	7,123562	6,301298	9,498219	13,65302	15,63567	18,4042
<b>1 cm</b>	19,08281	8,786364	12,23763	17,59445	27,21892	31,9988
<b>1,5 cm</b>	24,9747	12,1459	15,85858	21,40837	40,29262	45,81908
<b>2 cm</b>	28,55	15,76618	15,41167	24,02258	48,19571	57,49974
<b>3 cm</b>	34,65333	23,13713	22,48677	28,39497		

<b>Πίνακας 3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ακίδα-ακίδα με QuickField</b>				
	ΑΚΙΔΑ 30°	ΑΚΙΔΑ 60°	ΑΚΙΔΑ 90°	ΑΚΙΔΑ 120°
<b>2 cm</b>	418460	460230	646470	591754
<b>4 cm</b>	618760	611262	974978	945245
<b>6 cm</b>	705917	767392	1143530	1091090
<b>8 cm</b>	743244	792562	1336070	1267330

<b>Πίνακας 4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ακίδα-πλάκα, σφαίρα-σφαίρα και σφαίρα-πλάκα με QuickField.</b>						
	30°-ΠΛΑΚΑ	60°-ΠΛΑΚΑ	90°-ΠΛΑΚΑ	120°-ΠΛΑΚΑ	ΣΦΑΙΡΑ-ΠΛΑΚΑ	ΣΦΑΙΡΑ-ΣΦ.
<b>0,5 cm</b>	499998	442654	506398	504548	416385	488790
<b>1 cm</b>	551822	531808	524942	613881	544874	497569
<b>1,5 cm</b>	657511	680706	801618	787291	586333	524468
<b>2 cm</b>	736652	758558	984908	920934	630986	549995
<b>3 cm</b>	951037	952632	1334830	1168720	736837	579848