



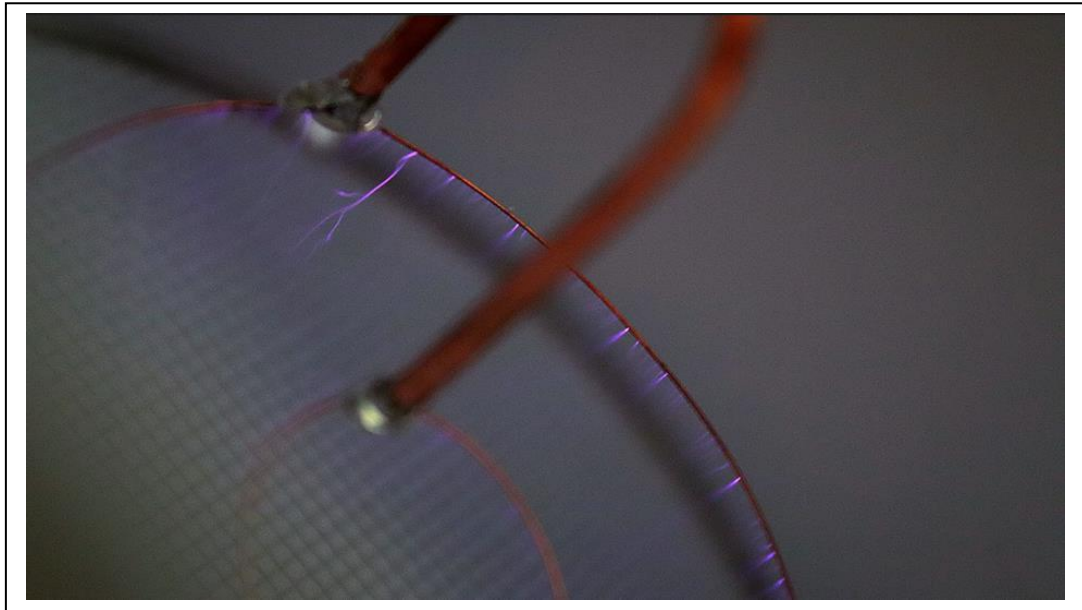
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Βελτιστοποίηση της Απόδοσης Ηλεκτροϋδροδυναμικών Διατάξεων



Φοιτητής: Κονδύλης Αλέξιος

ΑΜ: 18387268

Επιβλέπων Καθηγητής

Αντώνιος Μορώνης

Καθηγητής

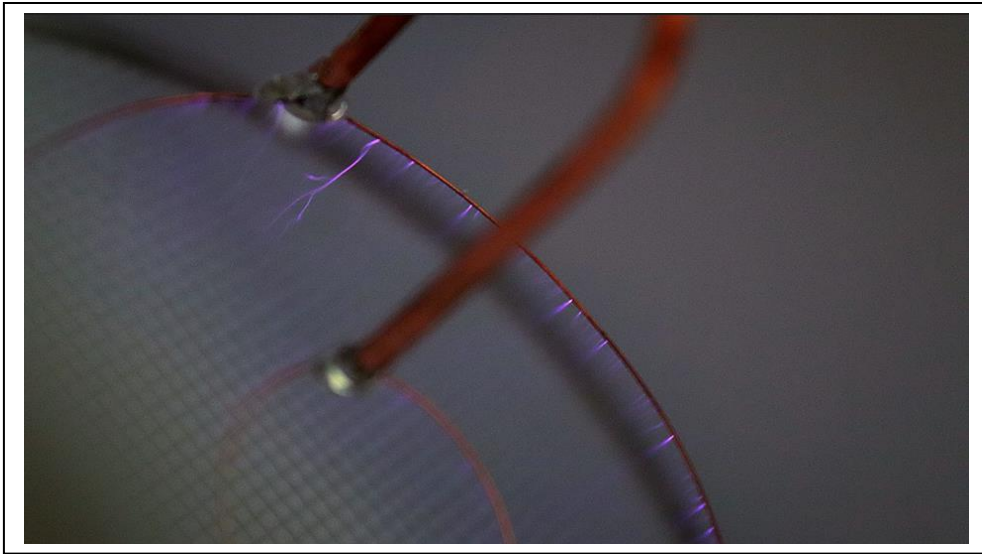
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Ιούλιος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Efficiency Optimization of Electrohydrodynamic Devices



Student: Kondylis Alexios
Registration Number: 18387268

Supervisor

Antonios Moronis
Professor

ATHENS-EGALEO, July 2023

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Αντώνιος Μορώνης, Καθηγητής	Γεώργιος Τσεκούρας, Επίκουρος Καθηγητής	Παναγιώτης Κονταξής, Λέκτορας Εφαρμογών
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Αλέξιος Κονδύλης),
Ιούλιο, 2023**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αλέξιος Κονδύλης του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 18387268 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών
Αλέξιος Κονδύλης



Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ενεργειακών Εφαρμογών και Συστημάτων Εξοικονόμησης Ενέργειας του Τομέα Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η ολοκλήρωσή της σηματοδοτεί το κλείσιμο ενός μεγάλου κύκλου, αυτού των προπτυχιακών σπουδών μου, στη διάρκεια του οποίου έζησα πολλές όμορφες, αλλά και δύσκολες στιγμές. Έτσι, αισθάνομαι το χρέος και την ανάγκη να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους, οι οποίοι συνέβαλαν τα μέγιστα στην ολοκλήρωση των σπουδών μου και χωρίς αυτούς δεν ξέρω αν θα τα κατάφερα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας καθηγητή του ΠΑΔΑ κ. Αντώνιο Μορώνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε, με την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος και δύσκολου θέματος, να συνεργαστώ μαζί του. Η βαθιά επιστημονική του γνώση, η καθοδήγησή του και η συνεχής υποστήριξη που παρείχε διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην εκπόνηση της διπλωματικής.

Έπειτα, θα πρέπει να ευχαριστήσω τον μέντορα Νικόλαο για τη μεταλαμπάδευση των τεχνικών γνώσεων, του ζήλου και της αγάπης που έχει για τις κατασκευές και ιδιαίτερος του ξύλου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την οικογένειά μου και συγκεκριμένα τους γονείς μου, Μιχάλη και Ελένη, και τα αδέρφια μου, Ειρήνη, Παναγιώτη και Αντώνη. Αυτό το ευχαριστώ είναι πολύ φτωχό και λίγο μπροστά σε όλα αυτά που μου έχουν προσφέρει στη ζωή μου. Χωρίς την ανιδιοτελή στήριξή τους και την αμέριστη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια δεν θα κατάφερα σε καμία περίπτωση να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, που ήταν πάντα δίπλα μου στις δύσκολες στιγμές και μας ενώνουν πολύ όμορφες αναμνήσεις. Τέλος, ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον φίλο και συμφοιτητή μου Θεόφιλο με τον οποίο έχουμε μοιραστεί όλες τις αγωνίες και τις χαρές μας.

Περίληψη

Οι ηλεκτροϋδροδυναμικές (EHD) αντλίες ρευστού χρησιμοποιούν ένα κατάλληλα διαμορφωμένο ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης για τη δημιουργία μηχανικής ροής ενός διηλεκτρικού υλικού χωρίς την ανάμιξη κινούμενων τμημάτων. Παρουσιάζουν διάφορα πρακτικά πλεονεκτήματα και έχουν προταθεί για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών, ιδιαίτερα εκεί που απαιτείται ελαχιστοποίηση του μεγέθους ή /και αθόρυβη λειτουργία. Πολλές πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει τα πλεονεκτήματά τους έναντι των μηχανικών αντλιών, ειδικά για την ξήρανση τροφίμων και την ψύξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε σχεδιασμός, κατασκευή και βελτιστοποίηση πρωτότυπων ηλεκτροδίων εκπομπών (δακτυλίων διαφορετικής διαμέτρου και διπλού δακτυλίου), ενταγμένων σε ηλεκτροϋδροδυναμικές διατάξεις (Δακτυλίου – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος) και η σύγκρισή τους με ήδη μελετημένους εκπομπούς (ακίδας και πέντε ακίδων) σε αντίστοιχες διατάξεις (Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος). Έγινε προσομοίωση των προς μελέτη συστημάτων, ώστε να καταγραφούν οι τιμές της μέγιστης έντασης πεδίου και της αποθηκευμένης ενέργειας. Επίσης, με τη χρήση θεωρητικών τύπων, έγινε διασταύρωση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από τις προσομοιώσεις και ο επιπλέον υπολογισμός του συντελεστή χρησιμοποίησης. Τα αποτελέσματα καταγράφηκαν και στη συνέχεια απεικονίστηκαν σε διαγράμματα για να γίνει έλεγχος και επιλογή των EHD διατάξεων που παρουσίαζαν τα καλύτερα αποτελέσματα, ώστε να κατασκευαστούν πειραματικά. Η κατασκευή αυτή προϋπέθετε την ύπαρξη ενός κατάλληλου χώρου για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων. Ακολούθησε ο σχεδιασμός και η δημιουργία ενός κυλινδρικού θαλάμου από PVC. Τα πρωτότυπα ηλεκτρόδια εκπομπού κατασκευάστηκαν από χαλκό, το ηλεκτρόδιο του συλλέκτη από γαλβανισμένο σίδηρο και οι ακίδες από ανοξείδωτο χάλυβα. Μέσω ειδικών οργάνων μέτρησης της τάσης τροφοδοσίας (βολτόμετρου), της έντασης του ρεύματος (αμπερόμετρου) και της ταχύτητας του αέρα (ανεμόμετρου) έγινε η λήψη των μετρήσεων. Αυτές καταχωρήθηκαν σε διαγράμματα και εξήχθησαν συμπεράσματα για κάθε σύστημα μεμονωμένα, αλλά και συγκριτικά. Το πρωτότυπο σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος είχε την πιο ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας του αέρα στη διατομή του θαλάμου, η πρωτότυπη διάταξη Δακτυλίου (διαμέτρου 20 mm) – Πλέγματος είχε την πιο υψηλή μέγιστη ταχύτητα αέρα στο κέντρο του θαλάμου, ενώ το σύστημα των Πέντε Ακίδων – Πλέγματος είχε τον πιο υψηλό βαθμό απόδοσης βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του θαλάμου.

Λέξεις – κλειδιά

Ηλεκτροϋδροδυναμικές διατάξεις, φαινόμενο κορώνα, ιοντικός άνεμος, ηλεκτρόδια εκπομπού, δακτύλιος-πλέγμα, διπλός δακτύλιος-πλέγμα, βελτιστοποίηση απόδοσης

Abstract

Electrohydrodynamic (EHD) fluid pumps use a properly shaped high voltage electric field to create a mechanical flow of a dielectric fluid without using moving parts. They present several practical advantages and they have been proposed for a large number of applications, especially in the cases where miniaturization and silent operation is required. Many experimental studies have proved their advantages versus mechanical pumps especially for food drying and electronics cooling. In the present diploma thesis, design, construction and optimization of novel emitter electrodes (several diameter rings and a double ring) have occurred as parts of EHD devices (ring-to-mesh and double ring-to-mesh). In addition, comparison with common used emitter electrodes (a needle and a 5-needle arrangement) was held in relevant devices (needle-to-mesh and 5-needle-to-mesh). FEM simulations were used for the devices under study, for the maximum electric field intensity and stored energy values to be recorded. Moreover, appropriate theoretical equations were used to check the validity of the simulations results and to calculate the coefficient of use. Results were recorded and presented in diagrams in order to check them and decide about the EHD devices showing the best results and consequently preferred to be constructed. An appropriate PVC cylindrical chamber to host the pairs of electrodes was designed and manufactured. The novel emitter electrodes were made with copper, the collector electrode with galvanized iron and the needles with stainless steel. Measurements were conducted by specific instruments, as the high voltage input by a voltmeter, the current intensity by an ammeter and the velocity of ionic wind by an anemometer. Data were used to form several diagrams for each device separately but also for combination of them, as well. The prototype double ring-to-mesh device showed the most uniform air velocity rate in the cross section of the chamber. The prototype ring (20 mm diameter)-to-mesh device presented the highest average air velocity in the middle of the chamber, while the 5-needles-to-mesh device performed the highest efficiency rate based on the average air velocity in the cross section of the chamber.

Keywords

Electrohydrodynamic devices, corona discharge, ionic wind, emitter electrodes, ring-to-mesh, double ring-to-mesh, efficiency optimization

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	10
Κατάλογος Εικόνων	10
Κατάλογος Σχημάτων.....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	17
Σκοπός και στόχοι.....	18
Μεθοδολογία	18
Καινοτομία	18
Δομή	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	20
1.1 Το Ηλεκτροϋδροδυναμικό φαινόμενο	20
1.1.1 Εισαγωγή	20
1.1.2 Ιστορική Αναδρομή.....	21
1.1.3 Θεωρητική Προσέγγιση	23
1.1.3.1 Βασικές Εξισώσεις	23
1.1.3.2 Εξέλιξη της Μοντελοποίησης και των Προσομοιώσεων	27
1.1.4 Εφαρμογές.....	28
1.1.4.1 Διατάξεις παραγωγής μηχανικής πρόωσης (Thrusters)	28
1.2 Ηλεκτροϋδροδυναμικές γεννήτριες ή αντλίες ρευστού	29
1.2.1 Εισαγωγή	29
1.2.2 Εξέλιξη στις EHD Αντλίες Ρευστών [5]	31
1.2.2.1 Νέες Γεωμετρίες Αντλιών	31
1.2.2.2 Μείωση Μεγέθους (Miniaturization).....	32
1.2.2.3 Νέες αντιλήψεις για παραγωγή ιοντικού ανέμου και λειτουργία.....	33
1.2.3 Πρόσφατες εφαρμογές των EHD αντλιών αερίου	36
1.2.3.1 EHD για ψύξη (Cooling) και θερμική διαχείριση (Thermal management).....	36
1.2.3.2 EHD για εφαρμογές ξήρανσης (Drying).....	37
1.2.3.3 EHD Για Βελτίωση της Καύσης (Combustion)	38
1.2.4 EHD Διατάξεις: Πεδίο σε εξέλιξη	39
1.2.4.1 Εισαγωγή	39
1.2.4.2 Όζον.....	40
1.2.4.3 Υγρασία.....	41
1.2.4.4 Αλλοίωση / Διάβρωση ηλεκτροδίων	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων για τον σχεδιασμό των εργαστηριακών πρωτοτύπων.....	43
2.1 Μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	43
2.1.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	43
2.1.2 Βασικοί τύποι διατάξεων ηλεκτροδίων που μελετήθηκαν	43
2.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	45
2.2.1 Προσομοίωση για τα προς μελέτη συστήματα	46
2.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί.....	51
2.3.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας	51
2.3.2 Θεωρητικοί υπολογισμοί για το σύστημα Δακτυλίου – Πλάκας	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Πειραματική διαδικασία.....	56

3.1 Οργανολογία	56
3.2 Πειραματική διάταξη	59
3.2.1 Χώρος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων	59
3.2.2 Διατάξεις ηλεκτροδίων	61
3.3 Πειραματική διαδικασία	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός αποτελεσμάτων	67
4.1 Πειραματικές μετρήσεις.....	67
4.1.1 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Ακίδας – Πλέγματος	68
4.1.2 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	75
4.1.3 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Δακτυλίου – Πλέγματος.....	82
4.1.4 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα.....	111
5.1 Συγκριτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα	111
5.2 Περιοχές για περαιτέρω έρευνα	135
Βιβλιογραφία	137

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτική παρουσίαση των τύπων διατάξεων των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν με τις αντίστοιχες διαστάσεις τους και τα γραμμικά σχήματα απεικόνισής τους. 44

Πίνακας 4.1 Απεικονιζόμενα μεγέθη με τα αντίστοιχα σύμβολα και τις μονάδες τους.....	68
Πίνακας 4.2 Αναφορά των προς μελέτη διακένων για κάθε τύπο διάταξης	68
Πίνακας 4.3 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Ακίδας – Πλέγματος	68
Πίνακας 4.4 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	75
Πίνακας 4.5 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Δακτυλίου (διαμέτρου 20 mm) – Πλέγματος.....	82
Πίνακας 4.6 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Δακτυλίου (διαμέτρου 40 mm) – Πλέγματος.....	89
Πίνακας 4.7 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Δακτυλίου (διαμέτρου 60 mm) – Πλέγματος.....	96
Πίνακας 4.8 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος ..	103

Πίνακας 5.1 Συγκριτικές τιμές CFM και μέγιστης ταχύτητας αέρα για διαφόρων τύπων διατάξεις. 135

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1. Η αρχή της δημιουργίας του ιοντικού ανέμου [5]	21
Εικόνα 1.2. Ρεύμα σωματιδίων σε μια ηλεκτροϋδροδυναμική συσκευή υψηλής συνεχούς τάσης [6].	22
Εικόνα 1.3. Ιοντικός άνεμος με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων: i) ακίδα-πλάκα (needle-plate), ii) ακίδα-κύλινδρος (needle-cylinder), iii) ακίδα-δακτύλιος (needle-ring), iv) κυλινδρικός αγωγός-κύλινδρος (wire-cylinder), v) ράβδος-πλάκα (rod-plate), vi) ακίδα-πλέγμα (needle-mesh) [2].....	30
Εικόνα 1.4. 3D σχηματική παράσταση ακίδας-πλέγματος (αριστερά) και κυλινδρικού αγωγού-πλέγματος (δεξιά) πρωτοτύπων EHD αντλιών [55].....	31
Εικόνα 1.5. Προοπτική άποψη διάταξης σειριακής EHD αντλίας δύο σταδίων. E1,E2 είναι ηλεκτρόδια εκπομποί και C1,C2 είναι ηλεκτρόδια συλλέκτες για στάδιο 1 και 2, αντίστοιχα. Τα διαφορετικά χρώματα αναφέρονται σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Το κόκκινο χρώμα δείχνει το πλήρες δυναμικό (στον εκπομπού E2), το μαύρο χρώμα δηλώνει το μηδενικό δυναμικό ή την ηλεκτρική γείωση (στον συλλέκτη C1) και το πορτοκαλί αντιπροσωπεύει ένα προεπιλεγμένο κλάσμα του πλήρους δυναμικού (στο E1 και C2 που είναι βραχυκυκλωμένα). [17].....	32
Εικόνα 1.6. Σχηματική περιγραφή της αρχής λειτουργίας διάταξης, που περιλαμβάνει δύο ηλεκτρόδια εκπομπούς αντίθετης πολικότητας (συνδεδεμένα με την ίδια πηγή) τοποθετημένους παράλληλα μεταξύ τους (πάνω), σε σύγκριση με μια τυπική διάταξη κορώνα ακίδας-δακτυλίου (κάτω) [70].....	34
Εικόνα 1.7. Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης AC φαινομένου κορώνα, όπου μια ακίδα (ηλεκτρόδιο εκπομπού) τοποθετήθηκε σε απόσταση L από ένα δακτύλιο (ηλεκτρόδιο συλλέκτης) μέσα σε ένα σωλήνα από χαλαζία διαμέτρου D [5].....	35
Εικόνα 1.8. Υπόδειγμα μιας ψύκτρας με ενσωματωμένο σύστημα EHD αντλιών, όπου οι εκκενώσεις κυλινδρικού αγωγού-επιπέδου (wire-plane) οδηγούν τον ιοντικό άνεμο κατευθείαν μέσα στην ψύκτρα. Τα ηλεκτρόδια των πλακών ήταν τα πτερύγια (fins) της ψύκτρας. [5].....	37
Εικόνα 1.9. Σχηματική παράσταση διάταξης ενός ηλεκτροδίου, που χρησιμοποιείται για να επηρεάσει τη φλόγα. Το δυναμικό εφαρμόζεται σε ένα ρύγχος, το οποίο τοποθετείται μέσα σε μονωτικό δοχείο. [5].....	39

Εικόνα 2.1. Πλέγμα τριγωνικών στοιχείων από ένα σύγχρονο πρόγραμμα προσομοίωσης FEMM, ν. 4. 2 (συλλέκτης κυκλικό ηλεκτρόδιο ακτίνας 0.75 mm) [90].....	43
Εικόνα 3.1. Μικροσκόπιο OEM BP001 500x Zoom	56
Εικόνα 3.2. Παχύμετρο POWERFIX Z22855	56
Εικόνα 3.3. Τροφοδοτικό Matsusaba Precision W Series μαζί με το πολύμετρο Norma LP10	57
Εικόνα 3.4. Γάντζος γείωσης	57
Εικόνα 3.5. Probe Υψηλής Τάσης τύπου Coline HV40B 1000:1	57
Εικόνα 3.6. Αμπερόμετρο ακριβείας Thurlby 1503	58
Εικόνα 3.7. Βολτόμετρο Thurlby 1503	58
Εικόνα 3.8. Ανεμόμετρο RTM AM-4836V	58
Εικόνα 3.9. Ο Αισθητήρας μέτρησης του ανεμομέτρου RTM AM-4836V	58
Εικόνα 3.10. Κυλινδρικός θάλαμος για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας	59
Εικόνα 3.11. Κυλινδρική περιοχή τοποθέτησης των ηλεκτροδίων του εκπομπού	59
Εικόνα 3.12. (α) Πλέγμα προσαρτημένο πάνω στον κυλινδρικό σωλήνα, (β) Σημείο εξόδου του ιονισμένου αέρα.....	60
Εικόνα 3.13. Η βάση του κυλινδρικού θαλάμου.....	60
Εικόνα 3.14. Ηλεκτρόδιο ακίδα τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm	61
Εικόνα 3.15. Ηλεκτρόδιο με πέντε ακίδες τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm.....	62
Εικόνα 3.16. Ηλεκτρόδιο δακτυλίου διαμέτρου 20 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm	62
Εικόνα 3.17. Ηλεκτρόδιο δακτυλίου διαμέτρου 40 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm	63
Εικόνα 3.18. Ηλεκτρόδιο δακτυλίου διαμέτρου 60 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm	63
Εικόνα 3.19. Ηλεκτρόδιο διπλού δακτυλίου διαμέτρου 20 mm και 60 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm	63
Εικόνα 3.20. Χάλκινος αγωγός διαμέτρου 272μm	64
Εικόνα 3.21. Πειραματική συνδεσμολογία έτοιμη για τη λήψη μετρήσεων	66
Εικόνα 5.1. Φαινόμενο κορώνα με σπινθήρα γύρω από την αιχμή της ακίδας, για το σύστημα Ακίδας – Πλέγματος.....	112
Εικόνα 5.2. Η στιγμή της διάσπασης μίας εκ των πέντε ακίδων με το πλέγμα	112
Εικόνα 5.3. Φαινόμενο κορώνα με σπινθήρα στο σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος, κυρίως γύρω από τον μεγάλο δακτύλιο (διαμέτρου 60 mm)	113

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης έντασης πεδίου συναρτήσει του διακένου για το σύστημα Ακίδας - Πλάκας.....	46
Σχήμα 2.2. Διάγραμμα σύγκρισης μέσης αποθηκευμένης ενέργειας κατ' όγκο συναρτήσει του διακένου για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας	47
Σχήμα 2.3. Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης έντασης πεδίου συναρτήσει του διακένου για τα συστήματα Δακτυλίου - Πλάκας.....	48
Σχήμα 2.4. Διάγραμμα σύγκρισης μέσης αποθηκευμένης ενέργειας κατ' όγκο συναρτήσει του διακένου για τα συστήματα Δακτυλίου – Πλάκας.....	49

Σχήμα 2.5. Διάγραμμα σύγκρισης της μέσης αποθηκευμένης ενέργειας κατ' όγκο συναρτήσει του διακένου για τα συστήματα Διπλού Δακτυλίου – Πλάκας.....	50
Σχήμα 2.6. Διάγραμμα σύγκρισης της μέγιστης έντασης πεδίου των τριών διαφορετικών διπλών δακτυλίων συναρτήσει του διακένου.....	50
Σχήμα 2.7. Διάγραμμα της μέγιστης έντασης πεδίου για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας συναρτήσει του διακένου	52
Σχήμα 2.8. Διάγραμμα του συντελεστή χρησιμοποίησης για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας συναρτήσει του διακένου	53
Σχήμα 2.9. Διάγραμμα της μέγιστης έντασης πεδίου για τους δακτυλίους συναρτήσει του διακένου.....	54
Σχήμα 2.10. Διάγραμμα του συντελεστή χρησιμοποίησης για τους δακτυλίους συναρτήσει του διακένου.....	54
Σχήμα 3.1. Πειραματική διάταξη.....	65
Σχήμα 4.1. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	69
Σχήμα 4.2. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	69
Σχήμα 4.3. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	70
Σχήμα 4.4. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	70
Σχήμα 4.5. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	71
Σχήμα 4.6. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	71
Σχήμα 4.7. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	72
Σχήμα 4.8. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος	72
Σχήμα 4.9. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος	73
Σχήμα 4.10. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	73
Σχήμα 4.11. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	74
Σχήμα 4.12. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος.....	74
Σχήμα 4.13. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	76
Σχήμα 4.14. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	76
Σχήμα 4.15. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	77
Σχήμα 4.16. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	77

Σχήμα 4.17. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	78
Σχήμα 4.18. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	78
Σχήμα 4.19. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	79
Σχήμα 4.20. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	79
Σχήμα 4.21. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	80
Σχήμα 4.22. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	80
Σχήμα 4.23. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	81
Σχήμα 4.24. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	81
Σχήμα 4.25. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	83
Σχήμα 4.26. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	83
Σχήμα 4.27. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	84
Σχήμα 4.28. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	84
Σχήμα 4.29. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	85
Σχήμα 4.30. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	85
Σχήμα 4.31. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	86
Σχήμα 4.32. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος	86
Σχήμα 4.33. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	87
Σχήμα 4.34. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	87
Σχήμα 4.35. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	88
Σχήμα 4.36. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m , συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Δακτυλίων (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος.....	88
Σχήμα 4.37. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	89
Σχήμα 4.38. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	90

Σχήμα 4.39. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	90
Σχήμα 4.40. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	91
Σχήμα 4.41. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	91
Σχήμα 4.42. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	92
Σχήμα 4.43. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	92
Σχήμα 4.44. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος	93
Σχήμα 4.45. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	93
Σχήμα 4.46. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	94
Σχήμα 4.47. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	94
Σχήμα 4.48. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος.....	95
Σχήμα 4.49. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	96
Σχήμα 4.50. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	97
Σχήμα 4. 51. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	97
Σχήμα 4.52. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	98
Σχήμα 4.53. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	98
Σχήμα 4.54. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	99
Σχήμα 4.55. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	99
Σχήμα 4.56. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος	100
Σχήμα 4.57. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	100
Σχήμα 4.58. Βαθμός απόδοσης (n_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	101
Σχήμα 4.59. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	101
Σχήμα 4.60. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος.....	102

Σχήμα 4.61. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	103
Σχήμα 4.62. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	104
Σχήμα 4.63. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	104
Σχήμα 4.64. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	105
Σχήμα 4.65. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	105
Σχήμα 4.66. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	106
Σχήμα 4.67. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	106
Σχήμα 4.68. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	107
Σχήμα 4.69. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	107
Σχήμα 4.70. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	108
Σχήμα 4.71. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	108
Σχήμα 4.72. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	109
Σχήμα 5.1. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	114
Σχήμα 5.2. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	115
Σχήμα 5.3. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	116
Σχήμα 5.4. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίων – Πλέγματος	117
Σχήμα 5.5. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	118
Σχήμα 5.6. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος ..	119
Σχήμα 5.7. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	120
Σχήμα 5.8. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	121
Σχήμα 5.9. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	122
Σχήμα 5.10. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	123

Σχήμα 5.11. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	124
Σχήμα 5.12. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	125
Σχήμα 5.13. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	126
Σχήμα 5.14. Μέση ταχύτητα αέρα στην διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	127
Σχήμα 5.15. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος	128
Σχήμα 5.16. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος.....	129
Σχήμα 5.17. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	130
Σχήμα 5.18. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος	131
Σχήμα 5.19. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.....	132
Σχήμα 5.20. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλών Δακτυλίων – Πλέγματος.....	133

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ηλεκτροϋδροδυναμικό (Electro-hydrodynamic, EHD) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παράγεται μηχανική ροή ενός ρευστού διηλεκτρικού (αερίου ή υγρού) με την εφαρμογή ενός υψηλού ανομοιογενούς ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ κατάλληλα διαμορφωμένων ηλεκτροδίων υψηλής τάσης, λόγω του ιονισμού του ρευστού [1]. Τα παραγόμενα ιόντα κινούνται υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου και συμπαρασύρουν μέσω ελαστικών κρούσεων ουδέτερα άτομα ή μόρια του ρευστού με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μηχανικής κίνησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η άμεση μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική. Στην περίπτωση που το διηλεκτρικό είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, η παραγόμενη μηχανική κίνηση του αέρα αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ιοντικός άνεμος [2]. Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή ιοντικού ανέμου είναι η ανάπτυξη ιονισμού λόγω φαινομένου κορώνα (corona discharge) γύρω από ένα ηλεκτρόδιο μικρής ακτίνας καμπυλότητας που ονομάζεται «εκπομπός», κατά την εφαρμογή υψηλής τάσης μεταξύ δύο τουλάχιστον κατάλληλα διαμορφωμένων ηλεκτροδίων, ώστε το πεδίο να είναι έντονα ανομοιογενές και να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή του γύρω από τον εκπομπό, ενώ αντίστοιχα να απομειώνεται καθώς προσεγγίζει στο δεύτερο ηλεκτρόδιο που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας και ονομάζεται «συλλέκτης» [3]. Στην πράξη μπορεί να γίνει ανάπτυξη περισσότερο σύνθετων συνδυασμών ηλεκτροδίων που να περιλαμβάνουν περισσότερους του ενός «εκπομπούς» ή «συλλέκτες», προκειμένου να βελτιστοποιείται η παραγόμενη μηχανική ροή.

Μια διάταξη που παράγει ιοντικό άνεμο ονομάζεται γεννήτρια ιοντικού ανέμου (ionic wind generator) ή αντλία ιοντικού ανέμου (ionic wind pump) [4]. Επειδή ο ιοντικός άνεμος είναι μία ροή αέρα που δημιουργείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και ιόντα, οι διατάξεις παραγωγής του έχουν ως πλεονεκτήματα το μικρό μέγεθος, την απουσία κινούμενων τμημάτων (άρα λειτουργούν αθόρυβα και δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση) και τη μικρή κατανάλωση ισχύος. Ως εκ τούτου, έχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε πολλά πεδία.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν ανωτέρω, η κατασκευή ηλεκτροϋδροδυναμικών διατάξεων σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα και η βελτιστοποίηση της απόδοσής τους παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και έχουν κινητοποιήσει την αντίστοιχη επιστημονική κοινότητα με την προοπτική της εφαρμογής τους κυρίως στην ψύξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων [5].

Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή και η μελέτη νέων ηλεκτροδίων εκπομπών. Για την επίτευξή του απαιτείται ο σχεδιασμός και η παραγωγή ηλεκτροϋδροδυναμικών διατάξεων που τα περιέχουν. Άρα, ένας επιμέρους στόχος είναι με χρήση προσομοιώσεων να βρεθούν οι καλύτερες παράμετροι για την κατασκευή τους. Ένας άλλος στόχος είναι να πραγματοποιηθούν οι διατάξεις και να μελετηθεί η απόδοσή τους. Τέλος, να συγκριθούν οι πρωτότυπες διατάξεις με ήδη μελετημένες, οι οποίες όμως θα παρασκευασθούν και θα μελετηθούν στο ίδιο εργαστήριο.

Μεθοδολογία

Η μελέτη των ηλεκτροϋδροδυναμικών διατάξεων ξεκινάει με την προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων εφαρμογής υψηλής τάσης, ώστε να καταγραφούν οι τιμές της μέγιστης έντασης πεδίου και της αποθηκευμένης ενέργειας. Στη συνέχεια, με τη χρήση θεωρητικών τύπων γίνεται η διασταύρωση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις και ο επιπλέον υπολογισμός του συντελεστή χρησιμοποίησης. Τα αποτελέσματα καταγράφονται και κατόπιν αποδίδονται με διαγραμματικές παραστάσεις, για να γίνει έλεγχος και επιλογή των διατάξεων με τα καλύτερα αποτελέσματα, ώστε να κατασκευασθούν πειραματικά πρωτότυπα. Στη συνέχεια, διεξάγονται εργαστηριακές δοκιμές στα πειραματικά πρωτότυπα και λαμβάνονται πειραματικές μετρήσεις της τάσης τροφοδοσίας, της έντασης του ρεύματος και της ταχύτητας του αέρα, οι οποίες καταχωρούνται σε διαγράμματα. Τέλος, μέσω αυτών εξάγονται τα αποτελέσματα μεμονωμένα και συγκριτικά, ώστε να διεξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα.

Καινοτομία

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει την κατασκευή και μελέτη πρωτότυπων ηλεκτροϋδροδυναμικών διατάξεων με σετ ηλεκτροδίων που δεν έχουν διερευνηθεί στο παρελθόν και έχουν τη μορφή δακτυλίου ή διπλού δακτυλίου παράλληλα σε πλέγμα. Οι διατάξεις αυτές έχουν πρακτικό ενδιαφέρον διότι συνδυάζουν την απλή κατασκευή με την ικανοποιητική, όπως διαπιστώνεται, απόδοση λόγω του γεγονότος ότι εξασφαλίζουν μια εκτενή περιοχή ιονισμού, γύρω από τον αγωγό των εκάστοτε δακτυλίων, που προσαυξάνει την παραγόμενη ροή ιοντικού ρεύματος και επομένως δίνει αυξημένες ταχύτητες ιοντικού ανέμου.

Δομή

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται η βιβλιογραφική επισκόπηση του θέματος. Συγκεκριμένα, στην ενότητα 1.1 περιγράφεται, γενικά, η έννοια του ηλεκτροϋδροδυναμικού φαινομένου και του ιοντικού ανέμου. Γίνεται ιστορική αναδρομή και παρουσιάζεται η θεωρητική προσέγγιση και οι εφαρμογές του. Η ενότητα 1.2 επικεντρώνεται στην πιο σημαντική εφαρμογή του φαινομένου κορώνα, που είναι οι ηλεκτρικές γεννήτριες ή αντλίες ρευστού. Παρατίθενται η εξέλιξή τους και οι πιο σημαντικές εφαρμογές τους. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται και εφαρμόζεται το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEMM). Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται παράθεση των πειραματικών αποτελεσμάτων και ένας πρώτος σχολιασμός τους. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 γίνονται συγκρίσεις για να εξαχθούν τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Βιβλιογραφική επισκόπηση

1.1 Το Ηλεκτροϋδροδυναμικό φαινόμενο

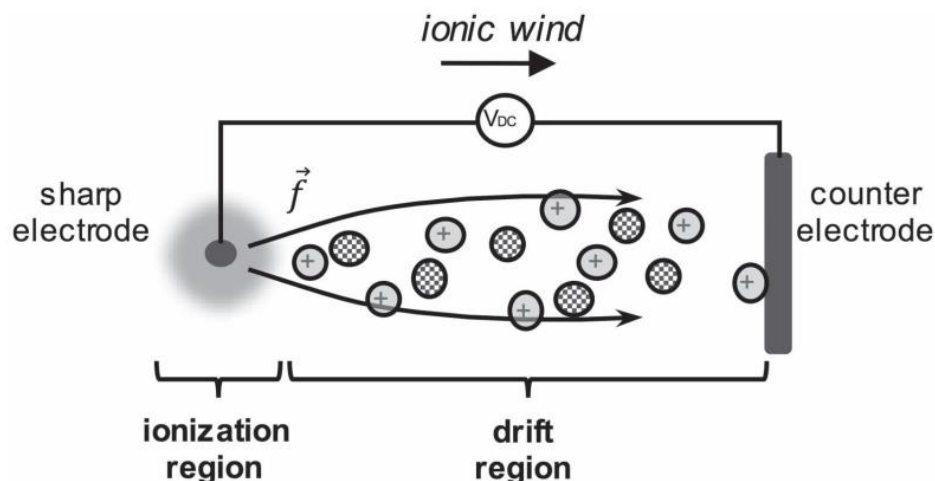
1.1.1 Εισαγωγή

Ηλεκτροϋδροδυναμικό (Electro-hydrodynamic, EHD) είναι το φαινόμενο που έχει ως αποτέλεσμα την άμεση μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική μέσω της δημιουργίας του ιοντικού ανέμου (ionic wind), σε περιβάλλον αέρα. Ο ιοντικός άνεμος είναι μία εφαρμογή της επιστήμης του πλάσματος (plasma), καθώς είναι η κίνηση του αέρα λόγω του φαινομένου κορώνα (corona discharge) [5].

Το φαινόμενο κορώνα παρατηρείται όταν το ηλεκτρικό πεδίο κοντά σ' έναν αγωγό είναι αρκετά ισχυρό για να προκαλέσει ιονισμό του διηλεκτρικού υλικού που περιβάλλει τον αγωγό αλλά δεν είναι τόσο ισχυρό ώστε να προκαλέσει ηλεκτρική διάσπαση (breakdown) ή ηλεκτρικό τόξο (arc) μεταξύ αγωγών ή άλλων στοιχείων του συστήματος. Σε συστήματα υψηλής τάσης το φαινόμενο αυτό είναι ανεπιθύμητο ή και επικίνδυνο. Όμως, ένα ελεγχόμενο φαινόμενο κορώνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ιονισμό ενός ρευστού και την κίνησή του, δηλαδή για τη δημιουργία ιοντικού ανέμου [6].

Ο ιοντικός άνεμος δημιουργείται σ' ένα ηλεκτρικό πεδίο ως αποτέλεσμα του καθαρού κέρδους ορμής σ' ένα κυρίως ηλεκτρικά ουδέτερο ρευστό μέσω συγκρούσεων μεταφοράς ορμής με ιόντα του ρευστού αυτού. Συγκεκριμένα, όταν μία τάση μεγαλύτερη από την τάση έναρξης του φαινομένου κορώνα εφαρμόζεται στα άκρα δύο ηλεκτροδίων με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας, δημιουργείται ένα ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο με τη μεγαλύτερη τιμή κοντά στο «αιχμηρότερο» ηλεκτρόδιο με τη μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας, τον εκπομπό (emitter). Αυτό το πεδίο προκαλεί ένα φαινόμενο κορώνα, που εκπέμπει ένα ρεύμα ιόντων. Στο φαινόμενο κορώνα μπορούν να παραχθούν ελεύθερα φορτία στον αέρα από τη διάσπαση των μορίων του ουδέτερου αέρα στην περιοχή ιονισμού (ionization region) κοντά στο ηλεκτρόδιο του εκπομπού με την εφαρμογή ενός υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Τα ιόντα, που παράγονται με αυτό τον τρόπο, απωθούνται από το ηλεκτρόδιο του εκπομπού προς την περιοχή χαμηλού ηλεκτρικού πεδίου, ή περιοχή ολίσθησης (drift region), και κατευθύνονται προς το ηλεκτρόδιο του συλλέκτη (collector, counter electrode) λόγω της εφαρμογής δυνάμεων Coulomb, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1 [5]. Τα ιόντα που συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο του συλλέκτη εξουδετερώνονται ηλεκτρικά κατά την πρόσκρουσή τους σε αυτόν, ενώ τα ουδέτερα μόρια που κέρδισαν ενέργεια κατά τις συγκρούσεις τους με τα ιόντα κινούνται στο σύστημα με καθαρή

ορμή κατά μήκος της διεύθυνσης των ηλεκτροδίων από τον εκπομπό προς τον συλλέκτη. Κατά τη διάρκεια της μετακίνησης παράγονται κι άλλα ζεύγη ιόντων/ηλεκτρονίων μέσω συγκρούσεων μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων και ουδετέρων μορίων του αέρα. Αυτή η διαδικασία συνεχούς ανταλλαγής ορμής δημιουργεί μια καθαρή ροή αέρα, που είναι γνωστή ως άνεμος κορώνα (corona wind), ηλεκτρικός άνεμος (electric wind), ιοντικός άνεμος (ionic wind) ή ηλεκτροϋδροδυναμική ροή αερίου (EHD gas flow) [5]. Η συσκευή που παράγει ιοντικό άνεμο ονομάζεται γεννήτρια ιοντικού ανέμου (ionic wind generator) ή αντλία ιοντικού ανέμου (ionic wind pump) [4]. Επειδή ο ιοντικός άνεμος είναι μία ροή αέρα που δημιουργείται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και ιόντα, οι συσκευές παραγωγής του έχουν ως πλεονεκτήματα την ευελιξία της σχεδίασης σε οποιαδήποτε κλίμακα μεγέθους μέχρι και ιδιαίτερα μικρά μεγέθη, την απουσία κινούμενων τμημάτων και τη μικρή κατανάλωση ισχύος. Ως εκ τούτου, έχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε πολλά πεδία.



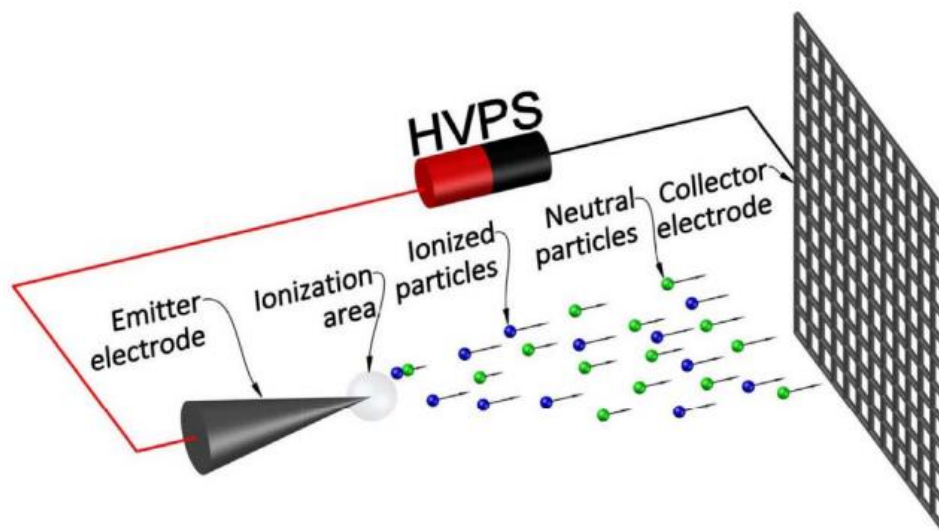
Εικόνα 1.1. Η αρχή της δημιουργίας του ιοντικού ανέμου [5]

1.1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη παρατήρηση που αφορούσε σε ηλεκτροϋδροδυναμικά (EHD) φαινόμενα αναφέρθηκε το 1629 από τον Niccolo Cabeo [6]. Διαπίστωσε ότι το πριονίδι που ελκυόταν από ένα ηλεκτρισμένο σώμα, όταν το ακουμπούσε, απωθείτο από αυτό. Βέβαια, αυτή η συμπεριφορά δεν αναγνωρίστηκε τότε ως απόρροια ενός EHD φαινομένου. Έτσι, η πρώτη επίσημη αναφορά για την ανακάλυψη του EHD αποδόθηκε στον Francis Hauksbee το 1709, ο οποίος κρατώντας έναν φορτισμένο αγωγό κοντά στο πρόσωπό του, αντιλήφθηκε το φύσημα ενός πολύ απαλού ανέμου. Τις μελέτες του συνέχισε ο I. Newton, ο οποίος ονόμασε το φαινόμενο ηλεκτρικό άνεμο. Σήμερα, έχει επικρατήσει ο όρος ιοντικός άνεμος. Στη συνέχεια, ο Wilson πέτυχε να

χρησιμοποιήσει τον ηλεκτρικό άνεμο για την κίνηση ενός γρήγορου περιστροφικού χάρτινου ανεμόμυλου. Η πρώτη ποιοτική θεώρηση του EHD φαινομένου έγινε από τον T. Cavallo, που περιέγραψε με ακρίβεια τον ηλεκτρικό άνεμο, ενώ ανέλυε την κίνηση μιας μύγας.

Αρκετές δεκαετίες αργότερα, ο M. Faraday περιέγραψε τον ηλεκτρικό άνεμο ως τη διαδικασία μεταφοράς ορμής, που προκαλείται από την τριβή ή τη σύγκρουση μεταξύ φορτισμένων και μη φορτισμένων αέριων σωματιδίων. Στην Εικόνα 1.2 αναπαρίσταται το ρεύμα των σωματιδίων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, όταν εφαρμόζεται υψηλή συνεχής τάση (DC) στον εκπομπό.



Εικόνα 1.2. Ρεύμα σωματιδίων σε μια ηλεκτροϋδροδυναμική συσκευή υψηλής συνεχούς τάσης [6]

Το 1873 ο J.C. Maxwell παρουσίασε την πρώτη ποιοτική ανάλυση του μηχανισμού του ηλεκτρικού ανέμου. Θεωρούσε πολύ σημαντική τη μελέτη των ηλεκτρικών εκκενώσεων των αερίων. Παρ' όλο που τότε δεν μπορούσε να γίνει ούτε στοιχειώδης μαθηματική επεξεργασία σε θεωρίες σχετικές με τον ιονισμό των αερίων, ο Maxwell προέβλεψε ότι μια τέτοια γνώση θα διαφώτιζε τον επιστημονικό κόσμο σχετικά με τη φύση τόσο του ηλεκτρισμού, όσο και των αερίων. Η μελέτη του έθεσε τη βάση για μελλοντική έρευνα στο εν λόγω πεδίο. Ήταν η πιο πλήρης για την εποχή της και ακόμη και σήμερα διατηρεί την εγκυρότητά της σε πολλά σημεία.

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ο A.P. Chattock πραγματοποίησε την πρώτη ποσοτική ανάλυση του ιοντικού ανέμου [7]. Συγκεκριμένα, παρήγαγε μια σχέση, πειραματικά επαληθεύσιμη, μεταξύ πίεσης και ηλεκτρικού ρεύματος για τη διάταξη επιπέδων παράλληλων ηλεκτροδίων. Λίγα χρόνια αργότερα, ο F.W. Peek εξέδωσε ένα από τα πρώτα βιβλία στον τομέα της μηχανικής υψηλής τάσης, εστιασμένο στα διηλεκτρικά φαινόμενα με τίτλο “Dielectric phenomena in high-voltage engineering” [8]. Η επιστημονική αξία αυτού του βιβλίου ήταν ανεκτίμητη, διότι

περιείχε πολλές πληροφορίες για τις ιδιότητες των αερίων, υγρών και στερεών μονωτικών υλικών, για μεθόδους χρήσιμες για τον σχεδιασμό συσκευών, γραμμών μεταφοράς, εξαρτημάτων και οργάνων υψηλής τάσης καθώς και για μεθόδους πραγματοποίησης πειραμάτων μηχανικής υψηλής τάσης, μέτρησης υψηλών τάσεων, απεικόνισης πεδίων και επεξηγήσεις διαφόρων διηλεκτρικών φαινομένων και πειραματικών δεδομένων. Μεταξύ των άλλων, σε αυτό το βιβλίο γινόταν ευρεία αναφορά σε φαινόμενα και μηχανισμούς σχετιζόμενους με το φαινόμενο κορώνα, στοιχεία κομβικής σημασίας για τους μετέπειτα ερευνητές του ιοντικού ανέμου [6].

Το 1922 ο Thomas Townsend Brown παρατήρησε ότι μια μηχανική δύναμη παραγόταν σε έναν σωλήνα Coolidge X-Ray, όταν τα μη συμμετρικά ηλεκτρόδιά του συνδέονταν με μια γεννήτρια υψηλής τάσης. Από τότε έχει βρεθεί ότι μια παρόμοια δύναμη παράγεται, όταν εφαρμόζεται υψηλή τάση και σε πολλούς άλλους ασύμμετρους πυκνωτές. Το φαινόμενο αυτό δεν οφειλόταν σε X-rays αλλά σε ιονισμένα σωματίδια που δημιουργούνταν από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης και ονομάστηκε Biefeld-Brown effect [9], καθότι ανακαλύφθηκε όταν ο Brown ήταν μεταπτυχιακός φοιτητής υπό την επίβλεψη του καθηγητού Dr. Paul Alfred Biefeld. Αυτή την έρευνα, ο Brown την κατοχύρωσε με πολλές πατέντες στην Αμερική και την Αγγλία.

Αρκετά χρόνια αργότερα ο E. Lob ερεύνησε τη μελέτη του Chattock για τον ιοντικό άνεμο και την εφάρμοσε και σε άλλες γεωμετρίες. Οι ιδιότητες ώθησης του φαινομένου κίνησαν το ενδιαφέρον του αμερικάνικου στρατού και έτσι, η εργασία του Lob αναβαθμίστηκε σύντομα από τον Captain Harney των αεροπορικών δυνάμεων των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Air Force, USAF). Αυτός μελέτησε τις ηλεκτρικές παραμέτρους μιας εκκένωσης κορώνα και τις μεταβολές συγκεκριμένων αεροδυναμικών παραμέτρων. Τις μελέτες των Lob και Harney επεξήγησε διεξοδικότερα και επεξέτεινε ο Otmar Stuetzer [10].

1.1.3 Θεωρητική Προσέγγιση

1.1.3.1 Βασικές Εξισώσεις

Σε παλαιότερο άρθρο [11] ο R.S. Sigmond παρουσιάζει μια κριτική ανασκόπηση παλιών και νέων μεθόδων και εξισώσεων για ροή μονοπολικών ιόντων στο φαινόμενο κορώνα. Το φαινόμενο κορώνα στα ρευστά είναι πολύπλοκο φυσικό φαινόμενο, το οποίο δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητό. Όμως, όταν τεθούν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες (boundary conditions), είναι εφικτή η απλοποίηση του μαθηματικού προβλήματος [12]. Η εξίσωση του

Poisson (1), που περιγράφει το ηλεκτρικό δυναμικό V , μπορεί να συνδυαστεί με τον νόμο του Gauss (2), που περιγράφει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$E = -\nabla V \quad (2)$$

όπου, ρ (C/m^3) είναι η πυκνότητα φορτίου χώρου, ϵ_0 (F/m) είναι η διηλεκτρική διαπερατότητα του ρευστού (για τον αέρα είναι $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m) και V (V) είναι η τάση του ηλεκτροδίου εκπομπού. Να σημειωθεί ότι σε όλη την διπλωματική χρησιμοποιείται η τελεία και όχι το κόμμα στους δεκαδικούς αριθμούς.

Εάν ληφθεί υπόψη η συνθήκη της συνέχειας του ρεύματος (current continuity condition), η πυκνότητα του ρεύματος (current density) j περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\nabla \cdot j = 0. \quad (3)$$

Επιπλέον, η πυκνότητα του ρεύματος παράγεται από τον συνδυασμό τριών παραμέτρων: α) των ιόντων που κινούνται λόγω του ηλεκτρικού πεδίου, β) των φορτίων που μεταφέρονται μέσω των μορίων λόγω της ροής του ρευστού και γ) της διάχυσης. Ως εκ τούτου, η πυκνότητα ρεύματος δίνεται και από την παρακάτω εξίσωση:

$$j = (\mu_e \rho E + \rho U - D \nabla \rho) \quad (4)$$

όπου, μ_e ($m^2/s \cdot V$) είναι η κινητικότητα των ιόντων, D (m^2/s) είναι ο συντελεστής διάχυσης των ιόντων και U (m/s) είναι η ταχύτητα της ροής του ρευστού.

Η κίνηση του ρευστού περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση των Navier-Stokes:

$$\rho \cdot \left[\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 U - \rho \nabla V \quad (5)$$

όπου, ρ (g/cm^3) είναι η πυκνότητα του ρευστού, p (Pa) είναι η πίεση και μ ($Pa \cdot s$) είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, όπου για τον αέρα η τιμή είναι $1.81 \cdot 10^{-5}$ $Pa \cdot s$.

Όταν η ροή του ρευστού είναι ασυμπιεστή και η πυκνότητα σταθερή, η εξίσωση (3) της συνέχειας του ρεύματος απλοποιείται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$(\nabla \cdot U = 0.) \quad (6)$$

Συνεπώς, οι αναφερθείσες εξισώσεις μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν για να οδηγήσουν σε μια εφικτή λύση του μαθηματικού προβλήματος, εφόσον απλοποιηθούν εφαρμόζοντας τις

κατάλληλες οριακές συνθήκες [6]. Παρόλα αυτά, για κάθε γεωμετρία που το δυναμικό V είναι συνάρτηση δύο ή περισσότερων συντεταγμένων, τα μαθηματικά για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος μπορούν να γίνουν εξαιρετικά πολύπλοκα [12]. Για τον λόγο αυτό η ανάπτυξη και χρήση αριθμητικών τεχνικών ήταν απαραίτητη για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών μεγεθών που προαναφέρθηκαν. Επομένως, η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών ήταν κεφαλαιώδους σημασίας για την αναθέρμανση του ερευνητικού ενδιαφέροντος στο πεδίο των EHDs, καθότι οι γνωστές αριθμητικές μέθοδοι απαιτούν υψηλή υπολογιστική δύναμη.

Παρακάτω παρατίθενται [5] οι απλοποιημένες εξισώσεις (7) - (11), που απαντώνται σε πολλά άρθρα αναφερόμενα σε ιοντικούς ανέμους που προκαλούνται από φαινόμενα κορώνας. Αυτές αποτελούν τη βάση των περισσότερων προσπαθειών για αριθμητική μοντελοποίηση των φαινομένων αυτών [13], [14], [15].

$$\text{Διατήρηση ορμής: } \rho \vec{u} \cdot \nabla \cdot \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + q n_{i,p} \vec{E} \quad (7)$$

$$\text{Διατήρηση μάζας: } \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\text{Ενέργεια: } \rho c_p \vec{u} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + q \mu_{i,p} n_{i,p} E^2 \quad (9)$$

$$\text{Διατήρηση ιόντων: } \nabla \cdot (q n_{i,p} \mu_{i,p} \vec{E}) = 0 \quad (10)$$

$$\text{Εξίσωση Poisson: } \nabla^2 \Phi = -\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{q n_{i,p}}{\epsilon_0} \quad (11)$$

όπου, ρ (g/cm^3) είναι η πυκνότητα του ρευστού, \vec{u} (m/s) η ταχύτητά του, q (C) το φορτίο, ∇p (Pa/m) η χωρική κλίση/μεταβολή της πίεσης, $n_{i,p}$ (m^{-3}) η πυκνότητα του θετικού αριθμού ιόντων, \vec{E} (V/m) η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, c_p ($\text{J}/(\text{K} \cdot \text{Kg})$) η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, k ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) η θερμική αγωγιμότητα, T (K) η θερμοκρασία, $\mu_{i,p}$ ($\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$) η ευκινησία των θετικών ιόντων, Φ (V) το απόλυτο ηλεκτρικό δυναμικό και ϵ_0 (F/m) η διηλεκτρική διαπερατότητα του ρευστού.

Άλλη χρήσιμη εξίσωση [16] για το ρεύμα συναρτήσει της τάσης είναι:

$$I = k \cdot (V - V_0)^2 \quad (12)$$

όπου, I (μA) είναι το ρεύμα του φαινομένου κορώνας, V είναι η εφαρμοζόμενη τάση (kV), V_0 (kV) είναι η αρχική τάση και k ($\mu\text{A}/\text{kV}^2$) είναι μια σταθερά.

Επίσης, η EHD επαγόμενη ταχύτητα u_0 συναρτήσει της ρίζας του ρεύματος [5] δίνεται από τη σχέση:

$$u_0 \sim \left(\frac{iL}{A\mu_i\rho} \right)^{1/2} \quad (13)$$

όπου, u_0 (m/s) είναι η επαγόμενη ταχύτητα του αέρα, i (A) μέση τιμή της έντασης του ρεύματος, L (m) η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, A (m²) η επιφάνεια των ηλεκτροδίων, μ_i (m²/(s·V)) η ευκινησία των θετικών ιόντων, ρ (kg/m³) είναι η πυκνότητα του ρευστού.

Ομοίως, η u_0 συναρτήσει της τάσης δίνεται από τη σχέση [16]:

$$u_0 \sim (a \cdot V + b) \quad (14)$$

όπου, u_0 (m/s) είναι η επαγόμενη ταχύτητα του αέρα, V (kV) είναι η εφαρμοζόμενη τάση, a (m/(s·kV)) και b (m/s) είναι σταθερές.

Από τις σχέσεις (13) και (14) φαίνεται ότι η ταχύτητα είναι ανάλογη της ρίζας του ρεύματος και της τάσης σε μία EHD διάταξη.

Για την εύρεση του βαθμού απόδοσης μίας EHD διάταξης χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις (15) - (17) [17, 18]:

Εξίσωση για την εύρεση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος:

$$P_e = V \cdot I \quad (15)$$

όπου, P_e (W) είναι η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς, V (V) είναι η τάση τροφοδοσίας και I (A) είναι η ένταση του ρεύματος.

Εξίσωση για την εύρεση της παραγόμενης μηχανικής ισχύος:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (16)$$

όπου, P_w (W) είναι η παραγόμενη μηχανική ισχύς, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (στους 25 °C ή 26 °C που υπήρχαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι 1.184 και 1.18 kg/m³, αντίστοιχα), A (m²) είναι η διατομή του θαλάμου και U (m/s) είναι η ταχύτητα του αέρα.

Εξίσωση για την εύρεση του βαθμού απόδοσης:

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3}{V \cdot I} = \frac{P_w}{P_e} \quad (17)$$

όπου, η είναι ο βαθμός απόδοσης, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (στους 25 °C ή 26 °C που υπήρχαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι 1.184 και 1.18 kg/m³, αντίστοιχα) και A (m²) είναι η διατομή του θαλάμου, U (m/s) είναι η ταχύτητα του αέρα, V (V) είναι η τάση τροφοδοσίας, I (A) είναι η ένταση του ρεύματος, P_w (W) είναι η παραγόμενη μηχανική ισχύς και P_e (W) είναι η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς.

1.1.3.2 Εξέλιξη της Μοντελοποίησης και των Προσομοιώσεων

Από τη στιγμή που κατέστη σαφές ότι η συνεισφορά των μαθηματικών ήταν αναγκαία για την επίλυση των προαναφερθεισών εξισώσεων, επιστήμονες και μηχανικοί αναζήτησαν νέες μεθόδους για τον υπολογισμό παραμέτρων που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά φαινόμενα. Η ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite-element method, FEM) βοήθησε την αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος των επιστημόνων για τα EHD φαινόμενα. Η μέθοδος αυτή θα περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2.

Με την αλματώδη εξέλιξη των υπολογιστών αρκετοί επιστήμονες ανέπτυξαν πιο εξελιγμένους αλγορίθμους για την προσομοίωση σύνθετων ηλεκτρικών πεδίων στον χώρο καθώς και ροών παραγομένων από το φαινόμενο κορώνα [14, 19, 20, 21]. Το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των αλγορίθμων είναι η πολυπλοκότητά τους και η απαίτηση για υψηλή υπολογιστική ισχύ. Τα περισσότερα από αυτά τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούν έναν υβριδικό συνδυασμό πολλαπλών αριθμητικών μεθόδων, όπως της μεθόδου των οριακών στοιχείων (boundary element method), της μεθόδου των χαρακτηριστικών (method of characteristics), της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (the finite-difference method), της μεθόδου του πεπερασμένου όγκου (finite-volume method), καθώς και της FEM.

Υπάρχουν ακόμη και αριθμητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια της υπολογιστικής μεθόδου δυναμικής των ρευστών (computational fluid dynamics, CFD) [22, 23, 24], καθώς και εμπορικά λογισμικά που ενσωματώνουν ήδη την μοντελοποίηση του EHD και του πλάσματος [2, 5]. Επίσης, ανευρίσκονται στη βιβλιογραφία μελέτες και μοντέλα βασικών γεωμετριών, όπως κυλινδρικός αγωγός-κυλινδρικός αγωγός (wire-to-wire) [25], κύλινδρος με κυλινδρικό αγωγό με πλάκα (cylinder-to-wire-to-plate) [26], κυλινδρικός αγωγός με κύλινδρο (wire-to-cylinder) [16], ακίδα με επίπεδο (needle-to-plane) [27], ακίδα με κύλινδρο (needle-to-cylinder) [28] και ακίδα με δακτύλιο (needle-to-ring) [29]. Έχει παρατηρηθεί ότι η έρευνα που

σχετίζεται με τον ιοντικό άνεμο και τα EHD φαινόμενα αναφέρεται σε συγκεκριμένες πρακτικές εφαρμογές και όχι στην εύρεση μιας γενικευμένης λύσης. Αυτό συμβαίνει, διότι υπάρχουν ακόμη θεμελιώδεις γνώσεις που πρέπει να αποκτηθούν για την κατανόηση αυτών των φαινομένων. Για παράδειγμα, ο R. Tirumala [30] μελέτησε πώς επηρεάζει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου η χρήση πολλαπλών ηλεκτροδίων, ως ηλεκτροδίου συλλέκτη. Διαπίστωσε ότι την επηρεάζει με τέτοιο τρόπο, ώστε οι συνήθεις στρατηγικές της μοντελοποίησης, όπως π.χ. η υπόθεση Kartzon, να είναι ανεπαρκείς και να πρέπει να ληφθεί υπόψη η πλήρης εικόνα του ιονισμού χωρίς απλουστεύσεις και προσεγγίσεις.

1.1.4 Εφαρμογές

Οι κυριότερες εφαρμογές των ηλεκτροϋδροδυναμικών φαινομένων είναι οι διατάξεις παραγωγής μηχανικής πρόωσης (thrusters) και οι EHD αντλίες ρευστού (αερίου) ή γεννήτριες. Οι δεύτερες θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

1.1.4.1 Διατάξεις παραγωγής μηχανικής πρόωσης (Thrusters)

Η ιστορία των συσκευών παραγωγής μηχανικής πρόωσης [6] ξεκινά με την εργασία του T.T. Brown. Οι F.X. Canning et al αναφέρουν ότι δύο είναι οι πιο γνωστές διατάξεις αυτού του τύπου [31]. Στη μία διάταξη, δύο ασύμμετροι πυκνωτές τοποθετούνται έτσι, ώστε να περιστρέφονται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα. Η συσκευή αυτή ονομάζεται διάταξη μηχανικής πρόωσης ασύμμετρου πυκνωτή (Asymmetrical Capacitor Thruster, ACT). Η άλλη συνήθης διάταξη περιλαμβάνει τους οπλισμούς του πυκνωτή τον ένα επάνω στον άλλο τοποθετημένους έτσι, ώστε να μπορεί η συσκευή να ανυψώνεται από το έδαφος. Αυτή ονομάζεται ανυψωτής (lifter) [3].

Τη δεκαετία του 1960 ο T.T. Brown, βασιζόμενος στις ανακαλύψεις του, κατέθεσε πολλές πατέντες για συσκευές που προορίζονταν να χρησιμοποιηθούν ως κινητήρες πρόωσης (propulsion motors). Την ίδια περίοδο ο de Seversky κατοχύρωσε μια πατέντα, αποκαλώντας τα οχήματα που κινούνταν με EHD διατάξεις μηχανικής πρόωσης “Ionocrafts”, προσπαθώντας να διαφοροποιήσει την έρευνά του από αυτήν του T.T. Brown. Σε αυτό πιθανώς να οφείλονται και οι επικρατούντες σήμερα διαφορετικοί όροι “ion thruster” και “ionic wind”.

Εξ αιτίας της πολυπλοκότητας των EHD φαινομένων, ιδιαίτερα στις διατάξεις σύνθετης γεωμετρίας, η έρευνα των EHD συσκευών μηχανικής πρόωσης που λειτουργούν στον ατμοσφαιρικό αέρα της γης σχεδόν εγκαταλείφθηκε. Μόνο στρατιωτική έρευνα από τις

αεροπορικές δυνάμεις των Ηνωμένων Πολιτειών (USAF) και της Ρωσίας (SAF) ελάμβανε χώρα, που οδήγησε στην ανάπτυξη των διαστημικών διατάξεων μηχανικής πρόωσης κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου. Το πιο σημαντικό επίτευγμα ήταν οι διατάξεις μηχανικής πρόωσης με χρήση του φαινομένου Hall, τις οποίες για δεκαετίες χρησιμοποιούσαν οι Σοβιετικοί για να σταθεροποιούν τους δορυφόρους τους. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν διάφορα EHD σχέδια για διαστημική προώθηση, δεν γίνονταν, όμως, γνωστές οι επιστημονικές ανακοινώσεις λόγω της ανάμιξης του στρατού. Αυτές άρχισαν να δημοσιεύονται μετά τη διάλυση της Σοβιετικής Ένωσης (USSR). Οι σχεδιασμοί αυτοί απαιτούσαν την παρουσία ενός αερίου ή υγρού προωθητικού υλικού. Συνήθως, γινόταν χρήση του αδρανούς ευγενούς αερίου ξέnon, λόγω του χαμηλού δυναμικού ιονισμού του και του μεγάλου μοριακού του βάρους. Παρά το πολύ χαμηλό επίπεδο προώθησης, οι EHD διαστημικές διατάξεις μηχανικής πρόωσης επιτυγχάνουν πολύ υψηλότερες τιμές ειδικής προώθησης έναντι των συμβατικών πυραύλων και σήμερα θεωρούνται η μόνη βιώσιμη λύση για μακράς διάρκειας διαστημικά ταξίδια.

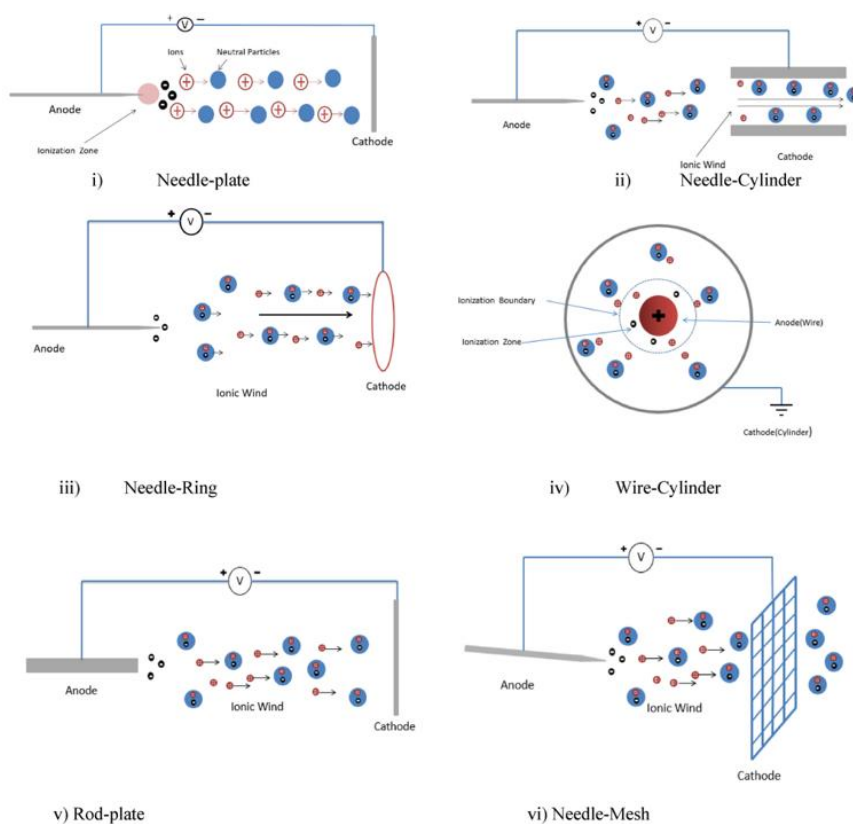
Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα άρχισε η κατανόηση του EHD φαινομένου και οι ερευνητές ανασκεύασαν τους ισχυρισμούς ότι το φαινόμενο Biefeld-Brown οφειλόταν στην αντιβαρύτητα. Το εξήγησαν πλήρως με την απλή θεωρία ότι το φαινόμενο EHD χρησιμοποιεί μόνο ηλεκτροστατικές δυνάμεις και μεταφορά της ορμής με πολλαπλές συγκρούσεις με τα μόρια του αέρα [31, 32]. Έκτοτε, συνεχίστηκε η έρευνα για τα ionocrafts [33] και τις διατάξεις ανύψωσης [34, 35, 36, 37, 38, 39].

1.2 Ηλεκτροϋδροδυναμικές γεννήτριες ή αντλίες ρευστού

1.2.1 Εισαγωγή

Οι πρώτοι που, κατά τη διάρκεια της έρευνάς τους στον ιοντικό άνεμο, πρότειναν τη δυνατότητα σχεδιασμού ενός λειτουργικού ηλεκτροστατικού φυσητήρα, δηλαδή μιας EHD αντλίας, ήταν ο Robinson [40] και ο Stuetzer [41]. Μελέτησαν ανεξάρτητα μεταξύ τους την γεωμετρία ηλεκτροδίων ακίδας-δακτυλίου και κατέληξαν σε παρεμφερή αποτελέσματα. Ο Robinson υπολόγισε την απόδοση της μετατροπής της ηλεκτρικής σε μηχανική ενέργεια που ήταν χαμηλή και συγκεκριμένα κάτω από 1%. Ανέφερε, όμως, ότι οι EHD αντλίες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των μηχανικών αντλιών. Είναι αθόρυβες κατά τη λειτουργία τους, δεν έχουν κινούμενα τμήματα και άρα δονήσεις και φθορά, δεν απαιτούν λίπανση και δεν εμφανίζουν φαινόμενα περιστροφής.

Η χαμηλή απόδοση μετατροπής από ηλεκτρική σε μηχανική ενέργεια είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των EHD αντλιών ακόμη και σήμερα. Τα τελευταία χρόνια, που έχει επιτευχθεί η βασική κατανόηση του ιοντικού ανέμου στις απλές γεωμετρίες, δίνεται έμφαση στην εύρεση νέων προσεγγίσεων, είτε στη γεωμετρία των ηλεκτροδίων, είτε στην παραγωγή της εκκένωσης για τη μεγιστοποίηση, είτε της ταχύτητας του ανέμου, είτε της απόδοσης των EHD αντλιών. Η πρόκληση σε αυτό το πεδίο δεν είναι πλέον η κατανόηση της θεωρίας του EHD φαινομένου, αλλά η κατασκευή των συσκευών (τα ηλεκτρόδια, η γεωμετρία, η λειτουργία) για τη βελτιστοποίηση της ροής [42]. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν σχεδιασθεί και αναπτυχθεί αρκετές διατάξεις ηλεκτροδίων, όπως ακίδας-δακτυλίου (needle-to-ring), ακίδας-πλέγματος (needle-to-mesh), ακίδας-κυλίνδρου (needle-to-cylinder) [28], ακίδας-πλάκας (needle-to-plate, pin-to-plate) [43], κυλινδρικού αγωγού-πλάκας (wire-to-plate), ακίδας-πλέγματος (pin-to-mesh), κυλινδρικού αγωγού-κεκλιμένου περυγίου (wire-to-inclined wing) [44], ράβδου-πλάκας (rod-to-plate), ακίδας-παράλληλων πλακών (needle-to-parallel plates) [45], κυλινδρικού αγωγού-κυλινδρικού αγωγού (wire-to-wire), ακίδας-κυλίνδρου (point-to-cylinder) με διαφορετικό αριθμό ακίδων και διευθετήσεων [13, 46, 47]. Κάποιες από αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3. Ιοντικός άνεμος με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων: i) ακίδα-πλάκα (needle-plate), ii) ακίδα-κύλινδρος (needle-cylinder), iii) ακίδα-δακτύλιος (needle-ring), iv) κυλινδρικός αγωγός-κύλινδρος (wire-cylinder), v) ράβδος-πλάκα (rod-plate), vi) ακίδα-πλέγμα (needle-mesh) [2]

Έχουν μελετηθεί και γεωμετρίες με άλλα σχήματα ηλεκτροδίων, όπως πριονωτή διάταξη-πλέγμα (saw-toothed-to-mesh) [48], καθώς και πιο πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως δακτύλιος/ακίδα-πλέγμα (ring/needle-to-mesh) [49] και κυλινδρικός αγωγός-κύλινδρος-πλάκα (wire-to-cylinder-to-plate) [50].

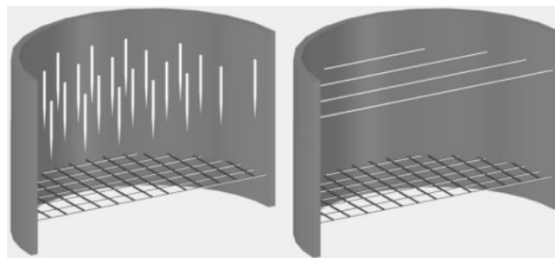
Επιπλέον, έχουν δοκιμασθεί από διάφορους ερευνητές το θετικό και το αρνητικό φαινόμενο κορώνα, τα οποία συμβαίνουν όταν εφαρμόζεται θετικό ή αρνητικό υψηλό δυναμικό στο ηλεκτρόδιο του εκπομπού, αντίστοιχα. Οι απόψεις συγκλίνουν στο ότι οι θετικές εκκενώσεις είναι πιο αποδοτικές από τις αντίστοιχες αρνητικές [6].

Τέλος, έχει μελετηθεί εκτενώς η χρήση διαφόρων διηλεκτρικών ρευστών, εκτός του αέρα, στις EHD αντλίες [6]. Από τους πρώτους ερευνητές, οι J. M. Crowley et al συμπεράναν ότι υψηλή διηλεκτρική σταθερά και μικρό ιξώδες οδηγούν σε υψηλές ταχύτητες ροής, ενώ χαμηλή αγωγιμότητα και ευκινησία επιτρέπουν υψηλή απόδοση [51]. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες οργανικές ενώσεις [52], μελετήθηκαν ρευστά υψηλής αγωγιμότητας, υδατικά διαλύματα [53] και υγρό άζωτο για εφαρμογή στην κρυσκοπία [54].

1.2.2 Εξέλιξη στις EHD Αντλίες Ρευστών [5]

1.2.2.1 Νέες Γεωμετρίες Αντλιών

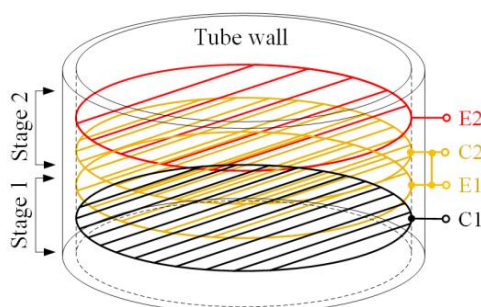
Μία από τις πιο ενεργές περιοχές έρευνας στις ηλεκτροϋδροδυναμικές αντλίες είναι η χρήση των πολλαπλών ηλεκτροδίων [18, 55, 56, 57, 58] για την αύξηση της ταχύτητας ροής και τη βελτίωση της απόδοσης. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο στρατηγικές. Η μία είναι χρησιμοποιώντας παράλληλες συστοιχίες αποτελούμενες από πολλαπλούς εκπομπούς (Εικόνα 1.4) και η άλλη από πολλαπλούς συλλέκτες. Στην πρώτη περίπτωση, η στρατηγική είναι η χρήση της συστοιχίας για τη δημιουργία μεγαλύτερης επιφάνειας ροής (και γενικά περισσότερου ρεύματος) για την αύξηση της συνολικής ταχύτητας ροής της EHD αντλίας [50].



Εικόνα 1.4. 3D σχηματική παράσταση ακίδας-πλέγματος (αριστερά) και κυλινδρικού αγωγού-πλέγματος (δεξιά) πρωτοτύπων EHD αντλιών [55]

Στη δεύτερη περίπτωση, η στρατηγική είναι συνήθως η επιμήκυνση της εκκένωσης κατά μήκος της διεύθυνσης ροής για τη δημιουργία επιφάνειας αλληλεπίδρασης μεγαλύτερου μήκους. Και οι δύο στρατηγικές έχουν τα θετικά σημεία τους αλλά και τις δυσκολίες που δημιουργούνται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας τους. Ως εκ τούτου, είναι αναμενόμενο ότι η ενσωμάτωση επιπρόσθετων ηλεκτροδίων, εκπομπών ή συλλεκτών δεν δρα καθαρά αθροιστικά, αλλά άλλοτε μπορεί να ευνοήσει και άλλοτε να επιδεινώσει το αποτέλεσμα. Σε αυτήν την περίπτωση οι προσομοιώσεις είναι ένα ισχυρό εργαλείο στα χέρια των επιστημόνων για τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων.

Τα τελευταία χρόνια μελετώνται, επίσης, οι EHD αντλίες ρευστών πολλαπλών σταδίων. Στην πλειονότητά τους κατασκευάζονται από την ίδια δομική μονάδα ενός σταδίου, επαναλαμβανόμενη σειριακά (Εικόνα 1.5) ή παράλληλα [4, 17, 59, 60, 61, 62]. Έχει αναφερθεί, όμως, και η μελέτη EHD αντλίας δύο σταδίων αποτελούμενης από δύο μη ομοιόμορφες μονάδες ακίδων-δακτυλίου συνδεδεμένων σε σειρά [63]. Τα χαρακτηριστικά της κατανομής της ροής του ιοντικού ανέμου σε αυτή την περίπτωση μελετήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προσομοίωσης δύο διαστάσεων.



Εικόνα 1.5. Προοπτική άποψη διάταξης σειριακής EHD αντλίας δύο σταδίων. E1, E2 είναι ηλεκτρόδια εκπομποί και C1, C2 είναι ηλεκτρόδια συλλέκτες για στάδιο 1 και 2, αντίστοιχα. Τα διαφορετικά χρώματα αναφέρονται σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Το κόκκινο χρώμα δείχνει το πλήρες δυναμικό (στον εκπομπό E2), το μαύρο χρώμα δηλώνει το μηδενικό δυναμικό ή την ηλεκτρική γείωση (στον συλλέκτη C1) και το πορτοκαλί αντιπροσωπεύει ένα προεπιλεγμένο κλάσμα του πλήρους δυναμικού (στο E1 και C2 που είναι βραχυκυκλωμένα). [17]

1.2.2.2 Μείωση Μεγέθους (Miniaturization)

Καθώς οι σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές γίνονται όλο και πιο μικρές και απαιτητικές, η ψύξη τους έχει καταστεί μεγάλης σημασίας, όχι μόνο για την αξιοπιστία και τη σταθερότητα του ηλεκτρονικού κυκλώματός τους αλλά και για την άνεση του χρήστη.

Τελευταία, έχει παρατηρηθεί αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μείωση του μεγέθους των EHD αντλιών με σκοπό τη δημιουργία των αντλιών «μικροπλάσματος» (microplasmas). Σε αυτήν την κατηγορία η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι μικρότερη από 1 mm και λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση. Τέτοια πίεση είναι συνηθισμένη για αντλίες ιοντικού ανέμου, διότι το περιβάλλον των πολλών συγκρούσεων ευνοεί τη μεταφορά ορμής, αλλά επιπλέον δημιουργεί ένα έντονα δραστικό χημικό περιβάλλον που έχει οδηγήσει σε ένα εκτεταμένο αριθμό νέων εφαρμογών μικροπλάσματος [64]. Η μείωση του μεγέθους αυτών των κατασκευών σε διαστάσεις κλάσματος του χιλιοστού έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως μικρότερα: δυναμικά λειτουργίας, κατανάλωση ισχύος και βάρος [65].

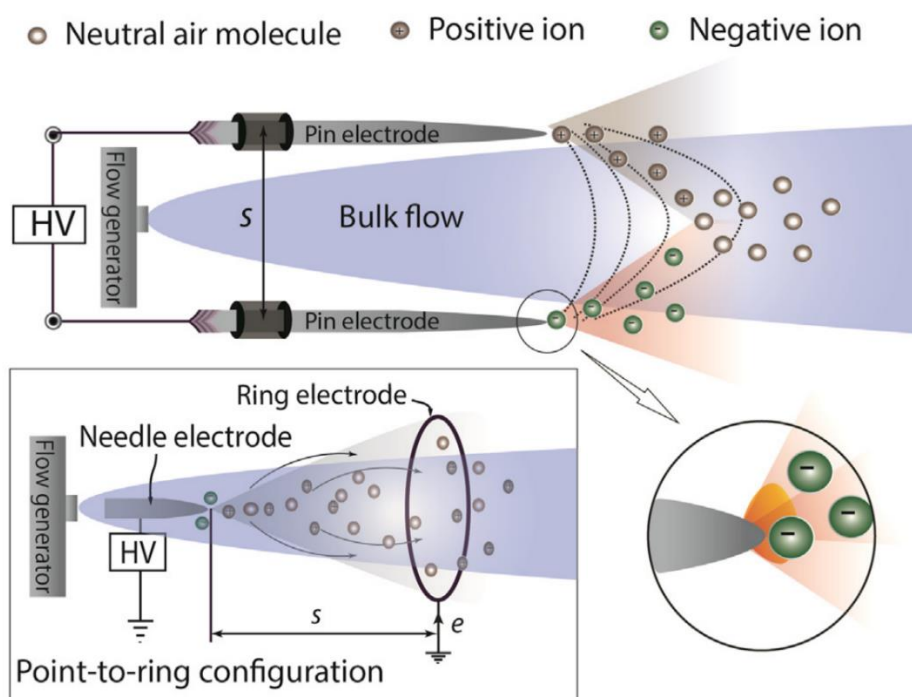
Οι Tirumala et al [66] μελέτησαν τη μείωση του μεγέθους των διατάξεων κορώνα στην κλίμακα κλασμάτων του χιλιοστού και κατάφεραν να έχουν σταθερή λειτουργία, χωρίς σπινθήρα, για αποστάσεις ηλεκτροδίων μέχρι 0.4 mm. Οι Ong et al [67] διερεύνησαν την δυνατότητα κατασκευής μιας μικρο-EHD αντλίας για θερμική διαχείριση κατά τη χρήση σε εφαρμογές μικροηλεκτρονικής. Η διάταξη αποτελείτο από ένα μεμονωμένο λεπτό ηλεκτρόδιο εκπομπού τοποθετημένο μεταξύ δύο παράλληλων πλεγμάτων-ηλεκτροδίων συλλέκτη. Η κατασκευή είχε διαστάσεις 5.4×3.6 mm και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ήταν περίπου 0.5 mm. Στις μέγιστες συνθήκες, το βελτιστοποιημένο σύστημα λειτουργούσε στα 1.9 kV και απαιτούσε μόνο 38 mW ισχύος, μεγέθη και τα δύο πολύ μικρά για EHD αντλία σε ατμοσφαιρικό αέρα. Όταν η συσκευή λειτουργεί παράλληλα με μία ψύκτρα, η ταχύτητα απομάκρυνσης της θερμότητας είναι μεγαλύτερη από εκείνη ενός συμβατικού ανεμιστήρα ψύξης, γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές για ψύξη.

1.2.2.3 Νέες αντιλήψεις για παραγωγή ιοντικού ανέμου και λειτουργία

Στις δύο προηγούμενες υποενότητες αναφέρθηκαν τρόποι βελτίωσης των EHD αντλιών σχεδιάζοντας και κατασκευάζοντας καλύτερα συστήματα. Έχει, όμως, καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων για την παραγωγή ιοντικού ανέμου, οι οποίες παρεκκλίνουν από τις συμβατικές γεωμετρίες και συνήθειες λειτουργίας που απαντώνται στη βιβλιογραφία και παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα.

Όπως έχει προαναφερθεί, το ηλεκτροϋδροδυναμικό φαινόμενο βασίζεται στην παραγωγή ιονισμού κορώνα μεταξύ ενός αιχμηρού ηλεκτροδίου εκπομπού και ενός πλατιού ηλεκτροδίου συλλέκτη. Εντούτοις, οι Dau et al [68, 69, 70] έδειξαν ότι μπορεί να δημιουργηθεί ιοντικός άνεμος από δύο ηλεκτρόδια εκπομπούς αντίθετης πολικότητας που είναι τοποθετημένα

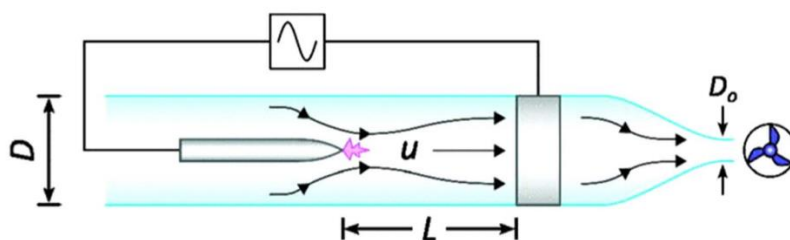
παράλληλα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6. Σε αυτήν την διάταξη, η παρουσία ενός θετικού και ενός αρνητικού φαινομένου κορώνα σε τόσο στενή γειτνίαση μεταξύ τους δημιουργεί σχεδόν ισοδύναμα ποσά φορτίου, τα οποία ουσιαστικά αλληλοεξουδετερώνονται [71]. Οι δύο πολικότητες του κορώνα παράγουν ιοντικό άνεμο που κατευθύνεται από τον εκπομπό στον συλλέκτη, έτσι, η ροή ακολουθεί μία μόνο κατεύθυνση. Μια τέτοια διάταξη έχει το πλεονέκτημα η διπολική φύση να δημιουργεί έναν αυτο-εξουδετερούμενο ιοντικό άνεμο, που πιθανόν εξαλείφει περιπτώσεις φόρτισης επιφανειών γειτονικών αντικειμένων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η απουσία του ηλεκτροδίου συλλέκτη, άρα η μείωση των απωλειών που οδηγεί σε δυνητικά υψηλότερες αποδόσεις. Χρησιμοποιώντας ένα ανεμόμετρο θερμού σύρματος (hot-wire anemometer), μετρήθηκαν ταχύτητες ροής περίπου 1.5 ms^{-1} και απόδοση μετατροπής από ηλεκτρική σε κινητική ενέργεια περίπου 0.65 %. Παρόλο που αυτά τα αποτελέσματα δεν είναι εξαιρετικά, περαιτέρω βελτιστοποίηση και χρήση συστοιχίων ηλεκτροδίων εκπομπών δείχνει ιδιαίτερα υποσχόμενη.



Εικόνα 1.6. Σχηματική περιγραφή της αρχής λειτουργίας διάταξης, που περιλαμβάνει δύο ηλεκτρόδια εκπομπούς αντίθετης πολικότητας (συνδεδεμένα με την ίδια πηγή) τοποθετημένους παράλληλα μεταξύ τους (πάνω), σε σύγκριση με μια τυπική διάταξη κορώνα ακίδας-δακτυλίου (κάτω) [70]

Ενώ οι περισσότερες EHD αντλίες λειτουργούν στο DC, οι ερευνητές Drews et al [72] μελέτησαν τη συμπεριφορά ενός ιοντικού ανέμου που παρήχθη από μία διάταξη ακίδας-δακτυλίου τροφοδοτούμενου από είσοδο AC. Στην Εικόνα 1.7 φαίνεται η πειραματική διάταξη, όπου μια ακίδα τοποθετείται μέσα σε έναν σωλήνα από χαλαζία σε απόσταση L από ένα ηλεκτρόδιο δακτυλίου. Μεταβάλλονταν η συχνότητα, η τάση και η μεταξύ των

ηλεκτροδίων απόσταση για να μελετηθεί η επίδρασή τους στον AC ιοντικό άνεμο. Παρατήρησαν ότι η παραγόμενη ροή βρισκόταν σε δύο περιοχές ανάλογα με τη μεταξύ των ηλεκτροδίων απόσταση και τη συχνότητα της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης εισόδου. Διαπίστωσαν ότι σε χαμηλότερες συχνότητες ο AC ιοντικός άνεμος συμπεριφέρεται όπως ένας DC, όπου τα ιόντα εκτείνονται στον χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων και τελικά ανασυνδυάζονται στο ηλεκτρόδιο του συλλέκτη. Σε υψηλότερες συχνότητες τα ιόντα συγκεντρώνονται γύρω από το άκρο του ηλεκτροδίου της ακίδας, διότι καθίστανται γρήγορα ουδέτερα μέσω του ανασυνδυασμού ιόντος-ιόντος, που προκαλείται από το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο, η δύναμη, που παράγεται από αυτά τα ιόντα κατά τη ροή, συγκεντρώνεται στο άκρο της ακίδας και γίνεται ανεξάρτητη από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Τελικά, το AC φαινόμενο κορώνα παρήγαγε ταχύτητες ροής συγκρίσιμες με αυτές από μία DC εκκένωση για κάθε απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για χρήση στις EHD διατάξεις.



Εικόνα 1.7. Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης AC φαινομένου κορώνα, όπου μια ακίδα (ηλεκτρόδιο εκπομπός) τοποθετήθηκε σε απόσταση L από ένα δακτύλιο (ηλεκτρόδιο συλλέκτης) μέσα σε ένα σωλήνα από χαλαζία διαμέτρου D [5]

Συνήθως, οι EHD αντλίες απαιτούν ένα υψηλό δυναμικό μεταξύ δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων. Για λόγους ασφάλειας και περιορισμών μεγέθους και βάρους, αυτές οι υψηλές τάσεις μπορεί να είναι απαγορευτικές για κάποιες εφαρμογές, όπως για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Αντί για τη χρήση δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων, οι M. Johnson and D. Go [73] χρησιμοποίησαν ένα πιεζοηλεκτρικό μετασχηματιστή ως ένα ηλεκτρόδιο στο φαινόμενο κορώνα για τη δημιουργία ιοντικού ανέμου. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετασχηματιστές έχουν υψηλή απόδοση και εύκολα μειώνεται το μέγεθός τους. Από την άλλη μεριά, πρέπει να λειτουργούν με μια AC είσοδο σε μία συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού.

Οι M. Johnson and D. Go έδειξαν ότι το πιεζοηλεκτρικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως ηλεκτρόδιο εκπομπός, είτε ως ηλεκτρόδιο συλλέκτης. Όταν χρησιμοποιήθηκε ως συλλέκτης, ο πιεζοηλεκτρικός μετασχηματιστής παρήγαγε ταχύτητες ροής ισοδύναμες με του αντίστοιχου συμβατικού φαινομένου κορώνα δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων, αλλά με πολύ μικρότερες

τάσεις εισόδου. Ως ηλεκτρόδιο εκπομπός, οι ίδιοι ερευνητές έδειξαν ότι ο πιεζοηλεκτρικός μετασχηματιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πίδακα ιοντικών ανέμων για ψύξη με πρόσκρουση με εφαρμοζόμενη τάση πολύ χαμηλή και ίση με 7 V [74].

1.2.3 Πρόσφατες εφαρμογές των EHD αντλιών αερίου

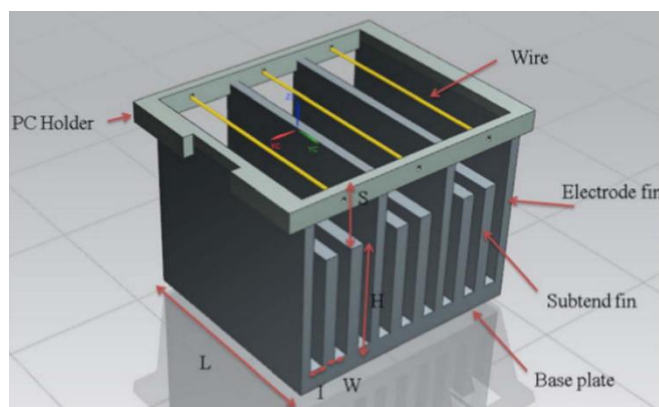
Έχει καταβληθεί μια τεράστια ερευνητική προσπάθεια για την εύρεση τομέων της τεχνολογίας, στους οποίους θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επωφελώς οι EHD αντλίες. Θα αναφερθούν τρεις τομείς εφαρμογών, που έχουν τύχει ιδιαίτερης προσοχής τα τελευταία χρόνια: θερμική διαχείριση, ξήρανση τροφής και ενίσχυση της καύσης.

1.2.3.1 EHD για ψύξη (Cooling) και θερμική διαχείριση (Thermal management)

Την τελευταία δεκαετία η ψύξη των ηλεκτρονικών μονάδων έχει καταστεί μία από τις πιο υποσχόμενες περιοχές εφαρμογών των διατάξεων ιοντικού ανέμου [75]. Το μέγεθος των σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών μειώνεται συνεχώς, όμως, παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας, τα οποία απαιτούν κατάλληλη θερμική διαχείριση. Χρειάζονται τρόπους ψύξης αποτελεσματικούς, αθόρυβους, αξιόπιστους, που αποδίδουν καλύτερα από τις παραδοσιακές μεθόδους.

Το 2009, οι ερευνητές N. E. Jewell-Larsen et al [76] έδειξαν ότι μία EHD αντλία μπορούσε να ενσωματωθεί σε ένα φορητό υπολογιστή. Πρόσφατα, έχει εκδηλωθεί έντονο ενδιαφέρον από τη βιομηχανία για τη χρήση της EHD τεχνολογίας για την ψύξη ηλεκτρονικών μονάδων και έχουν κατατεθεί πολλές πατέντες. Στις ανασκοπήσεις [2, 5, 6] παρατίθενται σε πίνακες ή περιγράφονται αρκετές εφαρμογές.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα από τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά των EHD αντλιών είναι ότι μπορούν να ενσωματωθούν σε εφαρμογές στις οποίες άλλες αντλίες δεν μπορούν. Έτσι, αρκετοί ερευνητές σχεδίασαν ψύκτρες με ενσωματωμένες EHD αντλίες. Με αυτόν τον τρόπο, πρόσθεσαν ένα επιπλέον ψυκτικό μηχανισμό, όταν ο ιοντικός άνεμος λειτουργούσε. Στην Εικόνα 1.8 απεικονίζεται μια τέτοια διάταξη, όπου οι D. H. Shin et al [77] τοποθέτησαν από ένα ηλεκτρόδιο κυλινδρικού αγωγού μεταξύ κάθε ζεύγους παράλληλων ηλεκτροδίων πλακών, που ταυτόχρονα ήταν και τα πτερύγια της ψύκτρας. Ακολούθησε υπολογιστική και πειραματική βελτιστοποίηση, για να βρεθεί η κατάλληλη θέση του κυλινδρικού αγωγού για την επίτευξη της καλύτερης ψύξης. Οι ερευνητές, όταν κατασκεύασαν το νέο ψυκτικό σύστημα και το δοκίμασαν, κατέθεσαν ότι η ψυκτική του ικανότητα ήταν βελτιωμένη κατά 150 %.



Εικόνα 1.8. Υπόδειγμα μιας ψύκτρας με ενσωματωμένο σύστημα EHD αντλιών, όπου οι εκκενώσεις κυλινδρικού αγωγού-επιπέδου (wire-plane) οδηγούν τον ιοντικό άνεμο κατευθείαν μέσα στην ψύκτρα. Τα ηλεκτρόδια των πλακών ήταν τα πτερύγια (fins) της ψύκτρας. [5]

Μια ακόμη περιοχή ενδιαφέροντος για εφαρμογές των EHD αντλιών είναι η ψύξη των LEDs (light-emitting diodes) [5]. Στην αρχή γίνεται η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ζεύγους των ηλεκτροδίων. Μελετάται, επίσης, η πολικότητα της εκκένωσης, καθότι ερευνητές ανέφεραν ότι η αρνητική κορώνα απέφερε καλύτερη ψύξη και είχε ευρύτερη λειτουργική περιοχή δυναμικού, με το μειονέκτημα, βέβαια, της έκλυσης περισσότερου όζοντος, το οποίο είναι τοξικό για τον άνθρωπο σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Επιπλέον, η χρήση AC τάσης εισόδου δίνει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφόρων κυματομορφών [72]. Έχει αναφερθεί, όμως, από τους W. J. Sheu et al [78] ότι η τάση DC εμφάνισε καλύτερη ψυκτική συμπεριφορά σε σχέση με την αντίστοιχη χαμηλής συχνότητας AC.

1.2.3.2 EHD για εφαρμογές ξήρανσης (Drying)

Η ξήρανση ήταν από τους αρχαίους χρόνους ο κυρίαρχος τρόπος συντήρησης της τροφής. Οι περισσότερες μέθοδοι ξήρανσης χρησιμοποιούν θερμότητα για να αυξήσουν τη μεταφορά μάζας και να απομακρύνουν την υγρασία από τα τρόφιμα. Όμως, η αύξηση της θερμοκρασίας απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας αφενός και αφετέρου μπορεί να βλάψει την ποιότητα του προϊόντος. Για τον σκοπό αυτό υπάρχει ενδιαφέρον για νέες μεθόδους ξήρανσης της τροφής.

Τα ηλεκτρικά πεδία μελετώνται εδώ και δεκαετίες για εφαρμογές ξήρανσης, μετά την ανακάλυψη ότι τα τρόφιμα συμπεριφέρονται ως διηλεκτρικό υλικό μέσα σε ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, υφιστάμενα μια εξώθερμη αλληλεπίδραση που αυξάνει κατά πολύ την ταχύτητα εξάτμισης (μέχρι και 50 φορές) κάτω από κατάλληλες συνθήκες.

Η ξήρανση με EHD διάταξη είναι μία μη θερμική μέθοδος, που αφενός διατηρεί την υψηλή ποιότητα της τροφής και αφετέρου μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Πρόσφατες σχετικές

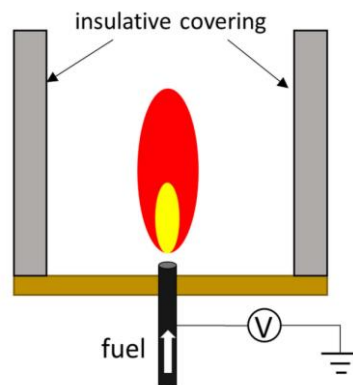
μελέτες εμπεριέχονται σε αντίστοιχες ανασκοπήσεις [79, 80]. Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες για την EHD ξήρανση αναφέρονται στη σύγκριση αφενός της ποιότητας των αποξηραμένων τροφίμων και αφετέρου της δαπανώμενης ενέργειας με τη μέθοδο EHD και τις συμβατικές τεχνικές ξήρανσης και πάντα υπερτερεί η EHD μέθοδος. Επιπλέον, κατά τη χρήση του ιοντικού ανέμου, αυξάνοντας το εφαρμοζόμενο δυναμικό, αυξάνεται η ταχύτητα ξήρανσης, αλλά αυτό κάποιες φορές επιδρά αρνητικά στην ποιότητα του τροφίμου. Είναι πιθανόν να οφείλεται στις μεγαλύτερες ταχύτητες αντιδράσεων στην αέρια φάση με το φαινόμενο κορώνα, κατά τις οποίες παράγονται χημικές ουσίες που αντιδρούν με την επιφάνεια των τροφίμων. Έχει μελετηθεί μεταξύ άλλων η ξήρανση για αγγούρια της θάλασσας, μύες χτενιού, φέτες καρότου, μπανάνας, μήλου και μανιταριών [5].

1.2.3.3 EHD Για Βελτίωση της Καύσης (Combustion)

Με τη συνεχώς αυξανόμενη ανησυχία για μόλυνση του περιβάλλοντος και κλιματική αλλαγή στον πλανήτη μας, η αύξηση της απόδοσης των υπαρχόντων μηχανών καύσης καθίσταται επιτακτική ανάγκη [81, 82]. Η επίδραση του πλάσματος στην καύση μπορεί να χωριστεί σε τρεις συνιστώσες: τη θερμική, την κινητική και τη μεταφορά [83]. Πρώτον, η θερμική συνιστώσα υπάρχει λόγω του ότι το πλάσμα αυξάνει την τοπική θερμοκρασία και τις ταχύτητες των χημικών αντιδράσεων. Δεύτερον, η κινητική συνιστώσα προέρχεται από την υψηλή θερμοκρασία των ηλεκτρονίων μέσα σε ένα πλάσμα που δεν βρίσκεται σε ισορροπία, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει ενεργές ρίζες μέσω διάσπασης που συμβαίνει από πρόσκρουση με ηλεκτρόνια και ιόντα (O, OH, H, κ.λπ.). Επίσης, παράγονται και άλλες δραστικές ενώσεις (O₃ και NO) με την παρουσία του πλάσματος, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν την οξειδωση των καυσίμων. Τρίτον, η μεταφορά του καυσίμου συχνά αυξάνει λόγω του ότι το πλάσμα το διασπά σε μικρότερα θραύσματα και αυξάνει τη διάχυσή του μέσω του αερίου. Επιπροσθέτως, το πλάσμα μπορεί να δημιουργήσει ιοντικό άνεμο, ο οποίος θα προωθήσει την ανάμιξη του καυσίμου μέσα στη φλόγα.

Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η χρήση εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου (AC) στη διάταξη του ιοντικού ανέμου βοηθά στη δημιουργία καύσης βοηθούμενης από πλάσμα (plasma-assisted combustion), που είναι μια ενδιαφέρουσα περίπτωση διαφορετική από τις περισσότερες EHD εφαρμογές. Επειδή η φλόγα είναι ένα πλάσμα που δεν βρίσκεται σε ισορροπία, κατευθυνόμενο από την καύση του καυσίμου, μπορεί να επηρεασθεί από ηλεκτρικά πεδία. Γι' αυτό δεν χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια που δημιουργούν εκκένωση. Αντίθετα, τα

ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενός επαρκώς ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου για την εμφάνιση ιοντικού ανέμου και τον χειρισμό της φλόγας. Την τελευταία δεκαετία, η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στη βάση της φλόγας (Εικόνα 1.9) έχει αποδειχθεί ότι εμποδίζει το σβήσιμο της φλόγας, αυξάνει τη σταθερότητα, μειώνει την αιθάλη και βελτιώνει τα χαρακτηριστικά της [5]. Τα περισσότερα από αυτά τα φαινόμενα οφείλονται στο σχηματισμό ενός ιοντικού ανέμου που σπρώχνει τα ιόντα στην περιοχή κάτω από τη φλόγα και αλλάζει τη χημεία της αντίδρασης.



Εικόνα 1.9. Σχηματική παράσταση διάταξης ενός ηλεκτροδίου, που χρησιμοποιείται για να επηρεάσει τη φλόγα. Το δυναμικό εφαρμόζεται σε ένα ρύγχος, το οποίο τοποθετείται μέσα σε μονωτικό δοχείο. [5]

Σε αντίθεση με τις περισσότερες EHD αντλίες, όπου ο στόχος είναι η δημιουργία ενός ρεύματος ρευστού μιας κατεύθυνσης, στις μελέτες της καύσης η πρόθεση είναι η παραγωγή μιας ροής που οδηγεί τα αντιδρώντα σε μία περιοχή: τη ζώνη της καύσης.

1.2.4 EHD Διατάξεις: Πεδίο σε εξέλιξη

1.2.4.1 Εισαγωγή

Οι εκκενώσεις αερίου, που κατευθύνουν τον ιοντικό άνεμο και αποτελούν τη βάση των EHD αντλιών, είναι εξαιρετικά δραστικά (ηλεκτρικά και χημικά) περιβάλλοντα, που αντιδρούν με το περιβάλλον [2, 5]. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές συχνά προκαλούν μη επιθυμητά αποτελέσματα, γι' αυτό όταν γίνεται η ανάπτυξη μιας EHD αντλίας, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παραπροϊόντα της εκκένωσης του αερίου. Επιπλέον, περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στη λειτουργία της αντλίας και πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό της αντλίας και γενικότερα του υπό μελέτη συστήματος.

Στην περιοχή ολίσθησης της EHD διάταξης, όπου τα ιόντα εξέρχονται από την περιοχή ιονισμού και επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο προς το πλατύ ηλεκτρόδιο συλλέκτη, το ηλεκτρικό πεδίο είναι ανεπαρκές για να δημιουργήσει επιπρόσθετο ιονισμό με συγκρούσεις ηλεκτρονίων. Σε αυτήν την περιοχή τα ιόντα του αερίου συγκρούονται με τα ουδέτερα μόρια του και τα αναγκάζουν να κινηθούν. Στον αέρα, που είναι το πιο συνηθισμένο διηλεκτρικό μέσο των EHD αντλιών, ιοντικοί άνεμοι μπορούν να σχηματισθούν και στις δύο πολικότητες: τη θετική και την αρνητική. Στη θετική πολικότητα τα πιο άφθονα ιόντα σε ξηρό αέρα είναι το θετικό νιτρικό οξείδιο NO^+ και το θετικό οξυγόνο O_2^+ , ενώ σε συνηθισμένες συνθήκες υγρασίας οι πρωτονιωμένες υδατικές ομάδες $[\text{H}_3\text{O}^+]$ $[(\text{H}_2\text{O})_n]$ είναι τα επικρατούντα ιόντα. Το ρεύμα της εκκένωσης μπορεί να επηρεάσει την κατανομή των ιόντων και έτσι, άλλα ιόντα, όπως τα θετικά μόρια αζώτου (N_2^+ , N_4^+) και οι θετικές ατομικές οντότητες (N^+ και O^+) μπορεί να γίνουν σημαντικά. Στην αρνητική πολικότητα, η προσκόλληση ηλεκτρονίων σε ηλεκτραρνητικά μόρια παράγει την πλειονότητα των ιόντων, έτσι, ώστε το φορτίο στην περιοχή ολίσθησης να είναι ακόμη το προϊόν του ιονισμού του αέρα, παρά ελεύθερα ηλεκτρόνια. Σε ξηρό αέρα, έχειδειχθεί, ότι τα ανιόντα που βρίσκονται σε αφθονία είναι πιο συχνά το τριοξείδιο του άνθρακα (CO_3^-), το όζον (O_3^-) και τα νιτρικά (NO_3^-). Πάλι, παρουσία σημαντικής υγρασίας τα επικρατούντα ιόντα είναι φορτισμένες υδατικές ομάδες, όπως $[\text{O}_2^-]$ $(\text{H}_2\text{O})_n$ και $[\text{CO}_3^-]$ $(\text{H}_2\text{O})_n$. Ανεξαρτήτως πολικότητας, τα ιόντα ολισθαίνουν από τον εκπομπό προς τον συλλέκτη και έτσι ο ιοντικός άνεμος δημιουργείται πάντα προς την κατεύθυνση του συλλέκτη. Γενικώς, η θετική πολικότητα προτιμάται, διότι παράγει λίγο ισχυρότερους ιοντικούς ανέμους, αλλά το πιο σημαντικό είναι ότι παράγει πολύ λιγότερα ανεπιθύμητα παραπροϊόντα και κυρίως το όζον (O_3). Αυτό την καθιστά πιο φιλική για πολλές εφαρμογές, ιδιαίτερα εκείνες που περιλαμβάνουν καταναλωτικά προϊόντα, όπως EHD αντλίες για ψύξη ηλεκτρονικών συσκευών ή θερμική διαχείριση.

1.2.4.2 Όζον

Η παραγωγή του όζοντος στις εκκενώσεις αερίων λαμβάνει χώρα λόγω των συγκρούσεων με μοριακό οξυγόνο, διασπώντας το και παράγοντας ατομικό οξυγόνο. Για την παραγωγή όζοντος, το ατομικό οξυγόνο υποβάλλεται σε αντίδραση τριών σωμάτων με μοριακό οξυγόνο:



όπου, M είναι συνήθως O_2 , O_3 , ή N_2 στον ατμοσφαιρικό αέρα. Άπαξ και παραχθεί το όζον, έχει χρόνο ημιζωής, τυπικά, λίγες ώρες μέχρι μερικές ημέρες ανάλογα με τις συνθήκες.

Το όζον είναι σημαντικό για διάφορες εφαρμογές, όπως επεξεργασία της τροφής και του νερού και κάποιες κατεργασίες των ημιαγωγών. Για πολλές δεκαετίες έχουν χρησιμοποιηθεί εκκενώσεις αερίων για την παραγωγή όζοντος. Όμως, το παραγόμενο όζον από μια εκκένωση μπορεί να δημιουργήσει σημαντικούς κινδύνους για τους ανθρώπους και τον εξοπλισμό που βρίσκονται κοντά. Μελέτες έχουν δείξει ότι οξεία έκθεση σε χαμηλά επίπεδα όζοντος μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους πνεύμονες, φλεγμονή στον αναπνευστικό σωλήνα και διάφορα άλλα αναπνευστικά προβλήματα. Γι' αυτό το λόγο θεσπίστηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής για ασφαλές περιβάλλον εργασίας, το ανώτατο επιτρεπτό όριο όζοντος στους εργασιακούς χώρους ίσο με 0.1 ppm. Εκτός από τους λόγους υγείας, παρατεταμένη έκθεση σε όζον μπορεί να προκαλέσει οξείδωση και διάβρωση των γύρω αντικειμένων και κατ' επέκταση καταστροφή του γειτονικού εξοπλισμού. Περιορισμένα ποσά όζοντος θεωρούνται αποδεκτά, αφού πολλά εμπορικά ηλεκτρονικά όργανα, όπως οι εκτυπωτές λέιζερ και τα φωτοτυπικά μηχανήματα, εκλύουν ίχνη όζοντος. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι EHD αντλίες σε πολλές εφαρμογές, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το όζον για την προστασία των ανθρώπων και του εξοπλισμού.

Άλλη μελέτη έχει δείξει ότι τα φαινόμενα κορώνα αρνητικής πολικότητας παράγουν όζον σχεδόν με τη διπλάσια ταχύτητα από αυτήν των θετικών και AC εκκενώσεων. Αυτό συμφωνεί με την πλειονότητα των δημοσιεύσεων σε αυτό το αντικείμενο που αναφέρει ότι η ταχύτητα παραγωγής του όζοντος σε αρνητικό κορώνα μπορεί να είναι μεγαλύτερη μέχρι μία τάξη μεγέθους από τη θετική.

1.2.4.3 Υγρασία

Ένα από τα ενδογενή προβλήματα των EHD αντλιών είναι η έλλειψη επαναληψιμότητας των χαρακτηριστικών της ροής από μέρα σε μέρα. Αυτό δημιουργεί ανησυχία στους μηχανικούς που προσπαθούν να ενσωματώσουν την EHD αντλία στην εφαρμογή τους και δεν μπορούν να προσδιορίσουν ακριβώς τι περιμένουν. Μια σημαντική πηγή των προβλημάτων κακής επαναληψιμότητας είναι οι μεταβολές της υγρασίας του αέρα, που εξαρτώνται από την εποχή και την περιοχή. Έχει διαπιστωθεί ότι η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος αέρα μπορεί να έχει σημαντική επίπτωση στο δυναμικό και στις χαρακτηριστικές ρεύματος-δυναμικού ενός φαινομένου κορώνα [84]. Κάτι τέτοιο είναι σοβαρό, διότι πολλές εμπορικές εφαρμογές απαιτούν τη λειτουργία τους σε πολλές διαφορετικές συνθήκες. Οι Richard et al [85] διαπίστωσαν ότι μετά τη χρησιμοποίηση αφυγραντήρα, τα μετρούμενα ρεύματα εκκένωσης και οι ταχύτητες ροής αυξήθηκαν δραστικά. Αυτό σημαίνει ότι η υγρασία δρα αρνητικά. Οι

Chen S. et al [86] παρατήρησαν ότι η αύξηση της υγρασίας οδήγησε σε σημαντική μείωση της παραγωγής της ροής μιας EHD αντλίας

1.2.4.4 Αλλοίωση / Διάβρωση ηλεκτροδίων

Μία συνηθισμένη αναφορά για τις EHD αντλίες είναι ο σχετικά μικρός χρόνος ζωής τους συγκρινόμενες με άλλες τεχνολογίες κινούμενου αέρα. Κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης κορώνα η επιφάνεια του ηλεκτροδίου του εκπομπού μπορεί να παρουσιάζει διάβρωση ή αλλοίωση, ακόμη και μετά από λειτουργία λίγων ωρών. Η διάβρωση αυτή έχει παρατηρηθεί στα πιο συνηθισμένα εν χρήσει υλικά ηλεκτροδίων, όπως: αλουμίνιο, χαλκό, ανοξείδωτο χάλυβα και τιτάνιο. Η επαγόμενη αλλοίωση από την εκκένωση κορώνα παρατηρείται και στη θετική και στην αρνητική πολικότητα λόγω της παραγωγής NO_x . Τα NO_3^- που σχηματίζονται κοντά στην επιφάνεια του εκπομπού μπορούν να της δημιουργήσουν βαθουλώματα. Έτσι, κάποια σωματίδια εκτινάσσονται από την επιφάνεια του εκπομπού και προκαλούν βαθμιαία μείωση της μάζας του. Το όζον, επίσης, διαβρώνει τα ηλεκτρόδια αλλά η συγκέντρωσή του είναι συνάρτηση της υγρασίας και άλλων παραμέτρων και έτσι περιορίζεται η επίδρασή του. Επιπροσθέτως, στην επιφάνεια του εκπομπού μπορεί να συγκεντρωθούν ανεπιθύμητες επικαθήσεις ή προσμίξεις κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Όλες αυτές οι αλλοιώσεις τροποποιούν την επιφάνεια των ηλεκτροδίων και αλλάζουν τις περιβάλλουσες δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Εάν δε το ηλεκτρικό πεδίο είναι αρκετά έντονο, τότε η εκκένωση μπορεί να μεταβεί σε μια πιο καταστροφική σπινθηρίζουσα κατάσταση και να καταστρέψει περισσότερο το ηλεκτρόδιο.

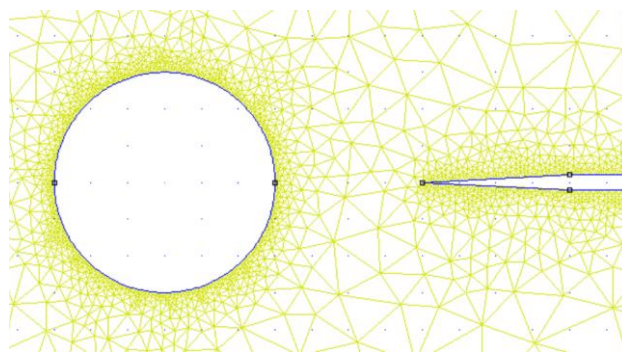
Μια λύση στο πρόβλημα της διάβρωσης των ηλεκτροδίων είναι η χρήση πιο ανθεκτικών υλικών για την κατασκευή του εκπομπού. Οι C.G. Noll και P.A. Lawless [87] μελέτησαν τη χρήση ακίδων, ως ηλεκτροδίων εκπομπών, από γερμάνιο και πυρίτιο για 100-750 ώρες λειτουργίας με διαφορετικές πολικότητες εκκένωσης. Εκεί διαπίστωσαν ότι το αρνητικό φαινόμενο κορώνα προκάλεσε την εκπομπή σωματιδίων από τους εκπομπούς τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη της αντίστοιχης θετικής εκκένωσης. Παρόλο που στις άκρες και των δύο ηλεκτροδίων δημιουργήθηκαν πόροι ή κανάλια, το γερμάνιο φάνηκε πιο ανθεκτικό υλικό από το πυρίτιο. Από την εν λόγω έρευνα προέκυψε ότι αυτά τα υλικά δεν είναι η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Πρέπει να δοκιμασθούν άλλα, όπως τα κεραμικά ή κατάλληλες επιστρώσεις της επιφάνειας των ηλεκτροδίων. Η χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων ως εκπομπών, που ήδη υιοθετήθηκε από τους M.J. Johnson και D.B. Go [73, 74] και που είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση, μπορεί να βοηθήσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων για τον σχεδιασμό των εργαστηριακών πρωτοτύπων

2.1 Μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

2.1.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Από τη στιγμή που κατέστη σαφές ότι η συνεισφορά των μαθηματικών ήταν αναγκαία για την επίλυση των προαναφερθεισών εξισώσεων, επιστήμονες και μηχανικοί αναζήτησαν νέες μεθόδους για τον υπολογισμό παραμέτρων που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά φαινόμενα. Η ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite-element method, FEM) βοήθησε την αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος των επιστημόνων για τα EHD φαινόμενα. Σύντομα, έγινε αντιληπτό ότι η μέθοδος αυτή μπορούσε να οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα [88] [89]. Η FEM διαιρεί τον χώρο του υπό επίλυση προβλήματος σε πολυάριθμα δισδιάστατα ή τρισδιάστατα στοιχεία, σχηματίζοντας ένα πλέγμα από μικρούς υποχώρους, οι οποίοι μπορούν να επιλυθούν μεμονωμένα μέσω συστημάτων διαφορικών εξισώσεων και να οδηγήσουν σε μία αποδεκτή λύση. Αυτό το πλέγμα μπορεί να είναι πιο πυκνό εκεί που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια και αραιότερο σε άλλες περιοχές (Εικόνα 2.1). Συνεπώς, αυτή η μέθοδος οδηγεί σε πολύπλοκα συστήματα εξισώσεων, όταν επιδιώκεται υψηλή ακρίβεια, ιδιαίτερα όταν οι ακτίνες των ηλεκτροδίων είναι πολύ μικρές. Επομένως, απαιτεί τεράστια υπολογιστική δύναμη και σύγχρονους υπολογιστές για τη γρήγορη λήψη των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 2.1. Πλέγμα τριγωνικών στοιχείων από ένα σύγχρονο πρόγραμμα προσομοίωσης FEMM, v. 4. 2 (συλλέκτης κυκλικό ηλεκτρόδιο ακτίνας 0.75 mm) [90]

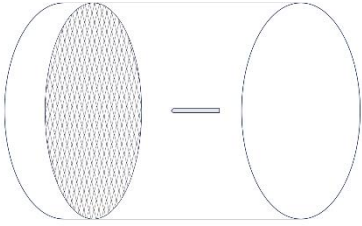
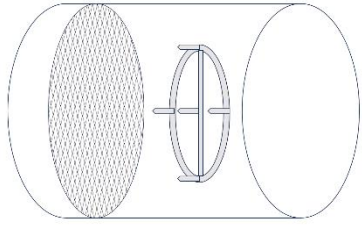
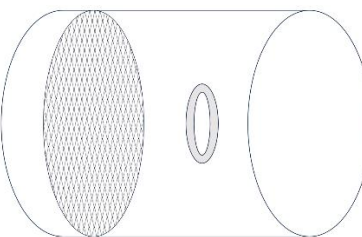
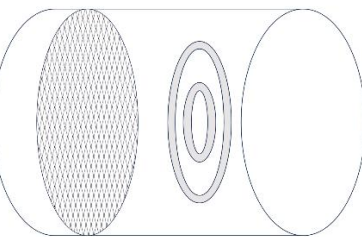
2.1.2 Βασικοί τύποι διατάξεων ηλεκτροδίων που μελετήθηκαν

Πριν ξεκινήσει η σχεδίαση εντός του προγράμματος προσομοίωσης, έγινε η ακριβής μέτρηση των διαστάσεων όλων των ηλεκτροδίων, που συνδέονται στο υψηλό δυναμικό με τη χρήση μικροσκοπίου. Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πλέγμα σε όλες τις διατάξεις. Εκτείνεται σε ολόκληρη

τη διατομή του σωλήνα και έχει ακτίνα 58.4 mm. Επίσης η ακίδα έχει ακτίνα καμπυλότητας 39 μm και ύψος 10 mm. Ο χάλκινος αγωγός των δακτυλίων έχει ακτίνα 136 μm.

Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων που μελετήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 2.1 μαζί με τις διαστάσεις τους και ενδεικτικά σχήματα απεικόνισής τους.

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτική παρουσίαση των τύπων διατάξεων των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν με τις αντίστοιχες διαστάσεις τους και τα γραμμικά σχήματα απεικόνισής τους.

Τύπος Διάταξης	Διαστάσεις (mm)	Γραμμικό Σχήμα Απεικόνισης
A. Ακίδα – Πλέγμα	Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: 0.039 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	
B. Πέντε Ακίδες - Πλέγμα	Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: 0.039 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	
Γ. Δακτύλιος – Πλέγμα	Ακτίνα δακτυλίου: 10 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	
	Ακτίνα δακτυλίου: 20 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	
	Ακτίνα δακτυλίου: 30 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	
Δ. Διπλός Δακτύλιος - Πλέγμα	Ακτίνα εσωτερικού δακτυλίου: 10 Ακτίνα εξωτερικού δακτυλίου: 30 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	
	Ακτίνα εσωτερικού δακτυλίου: 15 Ακτίνα εξωτερικού δακτυλίου: 30 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	
	Ακτίνα εσωτερικού δακτυλίου: 10 Ακτίνα εξωτερικού δακτυλίου: 25 Ακτίνα πλέγματος: 58.4	

2.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Η μελέτη της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στον χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι θεμελιώδους σημασίας για τον καθορισμό της περιοχής ιονισμού και τον έλεγχο της μέγιστης πεδιακής έντασης, αλλά και για τον προσδιορισμό της ενέργειας του πεδίου. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση του λογισμικού FEMM (Finite Element Method Magnetics) [90] για τη διερεύνηση των διατάξεων ηλεκτροδίων που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

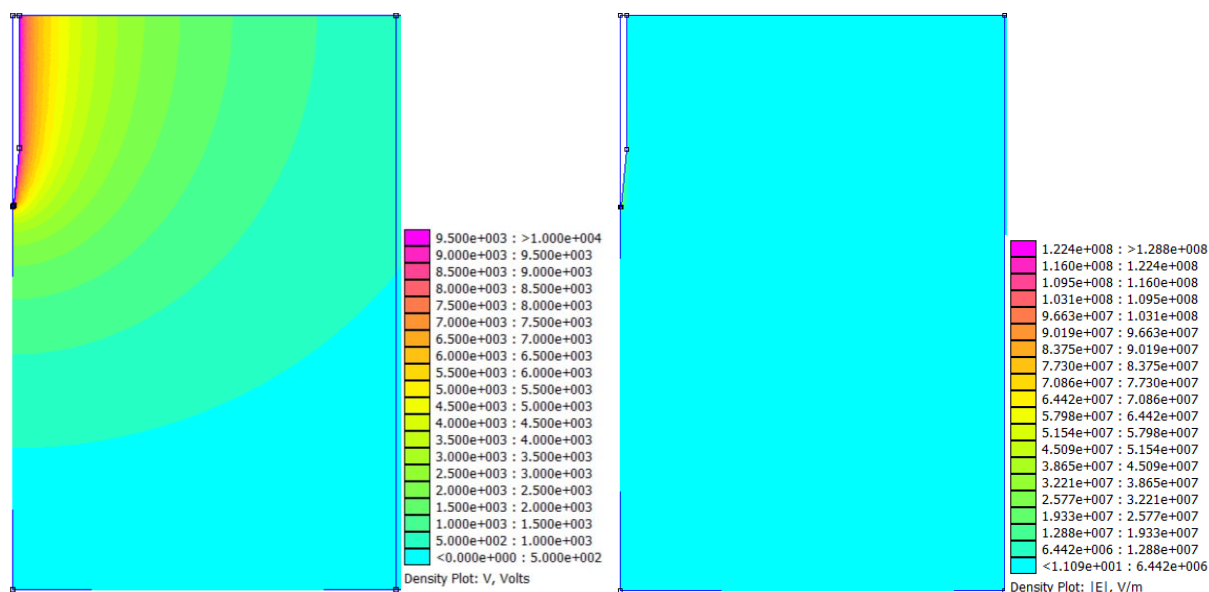
Στη συνέχεια, αναφέρονται ορισμένες συνθήκες που ισχύουν για όλες τις προσομοιώσεις.

1. Για να γίνουν πιο ακριβείς οι υπολογισμοί στο πρόγραμμα προσομοίωσης, χρειάστηκε να μειωθεί το μέγεθος του χώρου, ώστε γύρω από το ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού να υπάρξει ένα αρκετά πιο πυκνό πλέγμα. Προφανώς, η μείωση αυτή δεν ήταν αυθαίρετη, αλλά έγινε ύστερα από μελέτη, ώστε να είναι σίγουρο ότι δεν θα επηρεασθούν τα αποτελέσματα. Οπότε, για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά ελήφθη απόσταση ενός διακένου (διάκενο είναι η απόσταση μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη), από την αριστερή και τη δεξιά πλευρά.
2. Σε όλες τις προσομοιώσεις το ηλεκτρόδιο του εκπομπού τροφοδοτήθηκε με τάση ίση με 10 kV.
3. Το πρόγραμμα τέθηκε στη λειτουργία axisymmetric (αξονοσυμμετρικό) καθώς τα ηλεκτρόδια που μελετήθηκαν παρουσίαζαν συμμετρία εκ περιστροφής στον χώρο.
4. Το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν έχει τη δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος για το ηλεκτρόδιο του συλλέκτη, γι' αυτό τα συστήματα μελετήθηκαν με την παραδοχή πως αντί για πλέγμα τοποθετείται πλάκα. Η παραδοχή αυτή είναι αρκετά ρεαλιστική λόγω της πυκνότητας των αγωγών του πλέγματος που τελικά λειτουργούν αρκετά παραπλήσια με τη χρήση πλάκας αντίστοιχων διαστάσεων.

2.2.1 Προσομοίωση για τα προς μελέτη συστήματα

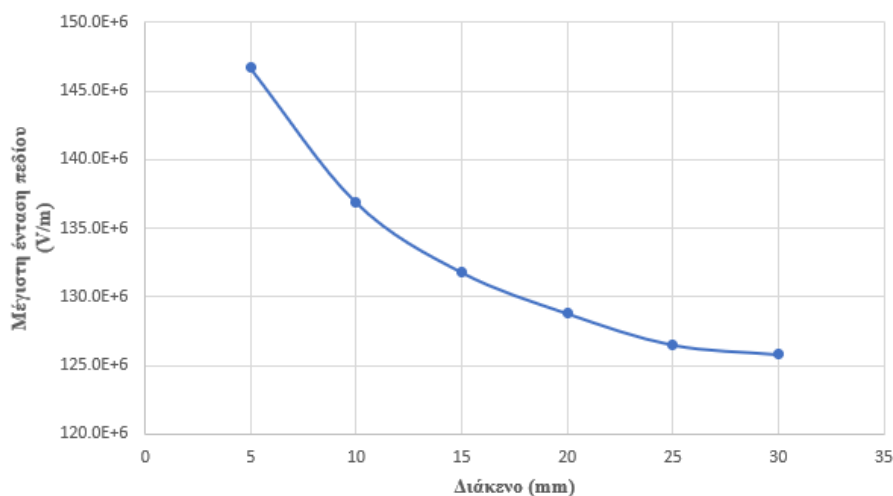
Α. Ακίδα – Πλέγμα

Έγιναν διάφορες προσομοιώσεις Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται το αποτέλεσμα μίας εκ των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση ακίδας-πλέγματος . Η ακίδα φαίνεται πάνω αριστερά και το πλέγμα είναι τοποθετημένο στο κάτω μέρος της απεικονιζόμενης περιοχής (κάτω οριζόντια γραμμή, όπου και προσομοιώνεται ως πλάκα.



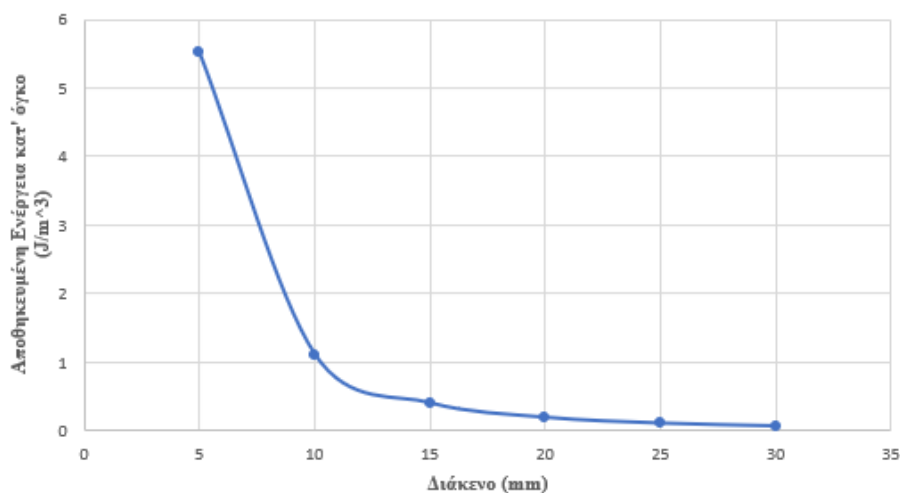
Εικόνα 2.2. Απεικόνιση της κατανομής του δυναμικού (αριστερά) και της κατανομής της έντασης του πεδίου (δεξιά) μέσω του προγράμματος προσομοίωσης, FEMM, για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας με διάκενο 20 mm

Στα Σχήματα 2.1 και 2.2 έχει γίνει ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, για τη μέγιστη ένταση του πεδίου και για τη μέση τιμή της αποθηκευμένης ενέργεια κατ' όγκο.



Σχήμα 2.1. Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης έντασης πεδίου συναρτήσει του διακένου για το σύστημα Ακίδας - Πλάκας

Από το Σχήμα 2.1 φαίνεται ότι κατά την αύξηση του διακένου η μέγιστη ένταση πεδίου μειώνεται, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα πως κατά την αύξηση του διακένου η τάση που απαιτείται για την εκκίνηση του φαινομένου του ιονισμού θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα σύγκρισης μέσης αποθηκευμένης ενέργειας κατ' όγκο συναρτήσει του διακένου για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας

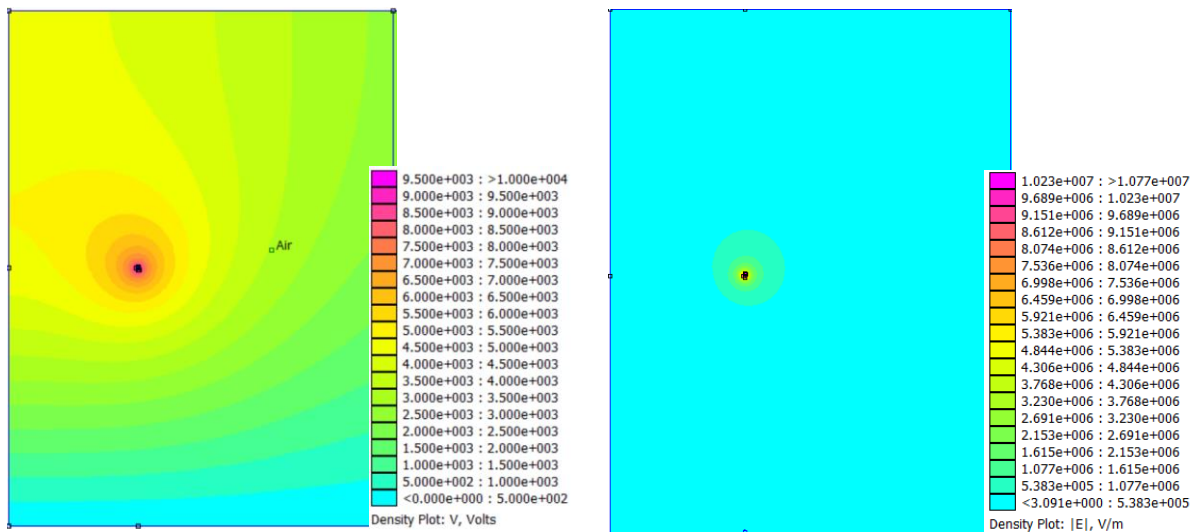
Στο Σχήμα 2.2, παρατηρείται ότι η αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο μειώνεται αρκετά κατά τη μετακίνηση του εκπομπού σε μεγαλύτερα διάκενα. Αυτό είναι αναμενόμενο, διότι συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.1, εφόσον μειώνεται η μέγιστη ένταση του πεδίου κατά την αύξηση της απόστασης, τότε και η ροή του αέρα που θα δημιουργηθεί θα είναι μειωμένη.

B. Πέντε Ακίδες – Πλέγμα

Στην περίπτωση της διάταξης Πέντε Ακίδων – Πλέγματος υπάρχει αδυναμία αναπαράστασης της στο πρόγραμμα προσομοίωσης, διότι δεν παρουσιάζει εκ περιστροφής συμμετρία. Οπότε, έγινε μελέτη διαφόρων δημοσιεύσεων οι οποίες επικεντρώνονταν στη χρήση αρκετών ακίδων σε σχηματισμό δακτυλίου ή σταυρού, ως ηλεκτρόδιο εκπομπού [1, 59, 63], που οδήγησαν στην εύρεση της τελικής μορφής της διάταξης Πέντε Ακίδων – Πλέγματος.

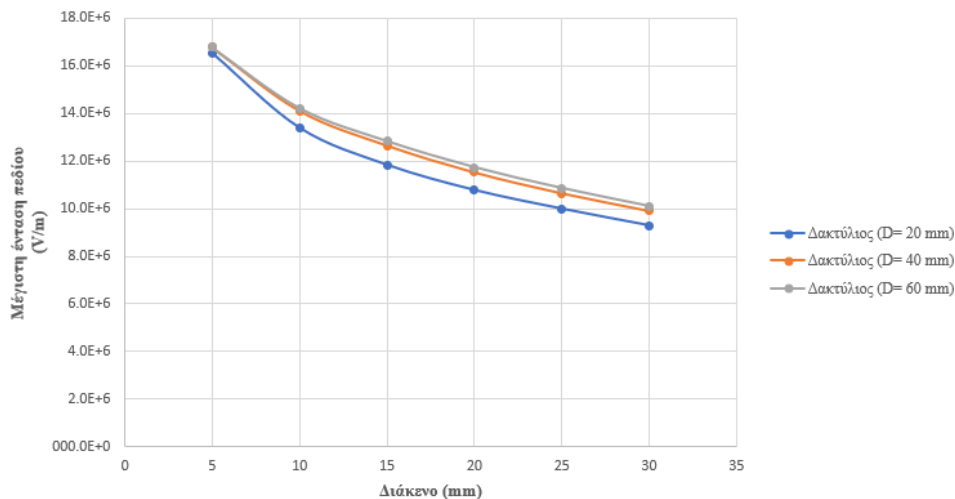
Γ. Δακτύλιος - Πλέγμα

Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται το αποτέλεσμα μίας εκ των προσομοιώσεων, για δακτύλιο ακτίνας 10 mm και διακένου 20 mm, που πραγματοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία.



Εικόνα 2.3. Απεικόνιση της κατανομής του δυναμικού (αριστερά) και της κατανομής της έντασης του πεδίου (δεξιά) μέσω του προγράμματος προσομοίωσης, FEMM, για το σύστημα Δακτυλίου (ακτίνας 10 mm) – Πλάκας με διάκενο 20 mm

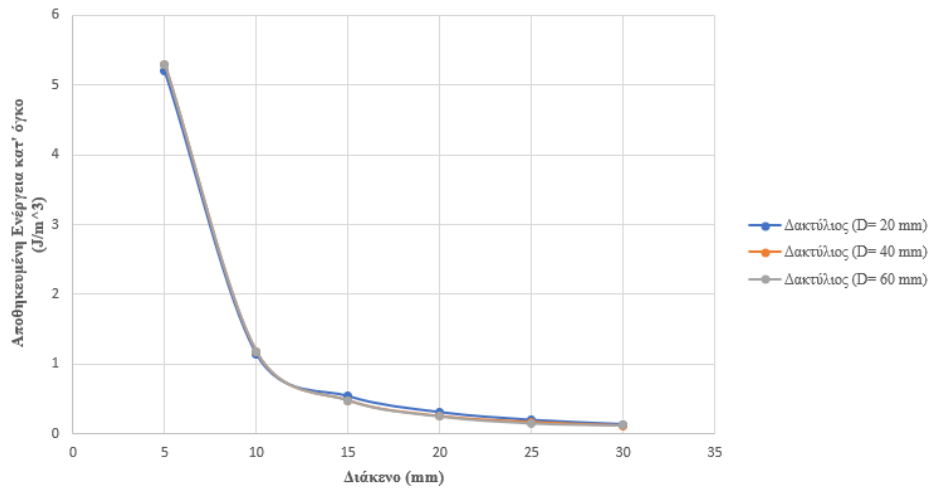
Στα Σχήματα 2.3 και 2.4 έχει γίνει ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για τη μέγιστη ένταση του πεδίου και για τη μέση αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο.



Σχήμα 2.3. Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστης έντασης πεδίου συναρτήσει του διακένου για τα συστήματα Δακτυλίου - Πλάκας

Από το Σχήμα 2.4 φαίνεται ότι σε όλες τις διατάξεις Δακτυλίου – Πλέγματος κατά την αύξηση του διακένου, η μέγιστη ένταση πεδίου μειώνεται, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κατά

την αύξηση του διακένου η τάση που θα απαιτηθεί για την έναρξη του φαινομένου του ιονισμού θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη.

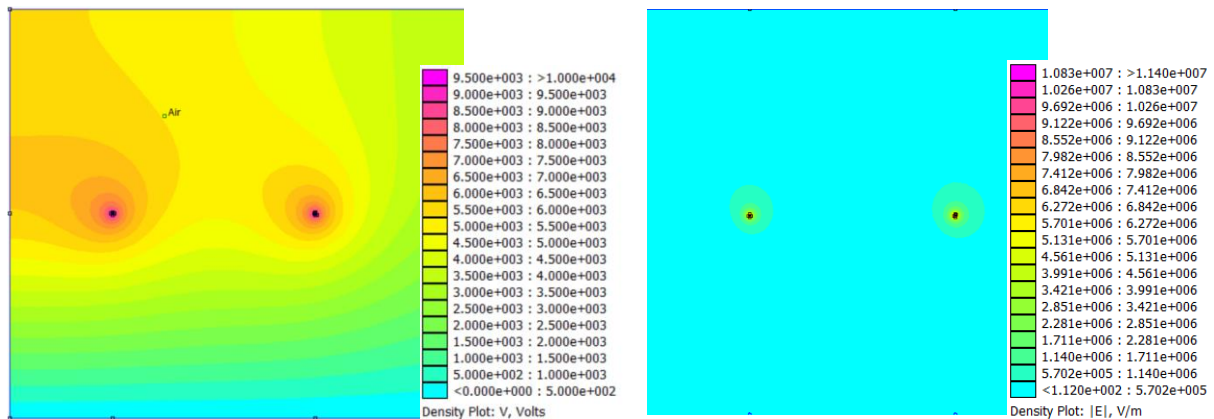


Σχήμα 2.4. Διάγραμμα σύγκρισης μέσης αποθηκευμένης ενέργειας κατ' όγκο συναρτήσει του διακένου για τα συστήματα Δακτυλίου – Πλάκας

Στο Σχήμα 2.4 παρατηρείται ότι η μέση αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο μειώνεται αρκετά κατά τη μετακίνηση του εκπομπού σε μεγαλύτερα διάκενα, δηλαδή εμφανίζεται, ως αναμένεται, παρόμοια συμπεριφορά με τις προηγούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων των παραγράφων.

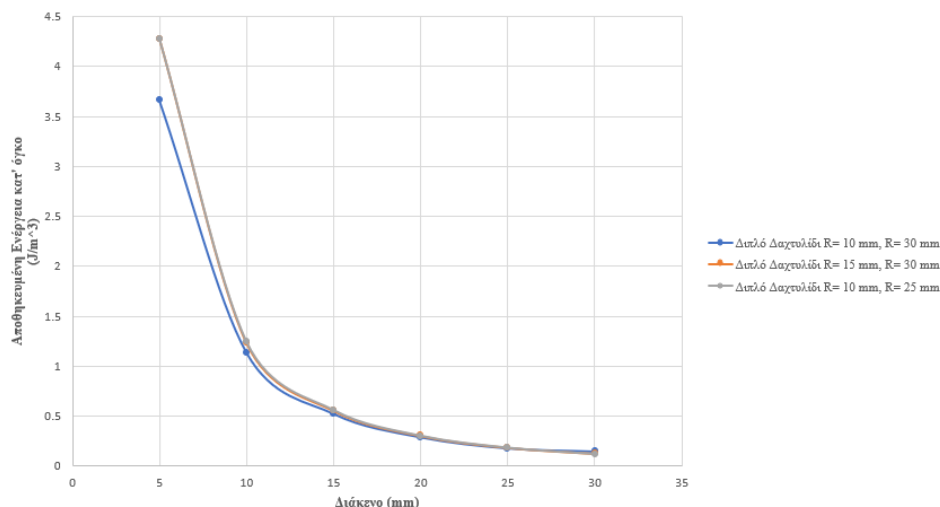
Δ. Διπλός Δακτύλιος - Πλέγμα

Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται το αποτέλεσμα μίας εκ των προσομοιώσεων για Διπλό Δακτύλιο - Πλάκα, όπου ο εσωτερικός δακτύλιος έχει ακτίνα 10 mm και ο εξωτερικός 30 mm.



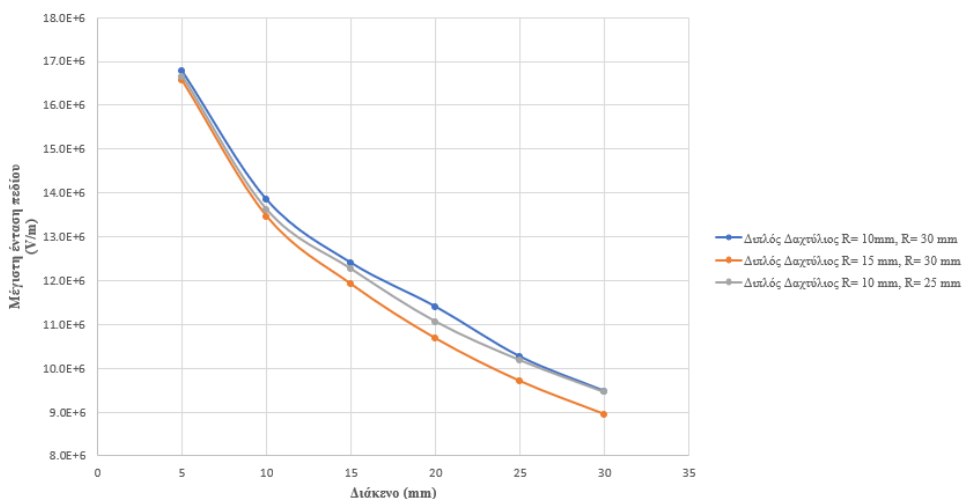
Εικόνα 2.4. Απεικόνιση της κατανομής του δυναμικού (αριστερά) και της κατανομής της έντασης του πεδίου (δεξιά) μέσω του προγράμματος προσομοίωσης, FEMM, για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου (με εσωτερική ακτίνα 10 mm και εξωτερική 30 mm) – Πλάκας με διάκενο 20 mm

Στα Σχήματα 2.5 και 2.6 έχει γίνει ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την αποθηκευμένη ενέργεια και για την κατ' όγκο μέγιστη ένταση του πεδίου.



Σχήμα 2.5. Διάγραμμα σύγκρισης της μέσης αποθηκευμένης ενέργειας κατ' όγκο συναρτήσει του διακένου για τα συστήματα Διπλού Δακτυλίου – Πλάκας

Στο Σχήμα 2.5 παρατηρείται ότι η αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο μειώνεται αρκετά κατά τη μετακίνηση του εκπομπού σε μεγαλύτερα διάκενα. Αυτό είναι λογικό, αφού όπως έχει φανεί και στα προηγούμενα γραφήματα, καθώς όταν αυξάνεται το διάκενο, μειώνεται σημαντικά η μέση αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο.



Σχήμα 2.6. Διάγραμμα σύγκρισης της μέγιστης έντασης πεδίου των τριών διαφορετικών διπλών δακτυλίων συναρτήσει του διακένου

Στο Σχήμα 2.6 παρατηρείται ότι το ηλεκτρόδιο που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μέγιστη ένταση πεδίου είναι αυτό με ακτίνα εσωτερικού δακτυλίου ίση με 10 mm και του εξωτερικού 30 mm. Αυτό δικαιολογείται, καθώς η απόσταση μεταξύ των δύο δακτυλίων είναι η μεγαλύτερη (20 mm). Στις άλλες δύο περιπτώσεις, που η απόσταση μεταξύ των δύο δακτυλίων

είναι 15 mm, όσο αυξάνεται το διάκενο αρχίζει ο ένας δακτύλιος να επηρεάζει το πεδίο του άλλου, με συνέπεια τη μείωση της τιμής της μέγιστης έντασης του πεδίου. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε να μετρηθεί μόνο ο διπλός δακτύλιος με εσωτερική ακτίνα 10 mm και εξωτερική ακτίνα 30 mm, διότι οι άλλοι δύο θεωρήθηκαν λιγότερο αποδοτικοί .

2.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί

Ένας τρόπος ελέγχου των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από τις προσομοιώσεις είναι η χρήση θεωρητικών τύπων [91] για την εύρεση της μέγιστης έντασης του πεδίου (εξισώσεις (18), (21)). Επίσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής χρησιμοποίησης, δηλαδή της ομοιογένειας του συστήματος (εξισώσεις (19), (20), (22)), κατά τη μεταβολή του διακένου.

2.3.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας

Εξίσωση για την εύρεση της μέγιστης έντασης πεδίου για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας:

$$E_{\max} = \frac{2 \cdot V}{R \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot d}{R}\right)} \quad (18)$$

όπου, E_{\max} (V/m) είναι η μέγιστη ένταση πεδίου, V (V) είναι η εφαρμοζόμενη τάση, R (m) είναι η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας και d (m) είναι το διάκενο, δηλαδή η απόσταση μεταξύ της ακίδας και της πλάκας.

Εξίσωση για την εύρεση της μέσης έντασης του πεδίου για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας:

$$E_m = \frac{V}{d} \quad (19)$$

όπου, E_m (V/m) είναι η μέση ένταση του πεδίου, V (V) είναι η εφαρμοζόμενη τάση και d (m) είναι το διάκενο.

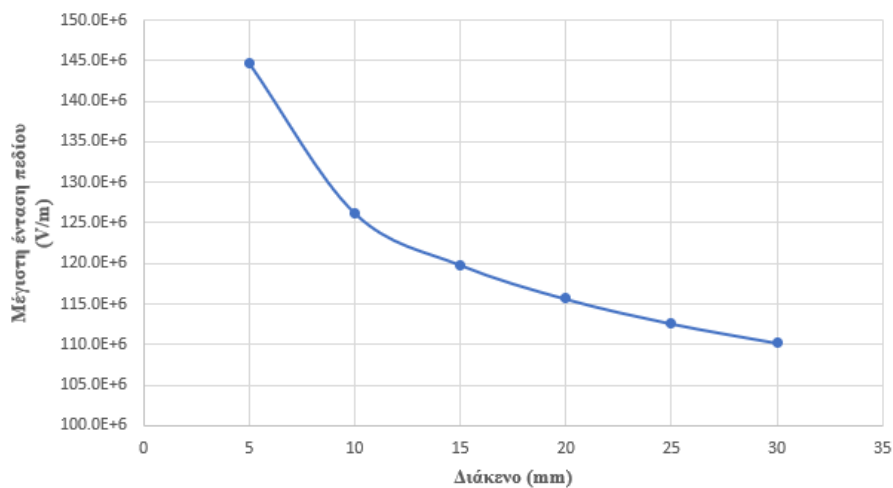
Εξίσωση για την εύρεση του συντελεστή χρησιμοποίησης για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας:

$$n = \frac{R \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot d}{R}\right)}{2 \cdot d} = \frac{E_m}{E_{\max}} \quad (20)$$

όπου, n είναι ο συντελεστής χρησιμοποίησης, R (m) είναι η ακτίνα καμπυλότητας, d (m) είναι το διάκενο, E_m (V/m) είναι η μέση ένταση του πεδίου και E_{\max} (V/m) είναι η μέγιστη ένταση του πεδίου.

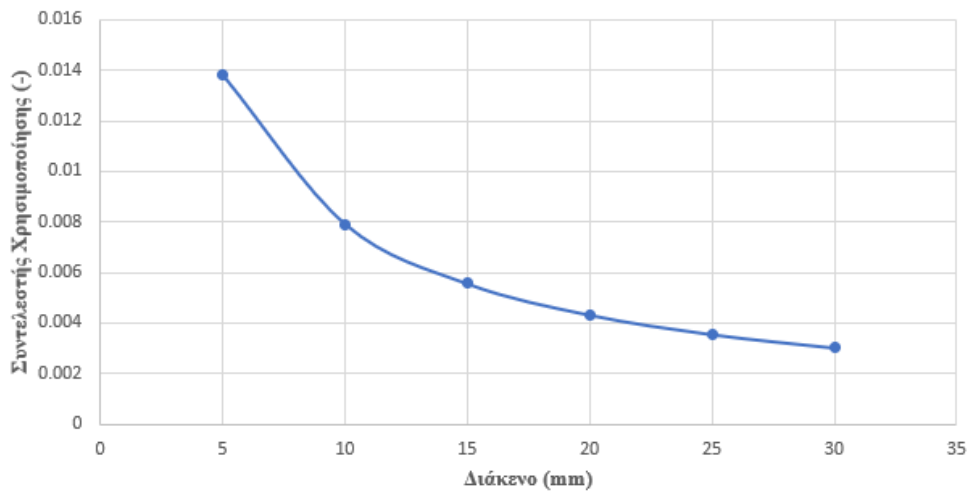
Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (18)-(20) έγιναν οι θεωρητικοί υπολογισμοί της μέγιστης έντασης πεδίου και του συντελεστή χρησιμοποίησης, που συνοψίζονται στα Σχήματα 2.7 και 2.8.

Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται ότι η ένταση του πεδίου μειώνεται κατά την αύξηση του διακένου, κάτι που, όπως εξηγήθηκε στο ενότητα 2.2, είναι αναμενόμενο. Η τάση που οδηγεί στην έναρξη του ιονισμού είναι μικρή για κοντινές αποστάσεις, ενώ με την αύξηση του διακένου χρειάζεται μεγαλύτερη τιμή τάσης για τον ιονισμό του αέρα.



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα της μέγιστης έντασης πεδίου για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας συναρτήσει του διακένου

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται ότι κατά την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, εκπομπού και συλλέκτη, ο συντελεστής χρησιμοποίησης μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι παράλληλα με τη μείωση της μέγιστης έντασης, υπάρχει και μείωση της μέσης έντασης. Μία ακόμη παρατήρηση, είναι ότι όσο αυξάνεται το διάκενο, το πεδίο γίνεται πιο ανομοιογενές, άρα και η απαιτούμενη τάση για να γίνει διάσπαση θα είναι αυξημένη (κατ' απόλυτη τιμή). Αυτό είναι θετικό, καθώς αυξάνει το εύρος της περιοχής ιονισμού.



Σχήμα 2.8. Διάγραμμα του συντελεστή χρησιμοποίησης για το σύστημα Ακίδας – Πλάκας συναρτήσει του διακένου

2.3.2 Θεωρητικοί υπολογισμοί για το σύστημα Δακτυλίου – Πλάκας

Για τους υπολογισμούς του συστήματος Δακτυλίου – Πλάκας χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις που ισχύουν για το σύστημα Ευθύγραμμου Αγωγού – Πλάκας. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα θα έχουν μια μικρή απόκλιση, η οποία δικαιολογείται λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω παραδοχή. Επίσης, όπως είναι λογικό τα αποτελέσματα μεταξύ των διαφορετικών διαμέτρων των δακτυλίων δεν παρουσιάζουν κάποια διαφορά.

Η εξίσωση για την εύρεση της μέγιστης έντασης πεδίου για το σύστημα Ευθύγραμμου Αγωγού – Πλάκας είναι:

$$E_{\max} = \frac{0.9 \cdot V}{R \cdot \ln\left(\frac{R+d}{R}\right)} \quad (21)$$

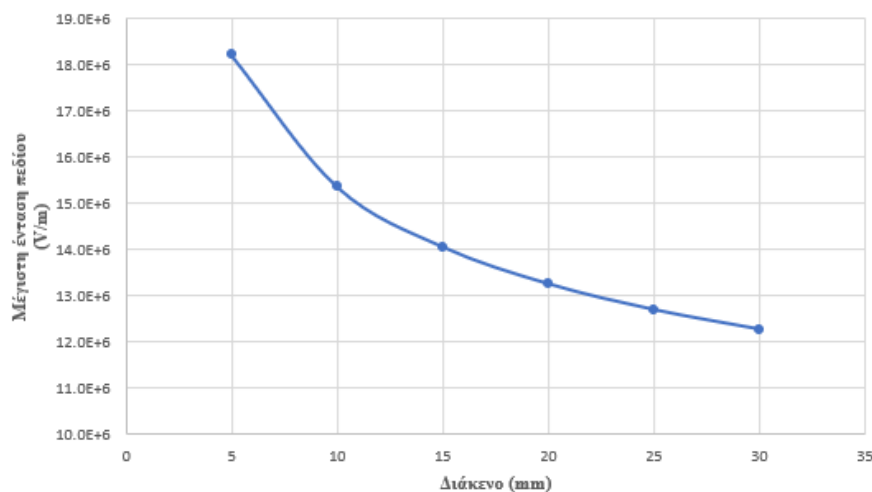
όπου, E_{\max} (V/m) είναι η μέγιστη ένταση του πεδίου, V (V) είναι η εφαρμοζόμενη τάση, R (m) είναι η ακτίνα του ευθύγραμμου αγωγού (είναι η ίδια με τον αγωγό του δακτυλίου) και d (m) είναι το διάκενο, δηλαδή η απόσταση μεταξύ της ακίδας και της πλάκας.

Η εξίσωση για την εύρεση της μέσης έντασης του πεδίου είναι γενική, εξίσωση (19), οπότε ισχύει και για Δακτύλιο – Πλάκας.

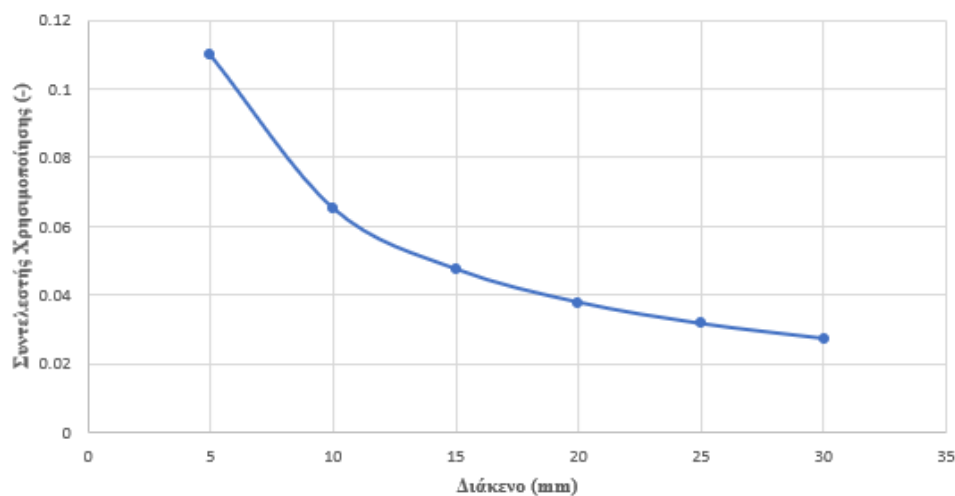
Η εξίσωση για την εύρεση του συντελεστή χρησιμοποίησης για το σύστημα Ευθύγραμμου Αγωγού – Πλάκας είναι:

$$\eta = \frac{R \cdot \ln\left(\frac{R+d}{R}\right)}{0.9 \cdot d} = \frac{E_m}{E_{\max}} \quad (22)$$

όπου, η είναι ο συντελεστής χρησιμοποίησης, R (m) είναι η ακτίνα του ευθύγραμμου αγωγού (είναι η ίδια με τον αγωγό του δακτυλίου), d (m) είναι το διάκενο, E_m (V/m) είναι η μέση ένταση του πεδίου και E_{\max} (V/m) είναι η μέγιστη ένταση του πεδίου.



Σχήμα 2.9. Διάγραμμα της μέγιστης έντασης πεδίου για τους δακτυλίους συναρτήσει του διακένου



Σχήμα 2.10. Διάγραμμα του συντελεστή χρησιμοποίησης για τους δακτυλίους συναρτήσει του διακένου

Από το Σχήμα 2.9 φαίνεται ότι η ένταση του πεδίου μειώνεται κατά την αύξηση του διακένου. Συνέπεια της προηγούμενης παρατήρησης είναι ότι η τάση που θα οδηγεί στην έναρξη του ιονισμού είναι μικρή για κοντινές αποστάσεις, ενώ κατά την αύξηση του διακένου χρειάζεται να αυξηθεί κι αυτή. Επίσης, από το Σχήμα 2.10 φαίνεται ότι κατά την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, εκπομπού και συλλέκτη, ο συντελεστής χρησιμοποίησης μειώνεται. Αυτό, σημαίνει ότι παράλληλα με τη μείωση της μέγιστης έντασης, υπάρχει και μείωση της μέσης έντασης. Μία επιπλέον παρατήρηση είναι ότι όσον αυξάνεται το διάκενο, το πεδίο γίνεται πιο ανομοιογενές, άρα και η απαιτούμενη τάση για να γίνει διάσπαση είναι αυξημένη (κατ' απόλυτη τιμή). Αυτό είναι πολύ θετικό, καθώς αυξάνει το εύρος της περιοχής ιονισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Πειραματική διαδικασία

3.1 Οργανολογία

Για την παρακολούθηση και καταγραφή της λειτουργίας των ηλεκτροϋδροδυναμικών διατάξεων χρειάστηκαν τα εξής όργανα:

- Μικροσκόπιο OEM BP001 500x Zoom (Εικόνα 3.1)



Εικόνα 3.1. Μικροσκόπιο OEM BP001 500x Zoom

- Παχύμετρο POWERFIX Z22855 με ακρίβεια μέτρησης για μέτρηση μήκους 20 μm και για μέτρηση βάθους 40 μm (Εικόνα 3.2)



Εικόνα 3.2. Παχύμετρο POWERFIX Z22855

- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος Matsusada Precision W Series (Εικόνα 3.3)

- Πολύμετρο Norma LP10 (Εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.3. Τροφοδοτικό Matsusaba Precision W Series μαζί με το πολύμετρο Norma LP10

- Γάντζος γείωσης που συνδέεται με την γείωση του τροφοδοτικού (Εικόνα 3.4)



Εικόνα 3.4. Γάντζος γείωσης

- Αισθητήρας υψηλής τάσης Coline HV40B 1000:1 με ακρίβεια [91]α 1 % (Εικόνα 3.5)



Εικόνα 3.5. Probe Υψηλής Τάσης τύπου Coline HV40B 1000:1

- Δύο πολύμετρα Thurlby 1503, όπου το ένα χρησιμοποιήθηκε ως αμπερόμετρο υψηλής ακρίβειας με ευαισθησία 1 nA και το άλλο ως βολτόμετρο (Εικόνα 3.6 και 3.7)



Εικόνα 3.6. Αμπερόμετρο ακριβείας Thurlby 1503



Εικόνα 3.7. Βολτόμετρο Thurlby 1503

- Ανεμόμετρο RTM AM-4836V με ακρίβεια 2 % (Εικόνα 3.8 και 3.9)



Εικόνα 3.8. Ανεμόμετρο RTM AM-4836V



Εικόνα 3.9. Ο Αισθητήρας μέτρησης του ανεμομέτρου RTM AM-4836V

3.2 Πειραματική διάταξη

3.2.1 Χώρος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων

Για τη μελέτη της διάταξης μίας EHD αντλίας κατασκευάστηκε πρωτότυπος κυλινδρικός θάλαμος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων (Εικόνα 3.10) από PVC.



Εικόνα 3.10. Κυλινδρικός θάλαμος για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας

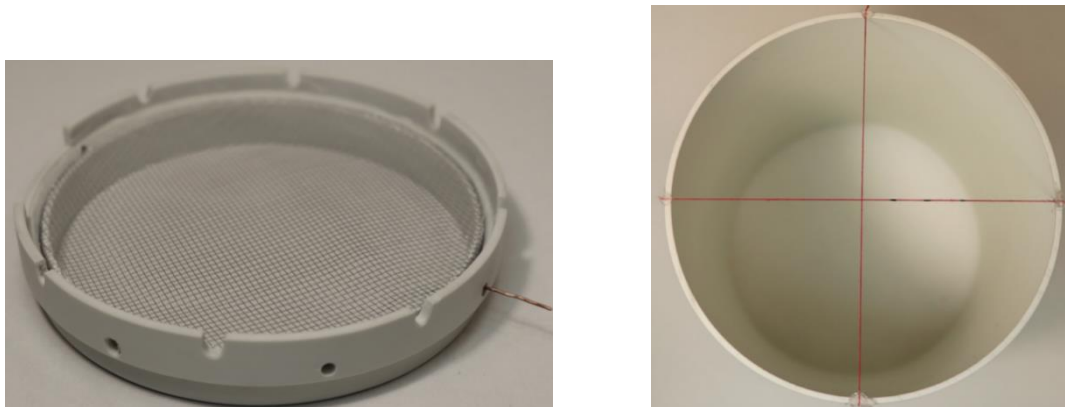
Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3.11, φαίνεται η περιοχή τοποθέτησης των ηλεκτροδίων του εκπομπού, όπου περιλαμβάνει έναν μηχανισμό χειροκίνητης αλλαγής θέσης (τύπου σύρτη). Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα αλλαγής της απόστασης του ηλεκτροδίου του εκπομπού από το ηλεκτρόδιο συλλέκτη. Επισημαίνεται ότι στο σημείο του κινούμενου μηχανισμού υπάρχει μία οπή μέσα από την οποία, κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, θα περάσει ο αγωγός του εκάστοτε ηλεκτροδίου.



Εικόνα 3.11. Κυλινδρική περιοχή τοποθέτησης των ηλεκτροδίων του εκπομπού

Στη συνέχεια με τη χρήση ενός κυλίνδρου ίδιας διαμέτρου με της Εικόνας 3.11 και ενός μικρότερου δακτυλίου που τοποθετήθηκε εσωτερικά, μπορεί να τεντωθεί το πλέγμα. Επίσης, στην εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου, δημιουργήθηκε ένας δακτύλιος, ώστε να δίνεται η δυνατότητα αφαίρεσης και επανατοποθέτησης της κυλινδρικής περιοχής των ηλεκτροδίων του εκπομπού. Επίσης, κοιτάζοντας την Εικόνα 3.12(α) στα δεξιά της κατασκευής που

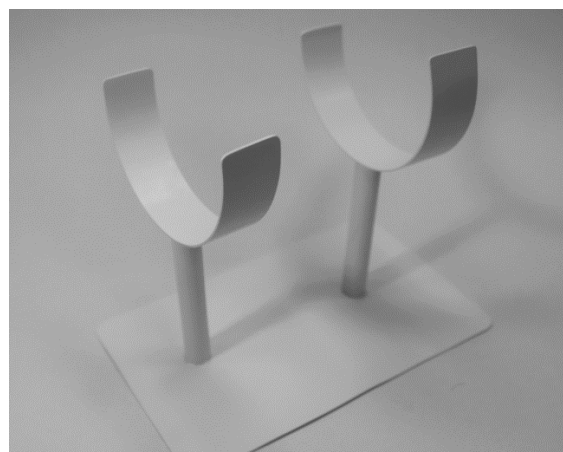
περιεγράφηκε, βρίσκεται ένας χάλκινος αγωγός, ο οποίος έρχεται σε επαφή με το πλέγμα, ώστε κατά την πειραματική διαδικασία να μπορεί να συνδεθεί το μηδενικό δυναμικό.



Εικόνα 3.12. (α) Πλέγμα προσαρτημένο πάνω στον κυλινδρικό σωλήνα, (β) Σημείο εξόδου του ιονισμένου αέρα

Στην Εικόνα 3.12(β), φαίνεται η έξοδος του σωλήνα οδήγησης όπου έχει τοποθετηθεί κλωστή για την εύρεση του κέντρου. Ακόμα, φαίνεται ότι στη μία κλωστή έχει γίνει σημείωση τριών σημείων με μαύρο χρώμα. Ο λόγος που έχει χρωματιστεί η μία κλωστή είναι για να μπορούν να εντοπίζονται οι διάφορες θέσεις τοποθέτησης του ανεμομέτρου για τη μέτρηση της ταχύτητας του ιοντικού ανέμου σε διάφορες θέσεις της διατομής. Πιο συγκεκριμένα, αν θεωρηθεί το κέντρο ως το σημείο μηδέν, το πρώτο μαύρο σημείο απέχει 10 mm, το δεύτερο 20 mm και το τρίτο 30 mm από το κέντρο. Αυτές είναι οι αποστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μελέτη των διάφορων διατάξεων ηλεκτροδίων. Για παράδειγμα το σημείο των 10 mm είναι η ακτίνα του δακτυλίου με διάμετρο 20 mm.

Τέλος, στην Εικόνα 3.13, φαίνεται η βάση που είναι κατασκευασμένη κι αυτή από PVC, ώστε να τοποθετείται πάνω σ' αυτήν ο κυλινδρικός θάλαμος.



Εικόνα 3.13. Η βάση του κυλινδρικού θαλάμου

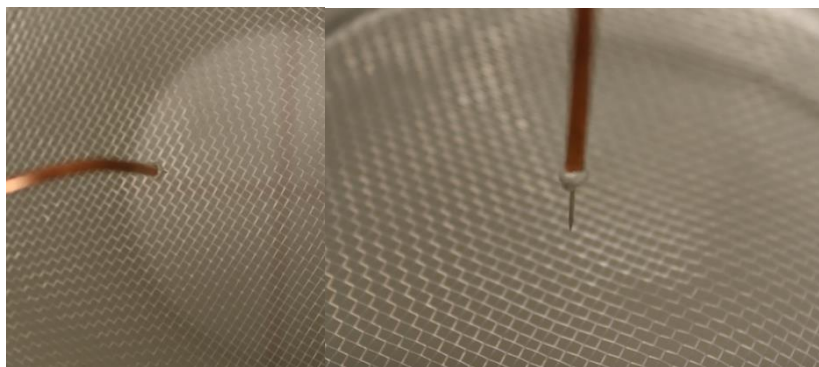
3.2.2 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Η συγκεντρωτική παρουσίαση των τύπων διατάξεων των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζεται στον Πίνακα 2.1.

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ως ηλεκτρόδιο συλλέκτη έχει αποστάσεις κατά τον διαμήκη και τον εγκάρσιο άξονα 2 mm, το μέγεθος της διαμέτρου του αγωγού είναι 220 μm και το υλικό κατασκευής είναι σίδηρος γαλβανισμένος.

Επισημαίνεται ότι όλα τα ηλεκτρόδια εκπομπού (ακίδες ή δακτύλιοι) έχουν κολληθεί πάνω σε χάλκινο αγωγό διατομής 4 mm², ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μηχανική στήριξή τους. Σε όλες τις περιπτώσεις ο αγωγός συνδέεται από το πάνω μέρος και έχει δημιουργηθεί ένα γόνατο ενενήντα μοιρών, ώστε να αποφευχθούν οι έντονες γωνίες. Η αιτία που χρησιμοποιήθηκε μεγάλης διατομής αγωγός είναι διότι με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ανάπτυξη τοπικών αυξημένων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του αγωγού, ώστε να περιορίζεται ο ιονισμός αποκλειστικά στην περιοχή γύρω από τον εκπομπό. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο αποφεύγεται γενικά η δημιουργία γωνιών ή ακμών σε άλλα σημεία στο χώρο ώστε να υπάρχει καλός έλεγχος της περιοχής όπου αναπτύσσεται ιονισμός.

Στην Εικόνα 3.14 φαίνεται το ηλεκτρόδιο ακίδα, που είναι από ανοξείδωτο ατσάλι. Παρατηρώντας πιο προσεκτικά, στο σημείο όπου η ακίδα προσαρτάται πάνω στον χάλκινο αγωγό έχει γίνει κατάλληλη σφαιρική διαμόρφωση της κόλλησης από καλά και έπειτα λείανσή της για να μην επηρεάζεται το πεδίο λόγω δημιουργίας μικροπροεξοχών από την κόλληση.



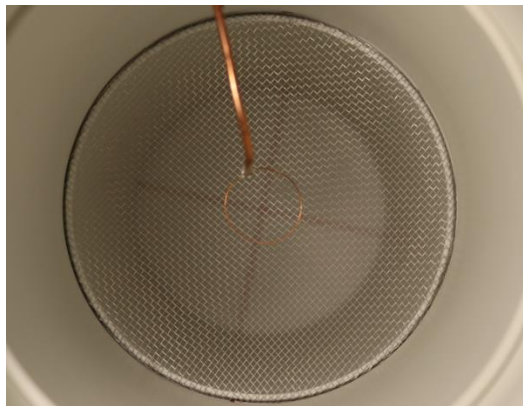
Εικόνα 3.14. Ηλεκτρόδιο ακίδα τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm

Το ηλεκτρόδιο με τις πέντε ακίδες από ανοξείδωτο ατσάλι, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.15, έχει μία ακίδα στο κέντρο και οι άλλες τέσσερις έχουν τοποθετηθεί πάνω σ' έναν χάλκινο αγωγό διατομής 6 mm^2 , ο οποίος έχει σχήμα δακτυλίου με εσωτερική διάμετρο 50 mm . Ο δακτύλιος έχει τρυπηθεί, ώστε οι ακίδες να κολληθούν από το πάνω μέρος.

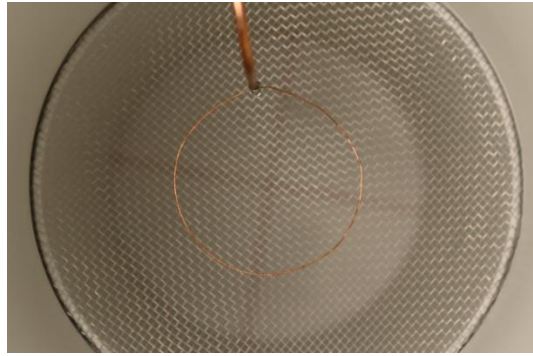


Εικόνα 3.15. Ηλεκτρόδιο με πέντε ακίδες τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm

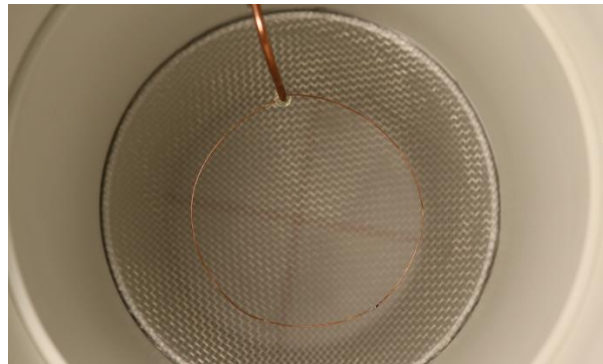
Στις Εικόνες 3.16-3.18 φαίνονται τα πρωτότυπα χάλκινα ηλεκτρόδια δακτυλίου με εσωτερική ακτίνα 20 mm , 40 mm και 60 mm , αντίστοιχα. Επίσης, η ακτίνα του χάλκινου αγωγού των δακτυλίων είναι 136 mm . Οι δακτύλιοι έχουν κολληθεί με κόλληση καλά σε χάλκινο αγωγό διατομής 4 mm^2 .



Εικόνα 3.16. Ηλεκτρόδιο δακτυλίου διαμέτρου 20 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm

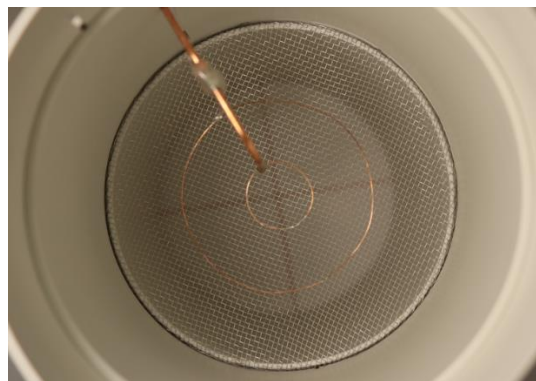


Εικόνα 3.17. Ηλεκτρόδιο δακτυλίου διαμέτρου 40 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm



Εικόνα 3.18. Ηλεκτρόδιο δακτυλίου διαμέτρου 60 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm

Στην Εικόνα 3.19 φαίνεται το πρωτότυπο χάλκινο ηλεκτρόδιο διπλού δακτυλίου με διαμέτρους δακτυλίων 20 mm και 60 mm, κατασκευασμένο όπως και οι παραπάνω δακτύλιοι. Επιπλέον, στο σημείο ένωσης των δύο χάλκινων αγωγών, έχει γίνει κατάλληλη λείανση, ώστε να διατηρείται, κατά το δυνατό, σταθερή η ακτίνα καμπυλότητας.



Εικόνα 3.19. Ηλεκτρόδιο διπλού δακτυλίου διαμέτρου 20 mm και 60 mm τοποθετημένο στον θάλαμο με διάκενο 20 mm

3.3 Πειραματική διαδικασία

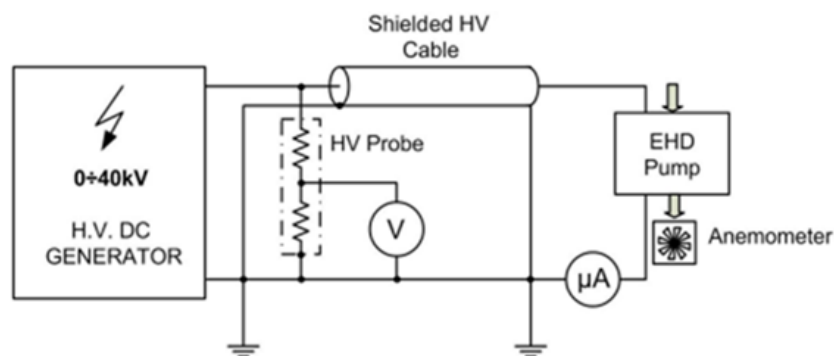
Για την πραγματοποίηση των θεωρητικών υπολογισμών, της προσομοίωσης και της πειραματικής διαδικασίας θα πρέπει να προηγηθεί η ακριβής μέτρηση των αγωγών που

δύνανται να χρησιμοποιηθούν, ώστε να είναι γνωστή η διάμετρός τους. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο (Εικόνα 3.1), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20. Για την εύρεση της διαμέτρου του πλέγματος ή των δακτυλίων έγινε χρήση του παχυμέτρου.



Εικόνα 3.20. Χάλκινος αγωγός διαμέτρου 272μm

Στην συνέχεια, γίνεται η απεικόνιση της υπό σκέψη πειραματικής διάταξης στο πρόγραμμα προσομοίωσης (FEMM). Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν ήταν δυνατό να ορισθεί το ηλεκτρόδιο του συλλέκτη ως πλέγμα και γι' αυτό το λόγο, ως μία καλή προσέγγιση, ορίζεται ως πλάκα σε όλες τις διατάξεις (Ακίδα – Πλάκα, Δακτύλιος – Πλάκα και Διπλός Δακτύλιος – Πλάκα) έχουν γίνει με τον ίδιο τρόπο, οπότε μπορούν να εξαχθούν παρατηρήσεις και συμπεράσματα. Οι αναλύσεις έγιναν για τα διάκενα 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm και 30 mm. Πιο συγκεκριμένα, ως διάκενο ορίζεται η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου του εκπομπού και του ηλεκτροδίου του συλλέκτη. Η δοκιμή στο FEMM κρίνεται επιβεβλημένη, διότι μέσω αυτού μπορεί να βρεθεί η μέγιστη ένταση του πεδίου και η αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο. Αναλυτικότερα, η μέγιστη ένταση του πεδίου σχετίζεται με το πόσο χαμηλή θα πρέπει να είναι η εφαρμοζόμενη τάση, στο ηλεκτρόδιο του εκπομπού, ώστε να υφίσταται ο ιονισμός (όσο πιο μεγάλη η τιμή της έντασης, τόσο πιο γρήγορα θα εμφανίζεται το φαινόμενο του ιονισμού). Η αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο σχετίζεται με τη ροή του αέρα που μπορεί να εμφανιστεί, δηλαδή το πόσο γρήγορα ταξιδεύουν τα θετικά ιόντα (μαζί και τα παρασυρόμενα αφόρτιστα μόρια) από το ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού προς το ηλεκτρόδιο χαμηλού δυναμικού. Οπότε, μέσω του προγράμματος προσομοίωσης έχουν ελεγχθεί όλα τα συμμετρικά συστήματα. Παράλληλα, με τους υπολογισμούς του προγράμματος προσομοίωσης γίνεται και έλεγχος μέσω των θεωρητικών τύπων, ώστε να ελέγχεται η κατά προσέγγιση αντιστοίχιση της μέγιστης έντασης του πεδίου και ο έλεγχος της ανομοιογένειας.

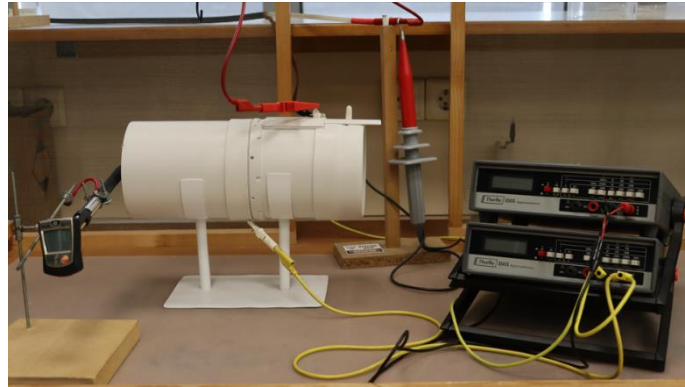


Σχήμα 3.1. Πειραματική διάταξη

Αρχικά, όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.1 χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (Matsusada Precision W Series) για την τροφοδότηση της διάταξης EHD. Επιπλέον, για να επιτευχθεί ο έλεγχος της τάσης γίνεται χρήση ενός ποτενσιόμετρου που διαθέτει το τροφοδοτικό. Στη συνέχεια, για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της υψηλής τάσης με το βολτόμετρο, χρησιμοποιείται ο αισθητήρας υψηλής τάσης (Coline HV40B 40kV 1000:1), ο οποίος περιέχει έναν καταμεριστή τάσης. Αυτό σημαίνει ότι με τη χρήση δύο ωμικών αντιστάσεων επιτυγχάνεται η μείωση της τάσης που θα καταλήξει στο όργανο μέτρησης με γνωστή αναλογία 1000:1. Στην έξοδο του αισθητήρα υψηλής τάσης τοποθετήθηκε το βολτόμετρο (Thurbly 1503). Μετά συλλέκτη της ιοντικής γεννήτριας, δηλαδή στον αγωγό εξόδου από το πλέγμα, συνδέθηκε σε σειρά το αμπερόμετρο υψηλής ακρίβειας (Thurbly 1503). Για την καταγραφή της ταχύτητας του αέρα τοποθετήθηκε το ανεμόμετρο σε απόσταση 18 cm από το πλέγμα.

Κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, το ηλεκτρόδιο συλλέκτη, δηλαδή το πλέγμα, ήταν σταθερό και προσαρτημένο πάνω στον σωλήνα οδήγησης του αέρα. Με την χρήση του παχυμέτρου μετρήθηκαν τα διάκενα που θα ελεγχθούν πειραματικά, δηλαδή 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm και 30 mm. Αυτή η διαδικασία εφαρμόστηκε για κάθε διαφορετικό ηλεκτρόδιο εκπομπού ξεχωριστά, καθώς η απόσταση από το πλέγμα είναι μεταβαλλόμενη κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Επιπλέον, αξίζει να επισημανθεί ότι για κάθε αλλαγή ηλεκτροδίου, διακένου ή οποιασδήποτε μεταβολής του δοκιμίου, ο διακόπτης του τροφοδοτικού υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος τίθεται εκτός λειτουργίας (ανοιχτός διακόπτης) και στη συνέχεια γίνεται χρήση του γάντζου γείωσης για την εκφόρτιση οποιωνδήποτε ηλεκτροστατικών φορτίων, πριν γίνει η οποιαδήποτε επαφή εντός του χώρου των μετρήσεων.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.21 το επόμενο βήμα ήταν να τοποθετηθεί ο κυλινδρικός θάλαμος πάνω στη βάση, να τροφοδοτηθούν τα ηλεκτρόδια και στην έξοδο του θαλάμου να τοποθετηθεί το ανεμόμετρο για την καταγραφή της ταχύτητας του αέρα.



Εικόνα 3.21. Πειραματική συνδεσμολογία έτοιμη για τη λήψη μετρήσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός αποτελεσμάτων

4.1 Πειραματικές μετρήσεις

Η επιλογή των 2 mm, ως διαστάσεων του πλέγματος κατά τον διαμήκη και τον εγκάρσιο άξονά του έγινε με βάση σχετική μελέτη του άρθρου [55].

Κατά τη λήψη των μετρήσεων της τάσης, της έντασης του ρεύματος και της ροής του αέρα καταγράφηκε η μέγιστη τιμή, η ελάχιστη και η μέση παρατηρούμενη τιμή. Η τελευταία ήταν η πιο σημαντική και γι' αυτό όλα τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με βάση αυτή.

Επίσης, στα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται οι όροι μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα και μέση ταχύτητα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου.

- Η μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα αναφέρεται στο σημείο της διατομής του κυλίνδρου που μετρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές της μέσης παρατηρούμενης τιμής της ταχύτητας του αέρα.
- Η μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου είναι ο μέσος όρος των τιμών της ταχύτητας του αέρα που μετρήθηκαν για μία συγκεκριμένη τιμή τάσης (ανάλογα με το βήμα που είχε επιλεγεί), στα διάφορα σημεία τοποθέτησης του ανεμομέτρου στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου.

Ένας ακόμα όρος που θα χρησιμοποιηθεί στα πειραματικά αποτελέσματα είναι η τάση κατωφλίου.

- Τάση κατωφλίου, είναι η ελάχιστη τάση τροφοδοσίας που χρειάζεται να δοθεί στο ηλεκτρόδιο του εκπομπού, για να ξεκινήσει το φαινόμενο κορώνα, δηλαδή να υπάρξει κατανάλωση ρεύματος και ιονισμός του αέρα.

Επιπροσθέτως, για τη δημιουργία των επιπλέον διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις (15), (16) και (17) για διατομή θαλάμου 0.011098 m^2 .

Σε όλα τα παρακάτω διαγράμματα χρησιμοποιείται η ορολογία, που φαίνεται στον Πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1 Απεικονιζόμενα μεγέθη με τα αντίστοιχα σύμβολα και τις μονάδες τους

Σύμβολα	Μονάδες	Μέγεθος
V	kV	Τάση
I	μA	Ένταση του ρεύματος
\sqrt{I}	μA ^{1/2}	Ρίζα της έντασης του ρεύματος
u _m	m/s	Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα
u _{av}	m/s	Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλίνδρου
n _m	-	Βαθμός απόδοσης για τη μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα
n _{av}	-	Βαθμός απόδοσης για τη μέση μετρούμενη ταχύτητα αέρα
V ₀	kV	Τάση κατωφλίου

Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται οι τύποι των διατάξεων και τα διάκενα που μελετήθηκαν.

Πίνακας 4.2 Αναφορά των προς μελέτη διακένων για κάθε τύπο διάταξης

Τύποι διατάξεων	Διάκενα (mm)	Ενότητα
Ακίδα – Πλέγμα	5, 10, 15, 20, 25 και 30	4.1.1
Πέντε Ακίδες – Πλέγμα	10, 15, 20, 25 και 30	4.1.2
Δακτύλιος – Πλέγμα	5, 10, 15, 20, 25 και 30	4.1.3
Διπλός Δακτύλιος - Πλέγμα	10, 15, 20, 25 και 30	4.1.4

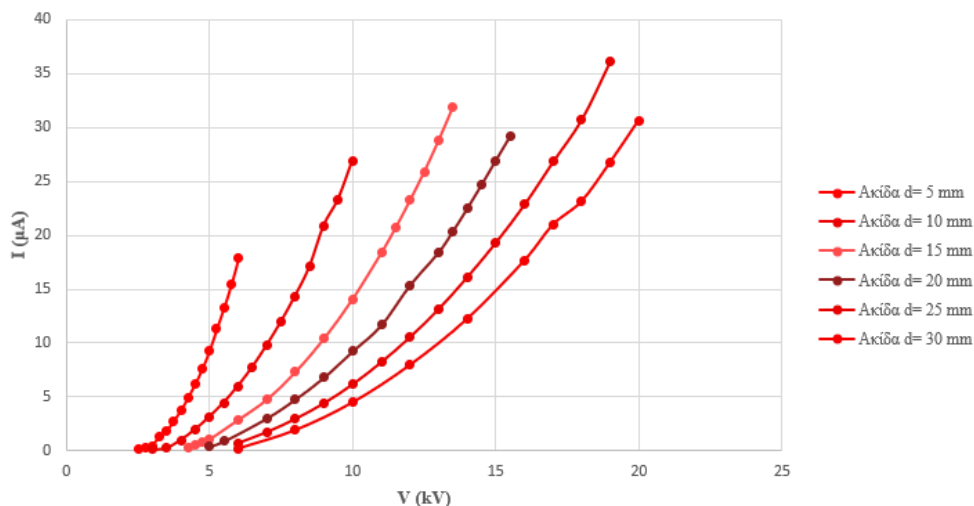
4.1.1 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Ακίδας – Πλέματος

Στον Πίνακα 4.3 γίνεται αναφορά της τάσεως κατωφλίου για τη διάταξη Ακίδα – Πλέγμα, με βάση το εκάστοτε διάκενο.

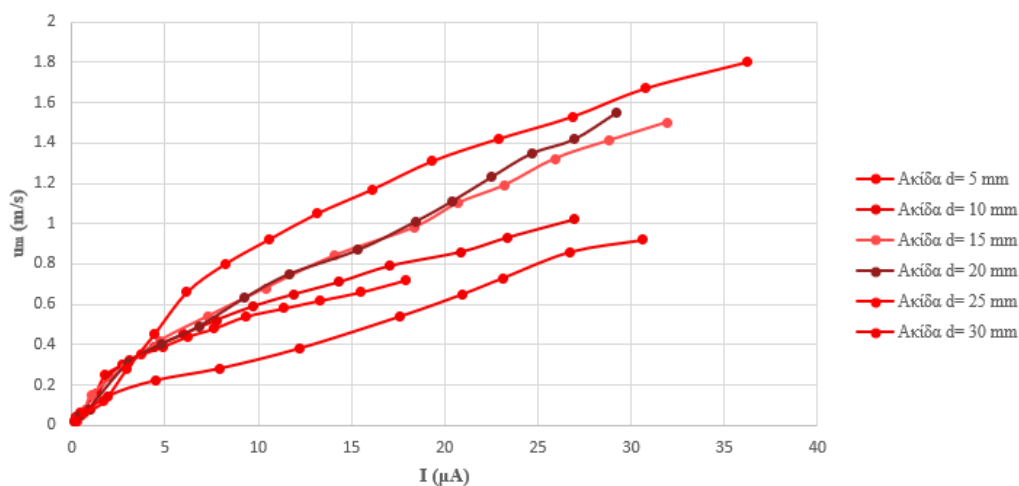
Πίνακας 4.3 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Ακίδας – Πλέματος

Τύπος διάταξης	Διάκενο (mm)	Τάση κατωφλίου, V ₀ (kV)
Ακίδα - Πλέγμα	5	2.50
	10	3.00
	15	4.25
	20	5.00
	25	5.70
	30	6.00

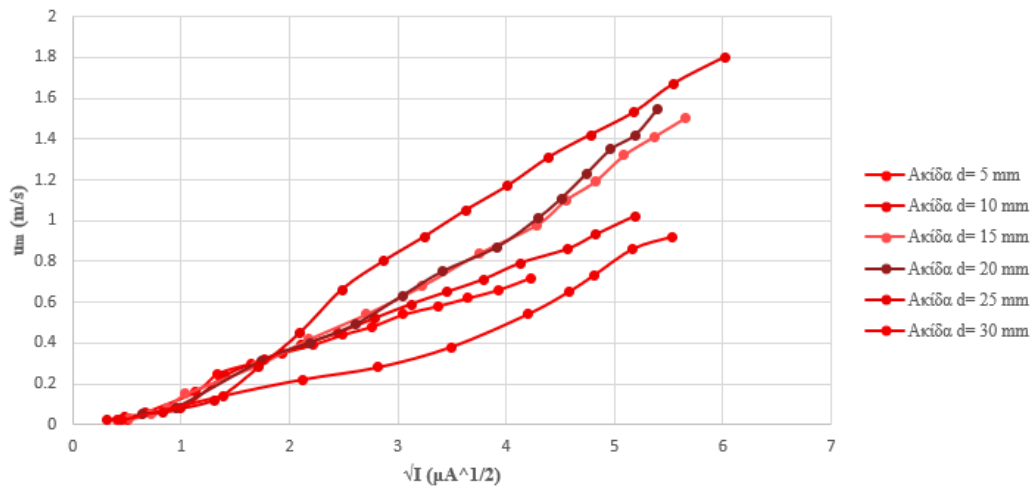
Παρακάτω απεικονίζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα για τη διάταξη Ακίδας – Πλέγματος. Στην ενότητα 4.1 έχει δοθεί η ακριβής περιγραφή της ορολογίας της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα και της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του θαλάμου.



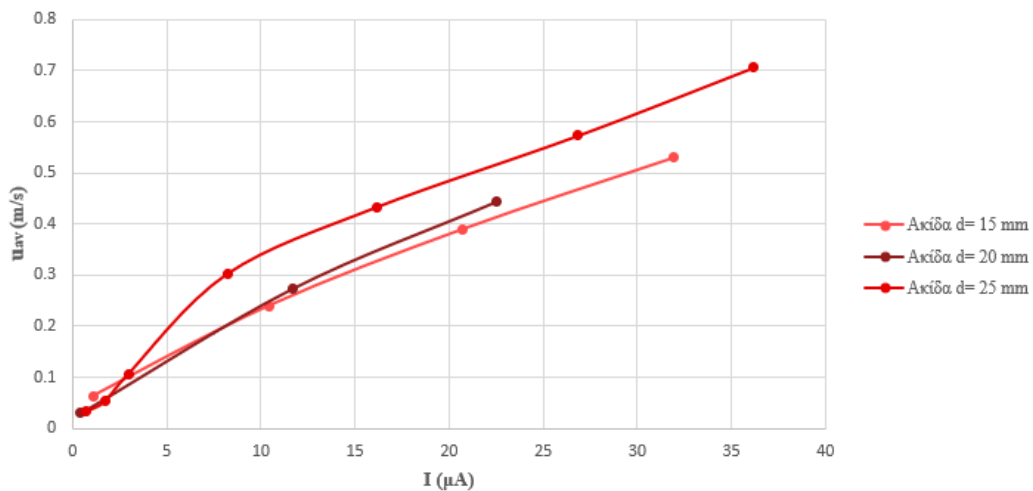
Σχήμα 4.1. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



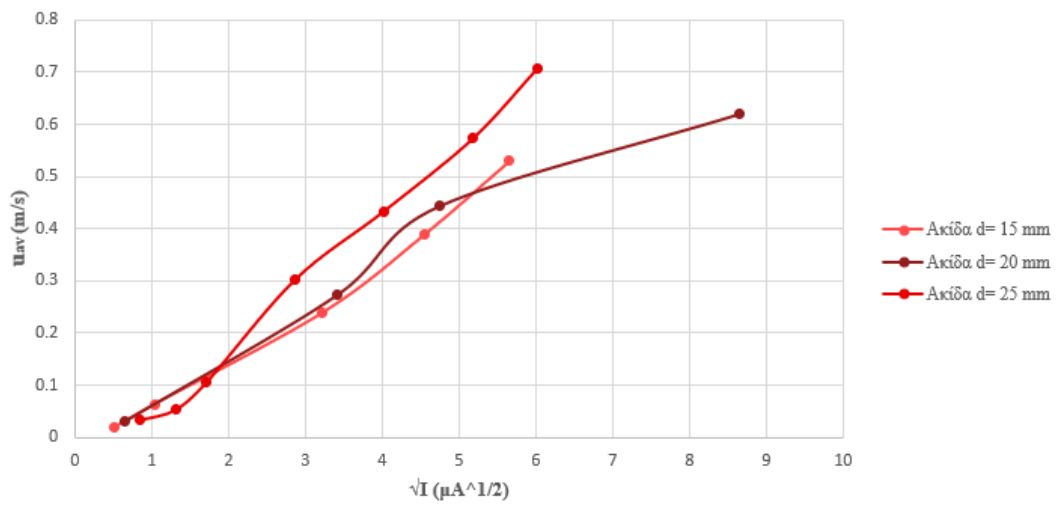
Σχήμα 4.2. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



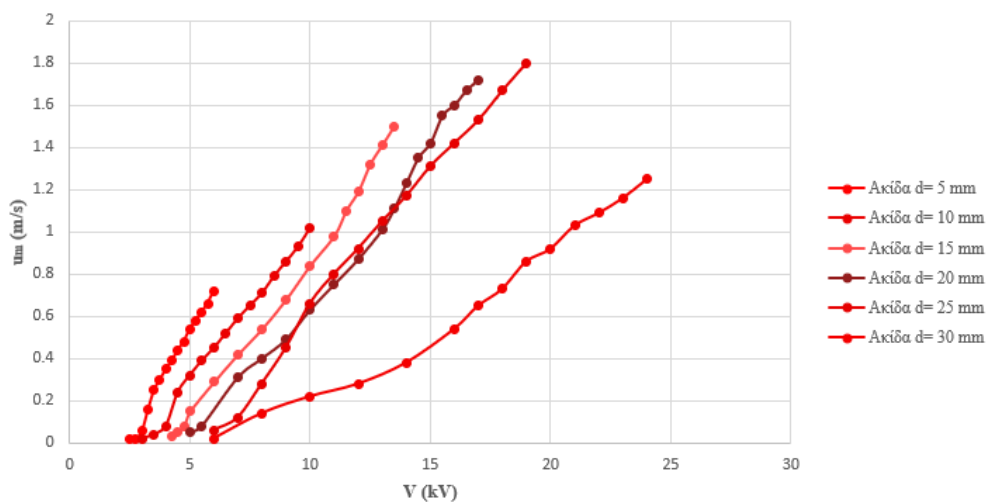
Σχήμα 4.3. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



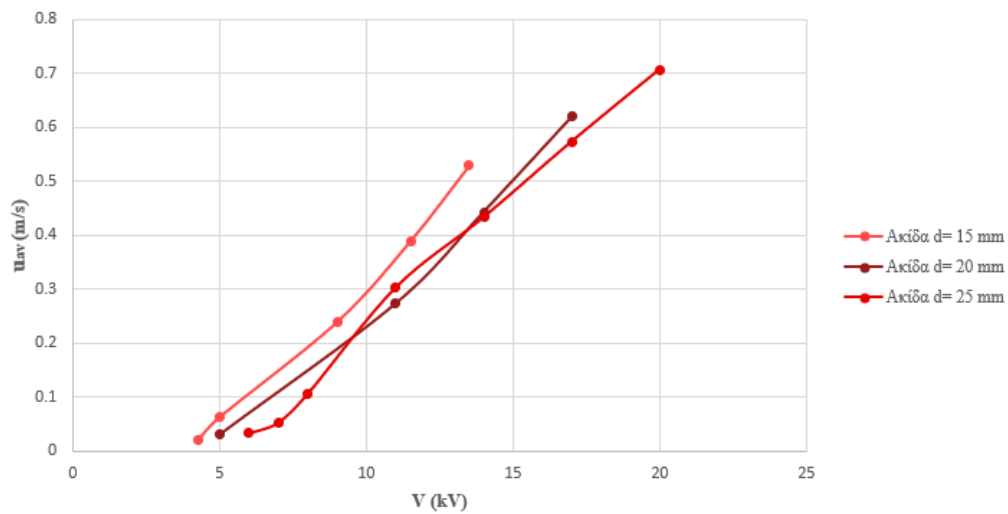
Σχήμα 4.4. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



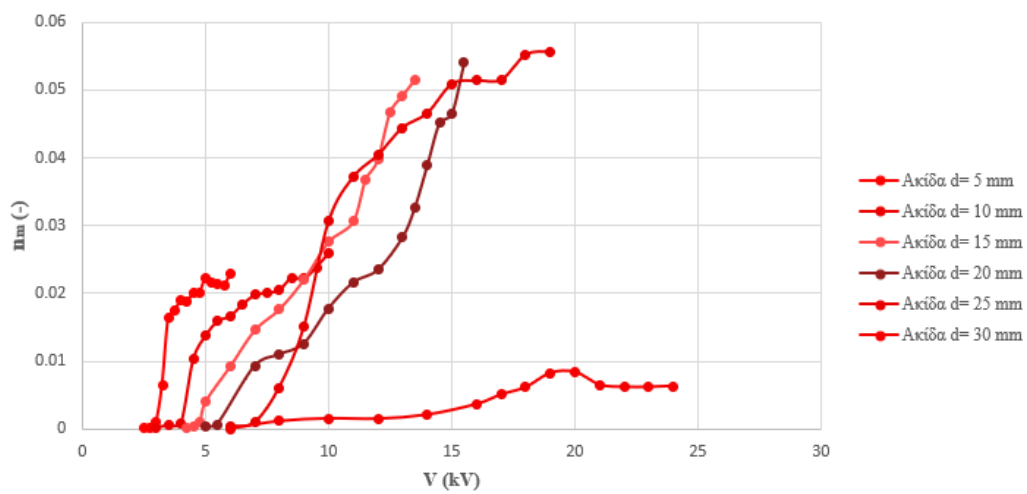
Σχήμα 4.5. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



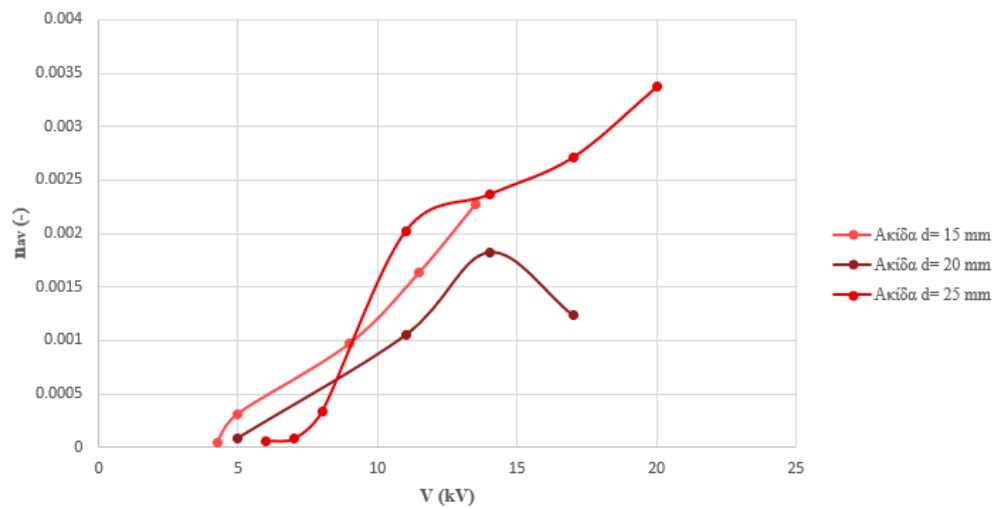
Σχήμα 4.6. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



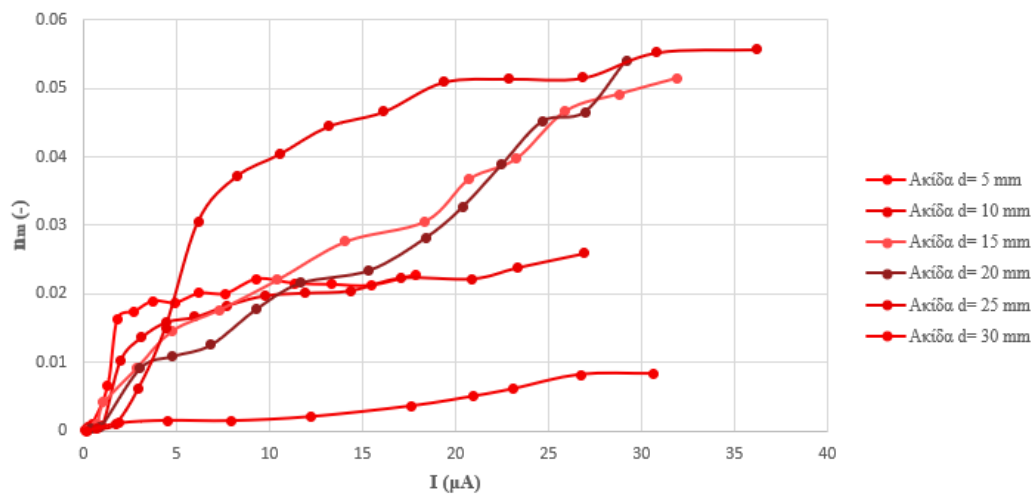
Σχήμα 4.7. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



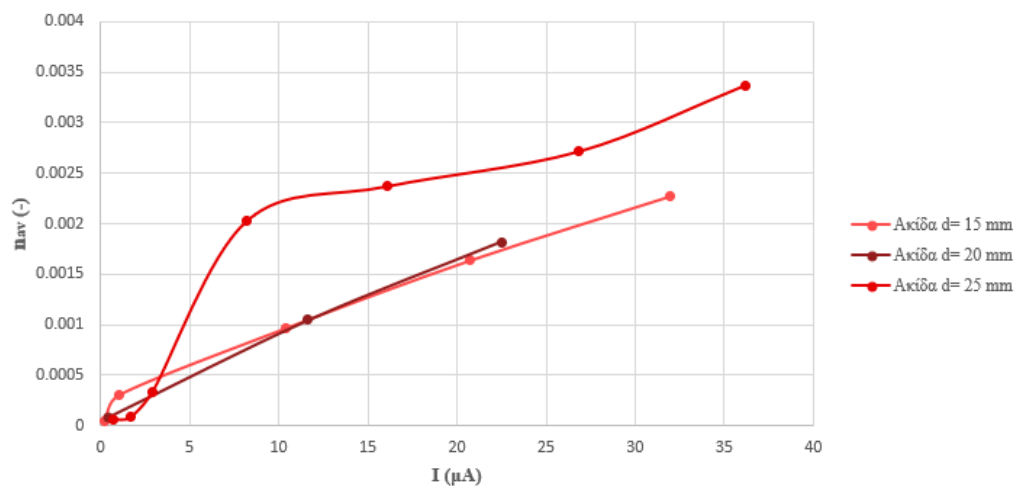
Σχήμα 4.8. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



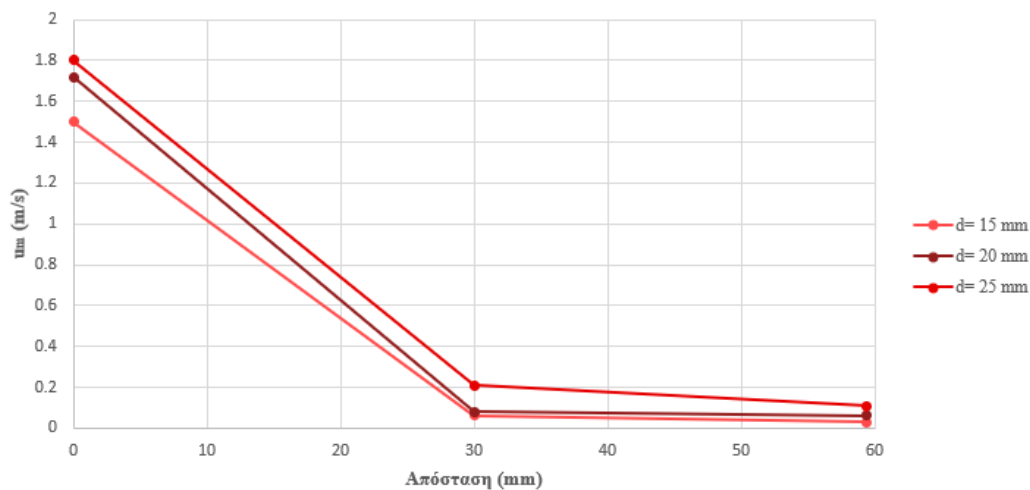
Σχήμα 4.9. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 4.10. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 4.11. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 4.12. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Ακίδων – Πλέγματος

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ότι το ρεύμα που απαιτείται είναι αρκετά χαμηλό, αλλά και η τάση που χρειάζεται για την έναρξη του φαινομένου του ιονισμού είναι πολύ χαμηλή. Όπως εξηγήθηκε στις ενότητες 2.2 και 2.3, το σύστημα Ακίδας – Πλέγματος εμφανίζει πολύ υψηλή μέγιστη ένταση πεδίου. Έχοντας υπόψη το συμπέρασμα των προηγούμενων ενοτήτων μπορεί

να γίνει αντιληπτό ότι με υψηλή ένταση πεδίου, η τάση που χρειάζεται για να ξεκινήσει ο ιονισμός είναι πολύ χαμηλή. Επίσης, στα Σχήματα 4.8 και 4.10 φαίνεται ο αρκετά υψηλός βαθμός απόδοσης του συγκεκριμένου συστήματος, με βάση τη μέγιστη μέση μετρούμενη ταχύτητα του αέρα. Όμως, αυτό, έρχεται σε μεγάλη αντίθεση με τις τιμές του βαθμού απόδοσης στο μήκος της διατομής, όπου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.9 και 4.11, είναι αρκετά μειωμένος. Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και εξηγείται στο Σχήμα 4.12, καθώς παρουσιάζεται το πόσο πολύ μειώνεται η ταχύτητα του αέρα στα 30 mm της ακτίνας του κυλινδρικού θαλάμου. Μάλιστα, στην άκρη του θαλάμου ο αέρας είναι ελάχιστος, δηλαδή πρακτικά μηδενικός.

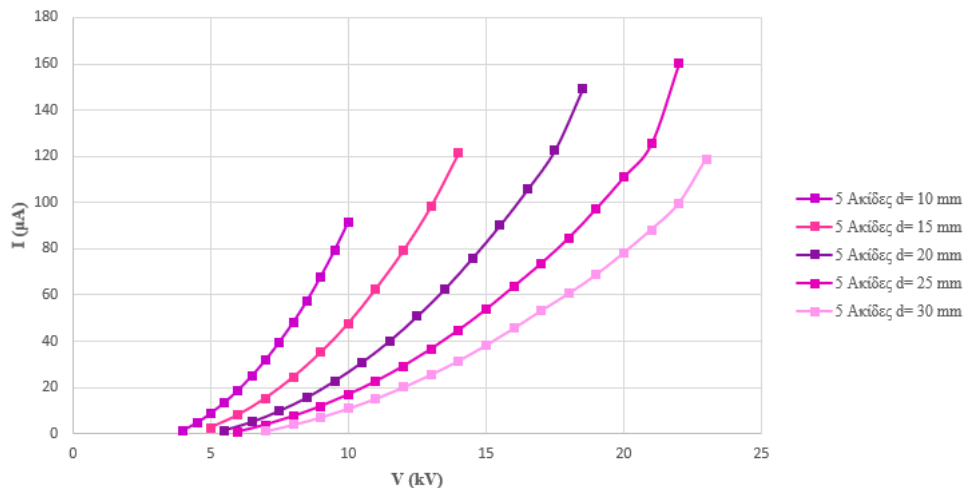
4.1.2 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

Στον Πίνακα 4.4 γίνεται αναφορά της τάσεως κατωφλίου για τη διάταξη Πέντε Ακίδων – Πλέγματος, με βάση το εκάστοτε διάκενο.

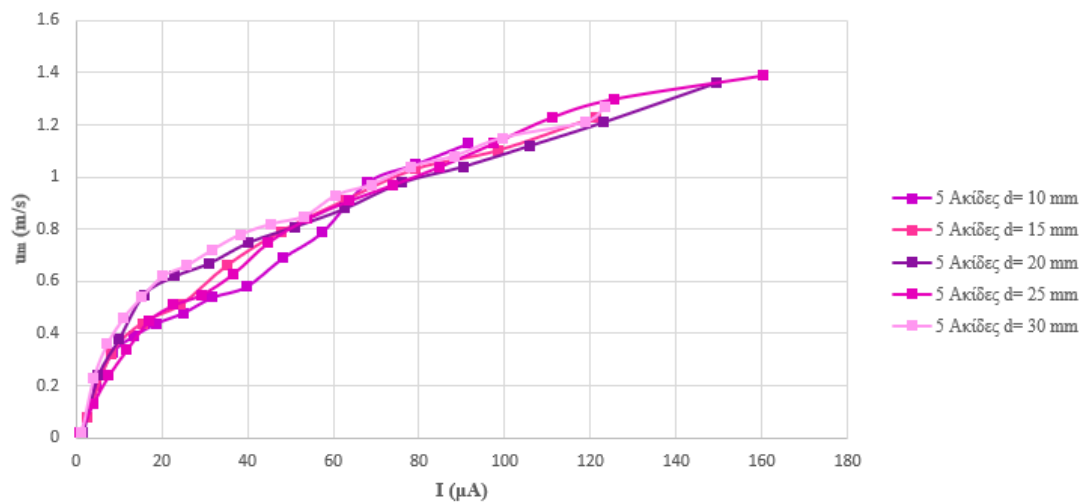
Πίνακας 4.4 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

Τύπος διάταξης	Διάκενο (mm)	Τάση κατωφλίου (kV)
Πέντε Ακίδες - Πλέγμα	10	4.00
	15	5.00
	20	5.50
	25	6.00
	30	7.00

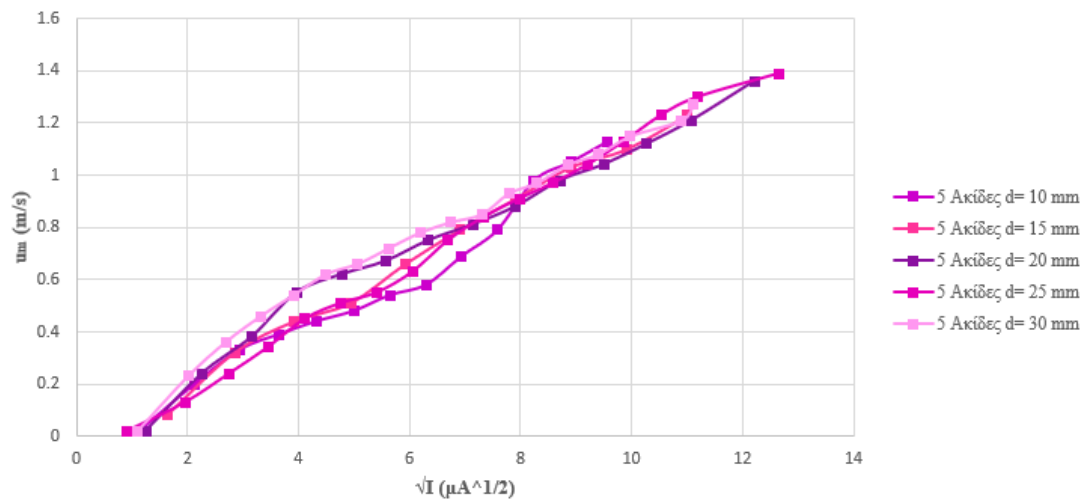
Παρακάτω απεικονίζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα για τη διάταξη Πέντε Ακίδων – Πλέγματος. Στην αρχή του κεφαλαίου 4.1 έχει δοθεί η ακριβής περιγραφή των ορολογιών της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα και μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του θαλάμου.



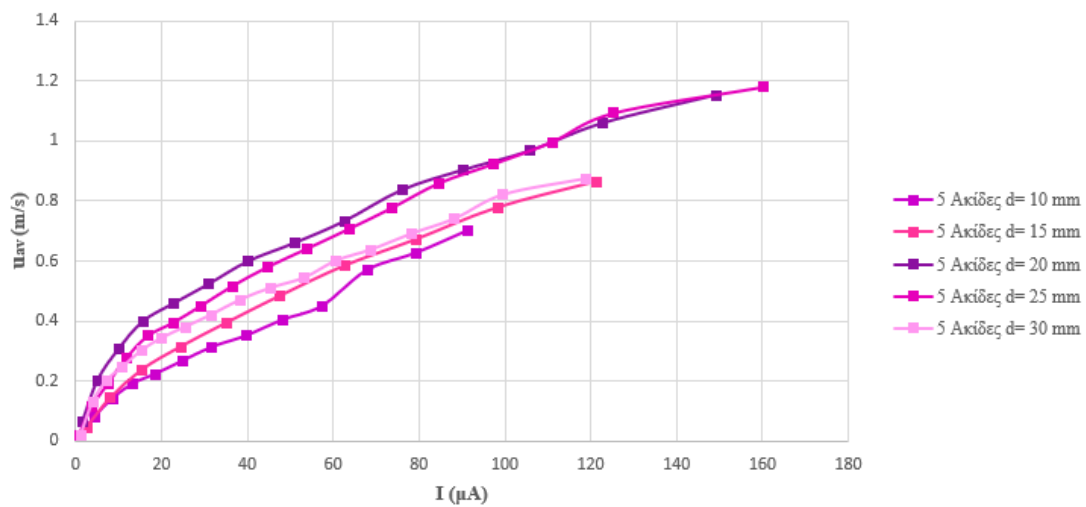
Σχήμα 4.13. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



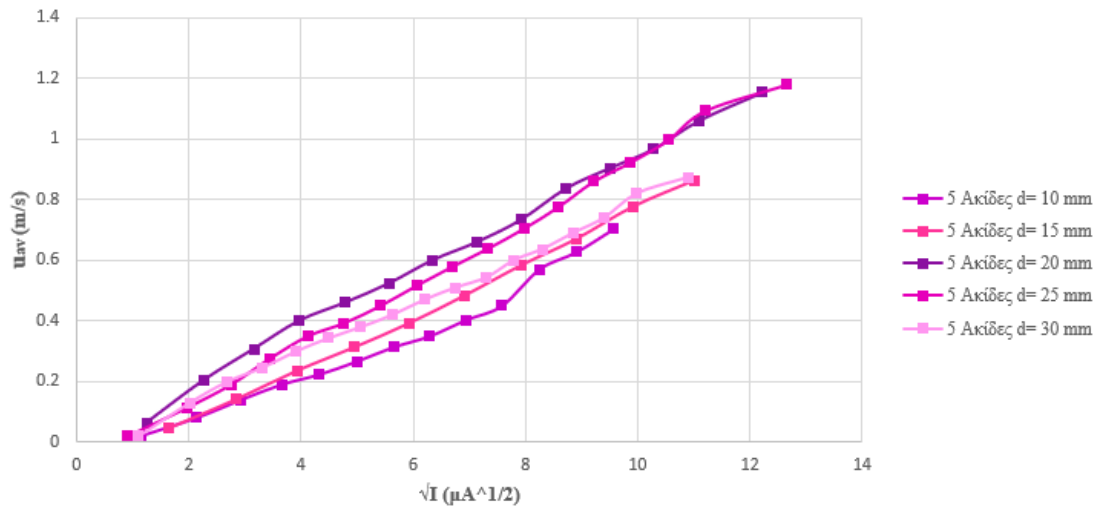
Σχήμα 4.14. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



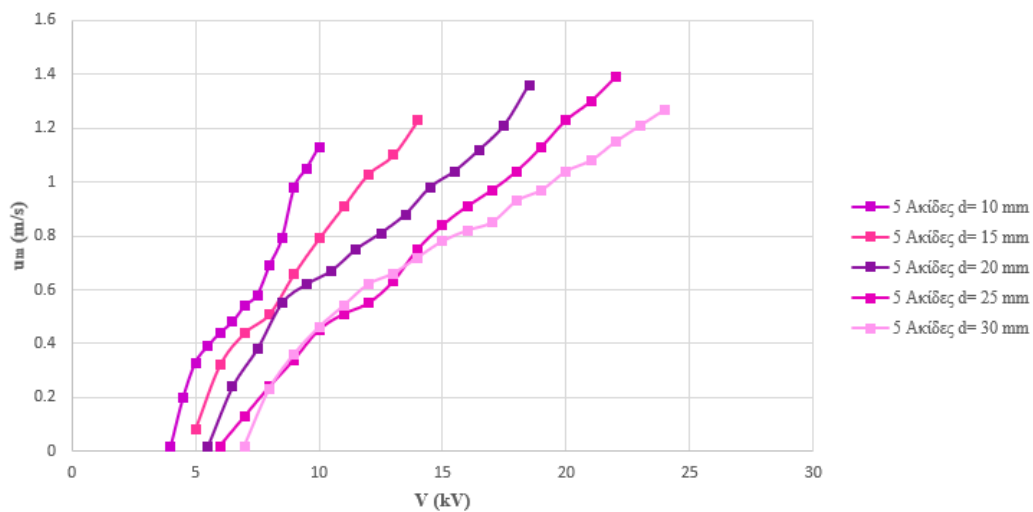
Σχήμα 4.15. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



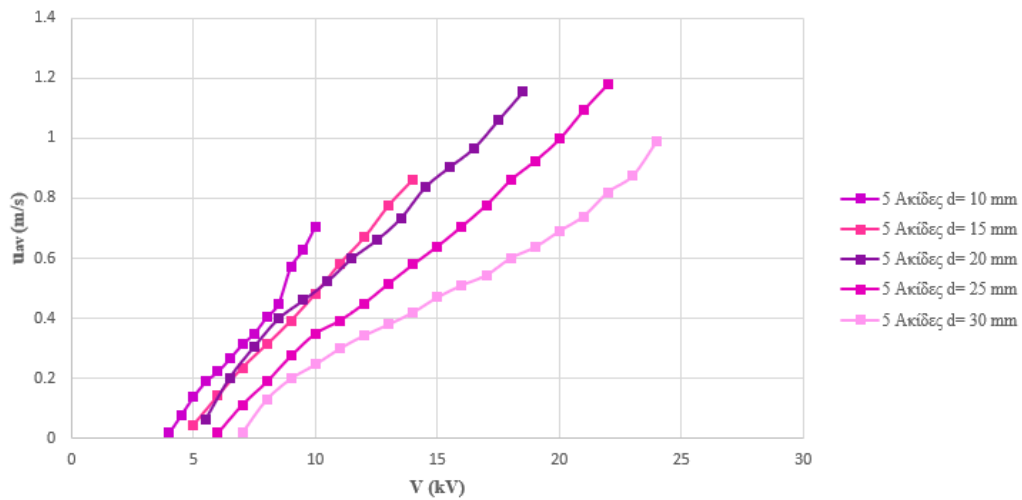
Σχήμα 4.16. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



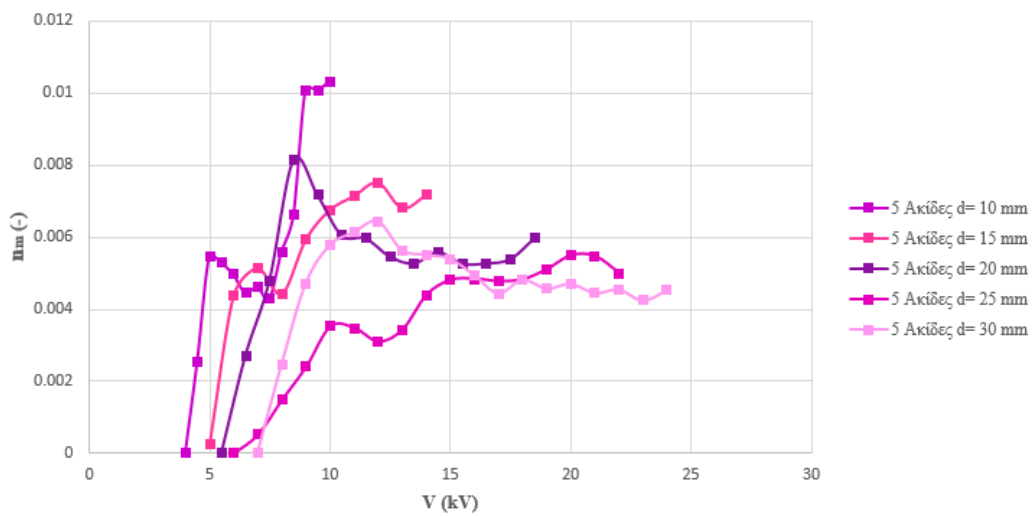
Σχήμα 4.17. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



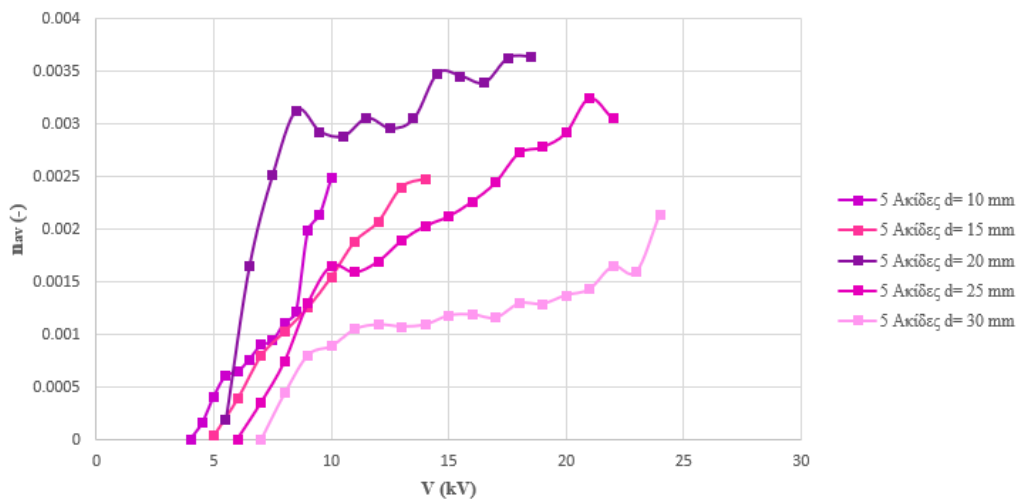
Σχήμα 4.18. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



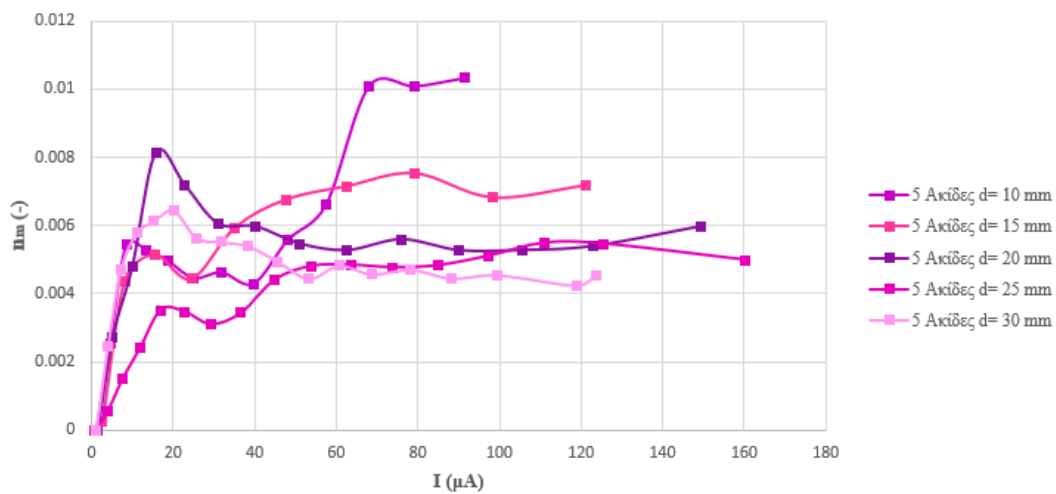
Σχήμα 4.19. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



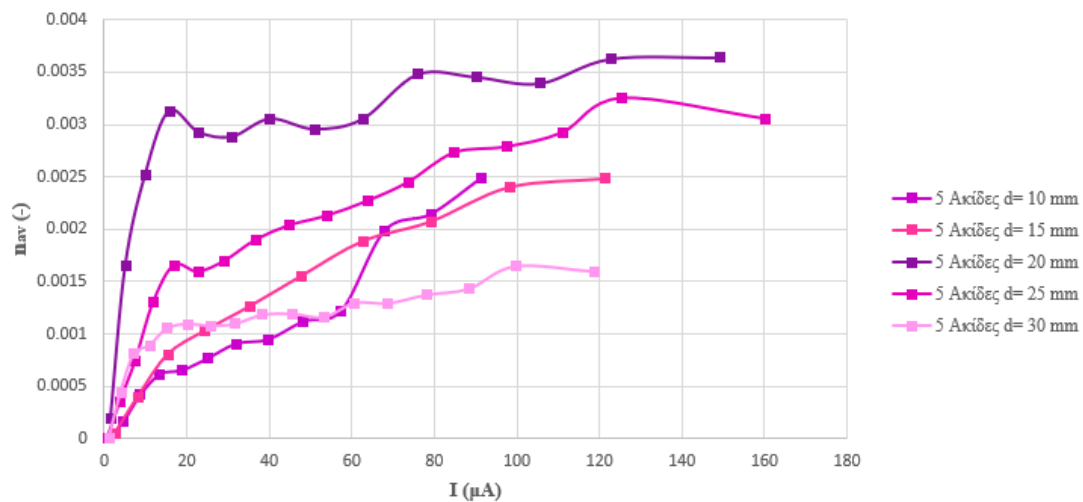
Σχήμα 4.20. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



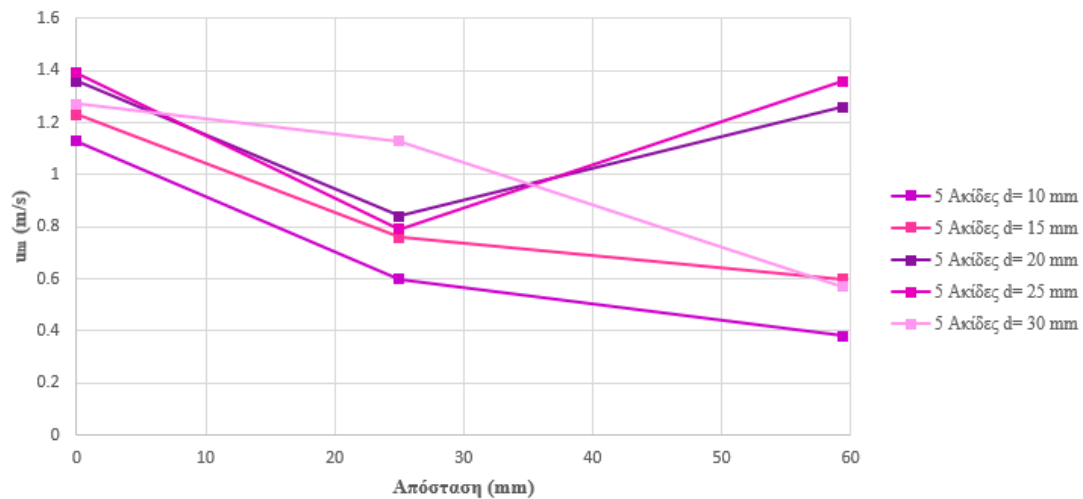
Σχήμα 4.21. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 4.22. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 4.23. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 4.24. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

Από τα Σχήματα 4.13, 4.14 και 4.16 φαίνεται ότι η τάση και το ρεύμα δεν λαμβάνουν πολύ υψηλές τιμές. Επίσης, παρατηρείται στα Σχήματα 4.20 – 4.23 ότι ο βαθμός απόδοσης είναι

πολύ υψηλός στη μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα και ενώ μειώνεται η απόδοση στο συνολικό μήκος της διατομής, παραμένει σε αρκετά υψηλές τιμές. Στο Σχήμα 4.24 γίνεται αντιληπτό ότι οι υψηλότερες μέσες μετρούμενες τιμές ταχύτητας αέρα παρατηρούνται σταθερά στο κέντρο της διατομής του θαλάμου. Επίσης, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων εκπομπού και συλλέκτη, τόσο αυξάνεται σημαντικά και η ταχύτητα του αέρα στην άκρη της διατομής (δηλαδή κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα) του κυλινδρικού θαλάμου.

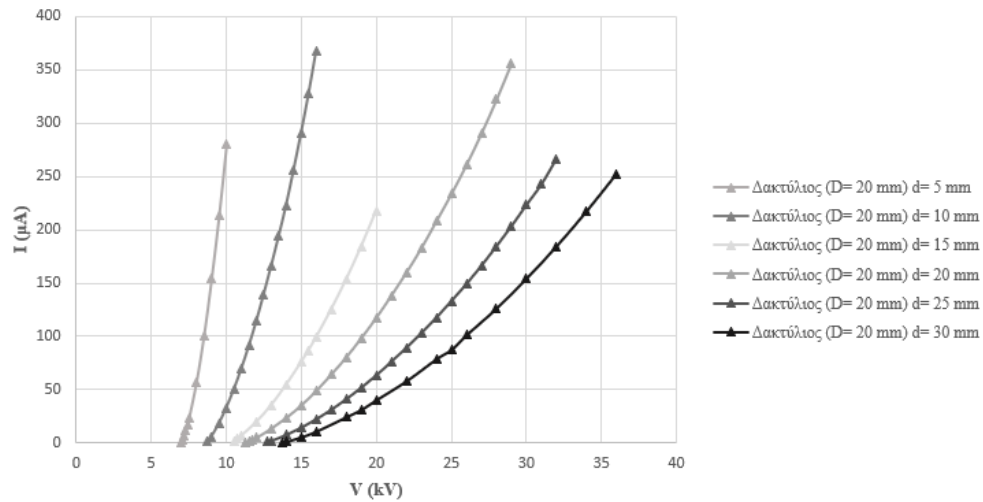
4.1.3 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Δακτυλίου – Πλέγματος

Στον Πίνακα 4.5 γίνεται αναφορά της τάσεως κατωφλίου για τη διάταξη Δακτυλίου (διαμέτρου 20 mm) – Πλέγματος, με βάση το εκάστοτε διάκενο.

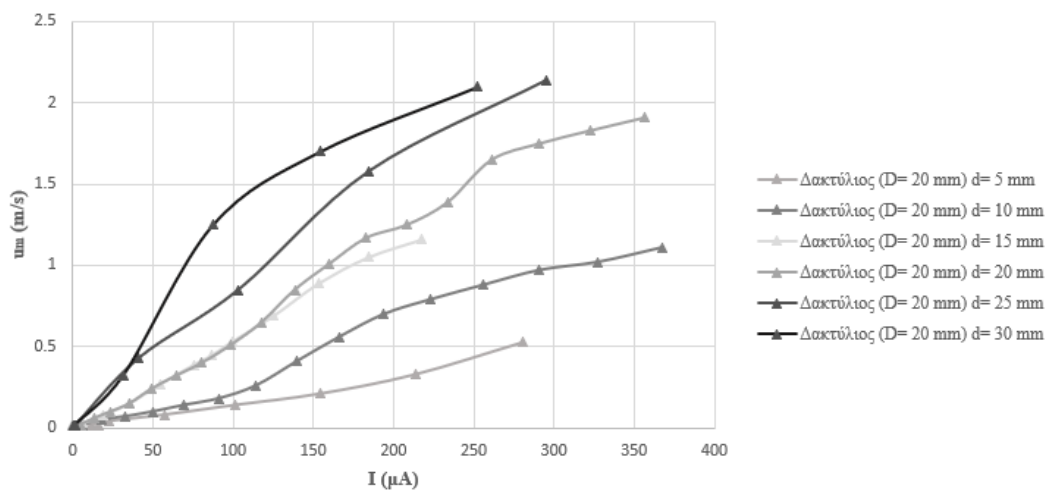
Πίνακας 4.5 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Δακτυλίου (διαμέτρου 20 mm) – Πλέγματος

Τύπος διάταξης	Διάμετρος δακτυλίου (mm)	Διάκενο (mm)	Τάση κατωφλίου (kV)
Δακτύλιος - Πλέγμα	20	5	7.00
		10	8.75
		15	10.50
		20	11.50
		25	12.75
		30	14.00

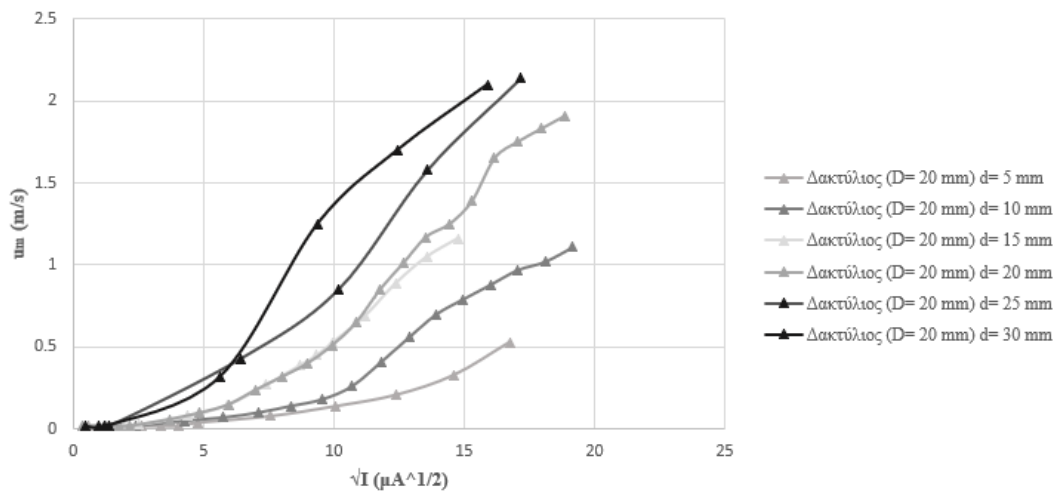
Ακολουθούν οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα για το σύστημα Δακτυλίου – Πλέγματος, για δακτύλιο διαμέτρου 20 mm.



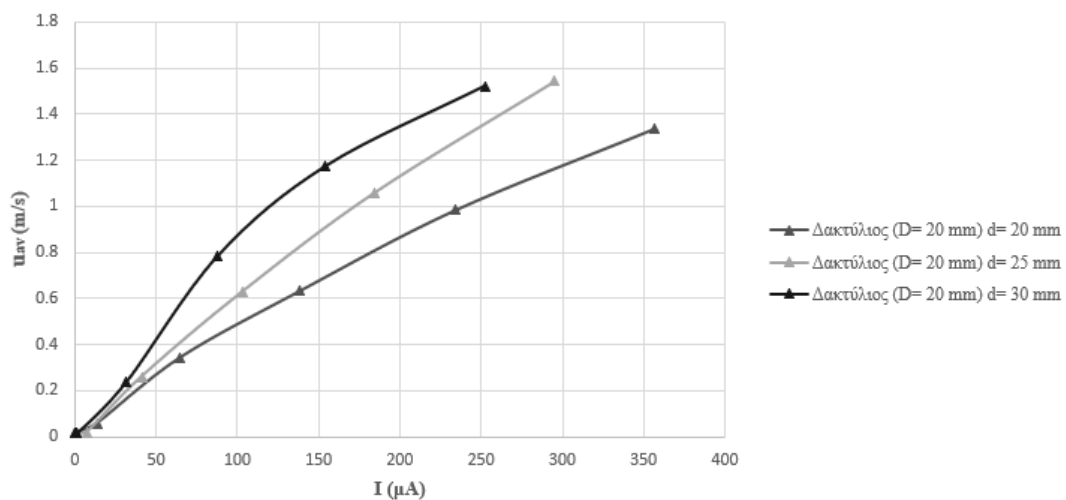
Σχήμα 4.25. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



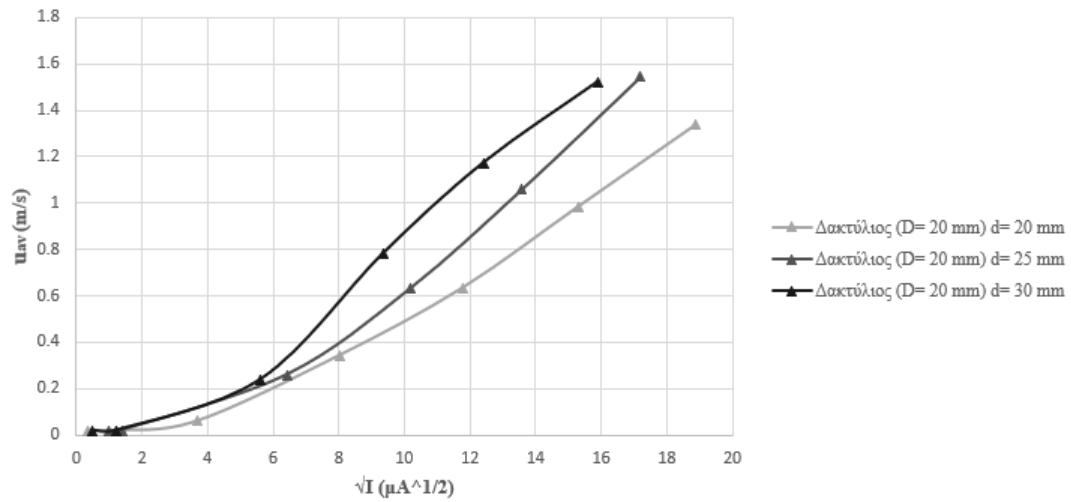
Σχήμα 4.26. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



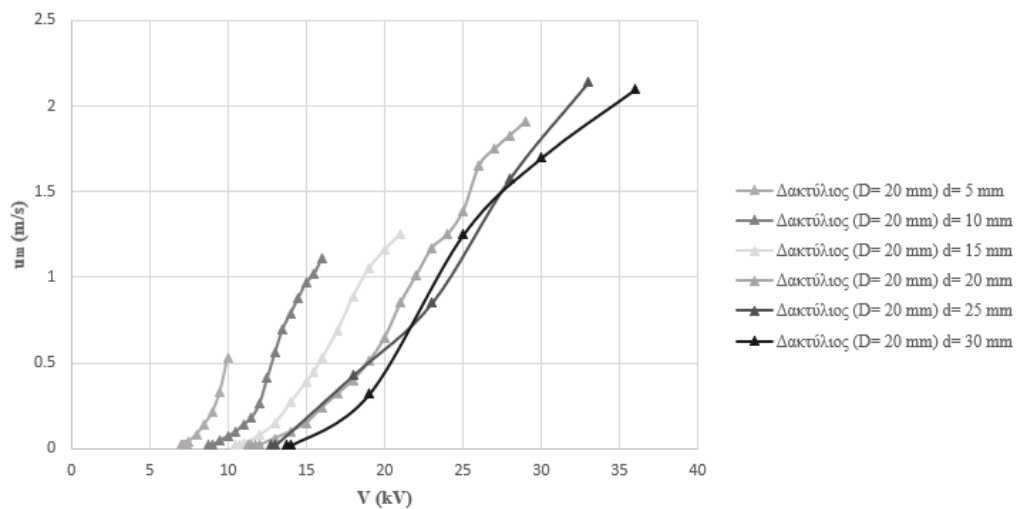
Σχήμα 4.27. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



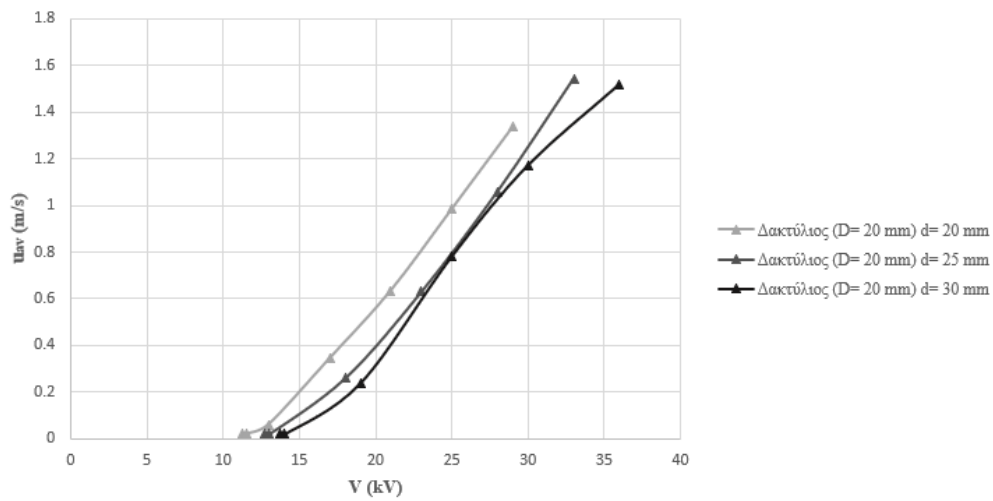
Σχήμα 4.28. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



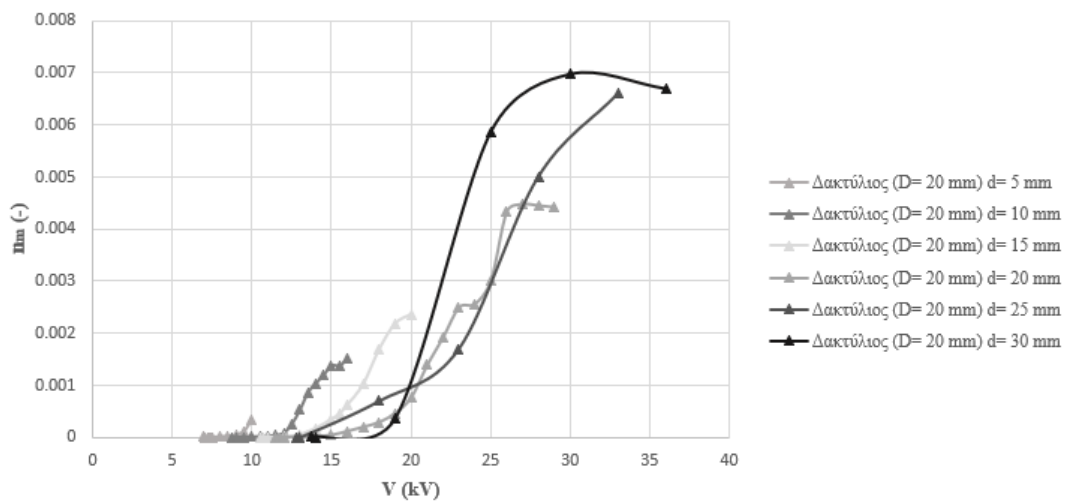
Σχήμα 4.29. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



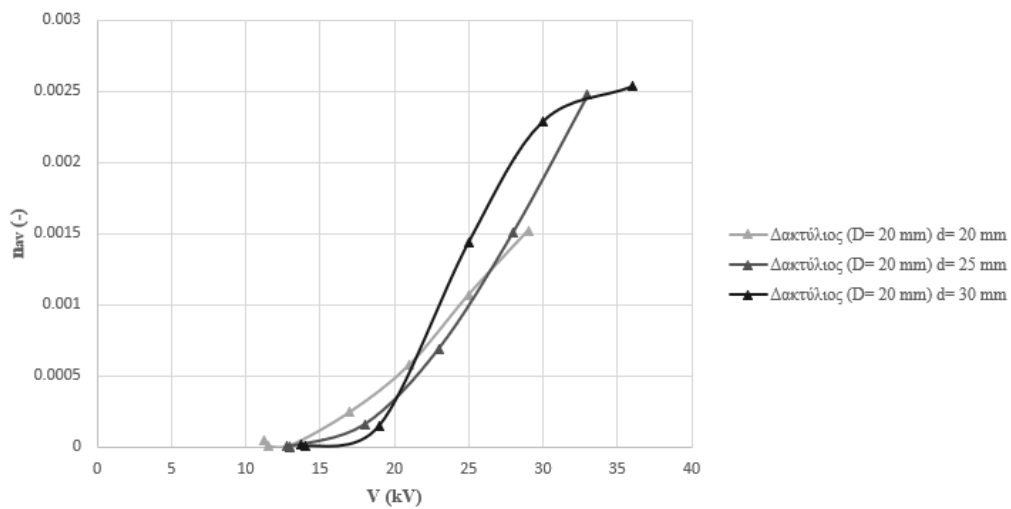
Σχήμα 4.30. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



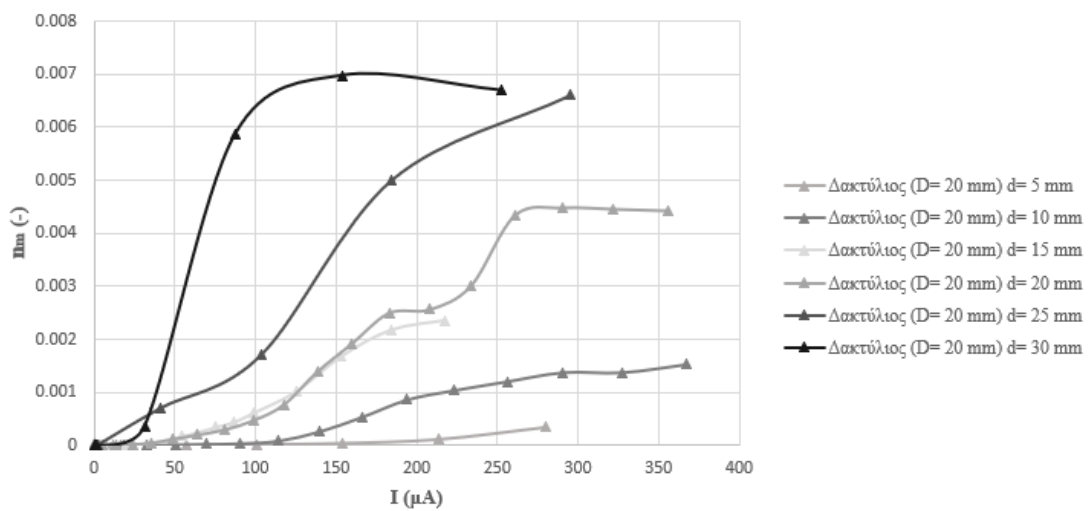
Σχήμα 4.31. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



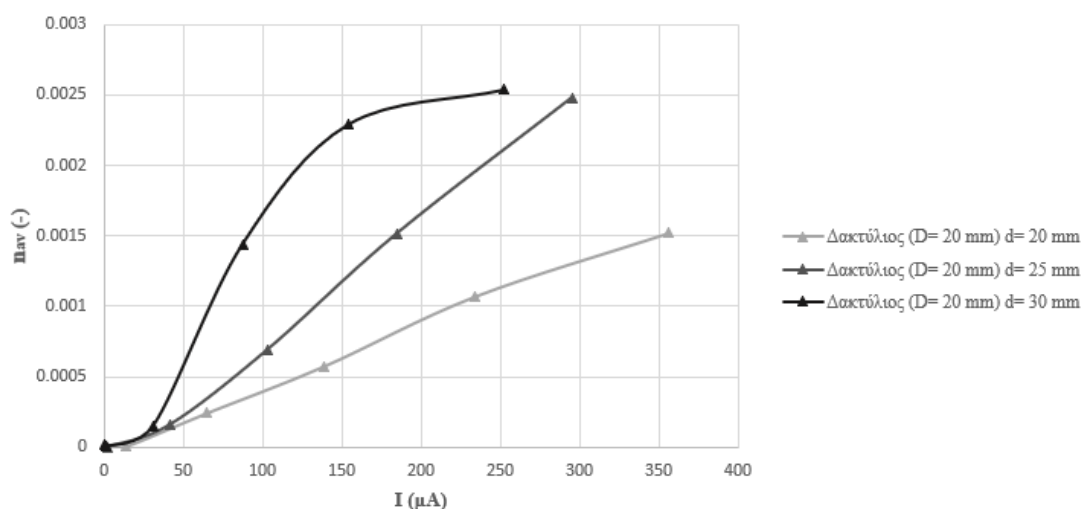
Σχήμα 4.32. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



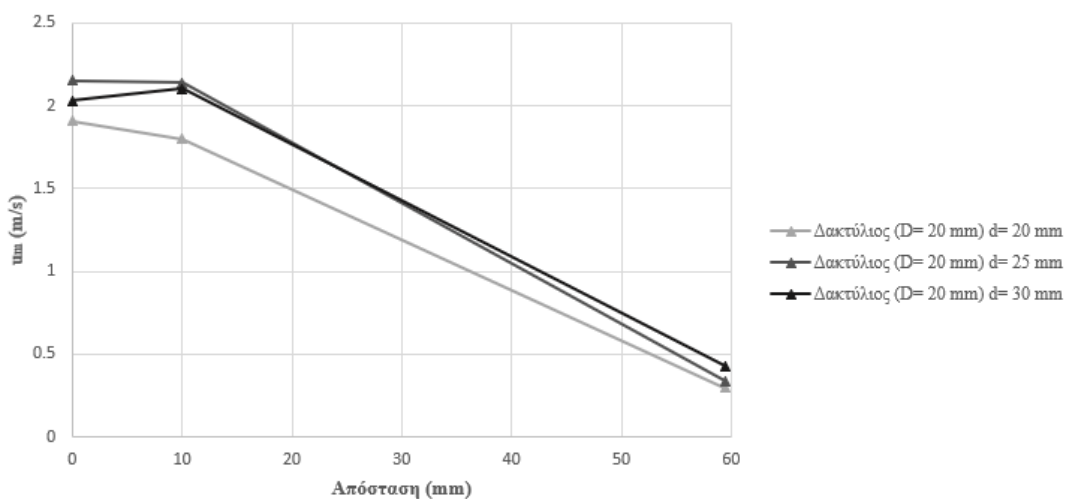
Σχήμα 4.33. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.34. Βαθμός απόδοσης (η_{m} , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.35. Βαθμός απόδοσης (n_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.36. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m , συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Δακτυλίων (με διάμετρο 20 mm) – Πλέγματος

Από τα Σχήματα 4.25 και 4.30 φαίνεται ότι η παρεχόμενη τάση έλαβε αρκετά μεγάλες τιμές, όπως και η ροή του αέρα. Μάλιστα, από τα Σχήματα 3.32 και 3.34 καταδεικνύεται ότι ο βαθμός απόδοσης δηλώνει πολύ μεγάλες αποδόσεις. Βέβαια, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.33 και 4.35, αυτό δεν ίσχυε σε όλη τη διατομή του κυλινδρικού σωλήνα. Το ίδιο μπορεί να

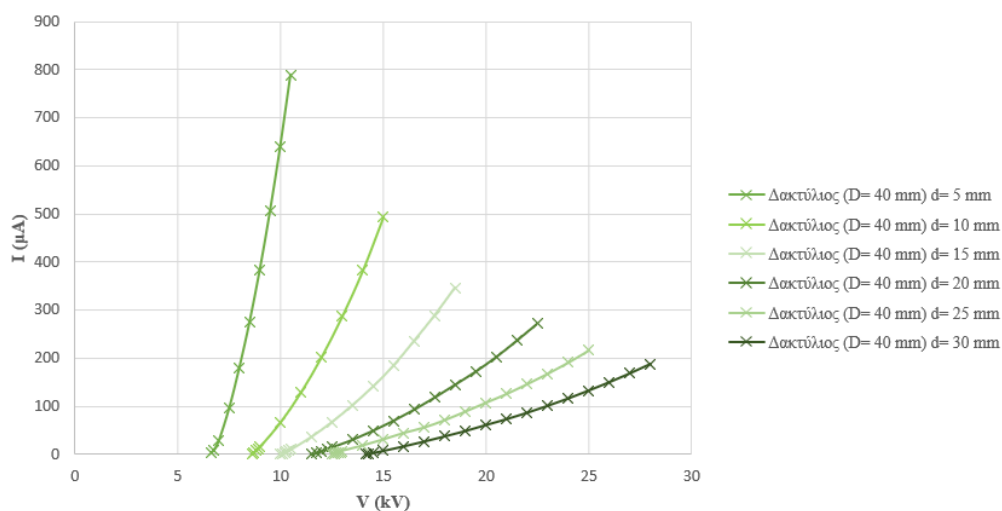
παρατηρηθεί και από το Σχήμα 4.36. Όμως, η ταχύτητα στην άκρη του σωλήνα πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Στον Πίνακα 4.6 γίνεται αναφορά της τάσεως κατωφλίου για την διάταξη Δακτυλίου (διαμέτρου 40 mm) – Πλέγμα, με βάση το εκάστοτε διάκενο.

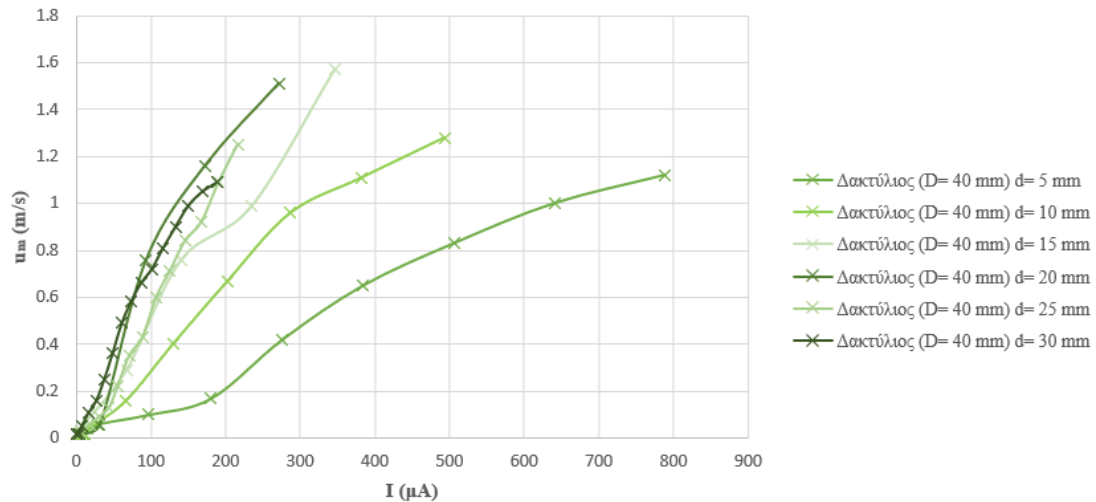
Πίνακας 4.6 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Δακτυλίου (διαμέτρου 40 mm) – Πλέγματος

Τύπος διάταξης	Διάμετρος δακτυλίου (mm)	Διάκενο (mm)	Τάση κατωφλίου (kV)
Δακτύλιος - Πλέγμα	40	5	6.65
		10	8.60
		15	10.10
		20	11.50
		25	12.50
		30	14.15

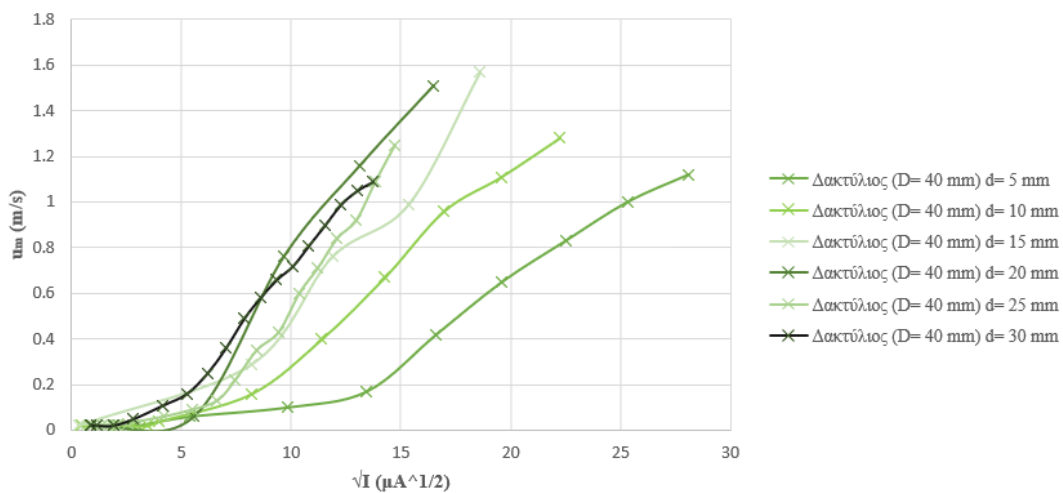
Ακολουθούν οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα για το σύστημα Δακτυλίου – Πλέγματος, για δακτύλιο διαμέτρου 40 mm



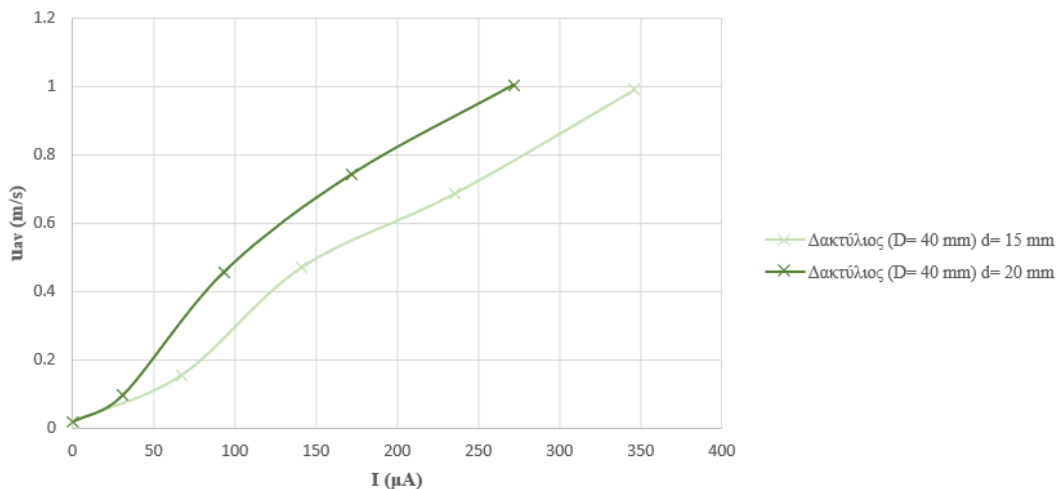
Σχήμα 4.37. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσεως της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



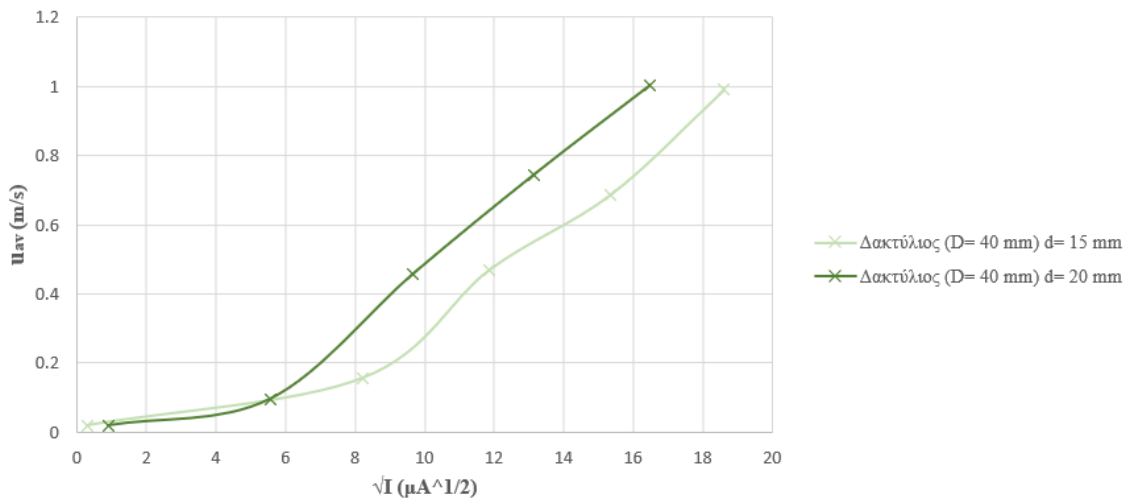
Σχήμα 4.38. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



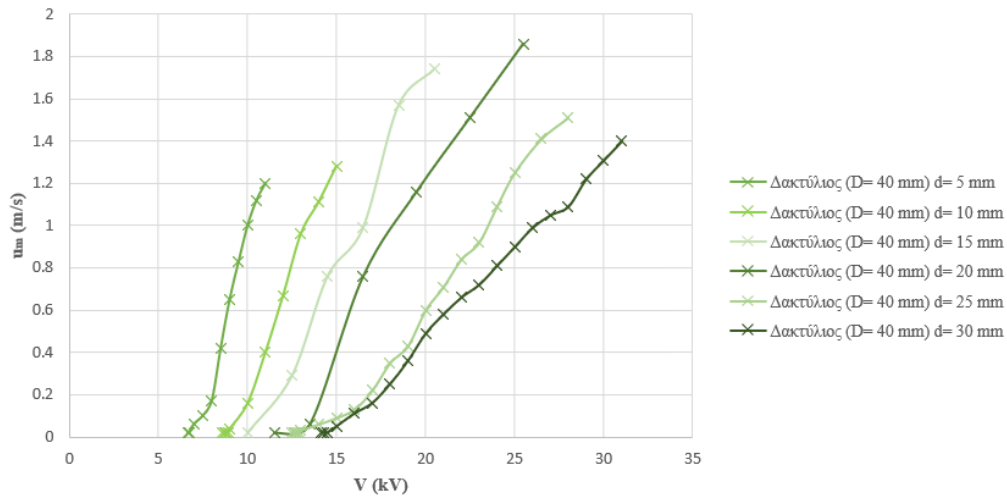
Σχήμα 4.39. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



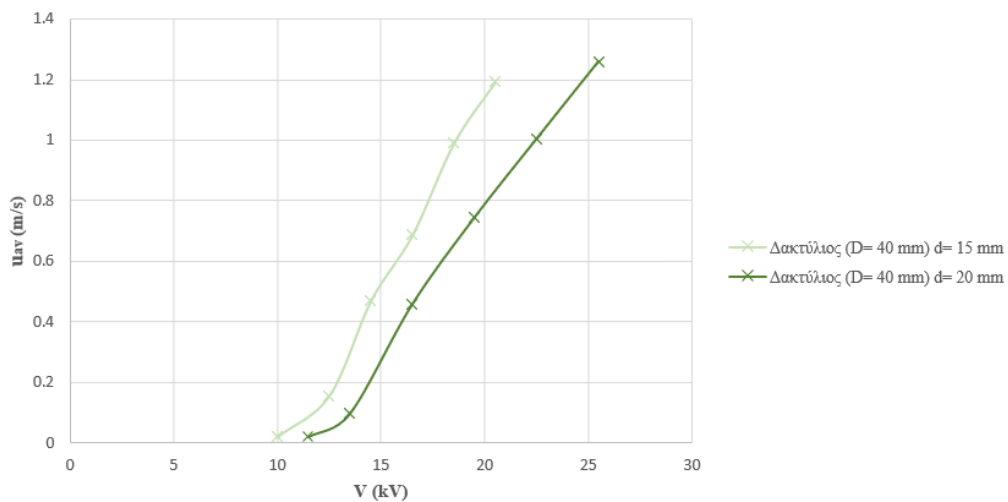
Σχήμα 4.40. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσεως της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



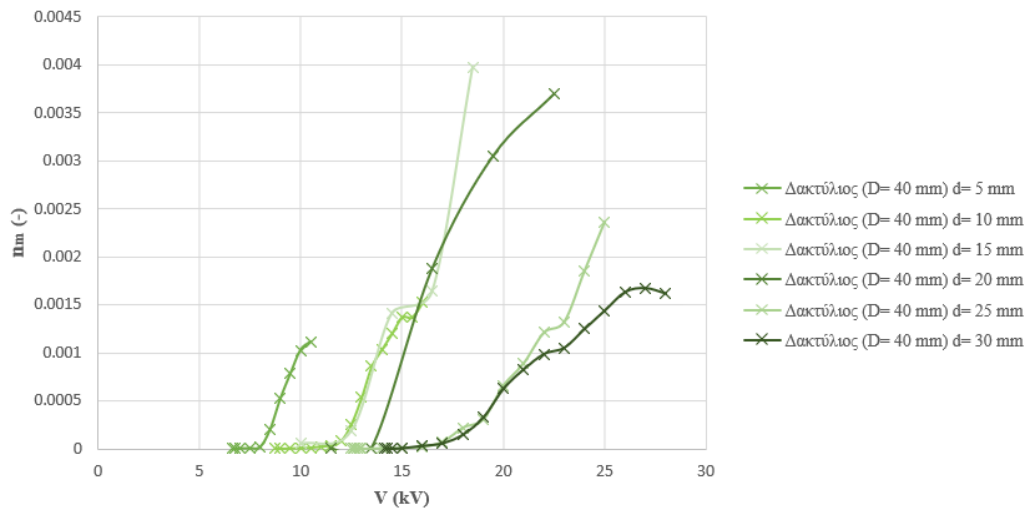
Σχήμα 4.41. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσεως της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



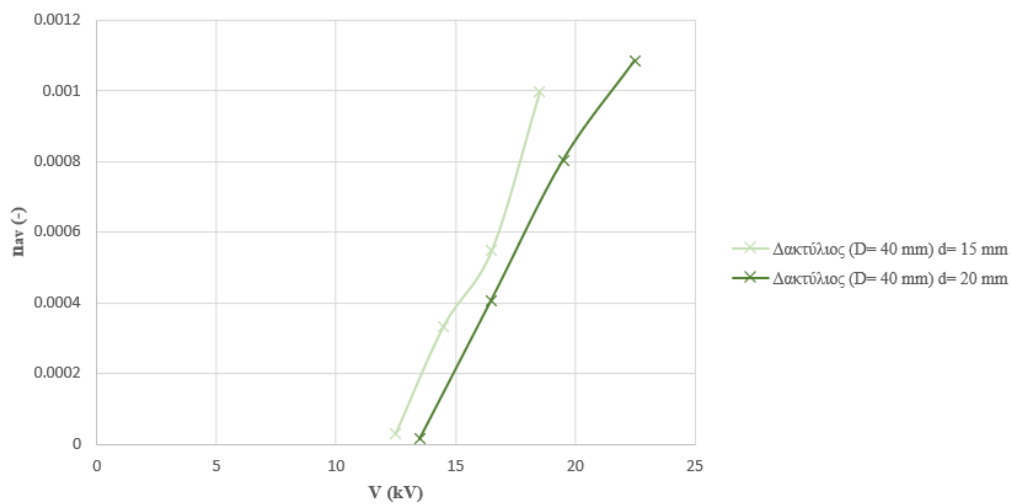
Σχήμα 4.42. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



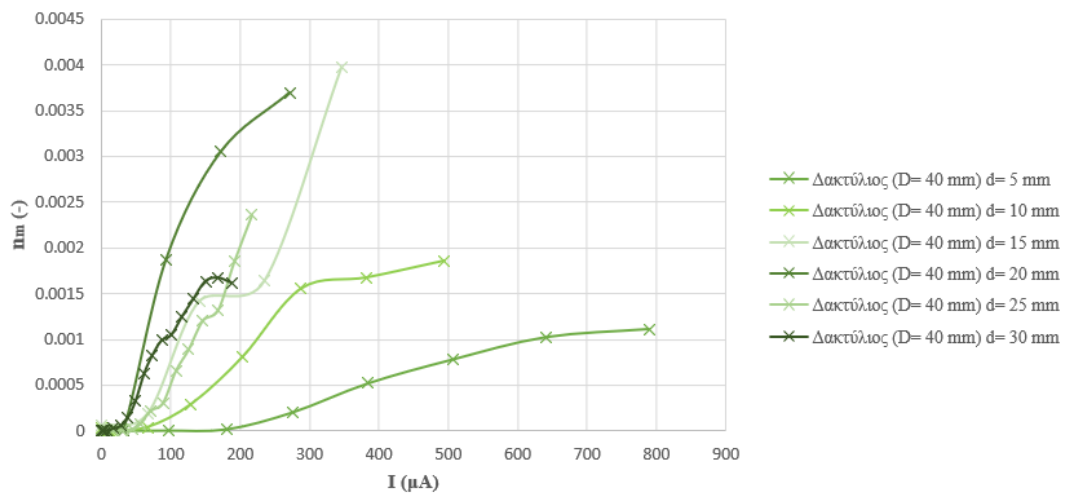
Σχήμα 4.43. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



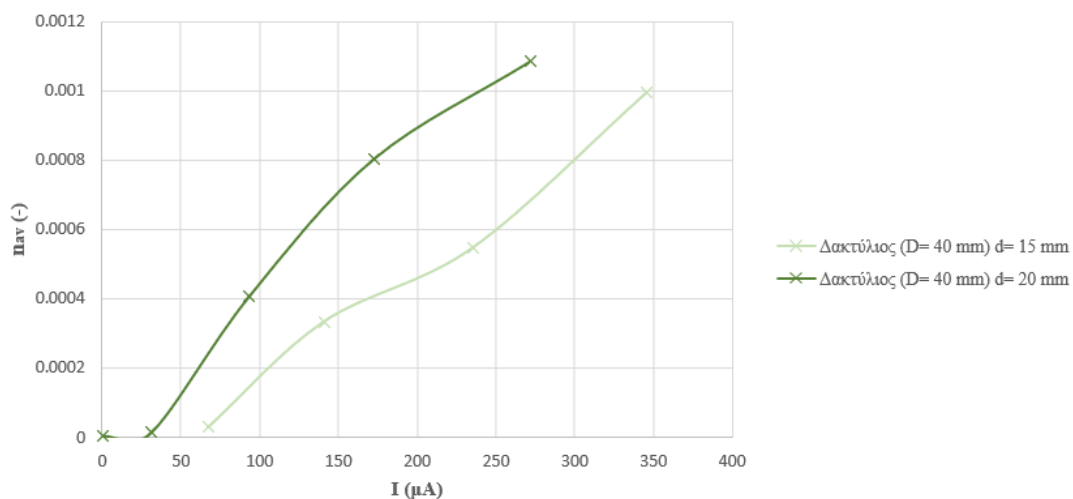
Σχήμα 4.44. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



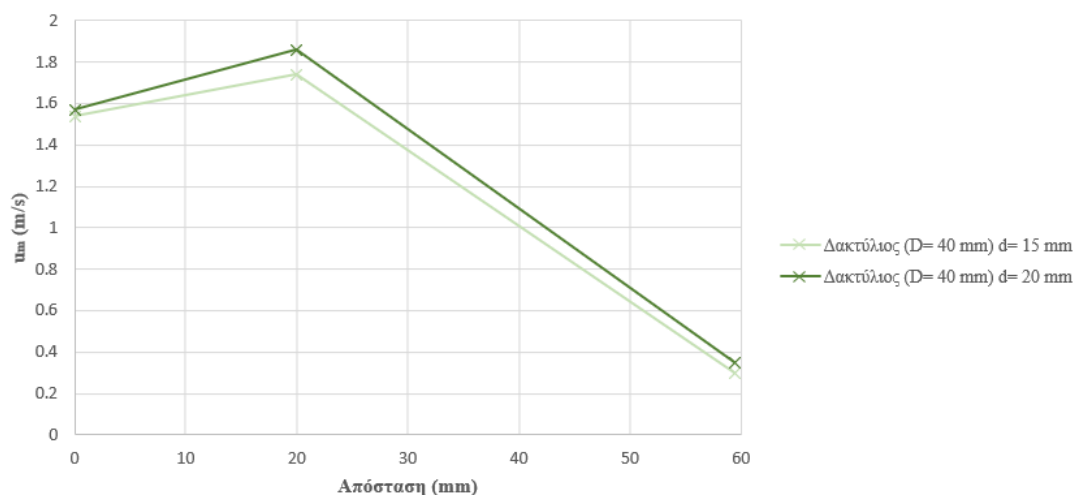
Σχήμα 4.45. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.46. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτύλιου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.47. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτύλιου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος



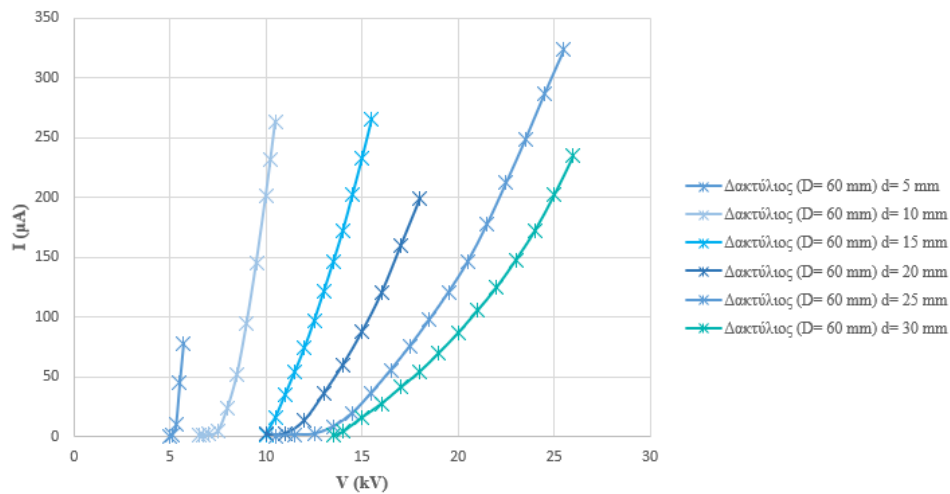
Σχήμα 4.48. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 40 mm) – Πλέγματος

Από το Σχήμα 4.37 φαίνεται ότι το ρεύμα στην περίπτωση του διακένου των 5 mm έλαβε πολύ υψηλές τιμές, κάτι που δεν συνέβη σε όλα τα επόμενα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε άλλα ηλεκτρόδια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όμως, είναι πολύ πιο έντονο και εστιασμένο σε ένα διάκενο. Ο λόγος που εμφανίζεται κάτι τέτοιο, όπως παρατηρήθηκε πειραματικά, είναι διότι κατά την τροφοδότηση του ηλεκτροδίου του εκπομπού με αυξημένες τιμές τάσης, το φαινόμενο κορώνα γίνεται όλο και πιο έντονο, σε σημείο που ο αγωγός χρωματιζόταν με ένα μπλε - ιώδες φως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του αγωγού, δηλαδή σε ορισμένα σημεία εμφανίζονταν μαυρίσματα στον χάλκινο αγωγό. Προφανώς, κάτι τέτοιο έχει επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος, καθώς εκτός από το φαινόμενο του ιονισμού, καταναλώνεται ενέργεια και για τη δημιουργία φωτός. Επίσης, λόγω της καταστροφής του αγωγού και της αδυναμίας επαναφοράς του στην πρότερη κατάσταση, οι επόμενες μετρήσεις εμφάνιζαν μείωση της τιμής της τάσης διασπάσεως. Στα Σχήματα 4.44 και 4.46 φαίνεται ότι οι καλύτεροι βαθμοί απόδοσης ελήφθησαν στα διάκενα 15 και 20 mm, και γι' αυτό επιλέχθηκαν για επιπλέον μέτρηση στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.45 και 4.47, η απόδοση εμφανίζει αρκετά μεγάλη μείωση. Παρατηρώντας μάλιστα το Σχήμα 4.48, η ταχύτητα του αέρα είναι μεν πιο μεγάλη κάτω από τον δακτύλιο, αλλά στην άκρη του κυλινδρικού θαλάμου (59.3 mm) καταγράφηκαν εξαιρετικά χαμηλές τιμές της. Στον Πίνακα 4.7 γίνεται αναφορά της τάσεως κατωφλίου για τη διάταξη Δακτυλίου (διαμέτρου 60 mm) - Πλέγματος, με βάση το εκάστοτε διάκενο.

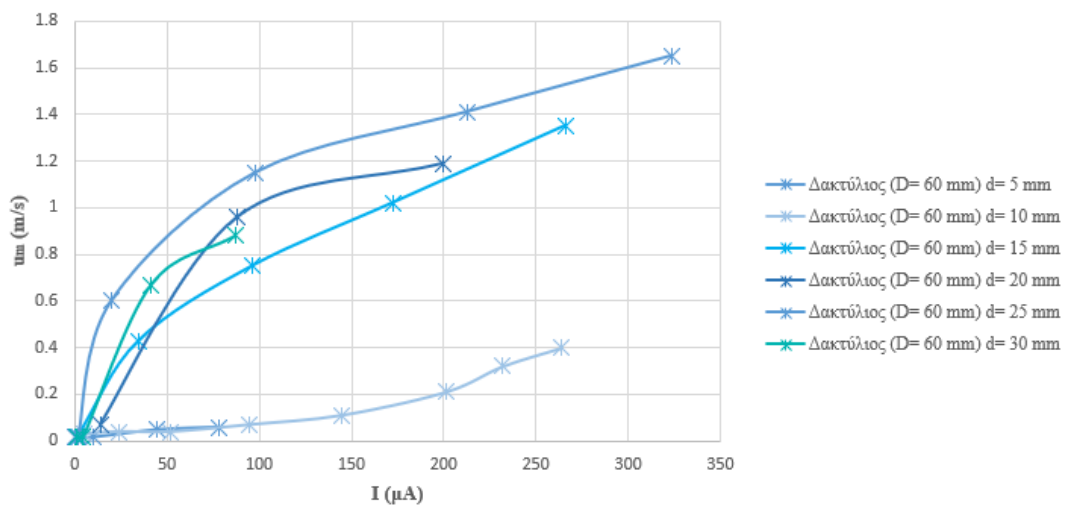
Πίνακας 4.7 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Δακτυλίου (διαμέτρου 60 mm) – Πλέγματος

Τύπος διάταξης	Διάμετρος δακτυλίου (mm)	Διάκενο (mm)	Τάση κατωφλίου (kV)
Δακτύλιος - Πλέγμα	60	5	5.00
		10	6.50
		15	8.00
		20	10.00
		25	11.50
		30	13.50

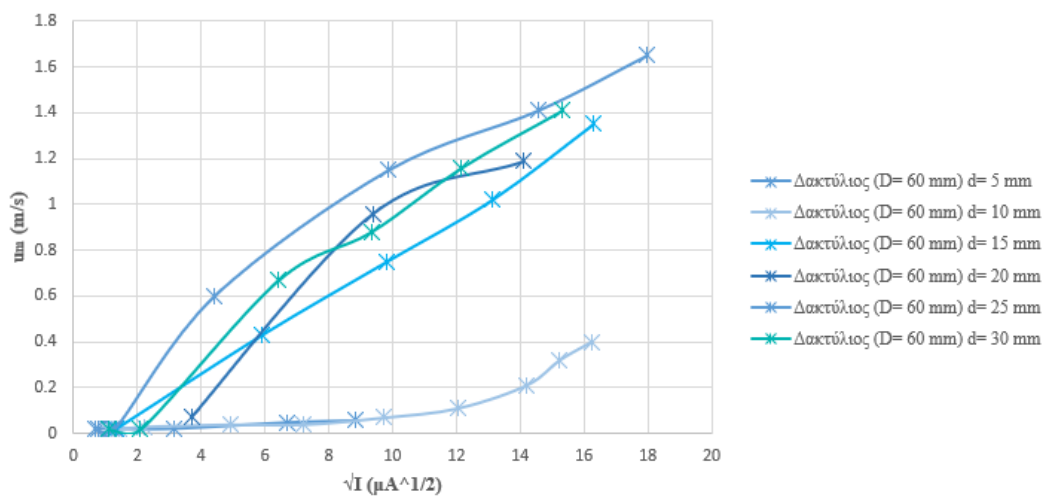
Ακολουθούν οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα για το σύστημα Δακτυλίου – Πλέγματος, για δακτύλιο διαμέτρου 60 mm



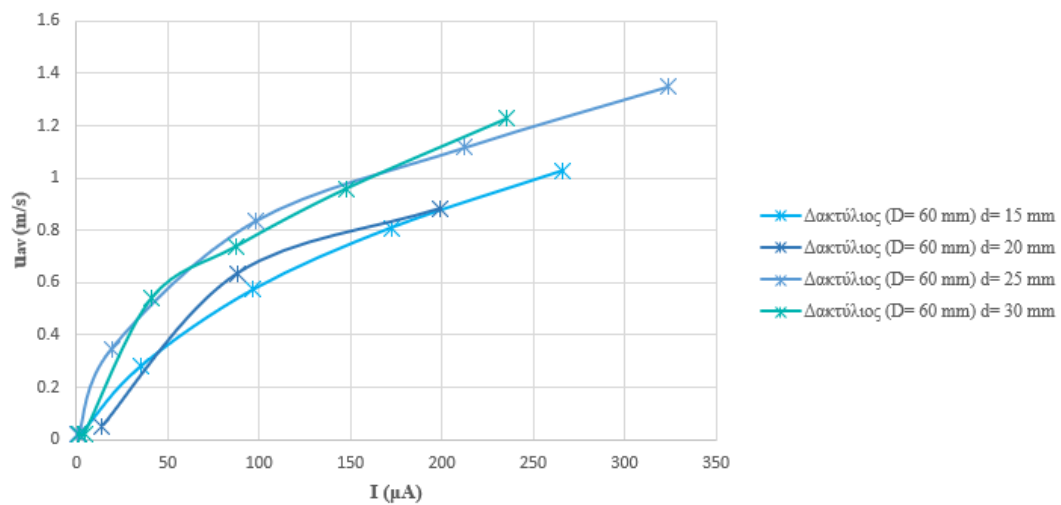
Σχήμα 4.49. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



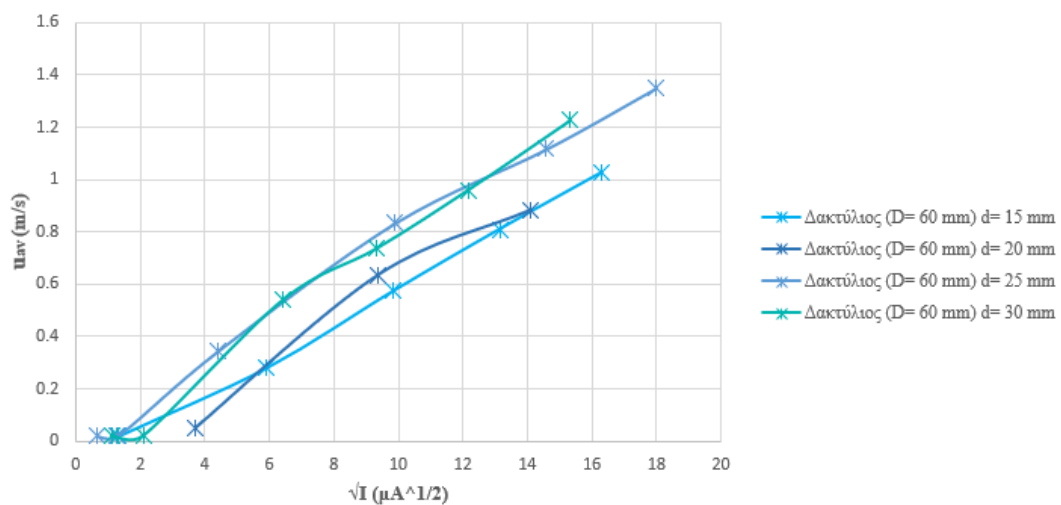
Σχήμα 4.50. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



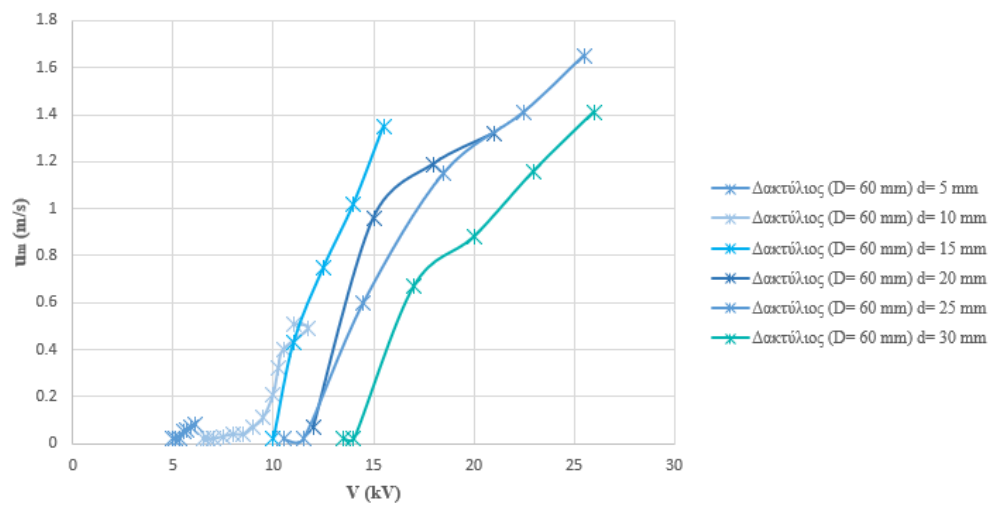
Σχήμα 4. 51. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



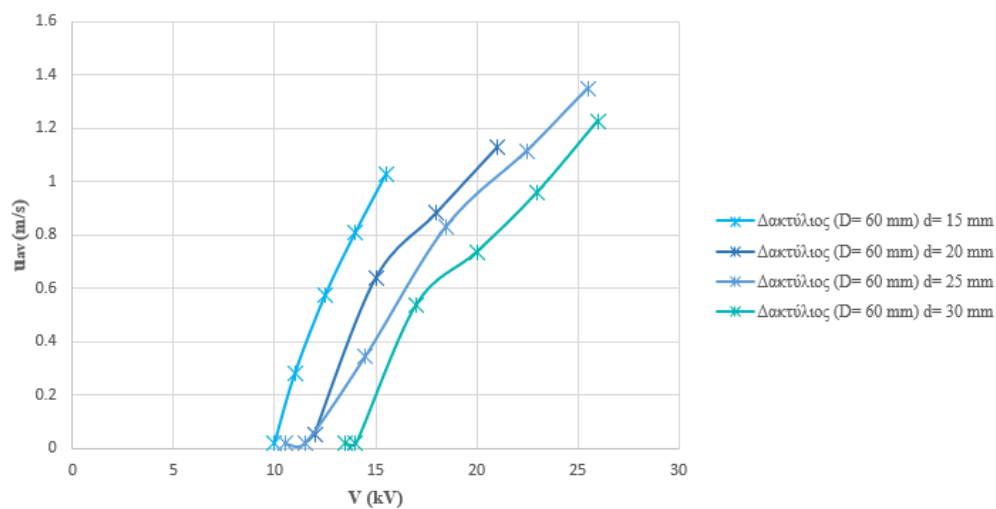
Σχήμα 4.52. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



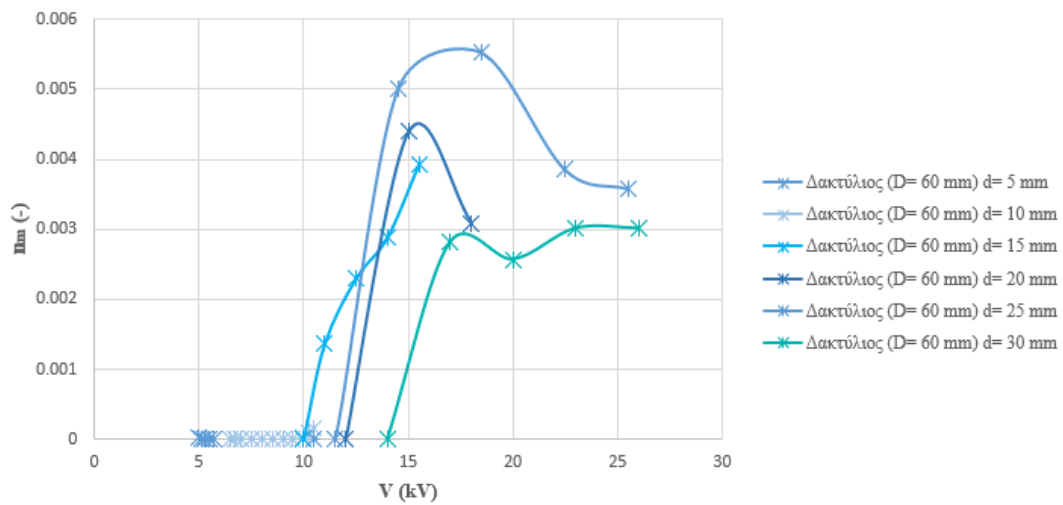
Σχήμα 4.53. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



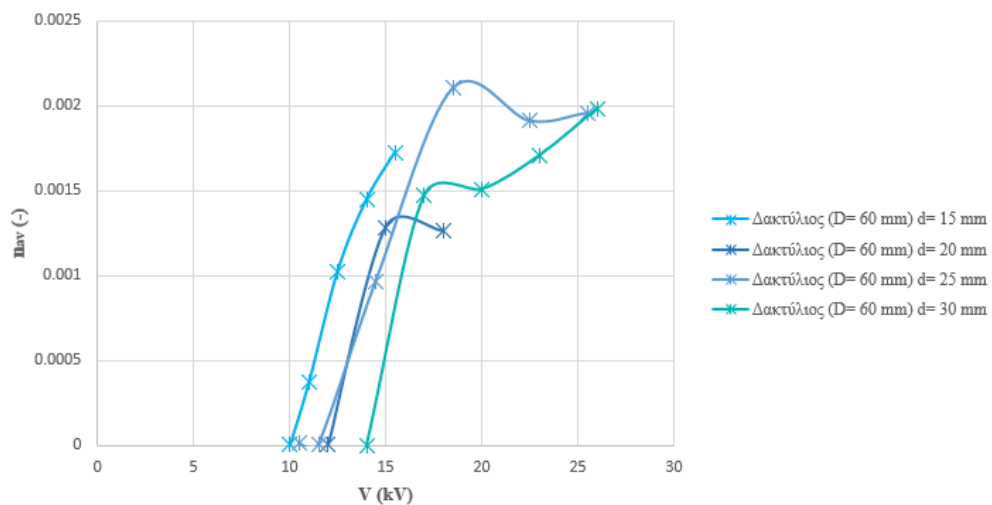
Σχήμα 4.54. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



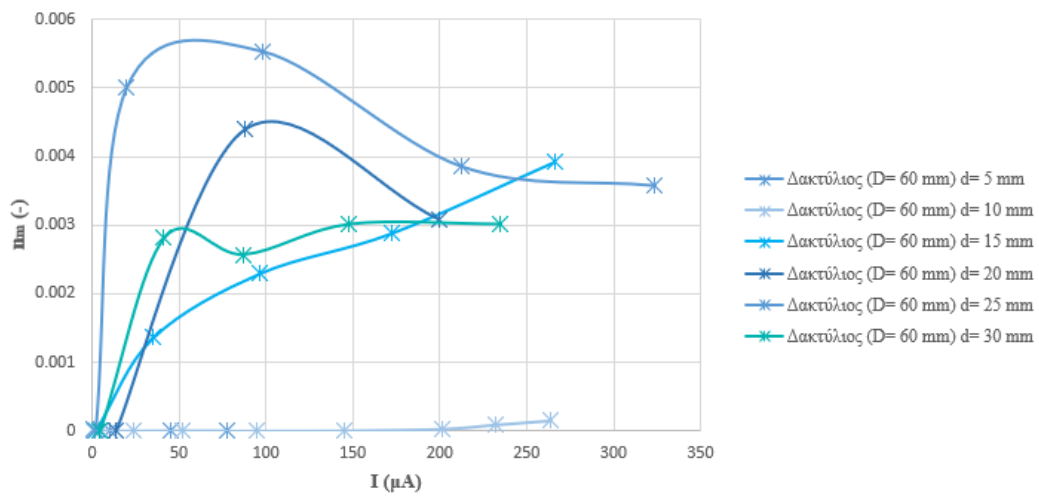
Σχήμα 4.55. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



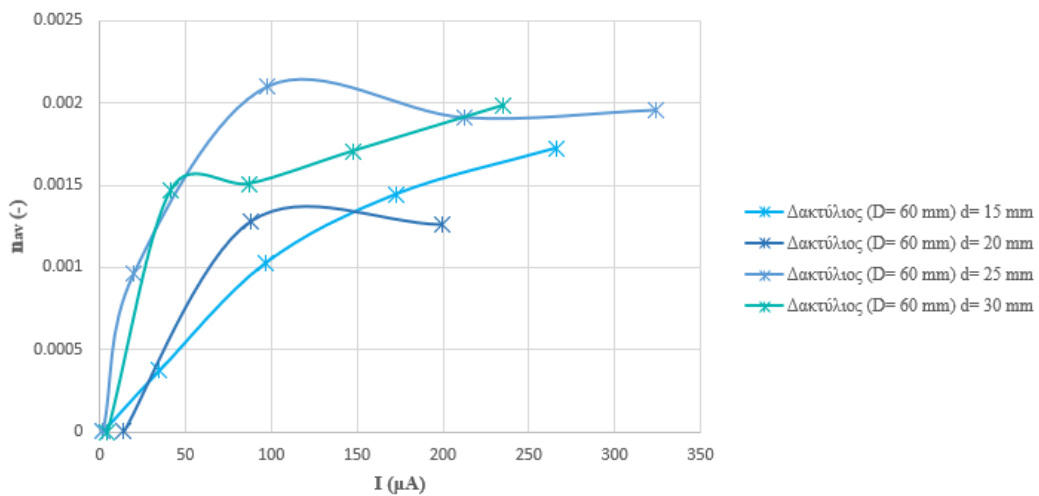
Σχήμα 4.56. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



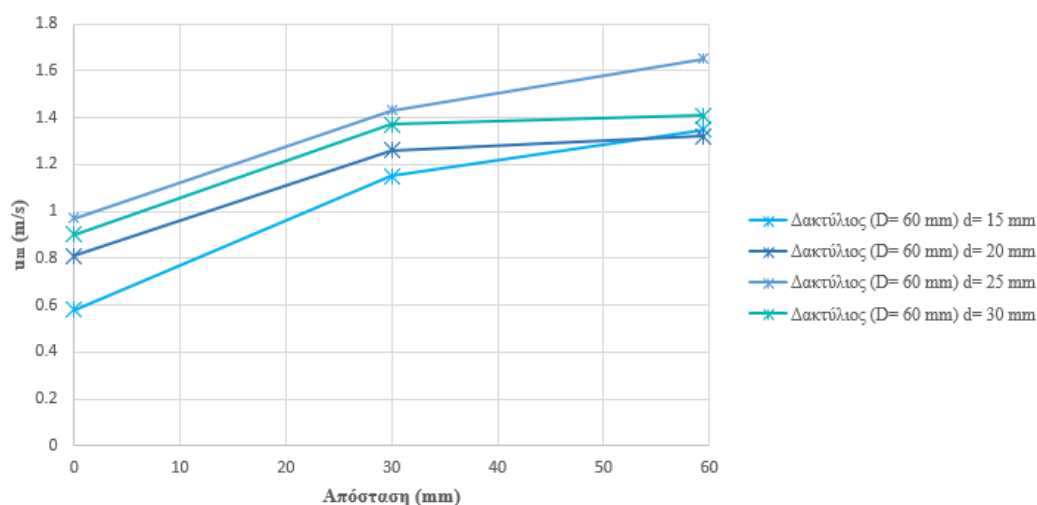
Σχήμα 4.57. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.58. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.59. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος



Σχήμα 4.60. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Δακτυλίου (με διάμετρο 60 mm) – Πλέγματος

Από τα Σχήματα 4.49 και 4.54 φαίνεται ότι η παρεχόμενη τάση έφτασε σε υψηλές τιμές μέχρι το διάκενο των 25 mm. Όπως αναφέρθηκε και στο δακτύλιο με διάμετρο 40 mm, αυτό οφείλεται στις φθορές που υπέστη ο χάλκινος δακτύλιος κατά τη λήψη των μετρήσεων στα διάφορα διάκενα. Επίσης, από τα Σχήματα 4.56 και 4.58 παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης έφτασε σε μεγάλες τιμές για διάφορα διάκενα, γι' αυτό έγιναν μετρήσεις σε περισσότερα από ένα σημεία στη διατομή του κυλινδρικού σωλήνα. Από τα Σχήματα 4.57 και 4.59 φαίνεται ότι υπάρχει μείωση στον βαθμό απόδοσης σε όλο το μήκος της διατομής. Παρ' όλα αυτά δεν είναι πολύ χαμηλός. Επιπλέον, από το Σχήμα 4.60 γίνεται αντιληπτό ότι οι μέγιστες μέσες τιμές εμφανίζονται στην άκρη του κυλινδρικού θαλάμου και κάτω από τον αγωγό του δακτυλίου, ενώ οι μικρότερες τιμές στο κέντρο του σωλήνα. Το ότι στους μεγάλους δακτυλίους (διαμέτρου 40 και 60 mm) εμφανίζεται η μικρότερη ταχύτητα αέρα στο κέντρο της διατομής του θαλάμου είναι αναμενόμενο. Αυτό συμβαίνει διότι η υψηλότερη ένταση πεδίου εμφανίζεται στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλίου και όχι στην εσωτερική του, επομένως όσο αυξάνεται η διάμετρος του δακτυλίου, στο κέντρο του, εμφανίζεται όλο και μικρότερη ταχύτητα αέρα. Η αιτία που συμβαίνει κάτι τέτοιο έχει να κάνει με τη μορφή του ηλεκτροδίου, αφού το κυκλικό σχήμα του αγωγού δεν επιτρέπει στο εσωτερικό του δακτυλίου την ελεύθερη δημιουργία μίας υψηλής έντασης πεδίου. Δηλαδή, στα εσωτερικά σημεία του δακτυλίου, λόγω της συμμετρίας του, οι συνιστώσες του πεδίου αλληλοαναιρούνται, ενώ αυτό δεν συμβαίνει στα εξωτερικά.

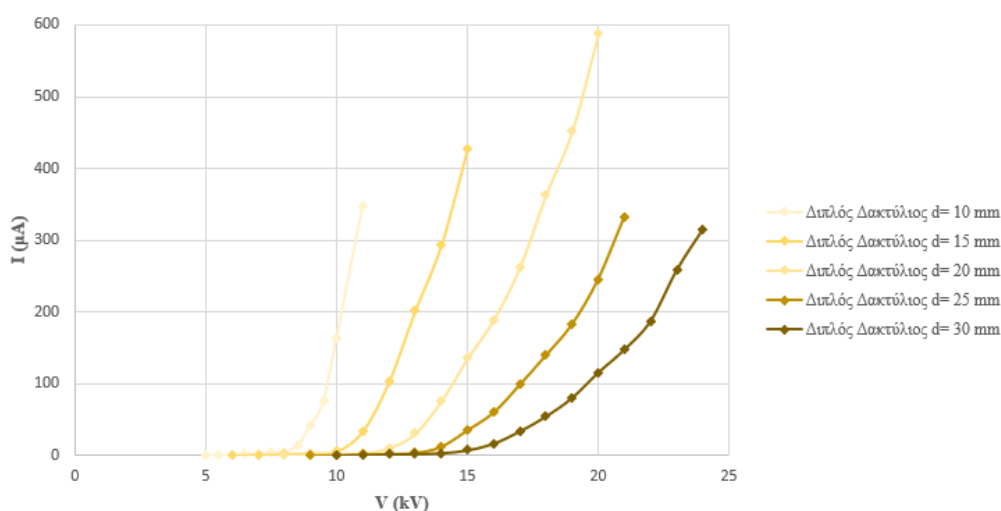
4.1.4 Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα για το σύστημα ηλεκτροδίων Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

Στον Πίνακα 4.8 γίνεται αναφορά της τάσεως κατωφλίου για τη διάταξη Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος, με βάση το εκάστοτε διάκενο.

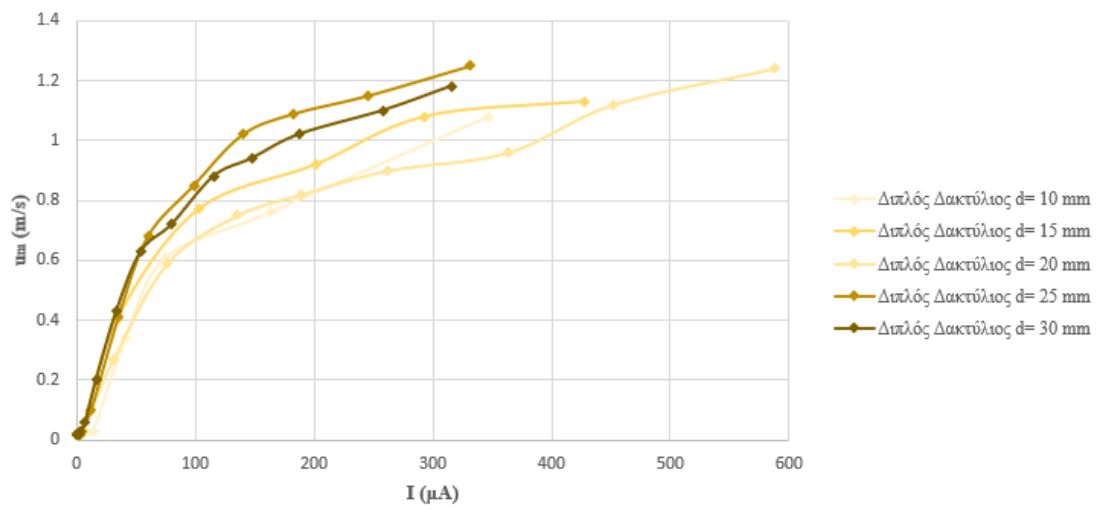
Πίνακας 4.8 Τάση κατωφλίου για το κάθε διάκενο της διάταξης Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

Τύπος διάταξης	Διάμετρος εξωτερικού δακτυλίου (mm)	Διάμετρος εσωτερικού δακτυλίου (mm)	Διάκενο (mm)	Τάση κατωφλίου (kV)
Διπλός Δακτύλιος - Πλέγμα	60	20	10	5.50
			15	7.00
			20	8.00
			25	10.00
			30	11.00

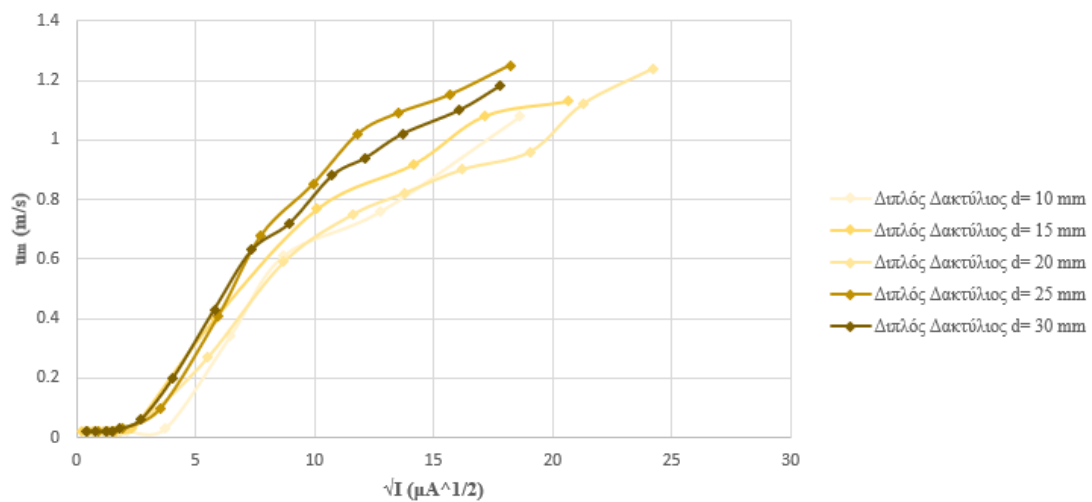
Ακολουθούν οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος, με εσωτερικό δακτύλιο διαμέτρου 20 mm και εξωτερικό δακτύλιο διαμέτρου 60 mm.



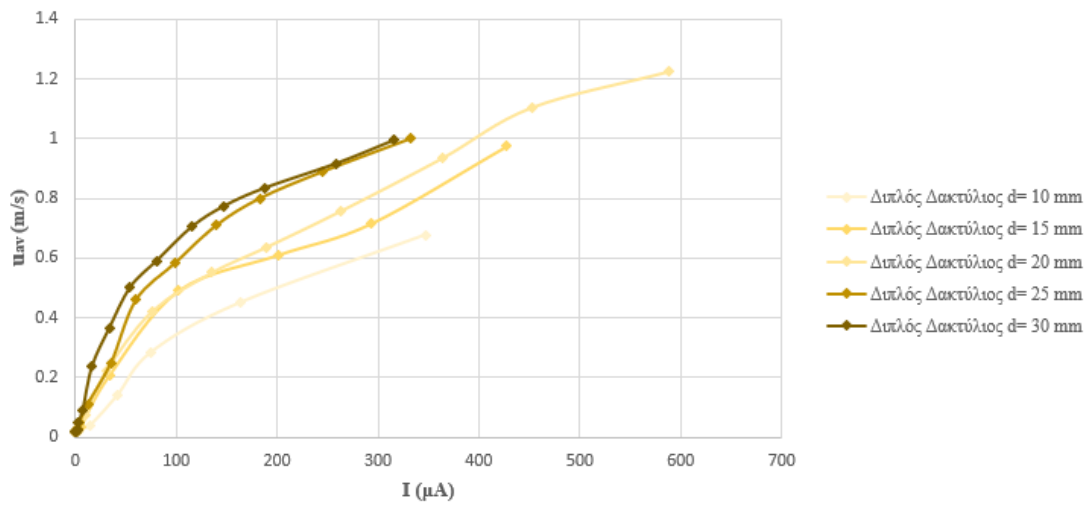
Σχήμα 4.61. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



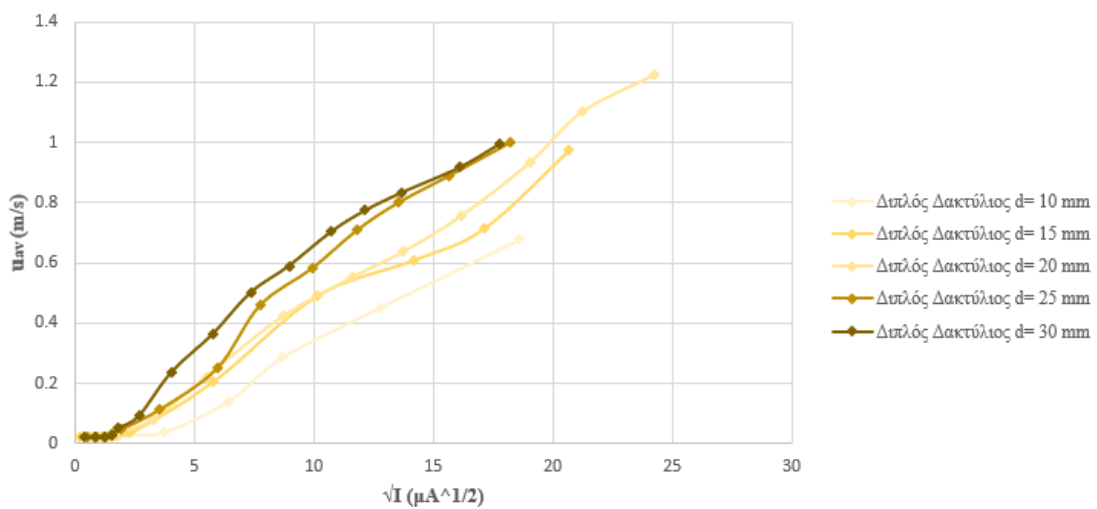
Σχήμα 4.62. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



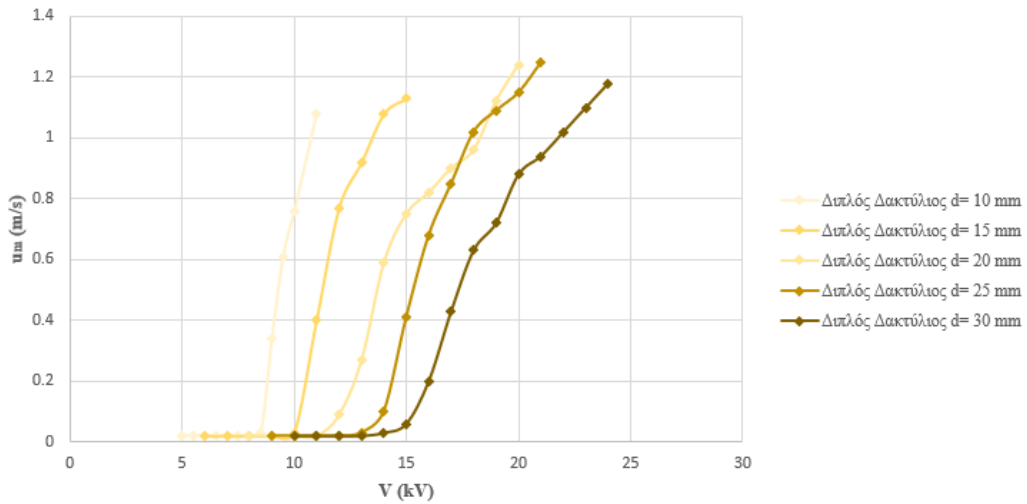
Σχήμα 4.63. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



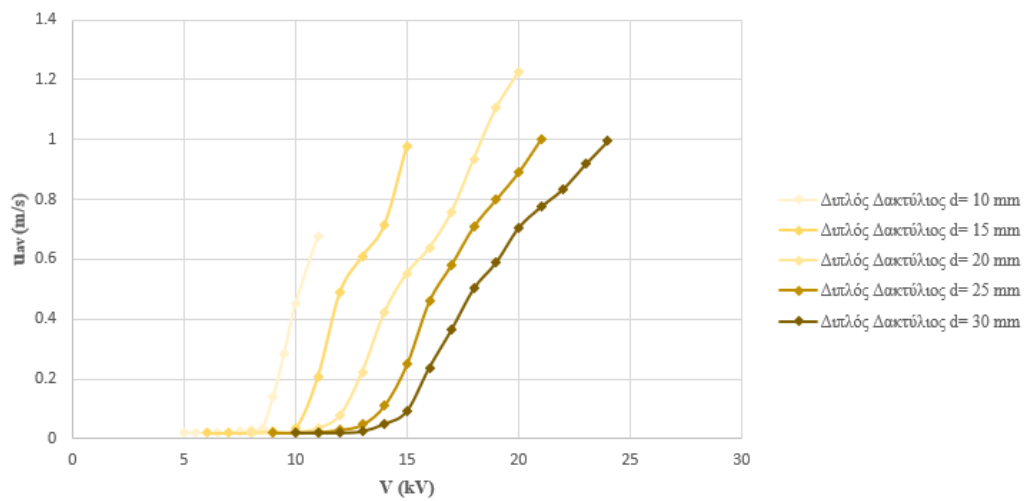
Σχήμα 4.64. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



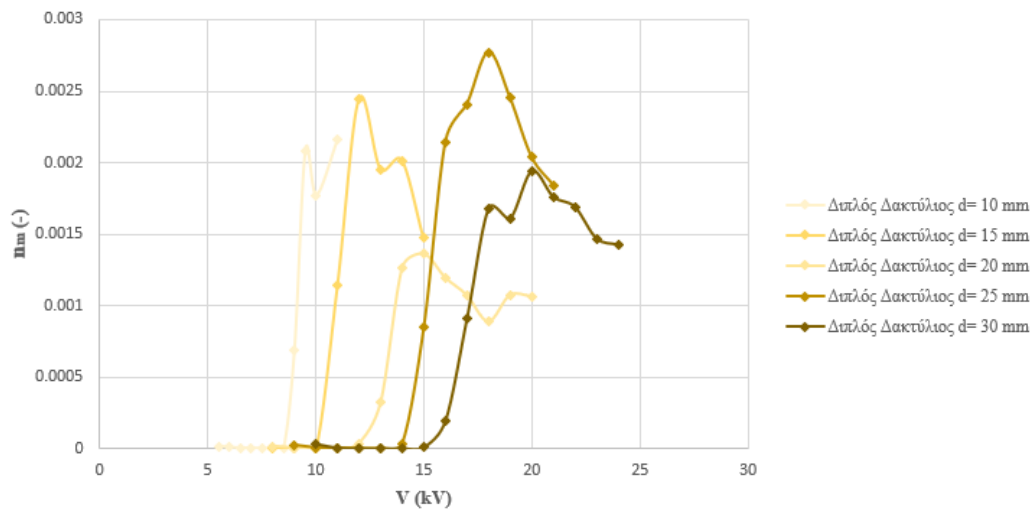
Σχήμα 4.65. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



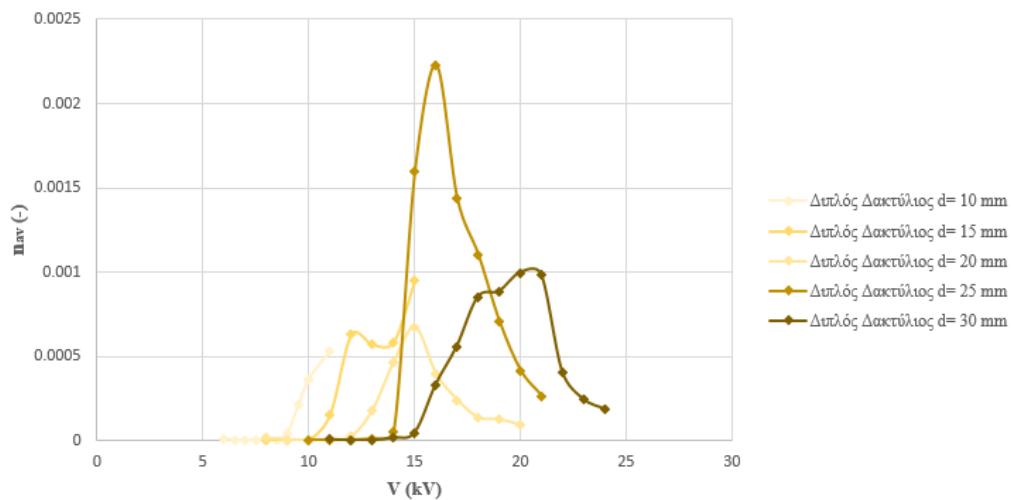
Σχήμα 4.66. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



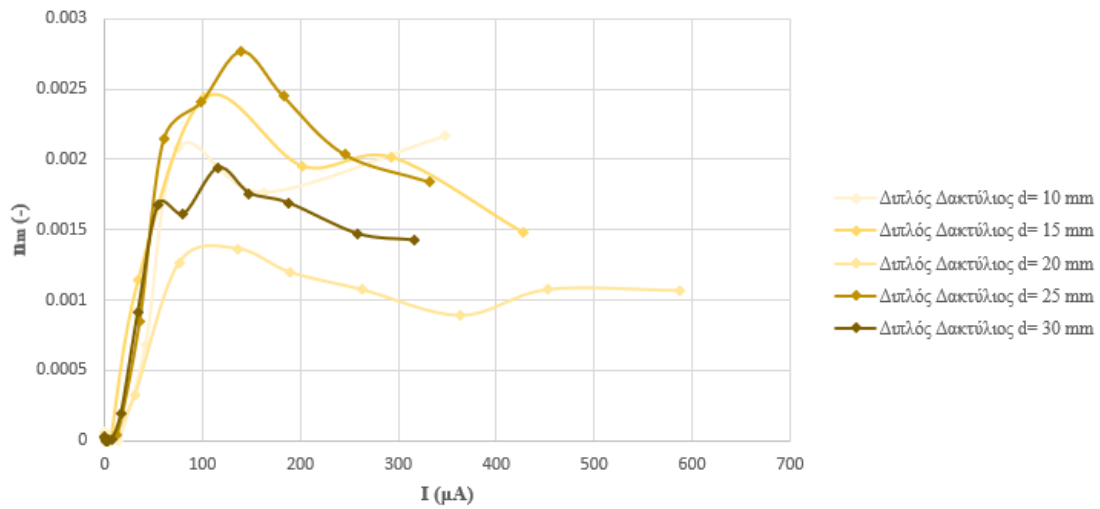
Σχήμα 4.67. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



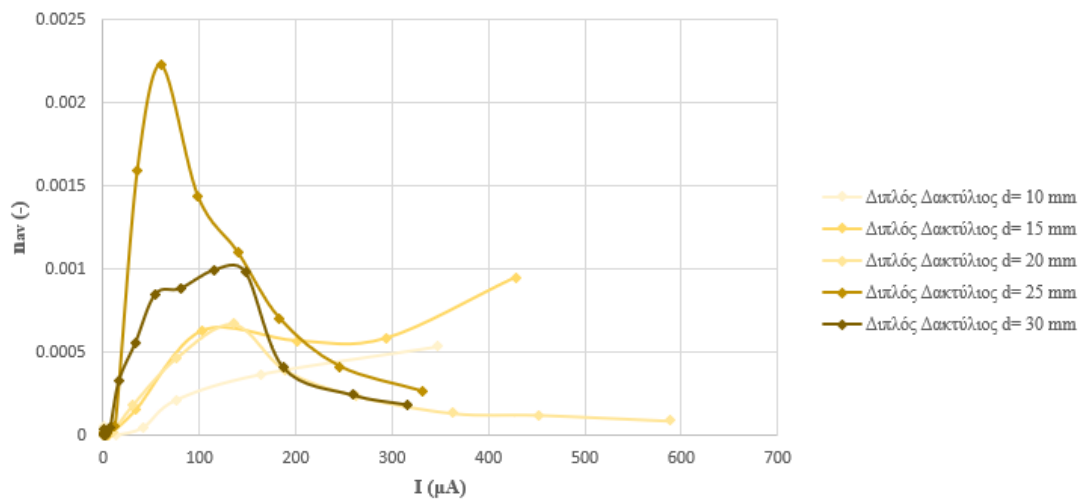
Σχήμα 4.68. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



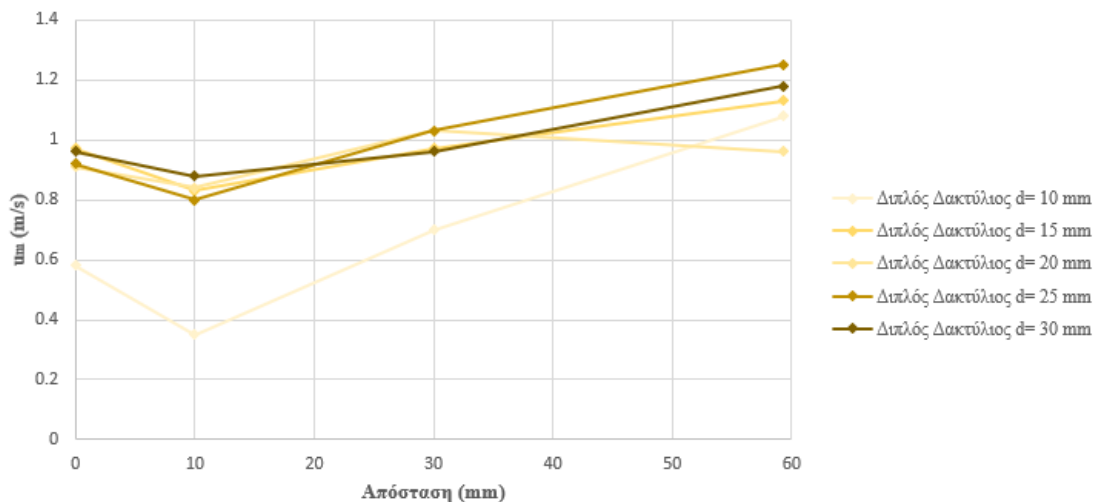
Σχήμα 4.69. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



Σχήμα 4.70. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



Σχήμα 4.71. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



Σχήμα 4.72. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

Παρατηρείται ότι στα Σχήματα 4.61-4.72 δεν περιλαμβάνονται οι μετρήσεις για το διάκενο των 5 mm. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν εμφάνιζε αξιόλογα αποτελέσματα και αφαιρέθηκε. Από τα Σχήματα 4.61 και 4.66 φαίνεται ότι η παρεχόμενη τάση δεν έφτασε σε μεγάλες τιμές. Πριν αναφερθεί η αιτία του συγκεκριμένου γεγονότος, έχει μεγάλη σημασία να παρατηρηθεί το Σχήμα 4.61 με μεγαλύτερη προσοχή, καθώς φαίνεται ότι μετά το διάκενο των 20 mm η τάση που οδηγεί στην διάσπαση εμφανίζεται πολύ πιο νωρίς από την αναμενόμενη. Ο λόγος που εμφανίζεται το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι, διότι η απόσταση μεταξύ των δύο δακτυλίων είναι 20 mm, οπότε, όταν το διάκενο γίνει μεγαλύτερο, μειώνεται σημαντικά η ένταση του πεδίου και αυξάνεται η ομοιογένειά του. Επίσης, συγκρίνοντας τα σχήματα της μέγιστης μέσης μετρούμενης ταχύτητας αέρα (Σχήμα 4.62, 4.64, 4.66, 4.68 και 4.70) σε σχέση με αυτά της μέσης ταχύτητας του αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (Σχήμα 4.63, 4.65, 4.67, 4.69 και 4.71) συμπεραίνεται ότι οι τιμές τους είναι παραπλήσιες. Βεβαίως, αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 4.72, όπου φαίνεται ότι οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται κάτω από τον εσωτερικό δακτύλιο (διαμέτρου 20 mm), αλλά κι αυτές δεν έχουν μεγάλη διαφορά από τις μέγιστες τιμές που παρατηρούνται στην άκρη του κυλινδρικού θαλάμου (59.3 mm). Έτσι, εξάγεται το συμπέρασμα ότι στο σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος εμφανίζεται στο σύνολο της διατομής του θαλάμου σχετική ομοιομορφία στις τιμές της ταχύτητας του αέρα.

Η μορφή των διαγραμμάτων των Σχημάτων 4.1, 4.13, 4.25, 4.37, 4.49 και 4.61 έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τη σχέση (12), που εκφράζει ότι η ένταση του ρεύματος είναι ανάλογη

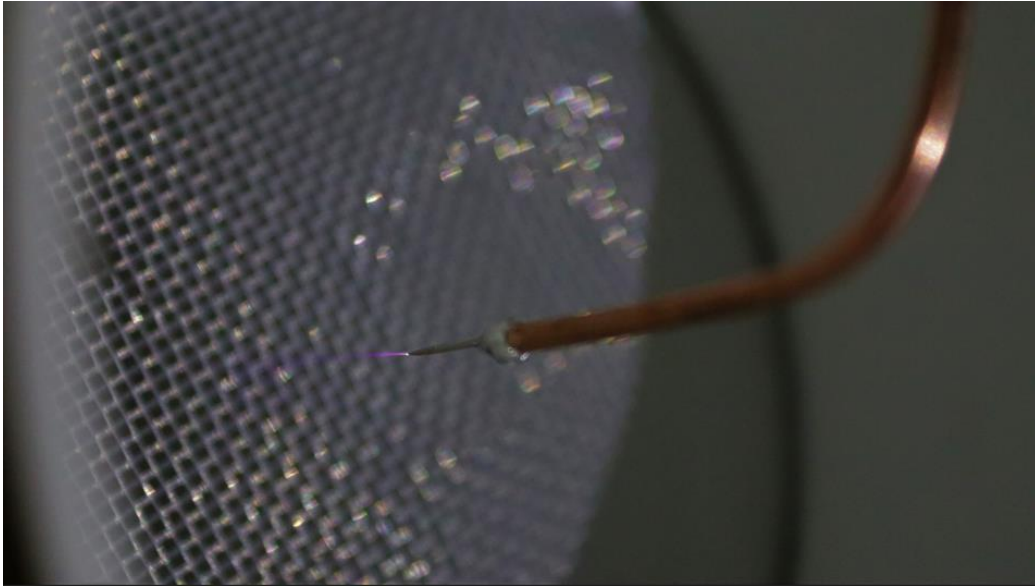
του τετραγώνου της τάσης. Επίσης, στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.3, 4.5, 4.15, 4.17, 4.27, 4.29, 4.39, 4.41, 4.51, 4.53, 4.63 και 4.65 η ταχύτητα του αέρα είναι γραμμική συνάρτηση της ρίζας της έντασης του ρεύματος, όπως αναμενόταν από τη θεωρητική σχέση (13). Τέλος, στα Σχήματα 4.6, 4.7, 4.18, 4.19, 4.30, 4.31, 4.42, 4.43, 4.54, 4.55, 4.66 και 4.67 διαπιστώνεται η γραμμική εξάρτηση της ταχύτητας του αέρα από την τάση, συμπεριφορά αναμενόμενη από τη θεωρητική σχέση (14).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα

5.1 Συγκριτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

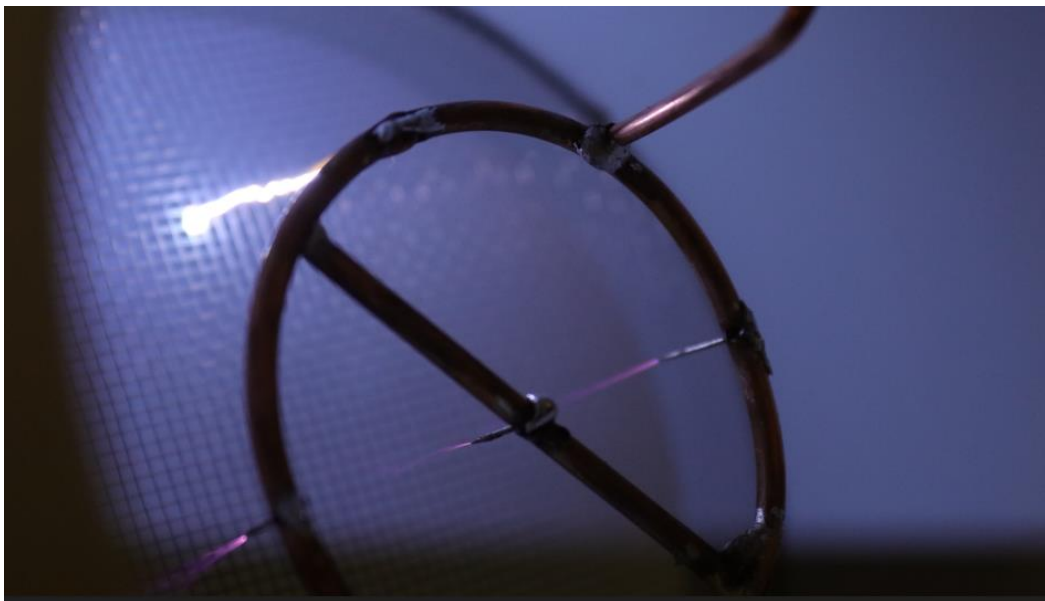
Κατ' αρχάς, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των θεωρητικών μετρήσεων έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, στους θεωρητικούς υπολογισμούς και τις προσομοιώσεις το σύστημα με τη μεγαλύτερη μέγιστη ένταση πεδίου ήταν αυτό της Ακίδας – Πλάκας. Πράγματι, πειραματικά είναι η διάταξη που εμφανίζει ροή αέρα (δηλαδή ιονισμό του χώρου μεταξύ των ηλεκτροδίων) στην έξοδο του θαλάμου σε πιο χαμηλά επίπεδα της εφαρμοζόμενης τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων σε σύγκριση με όλες τις άλλες. Επίσης, κάτι που ισχύει σε όλα τα συστήματα, στους θεωρητικούς υπολογισμούς και στις προσομοιώσεις είναι ότι η μέγιστη ένταση του πεδίου κατά την αύξηση του διακένου έφθινε, για δεδομένη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων (π.χ. στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ενδεικτικά σταθερό δυναμικό 10kV). Από τις πειραματικές μετρήσεις αποδεικνύεται ότι, όντως, η μέγιστη ένταση πεδίου μειώνεται κατά την αύξηση της απόστασης του εκπομπού από την κάθοδο, καθώς η τάση που απαιτείται για την έναρξη του ιονισμού του χώρου των ηλεκτροδίων είναι μεγαλύτερη με την αύξηση του διάκενου. Επιπλέον, μετρήθηκε μέσω των προσομοιώσεων η αποθηκευμένη ενέργεια κατ' όγκο. Όπως φάνηκε, σ' αυτήν την περίπτωση το σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλάκας έχει τις χαμηλότερες τιμές. Μέσω των πειραματικών μετρήσεων, διαπιστώθηκε ότι όντως εμφανίζει τις πιο χαμηλές τιμές ταχύτητας αέρα. Η αιτία που ο Διπλός Δακτύλιος δεν εμφανίζει υψηλές τιμές ταχύτητας αέρα είναι διότι το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο εμφανίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία, άρα χαμηλότερες τιμές πεδιακής έντασης. Επιπλέον, έγινε θεωρητικός υπολογισμός του συντελεστή χρησιμοποίησης, μέσω του οποίου παρατηρείται ότι κατά την αύξηση του διακένου, θα πρέπει να μειώνεται η ομοιομορφία στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου του εκάστοτε συστήματος. Πράγματι, μέσω των πειραματικών μετρήσεων αποδείχθηκε ότι, όντως, κατά την αύξηση του διακένου η τάση διάσπασης εμφανιζόταν σε υψηλότερες τιμές.

Πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζουν, ορισμένες εικόνες που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, όπου φαίνεται το πόσο έντονο είναι το φαινόμενο κορώνα με σπινθήρα σε εξαιρετικά ασταθή σημεία (λίγο πριν τη διάσπαση) για μερικά από τα προς μέτρηση συστήματα.



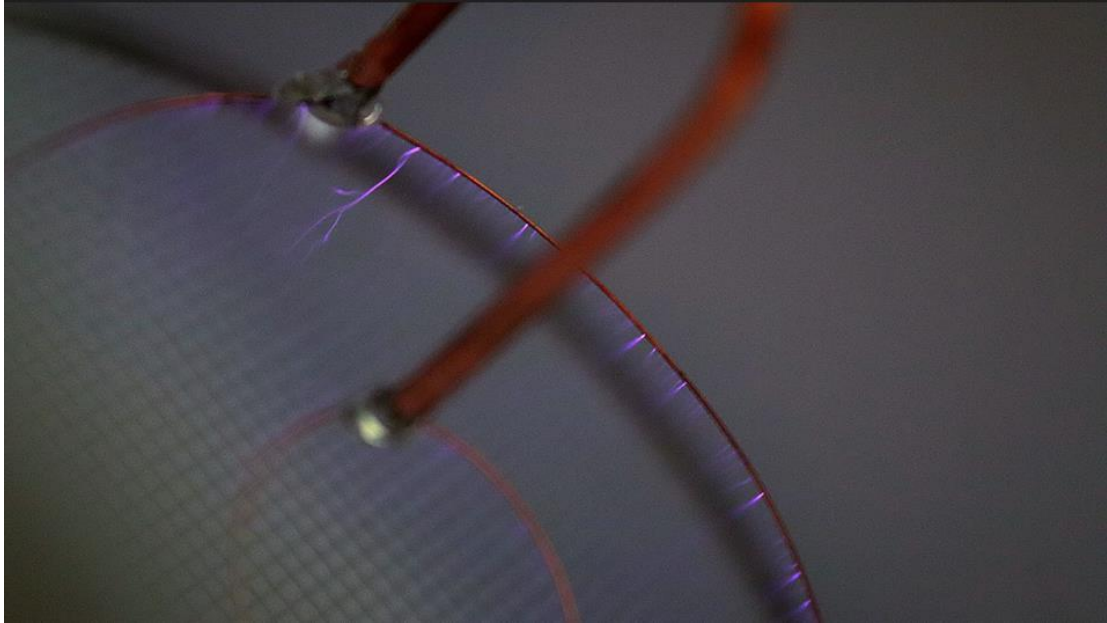
Εικόνα 5.1. Φαινόμενο κορώνα με σπινθήρα γύρω από την αιχμή της ακίδας, για το σύστημα Ακίδας – Πλέγματος

Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται το πόσο εστιασμένο είναι το πεδίο που δημιουργείται στην αιχμή της ακίδας. Επίσης, είναι πολύ χαρακτηριστικό το παραγόμενο φως λόγω του υψηλού ιονισμού που εμφανίζεται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.



Εικόνα 5.2. Η στιγμή της διάσπασης μίας εκ των πέντε ακίδων με το πλέγμα

Η Εικόνα 5.2 είναι αρκετά εντυπωσιακή, καθώς έχει ληφθεί την στιγμή που γίνεται μία διάσπαση στο σύστημα Πέντε Ακίδων - Πλέγματος, ενώ παράλληλα φαίνονται οι άλλες ακίδες να βρίσκονται σε κατάσταση υψηλού ιονισμού.

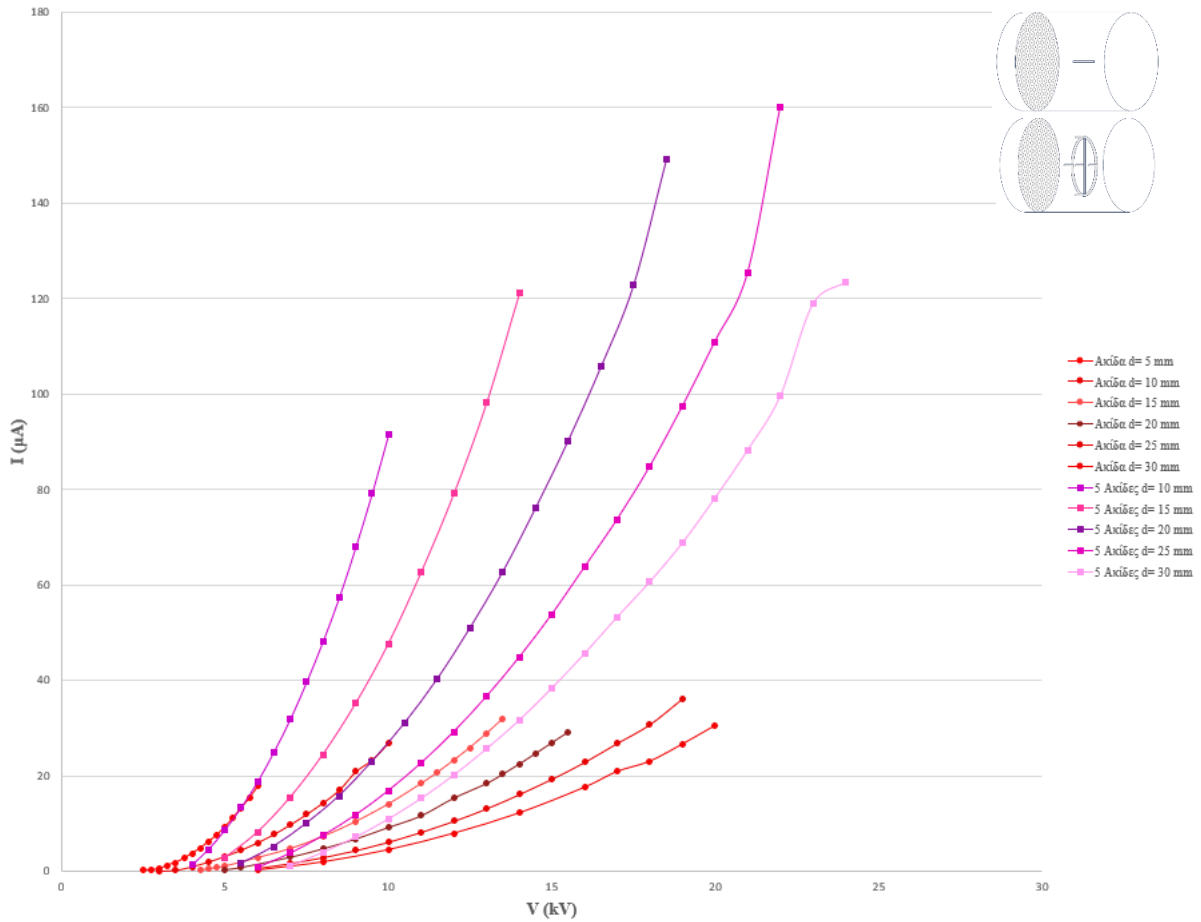


Εικόνα 5.3. Φαινόμενο κορώνα με σπινθήρα στο σύστημα Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος, κυρίως γύρω από τον μεγάλο δακτύλιο (διαμέτρου 60 mm)

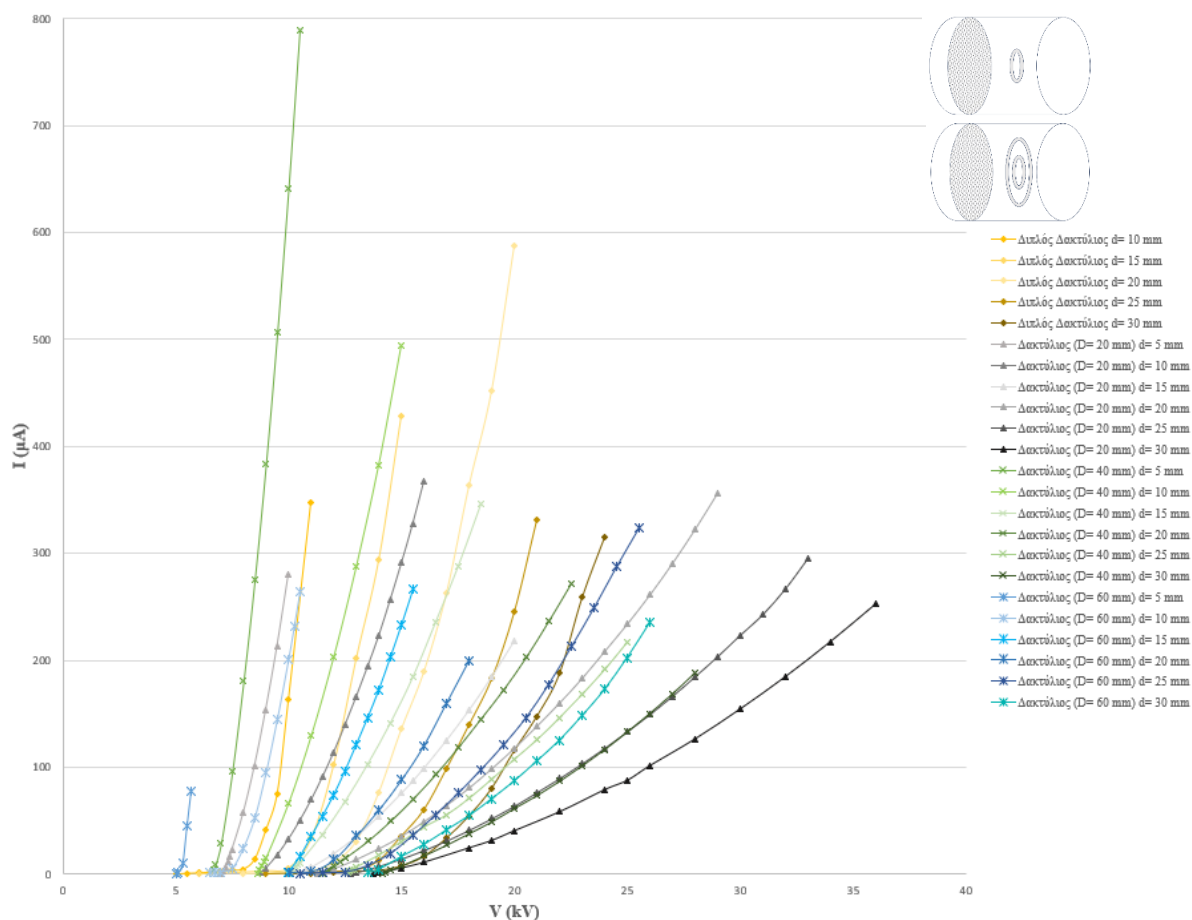
Από την Εικόνα 5.3 φαίνεται ότι ολόκληρος ο αγωγός του διπλού δακτυλίου έχει χρωματισθεί λόγω του έντονου φαινομένου κορώνα. Σημειώνεται επίσης ότι το φαινόμενο κορώνα δεν εμφανίζεται στον εσωτερικό δακτύλιο παρά μόνο στον εξωτερικό, γεγονός που καταδεικνύει ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σαφώς χαμηλότερη στην επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου λόγω της γειτνίασής του με τον εξωτερικό δακτύλιο που επιδρά στη μείωση της τιμής του πεδίου στον εσωτερικό δακτύλιο. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις προσομοιώσεις μέσω FEMM στα χρωματικά διαγράμματα κατανομής της πεδιακής έντασης στο συγκεκριμένο τύπο ηλεκτροδίων εκπομπού.

Μέσω των παραπάνω εικόνων (Εικόνες 5.1-5.3) μπορεί να διαπιστωθεί ο λόγος που τα ηλεκτρόδια του εκπομπού καταπονούνται.

Παρακάτω παρατίθενται μερικά συνδυαστικά διαγράμματα, ώστε να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων συστημάτων.

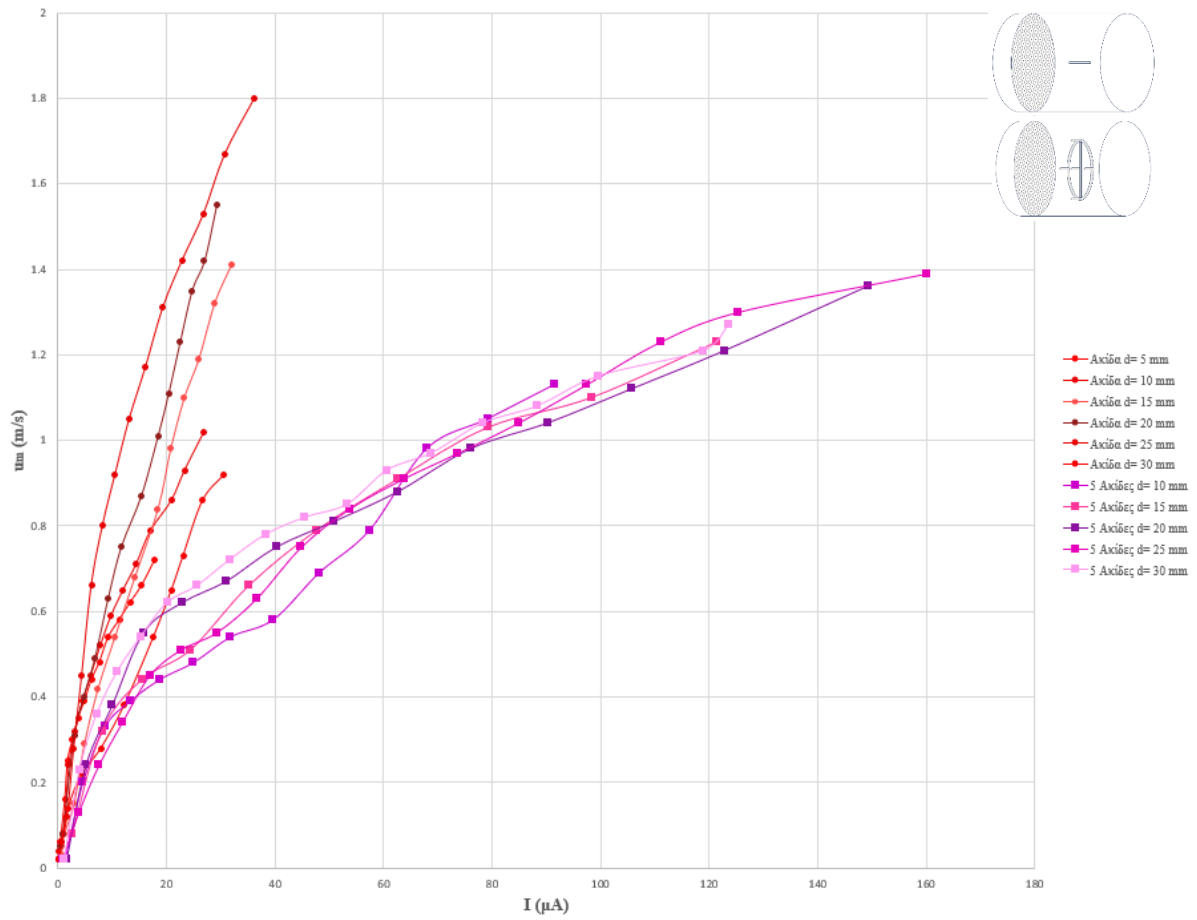


Σχήμα 5.1. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδα – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

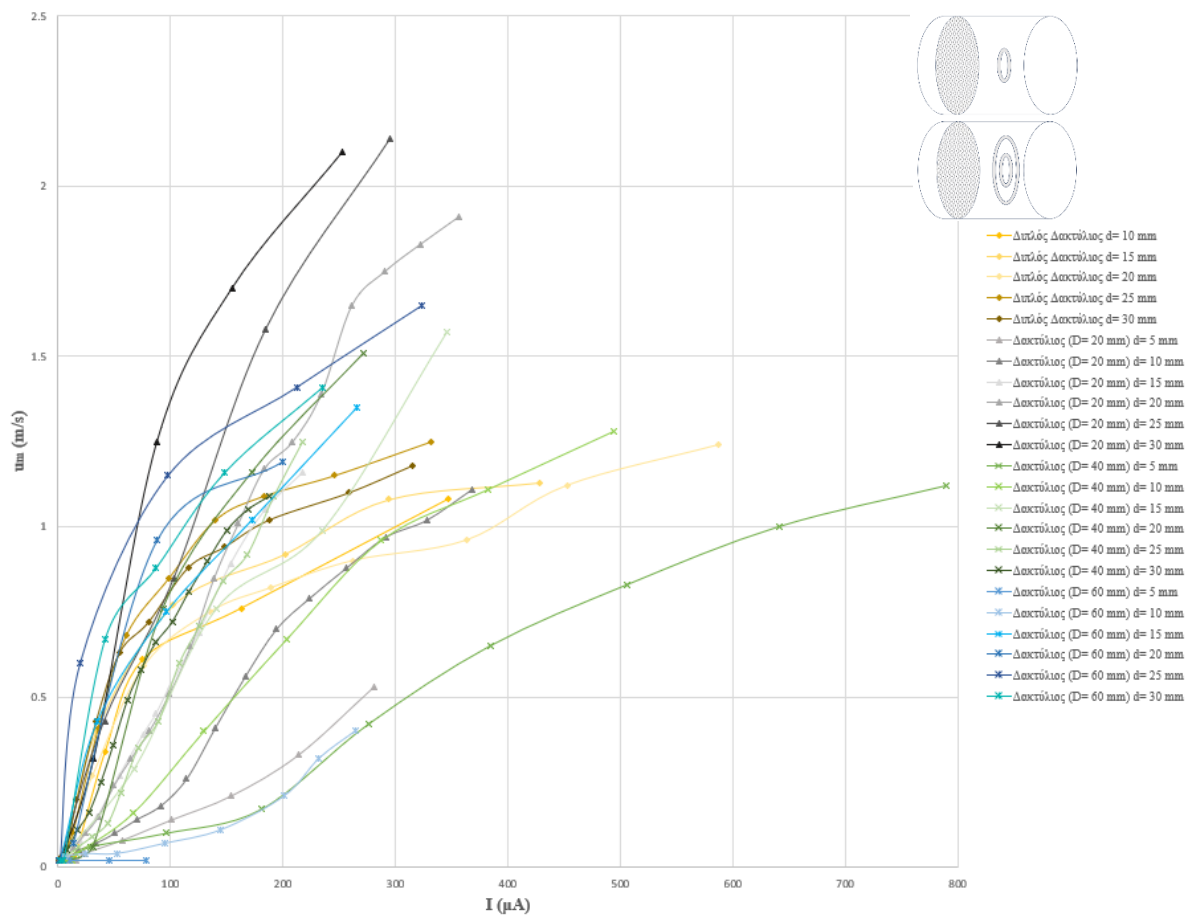


Σχήμα 5.2. Ένταση ρεύματος (I) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

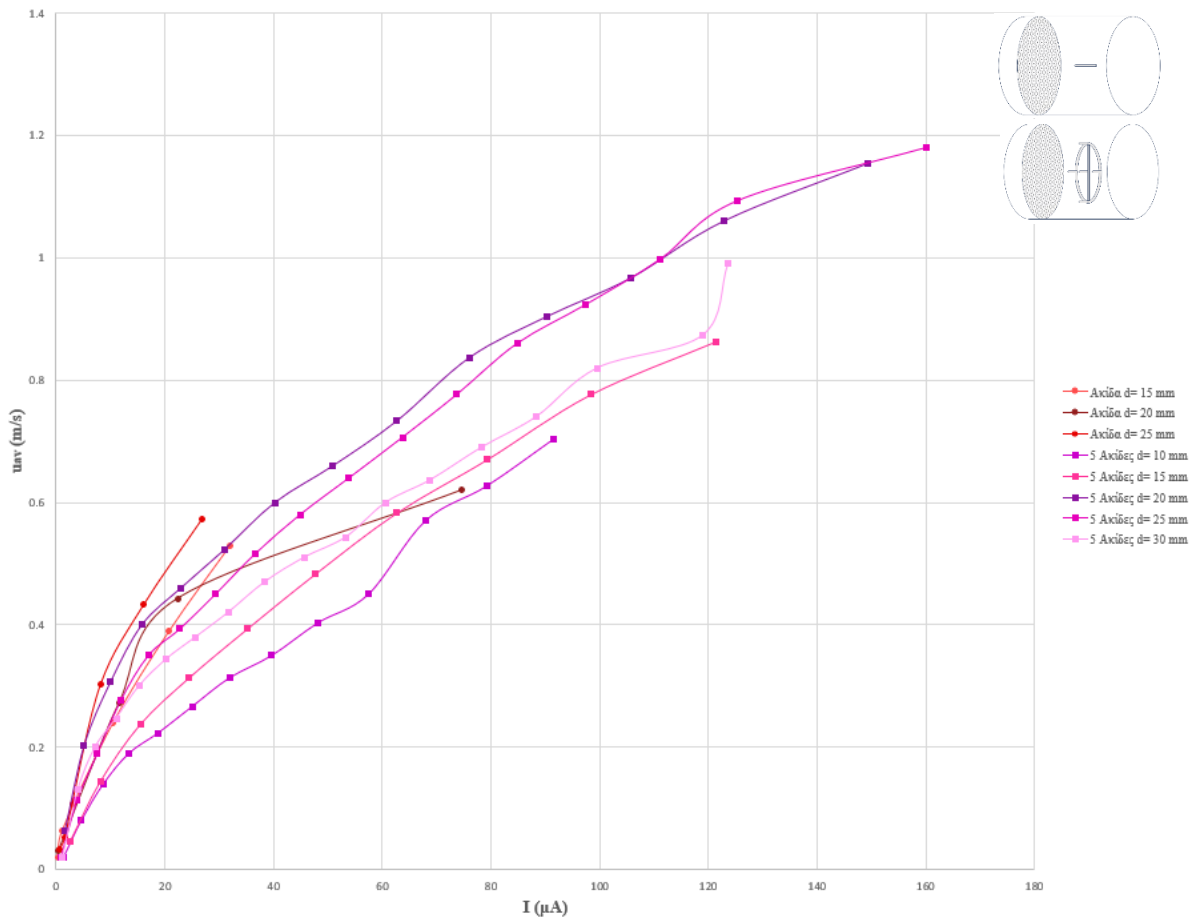
Από τα Σχήματα 5.1 και 5.2 φαίνεται ότι το σύστημα Ακίδας – Πλέγματος παρουσιάζει το μικρότερο ρεύμα. Εξάιρεση αποτελούν τα διάκενα 20 mm και 30 mm, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, ήταν σε κατάσταση πολύ έντονου φαινομένου κορώνα, οπότε παραγόταν αρκετό φως. Πολύ χαμηλό ρεύμα μετρήθηκε και για το σύστημα Πέντε Ακίδων – Πλέγματος, ενώ τα συστήματα με τους δακτυλίους είχαν αυξημένες απαιτήσεις σε ρεύμα. Ένα πρώτο συμπέρασμα, είναι ότι λόγω της αρκετά αυξημένης επιφάνειας που δύναται να ιονισθεί στην περίπτωση των δακτυλίων, σε σχέση με την περίπτωση της ακίδας που ιονίζεται μόνο ο χώρος γύρω από το αιχμηρό άκρο της, το ρεύμα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο. Ειδικά, στην περίπτωση του Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος που εκεί χρησιμοποιούνται ως περιοχή ιονισμού δύο Δακτύλιοι, το ρεύμα είναι αρκετά υψηλό. Επίσης, φαίνεται ότι οι δακτύλιοι χρειάζονται αρκετά μεγαλύτερη τάση για να εκκινήσει ο ιονισμός του χώρου, αλλά επειδή έχουν πολύ χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης, πηγαίνουν σε υψηλές τάσεις μέχρι να ξεκινήσουν οι διασπάσεις.



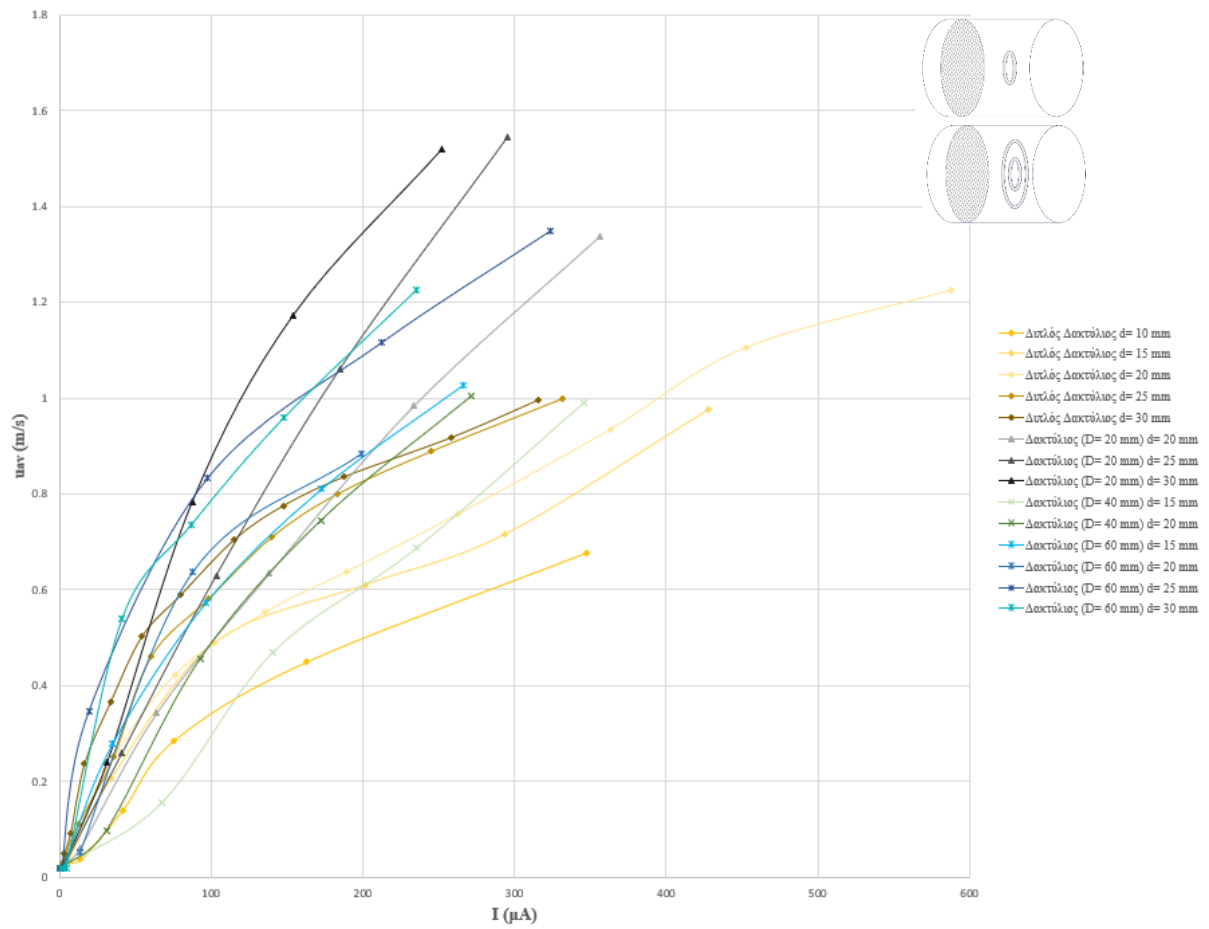
Σχήμα 5.3. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



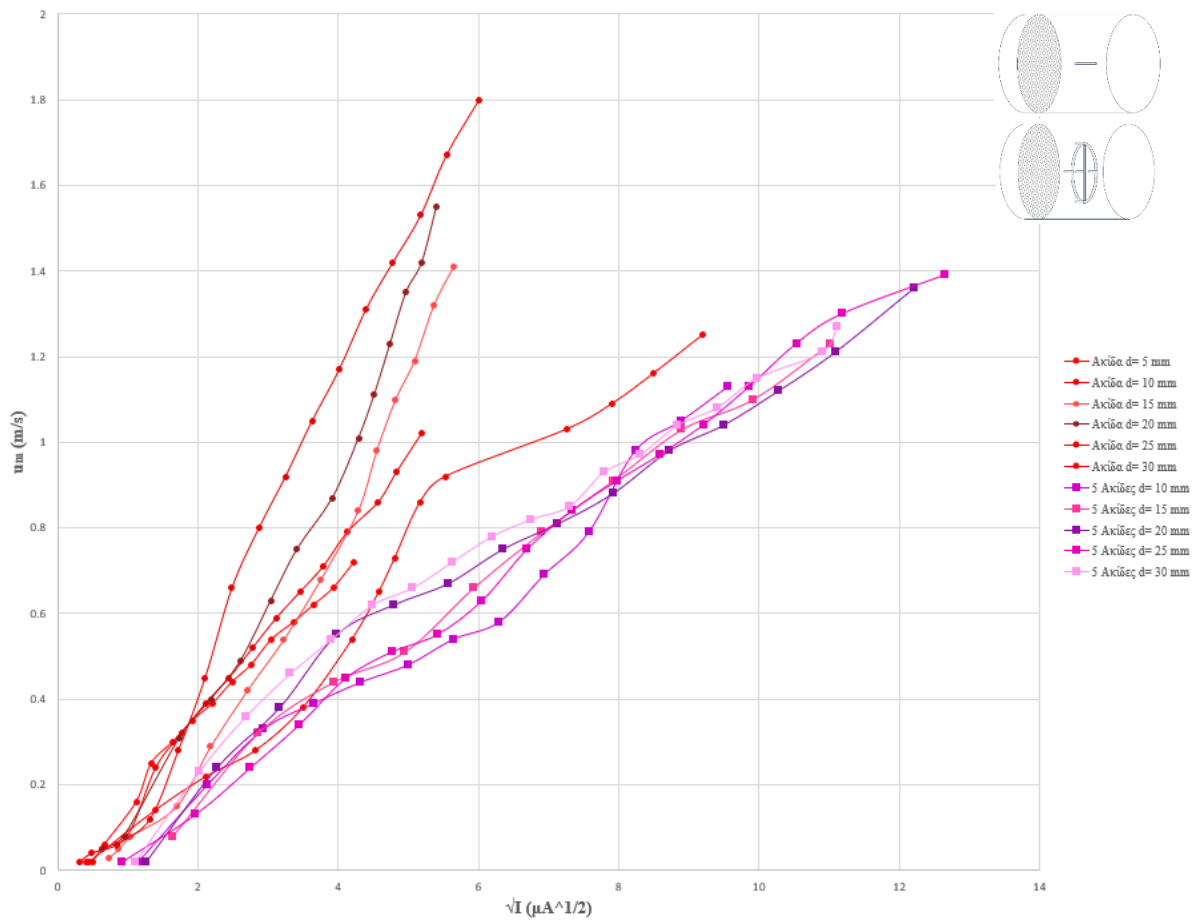
Σχήμα 5.4. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίων – Πλέγματος



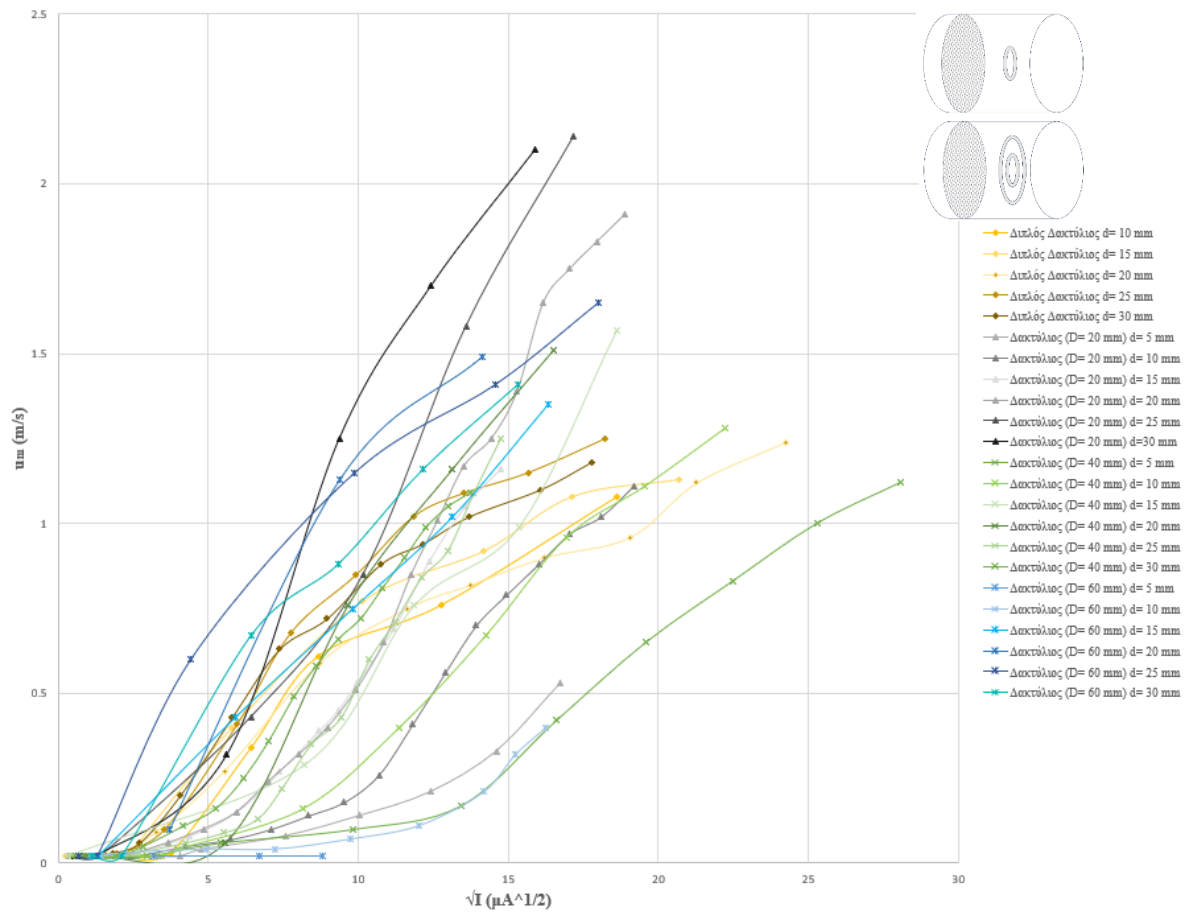
Σχήμα 5.5. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



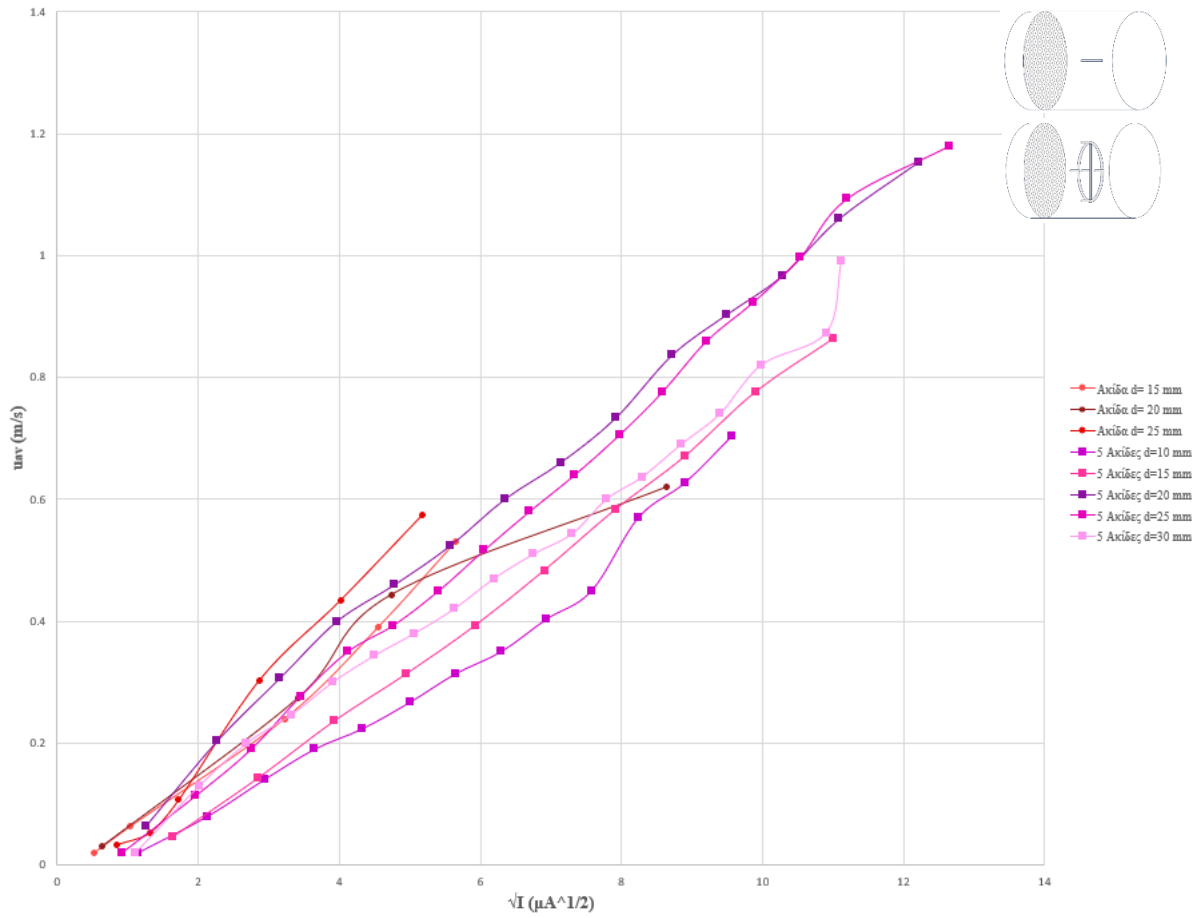
Σχήμα 5.6. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της έντασης του ρεύματος (I) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



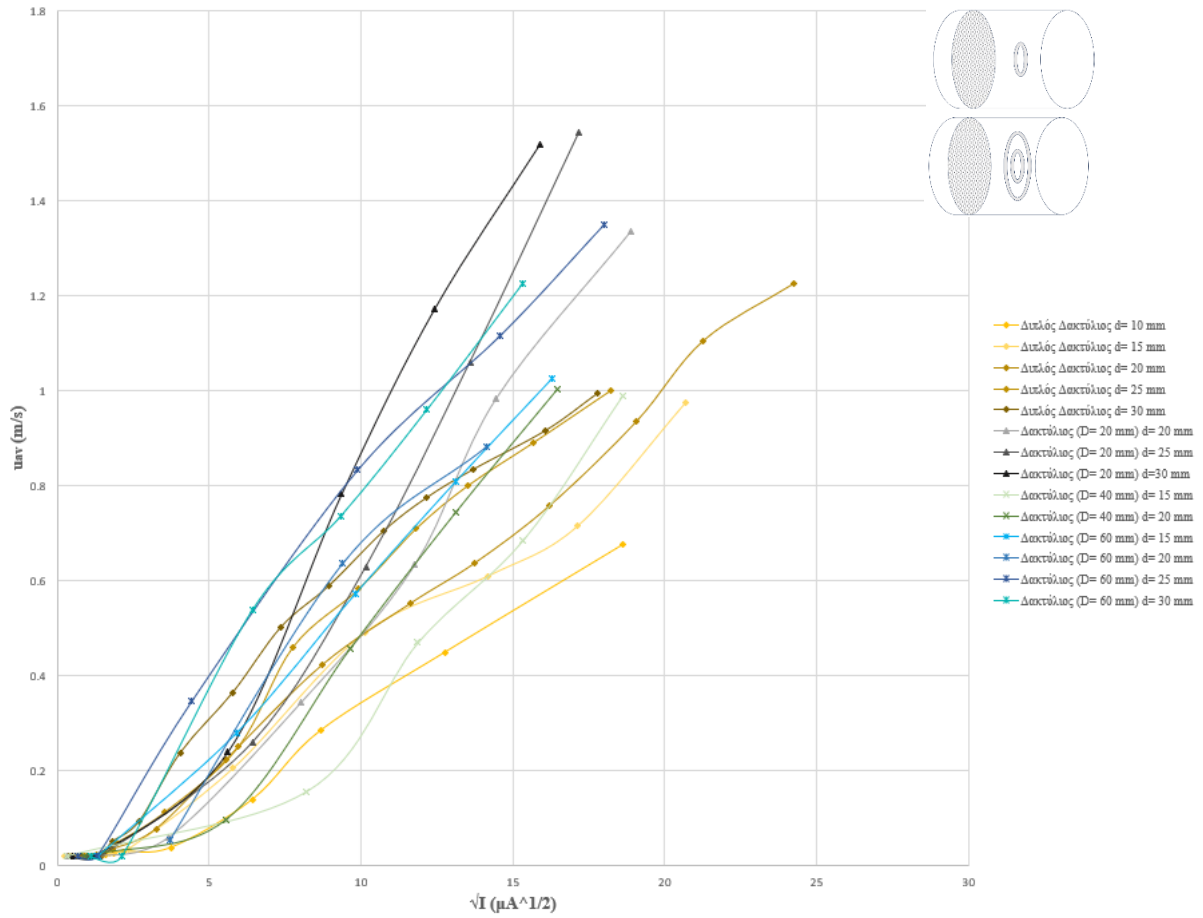
Σχήμα 5.7. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



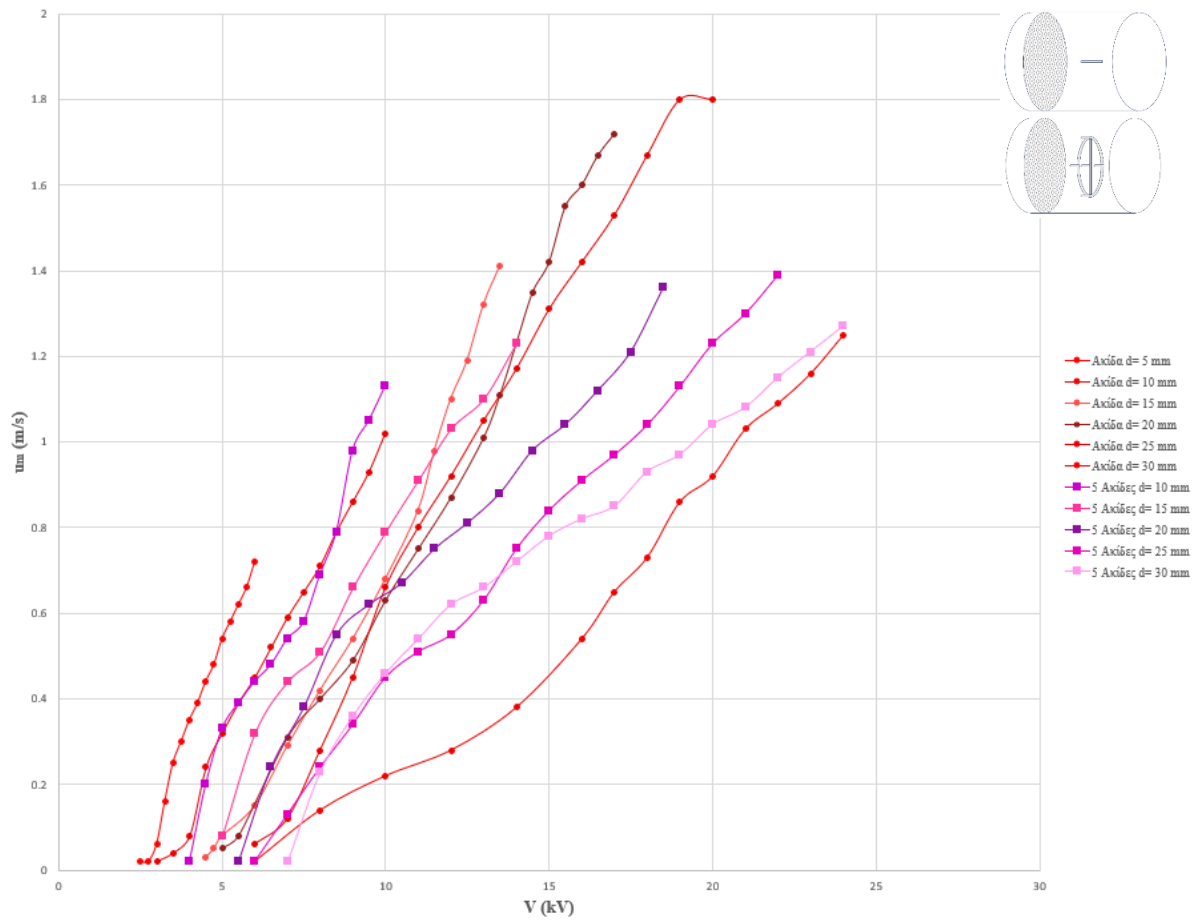
Σχήμα 5.8. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος



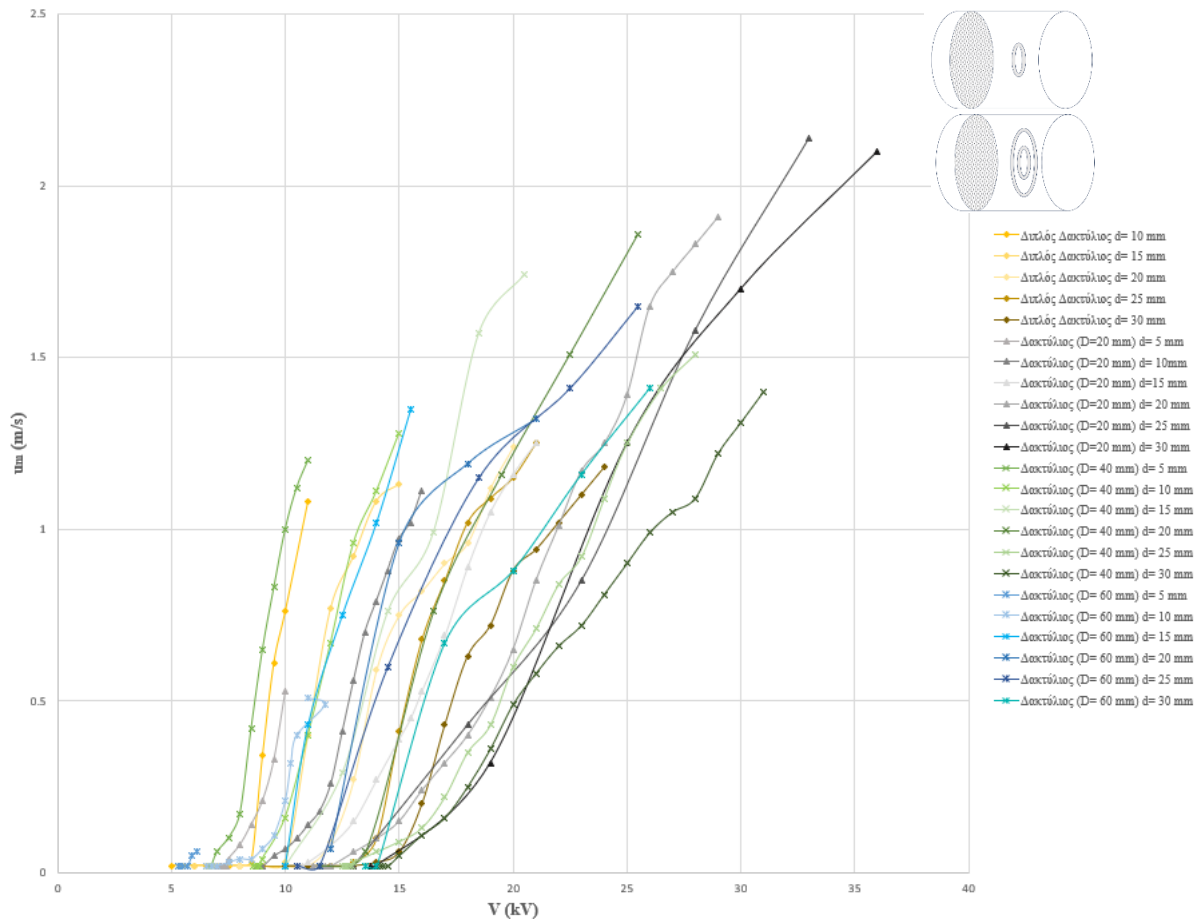
Σχήμα 5.9. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 5.10. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της ρίζας της έντασης του ρεύματος (\sqrt{I}) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

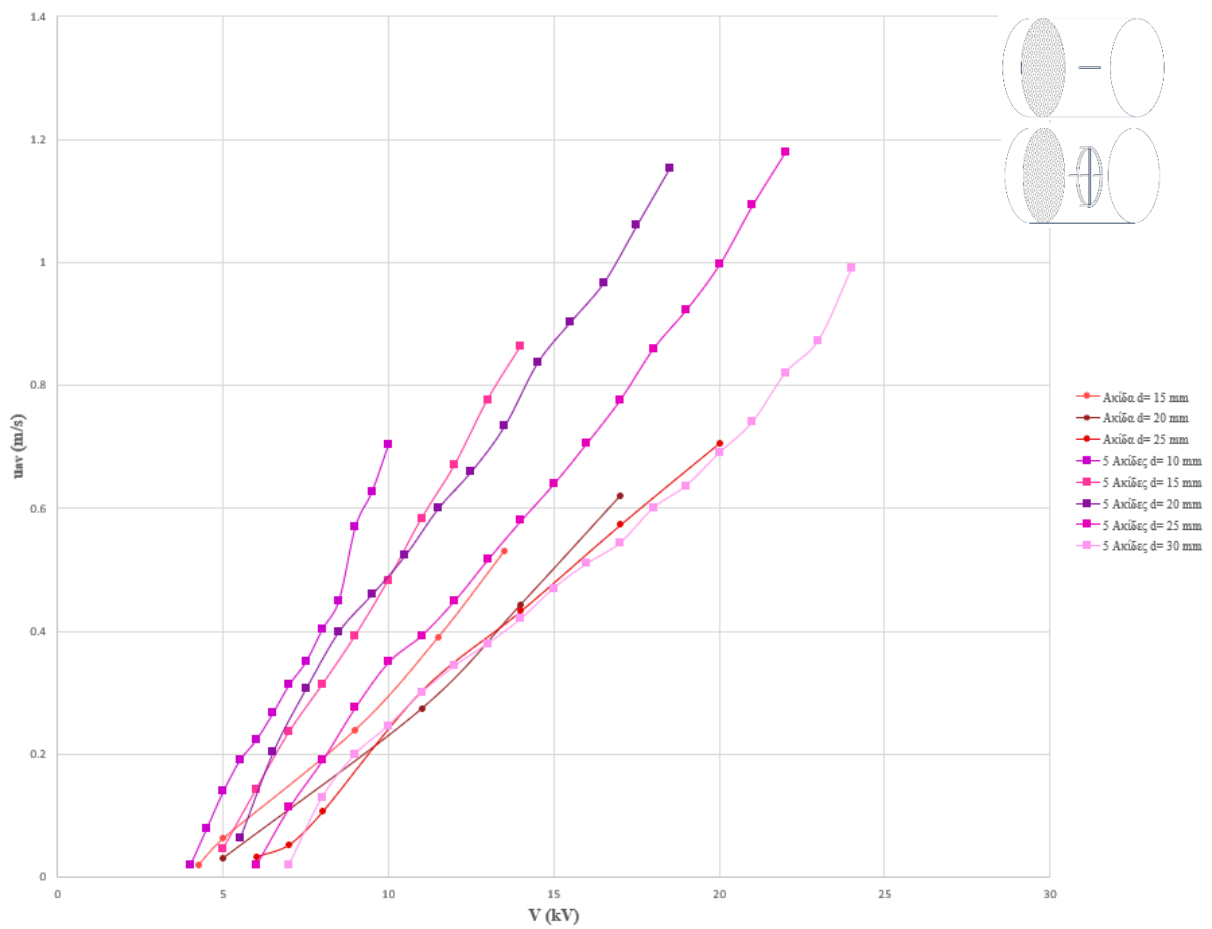


Σχήμα 5.11. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

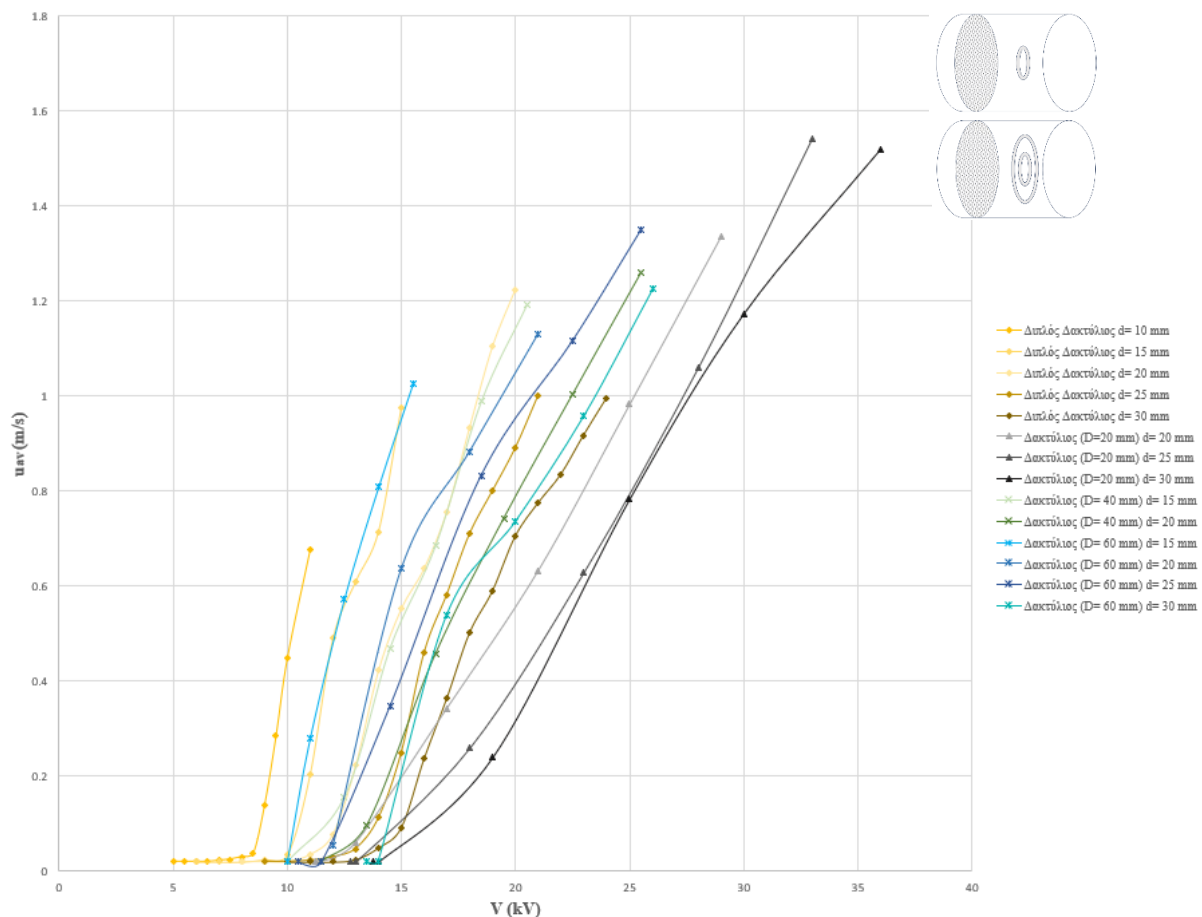


Σχήμα 5.12. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

Από τα Σχήματα 5.3, 5.4, 5.7, 5.8, 5.11 και 5.12 φαίνεται ότι η μία ακίδα εμφανίζει υψηλότερη ταχύτητα σε σχέση με τις πέντε ακίδες. Ομοίως, οι μεμονωμένοι δακτύλιοι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ταχύτητα σε σύγκριση με τον διπλό. Άρα, παρατηρήθηκε ότι, όσο πιο ομοιογενές γίνεται το πεδίο, τόσο μειώνεται η μέγιστη ταχύτητα του αέρα, δηλαδή σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να αυξηθεί η ταχύτητα του αέρα μέσω της αύξησης των ακίδων εντός του κυλινδρικού θαλάμου. Επιπλέον, μακράν την πιο υψηλή ταχύτητα από όλες τις διατάξεις την είχε αυτή με το δακτύλιο διαμέτρου 20 mm και μάλιστα στο κέντρο του θαλάμου και όχι κάτω από τον αγωγό του δακτυλίου.

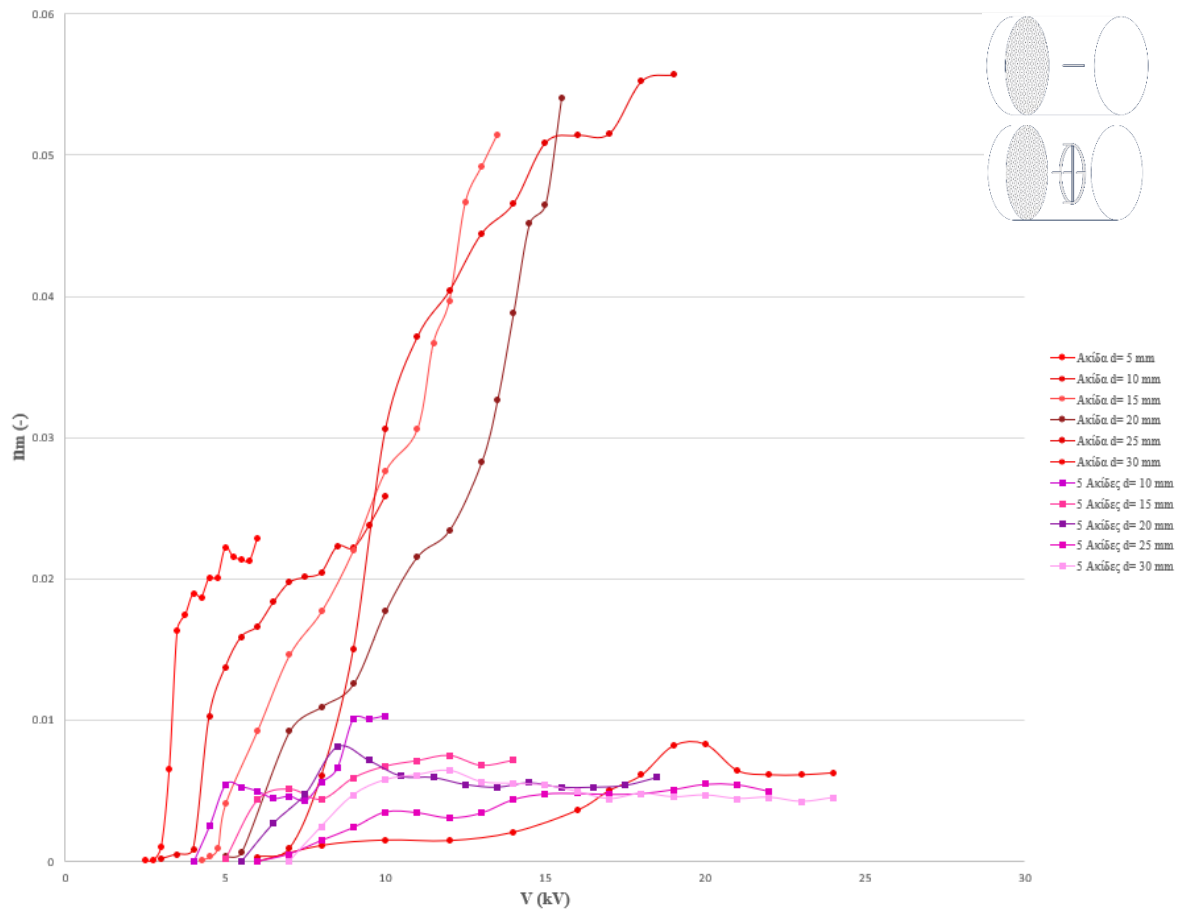


Σχήμα 5.13. Μέση ταχύτητα αέρα στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

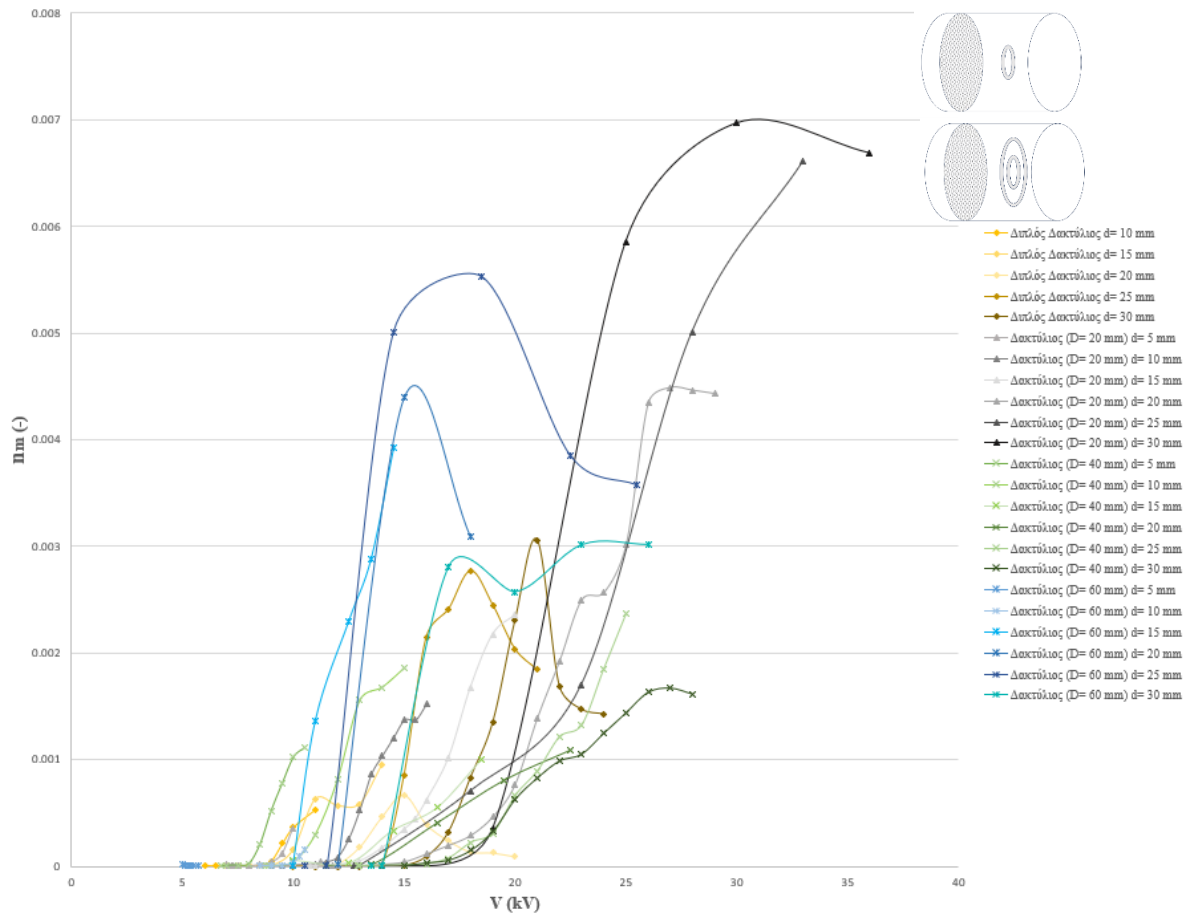


Σχήμα 5.14. Μέση ταχύτητα αέρα στην διατομή του κυλινδρικού θαλάμου (u_{av}) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

Στα Σχήματα 5.5, 5.6, 5.9, 5.10, 5.13 και 5.14 απεικονίζεται η ταχύτητα του αέρα στο σύνολο της διατομής. Είναι αρκετά ενδιαφέροντα τα ευρήματα που έχουν καταγραφεί, καθώς έχει μειωθεί πάρα πολύ η ταχύτητα του αέρα σε ορισμένα συστήματα. Η πιο έντονη διαφορά είναι εκείνη του συστήματος Ακίδας – Πλέγματος, όπου όπως είναι αναμενόμενο, η ακίδα εμφανίζει αρκετά εστιασμένη περιοχή ιονισμού. Ο δακτύλιος με διάμετρο 20 mm ξεχωρίζει και σε αυτήν την περίπτωση, διότι παρουσιάζει σταθερότητα στη μέση ταχύτητα του αέρα στη διατομή του θαλάμου. Ο διπλός δακτύλιος όχι μόνο δεν μπορεί να αναπτύξει μεγάλες ταχύτητες, αλλά και στο σύνολό της η διατομή δεν καταφέρνει να έχει υψηλότερο μέσο όρο στην ταχύτητα του αέρα. Επίσης, οι πέντε ακίδες, έχουν πολύ καλύτερη διασπορά του αέρα στη διατομή σε σχέση με την μία, αλλά ούτε αυτές δεν μπορούν να αγγίξουν τις ταχύτητες των μεμονωμένων δακτυλίων.

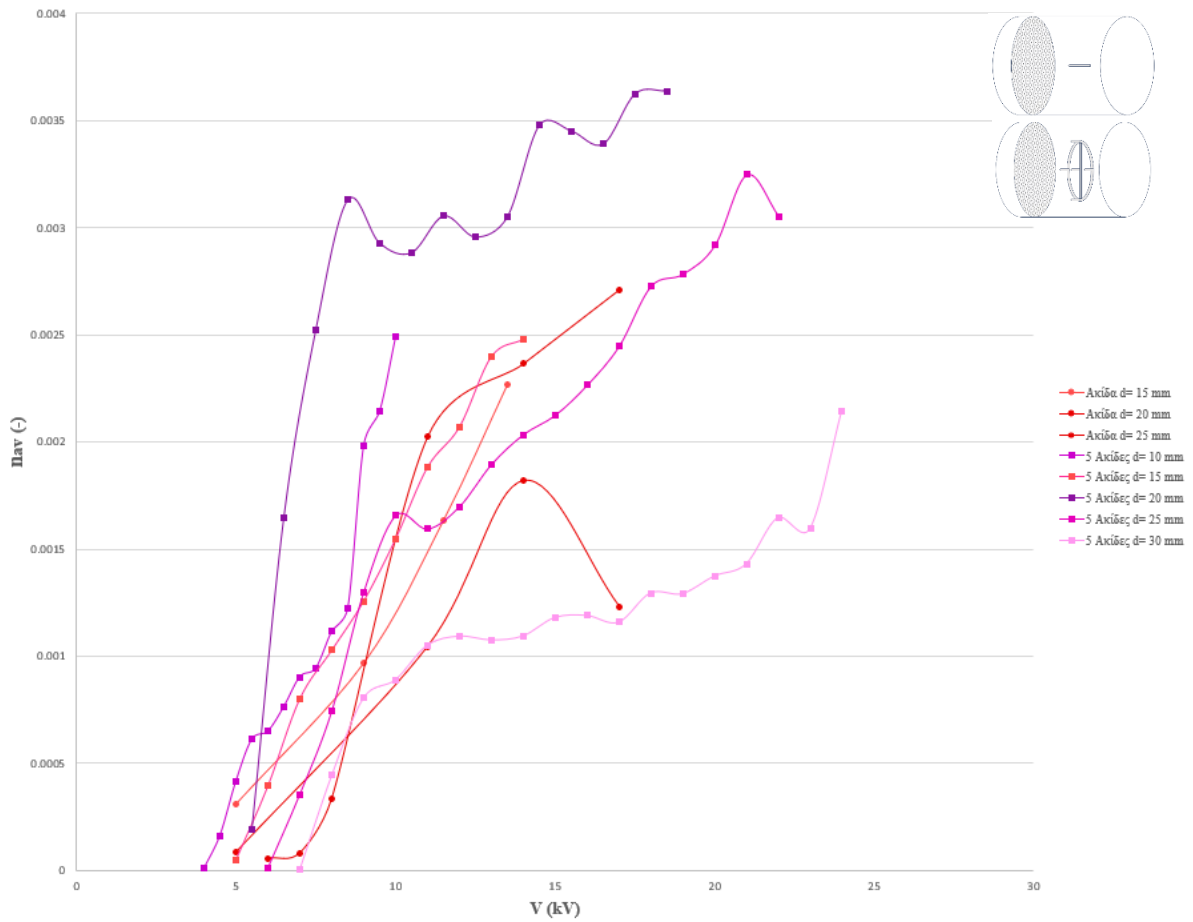


Σχήμα 5.15. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

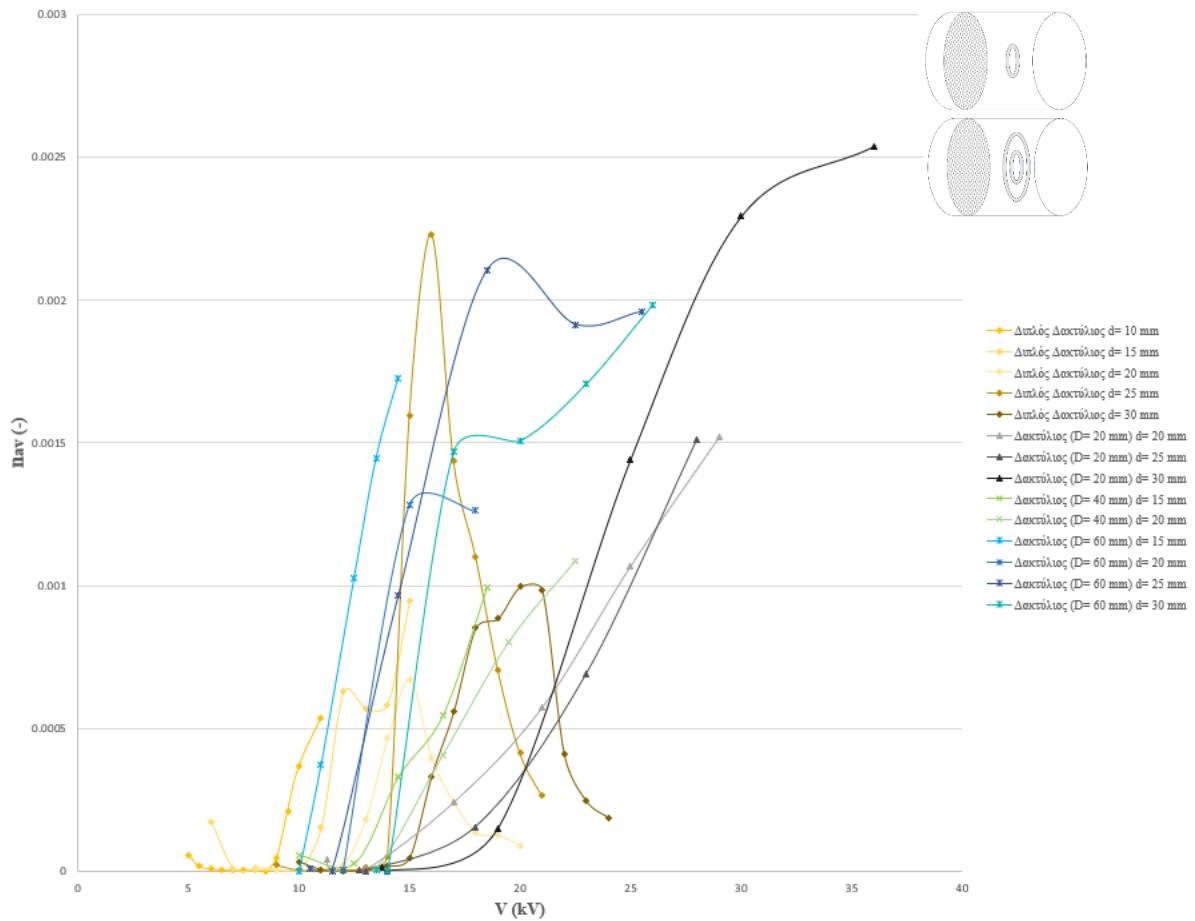


Σχήμα 5.16. Βαθμός απόδοσης (η_m , βάσει της μέγιστης μετρούμενης ταχύτητας αέρα) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

Από τα Σχήματα 5.15 και 5.16 φαίνεται ότι τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης τον έχει το σύστημα Ακίδας – Πλέγματος. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς, όπως έχει αναλυθεί ήδη στα προηγούμενα σχήματα (ιδιαίτερα στο Σχήμα 5.1) έχει την χαμηλότερη τάση, το χαμηλότερο ρεύμα και πολύ υψηλές ταχύτητες. Πιο συγκεκριμένα, ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης που υπολογίστηκε λαμβάνει την τιμή 0.05571. Επίσης, αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης εμφανίζουν οι πέντε ακίδες και ο δακτύλιος διαμέτρου 20 mm.

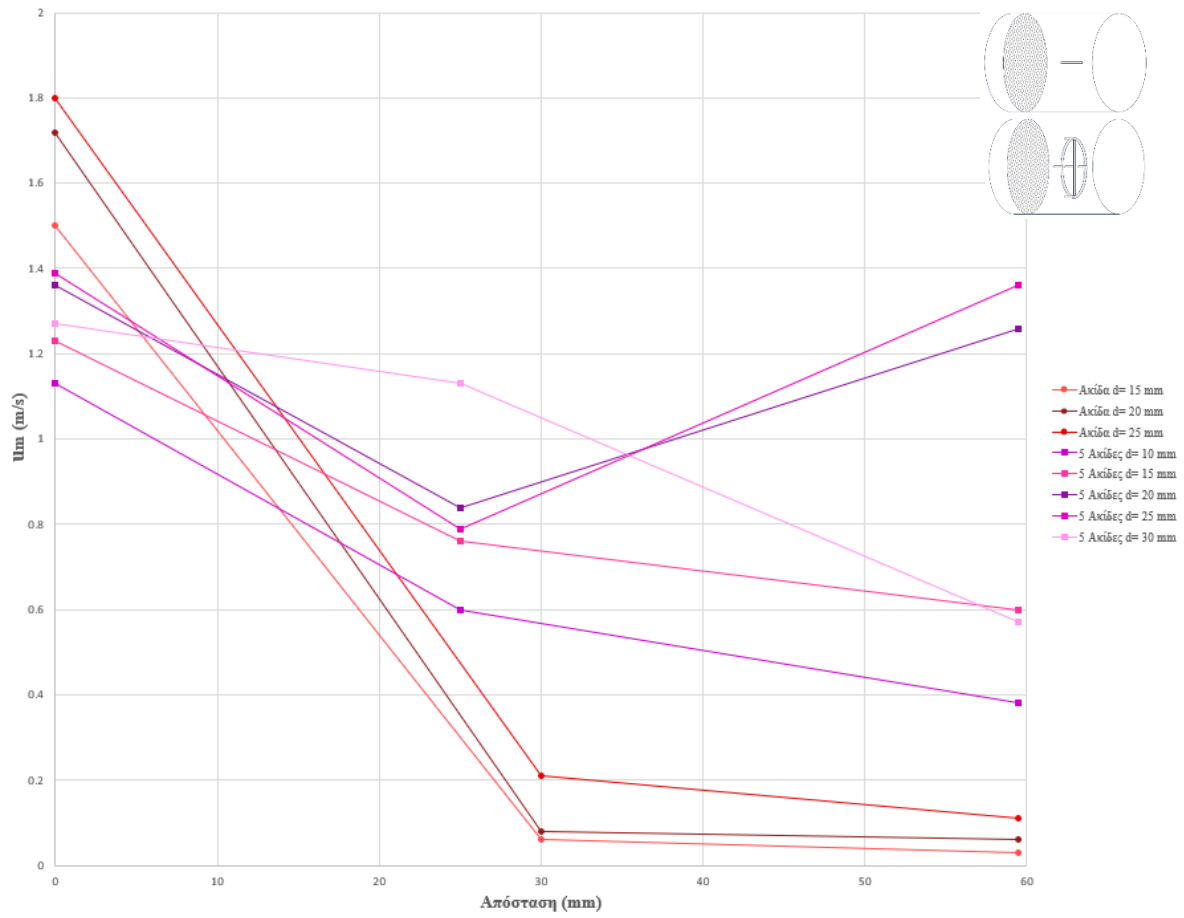


Σχήμα 5.17. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος

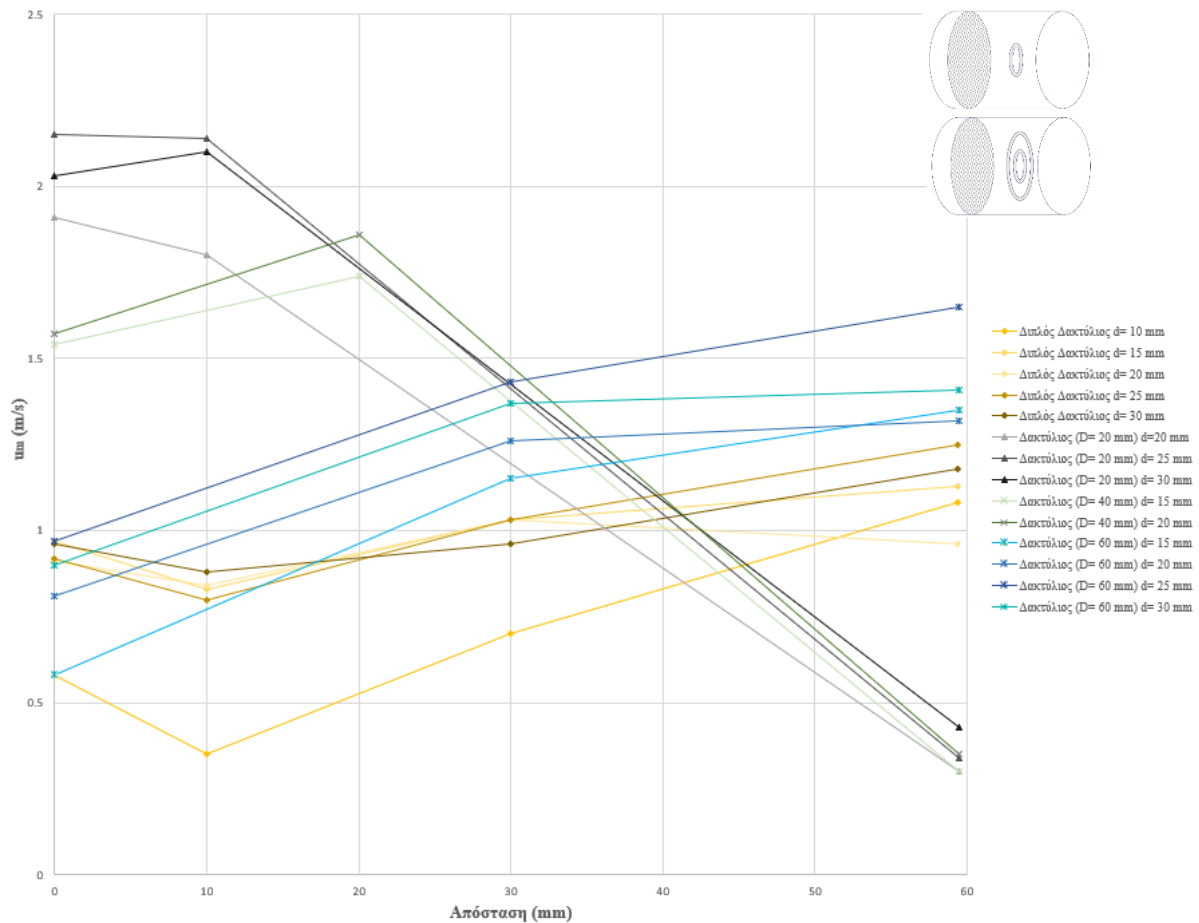


Σχήμα 5.18. Βαθμός απόδοσης (η_{av} , βάσει της μέσης ταχύτητας στη διατομή του κυλινδρικού θαλάμου) συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (V) για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλού Δακτυλίου – Πλέγματος

Από τα Σχήματα 5.17 και 5.18 φαίνεται ότι ο πιο υψηλός βαθμός απόδοσης σε ολόκληρη την διατομή του κυλινδρικού θαλάμου είναι μέσω του συστήματος Πέντε Ακίδων – Πλέγματος. Αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης έχουν και η μεμονωμένη ακίδα και ο δακτύλιος των 20 mm.



Σχήμα 5.19. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για τα συστήματα Ακίδας – Πλέγματος και Πέντε Ακίδων – Πλέγματος



Σχήμα 5.20. Μέγιστη μετρούμενη ταχύτητα αέρα (u_m) συναρτήσει των σημείων τοποθέτησης του ανεμομέτρου για τα συστήματα Δακτυλίων – Πλέγματος και Διπλών Δακτυλίων – Πλέγματος

Μέσω των δύο τελευταίων Σχημάτων (Σχήμα 5.19 και 5.20) μπορεί να γίνει αντιληπτός ο τρόπος διασποράς του αέρα στην έξοδο του κυλινδρικού θαλάμου. Όπως φαίνεται, το σύστημα που κρατά σταθερή τη ροή του αέρα σε όλο το μήκος της διατομής (με μικρές διακυμάνσεις) είναι ο Διπλός Δακτύλιος – Πλέγμα. Όμως, δεν μπορεί να αναπτύξει μεγάλες ταχύτητες εξαιτίας της αυξημένης ομοιομορφίας που οδηγεί σε μεγάλη μείωση της έντασης του πεδίου. Επίσης, ενδιαφέρον έχει ο Δακτύλιος με διάμετρο 20 mm, αλλά όπως είναι αναμενόμενο, όσο το ανεμόμετρο απομακρύνεται από το κέντρο του θαλάμου η ταχύτητα του αέρα μειώνεται αρκετά. Επιπλέον, φαίνεται το πόσο έντονη είναι η μεταβολή της ταχύτητας του αέρα με το ηλεκτρόδιο της ακίδας.

Μία ακόμα σύγκριση που μπορεί να γίνει είναι μέσω της παροχής του αέρα σε κυβικά πόδια ανά λεπτό (CFM, ft^3/min). Έχει μεγάλη σημασία αυτή η τιμή, διότι μέσω αυτής μπορεί να γίνει σύγκριση με μηχανικούς ανεμιστήρες της αγοράς ή με άλλες EHD διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα, είναι η ποσότητα του αέρα που μπορεί να διοχετεύσει ο μηχανικός ανεμιστήρας ή η EHD διάταξη σε ένα λεπτό, όταν λειτουργεί στις μέγιστες τιμές. Προφανώς, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή αυτή, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η ψύξη που μπορεί να επιτευχθεί. Ο συγκεκριμένος υπολογισμός επιλέχθηκε να γίνει στις τρεις διατάξεις με την καλύτερη κατανομή της ταχύτητας του αέρα στη διατομή του θαλάμου. Τα συστήματα αυτά είναι οι Πέντε Ακίδες – Πλέγμα (για $d=25\text{ mm}$), ο Δακτύλιος (διαμέτρου 20 mm) – Πλέγμα (για $d=25\text{ mm}$) και ο Διπλός Δακτύλιος – Πλέγμα (για $d=25\text{ mm}$).

Για να υπολογισθεί η τιμή του CFM, θα πρέπει να βρεθεί το εμβαδόν που περικλείει η εκάστοτε καμπύλη μέγιστης ταχύτητας αέρα συναρτήσει της απόστασης του ανεμομέτρου. Για παράδειγμα, στη διάταξη Πέντε Ακίδων – Πλέματος (για $d=25\text{ mm}$) έγινε χρήση του Σχήματος 5.19 για να υπολογισθεί το εμβαδόν. Έπειτα, επειδή αυτή η τιμή ήταν σε μονάδες κυβικών μέτρων ανά δευτερόλεπτο, έγινε μετατροπή των κυβικών μέτρων σε κυβικά πόδια και των δευτερολέπτων σε λεπτά.

Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών διατάξεων που κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν στο εργαστήριο, καθώς και οι συγκρίσεις με άλλες δημοσιευμένες EHD διατάξεις και με ανεμιστήρες της αγοράς.

Πίνακας 5.1 Συγκριτικές τιμές CFM και μέγιστης ταχύτητας αέρα για διαφόρων τύπων διατάξεις

Τύπος διάταξης	CFM (ft ³ /min)	Μέγιστη ταχύτητα αέρα (m/s)
Πέντε Ακίδες – Πλέγμα EHD (διάμετρος θαλάμου 118.87 mm)	12.63	1.39
Δακτύλιος (διαμέτρου 20 mm) – Πλέγμα EHD (διάμετρος θαλάμου 118.87 mm)	16.26	2.15
Διπλός Δακτύλιος – Πλέγμα EHD (διάμετρος θαλάμου 118.87 mm)	11.88	1.25
Ακίδα – Πλέγμα EHD (διάμετρος θαλάμου 74 mm) [55]	8.2	0.9
Κυλινδρικός Αγωγός – Πλέγμα EHD (διάμετρος θαλάμου 74 mm) [55]	16.7	1.8
Arctic F12 PWM 120mm [92]	53	-
Spire Orion Case Fan 70 mm [93]	16	-
StarTech FAN6X1TX3 60 mm [94]	15.49	-
Noctua NF-A4×20 12V 40 mm [95]	5.53	-

Από τον Πίνακα 5.1 φαίνεται ότι οι ταχύτητες αέρα που επιτεύχθηκαν με το ηλεκτρόδιο εκπομπού της μορφής δακτυλίου, διαμέτρου 20 mm, είναι οι πιο υψηλές και τα αποτελέσματα του CFM είναι επίσης αρκετά υψηλά. Βέβαια, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να φθάσει το CFM μηχανικών ανεμιστήρων με διάμετρο 120 mm.

5.2 Περιοχές για περαιτέρω έρευνα

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι τα πρωτότυπα ηλεκτρόδια εκπομπού με μορφή δακτυλίου έχουν αρκετό ενδιαφέρον και οδήγησαν σε υψηλότερες ταχύτητες από αυτές που μετρήθηκαν με τα πολυχρησιμοποιημένα ηλεκτρόδια ακίδας ή πέντε ακίδων. Έχοντας ως οδηγό τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί μελλοντικά να δημιουργηθεί μία αρκετά πιο αποδοτική

ιοντική γεννήτρια από αυτές που έχουν δημοσιευθεί. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει χρήση του δακτυλίου των 20 mm εντός ενός αρκετά μικρότερου κυλινδρικού αγωγού (διαμέτρου 60 mm), με διάκενο 25 mm, αφού έχει βρεθεί ότι σ' αυτό εμφανίζεται μεγάλη ταχύτητα αέρα.

Επίσης, το προτεινόμενο βήμα για μελλοντική έρευνα είναι να γίνει ένα σύστημα δύο ή και περισσότερων βαθμίδων, δηλαδή μια πολυβάθμια διάταξη, ώστε να βελτιωθεί περαιτέρω ο βαθμός απόδοσης.

Βιβλιογραφία

- [1] F. C. Lai, «EHD gas pumping-A concise review of recent development,» *J. Electrostat.*, τόμ. 106, pp. 1-8, 2020.
- [2] S. Venkatesh, A. Kumar, A. Bhattacharya και S. Pramanik, «Ionic wind review-2020: advancement and application in thermal management,» *Sadhana, Indian Academy of Sciences*, τόμ. 46:165, pp. 1-27, 2021.
- [3] K. Masuyama και S. R. H. Barrett, «On the performance of electrohydrodynamic propulsion,» *Proc. R. Soc. A*, τόμ. 469, pp. 1-16, 2013.
- [4] M. J. Zeng, Z. G. Qu και J. F. Zhang, «Negative corona discharge and flow characteristics of a two-stage needle-to-ring configuration ionic wind pump for temperature and relative humidity,» *Int. J. Heat and Mass Transf.*, τόμ. 201, pp. 1-14, 2023.
- [5] M. J. Johnson και D. B. Go, «Recent advances in electrohydrodynamic pumps operated by ionic winds: a review,» *Plasma Sources Sci. Technol.*, τόμ. 26, pp. 1-27, 2017.
- [6] E. D. Fylladitakis, M. P. Theodoridis και A. X. Moronis, «Review on the History, Research, and Applications of Electrohydrodynamics,» *IEEE Trans. Plasma Sci.*, τόμ. 42, αρ. 2, pp. 358-375, 2014.
- [7] A. P. Chattock, «On the velocity and mass of the ions in the electric wind in air,» *Phil. Mag.*, τόμ. 48, αρ. 294, pp. 401-420, 1899.
- [8] F. W. Peek, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1915.
- [9] T. Musha, «Theoretical explanation of the biefeld-brown effect,» *Electr. Spacecraft J.*, τόμ. 31, αρ. 1, pp. 21-29, 2000.
- [10] O. M. Stuetzer, «Magnetohydrodynamics and electrohydrodynamics,» *Phys. Fluids*, τόμ. 5, αρ. 5, p. 534, 1962.
- [11] R. S. Sigmond, «The unipolar corona space charge flow problem,» *J. Electrostat.*, τόμ. 18, pp. 249-272, 1986.
- [12] R. D. Morrison και D. M. Hopstock, «The distribution of current in wire-to-cylinder corona,» *J. Electrostat.*, τόμ. 6, αρ. 4, pp. 349-360, 1979.
- [13] D. B. Go, S. V. Garimella, T. S. Fisher και R. K. Mongia, «Ionic winds for locally enhanced cooling,» *J. Appl. Phys.*, τόμ. 102, p. 53302, 2007.

- [14] K. Adamiak και P. Atten, «Simulation of corona discharge in point-plane configuration,» *J. Electrostat.*, τόμ. 61, pp. 85-98, 2004.
- [15] L. Zhao και K. Adamiak, «EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin-plate configuration,» *J. Electrostat.*, τόμ. 63, pp. 337-50, 2005.
- [16] K. N. Kiouisis και A. X. Moronis, «Experimental investigation of EHD flow in wire to cylinder electrode configuration,» *Proc. 10th IASTED Eur. Conf. Power Energy Syst.*, pp. 21-26, 2011.
- [17] A. Moronis, E. Fylladitakis και I. Raptis, «Two-stage Cascaded EHD Air Pump Evaluation,» *IEEE Int. Conf. High Voltage Eng. and Appl.*, pp. 1-4, 2018.
- [18] E. D. Fylladitakis, A. X. Moronis και K. N. Kiouisis, «Experimental evaluation of a needle-to-grid EHD pump prototype for semiconductor cooling applications,» *Int. J. Circuits, Syst. Signal Process.*, τόμ. 8, pp. 337-42, 2014.
- [19] R. Morrow, «The theory of positive glow corona,» *J. Phys. D, Appl. Phys.*, τόμ. 30, αρ. 22, p. 3099, 1997.
- [20] G. Georghiou, R. Morrow και A. Metaxas, «A two-dimensional, finite-element, flux-corrected transport algorithm for the solution of gas discharge problems,» *J. Phys. D, Appl. Phys.*, τόμ. 33, αρ. 19, p. 2453, 2000.
- [21] P. Atten, K. Adamiak και V. Atrazhev, «Electric corona discharge simulation in the hyperbolic point-Ground plane configuration,» σε *Proc. Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena*, 2002.
- [22] L. Zhao, E. D. Cruz, K. Adamiak, A. Berezin και J. Chang, «A numerical model of a wire-plate electrostatic precipitator under electrohydrodynamic flow conditions,» *Proc. Int. Conf. Air pollution Abatement Technol. Future Challenges*, pp. 1-9, 2006.
- [23] J. Suda, T. Ivancsy, I. Kiss και I. Berta, «Complex analysis of ionic wind in ESP modeling,» *Proc. 10th Int. Conf. Electrostatic Precipitator*, pp. 1-13, 2006.
- [24] D. B. Go, S. V. Garimella και T. S. Fisher, «Numerical simulation of microscale ionic wind for local cooling enhancement,» *Proc. IEEE 10th Intersoc. Conf. Thermal Thermomech. Phenomena Electron. Syst.*, pp. 45-53, 2006.
- [25] P. Glushchenko και Y. K. Stishkov, «Modeling of the through EHD-flow structure in a wire-wire system,» *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, τόμ. 43, αρ. 4, pp. 257-264, 2007.
- [26] L. M. Dumitran, L. Dascaleskou, P. V. Notingher και P. Atten, «Modelling of corona discharge in cylinder-wire-plate electrode configuration,» *J. Electrostatics*, τόμ. 65, αρ. 12, pp. 758-763, 2007.

- [27] Y. K. Stishkov και V. Chirkov, «Computer simulation of EHD flows in a needle-plane electrode system,» *Tech. Phys.*, τόμ. 53, αρ. 11, pp. 1407-1413, 2008.
- [28] L. Li, S. J. Lee, W. Kim και D. Kim, «An empirical model for ionic wind generation by a needle-to-cylinder dc corona discharge,» *J. Electrostat.*, τόμ. 73, pp. 125-30, 2015.
- [29] Y. Zhang, L. Liu, Y. Chen και J. Ouyang, «Characteristics of ionic wind in needle-to-ring corona discharge,» *J. Electrostat.*, τόμ. 74, pp. 15-20, 2015.
- [30] R. Tirumala και D. B. Go, «Comparative study of corona discharge simulation techniques for electrode configurations inducing non-uniform electric fields,» *J. Electrostat.*, τόμ. 77, pp. 99-106, 2013.
- [31] F. X. Canning, C. Melcher και E. W. Winet, «Asymmetrical Capacitors for propulsion,» NASA/CR-2004-213312, West Virginia, 2004.
- [32] M. Tajmar, «Biefeld-brown effect: Misinterpretation of corona wind phenomena,» *AIAA J.*, τόμ. 42, αρ. 2, pp. 315-318, 2004.
- [33] L. Zhao και K. Adamiak, «EHD gas flow in electrostatic levitation unit,» *J. Electrostatics*, τόμ. 64, αρ. 7, pp. 639-645, 2006.
- [34] C. F. Chung και W. J. Li, «Experimental studies and parametric modeling of ionic flyers,» *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatron*, pp. 1-6, 2007.
- [35] L. Koziell, L. Zhao, J. Liaw και K. Adamiak, «Experimental Studies of EHD lifters,» *Proc. ESA Annu. Meeting Electrostatics*, pp. 1-6, 2011.
- [36] J.-M. Wang, T.-Y. Lin και L.-J. Yang, «Electrohydrodynamic (EHD) micro-boat,» *Proc. IEEE 2nd IEEE Int. Conf. Nano/Micro Eng. Molecular Syst.*, pp. 584-587, 2007.
- [37] H. S. Poon, M. K. Lam, M. Chow και W. J. Li, «Noiseless and vibration-free ionic propulsion technology for indoor surveillance blimps,» *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 2891-2896, 2009.
- [38] K. Masuyama, Performance characterization of electrohydrodynamic propulsion devices, Boston, MA, USA: Dept. Aeronautics Astronautics, Massachusetts Inst. Technol., 2012.
- [39] V. Y. Khomich και I. E. Rebrov, «In-atmosphere electrohydrodynamic propulsion aircraft with wireless supply onboard,» *J. Electrostat.*, τόμ. 95, pp. 1-12, 2018.
- [40] M. Robinson, Movement of Air in the Electric Wind of the Corona Discharge, Somerville, NJ, USA: Hamon Research-Cottrell, 1960.
- [41] O. M. Stuetzer, «Ion drag pumps,» *J. Appl. Phys.*, τόμ. 31, αρ. 1, pp. 136-146, 1960.

- [42] E. Moreau και G. Touchard, «Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharges,» *J. Electrostat.*, τόμ. 66, αρ. 1-2, pp. 39-44, 2008.
- [43] H. Kawamoto και Umezu, «Electrostatic micro-ozone fan that utilizes ionic wind induced in pin-to-plate corona discharge system,» *J. Electrostat.*, τόμ. 66, αρ. 7, pp. 445-454, 2008.
- [44] B. Kim, S. Lee, Y. S. Lee και K. H. Kang, «Ion win generation and the application to cooling,» *J. Electrostat.*, τόμ. 70, αρ. 5, pp. 438-444, 2012.
- [45] D. H. Shin, J. S. Yoon και H. S. Ko, «Experimental optimization of ion wind generator with needle-to-parallel plates for cooling device,» *Int. J. Heat Mass Transf.*, τόμ. 84, pp. 35-45, 2015.
- [46] C. Kim, K. C. Noh, J. Hyun, S. G. Lee, J. Hwang και H. Hong, «Microscopic energy conversion process in the ion drift region of electrohydrodynamic flow,» *Appl. Phys. Lett.*, τόμ. 100, p. 243906, 2012.
- [47] I. Y. Chen, M. Z. Guo, K. S. Yang και C. C. Wang, «Enhanced cooling for LED lighting using ionic wind,» *Int. J. Heat Mass Transf.*, τόμ. 57, pp. 285-291, 2013.
- [48] J.-D. Moon, D.-H. Hwang, J.-S. Jung, J.-G. Kim και S.-T. Geum, «A sliding discharge-type EHD gas pump utilizing a saw-toothed-plate discharge electrode,» *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, τόμ. 17, αρ. 3, pp. 742-747, 2010.
- [49] J.-D. Moon, D.-H. Hwang και S.-T. Geum, «An EHD gas pump utilizing a ring/needle electrode,» *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, τόμ. 16, αρ. 2, pp. 352-358, 2009.
- [50] D. F. Colas, A. Ferret, D. Z. Pai, D. A. Lacoste και C. O. Laux, «Ionic wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure,» *J. Appl. Phys.*, τόμ. 108, αρ. 10, pp. 103306-1 - 103306-6, 2010.
- [51] J. M. Crowley, G. S. Wright και J. C. Chato, «Selecting a working fluid to increase the efficiency and flow rate of an EHD pump,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, τόμ. 26, αρ. 1, pp. 42-49, 1990.
- [52] I. Kano, K. Mizuochi και I. Takahashi, «Micro-electrohydrodynamic pump by dielectric fluid: Improvement for performance of pressure using cylindrical electrodes,» *Proc. 6th JFPS Int.*, τόμ. 2, pp. 1-3, 2005.
- [53] G. Fuhr, R. Hagedorn, T. Muller, W. Benecke και B. Wagner, «Microfabricated electrohydrodynamic (EHD) pumps for liquids of higher conductivity,» *Microelectromech. Syst.*, τόμ. 1, αρ. 3, pp. 141-146, 1992.
- [54] Y. Zhao, P. Foroughi, J. Lawler και M. Ohadi, «Development of an electrohydrodynamic (EHD) micro pump for LN2 spot cooling,» *Proc. Int. Mech. Eng. Congr. Exposit.*, pp. 113-118, 2003.
- [55] E. D. Fylladitakis, A. X. Moronis και K. N. Kiouisis, «Design of a prototype EHD air pump for electronic chip cooling applications,» *Plasma Sci. Technol.*, τόμ. 16, pp. 491-501, 2014.

- [56] S. J. Lee, L. Li, K. Kwon, W. Kim και D. Kim, «Parallel integration of ionic wind generators on PCBs for enhancing flow rate,» *Microsyst. Technol.*, τόμ. 21, pp. 1465-71, 2015.
- [57] R. Tirumala και D. Go, «Multi-electrode assisted corona discharge for electrohydrodynamic flow generation in narrow channels,» *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, τόμ. 18, pp. 1854-63, 2011.
- [58] D. F. Colas, A. Ferret, D. Z. Pai, D. A. Lacoste και C. O. Laux, «Ionic wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure,» *J. Appl. Phys.*, τόμ. 108, p. 103306, 2010.
- [59] W. Qiu, L. Xia, X. Tan και L. Yang, «The Velocity Characteristics of a Serial-Staged EHD Gas Pump in Air,» *IEEE Trans. Plasma Sci.*, τόμ. 38, αρ. 10, pp. 2848-2853, 2010.
- [60] C. Kim, D. Park, K. C. Noh και J. Hwang, «Velocity and energy conversion efficiency characteristics of ionic wind generator in a multistage configuration,» *J. Electrostat.*, τόμ. 68, pp. 36-41, 2010.
- [61] S.-J. Kim, U.-H. Yun, H.-G. Lee και J.-G. Kim, «Enhancement of Ion Acceleration Efficiency by Multi-stage and Accelerating Electrodes Coupling,» *J. Electr. Engin. Technol.*, τόμ. 17, pp. 1301-1307, 2022.
- [62] M. J. Zeng, J. F. Zhang, S. Wang και Z. G. Qu, «Analysis of a two-stage ionic wind pump with multiple needle-to-mesh electrodes for cooling electronics,» *Appl. Thermal Engin.*, τόμ. 185, p. 116340, 2021.
- [63] J. Wang, Y. Liu, T. Zhu, Y. Chen, R. Cai και G. Liu, «Flow distribution and cooling performance of needle-to-ring ionic wind blowers with multiple electrodes,» *Int. J. Heat Mass Transf.*, τόμ. 193, p. 122971, 2022.
- [64] P. Bruggeman και R. Brandenburg, «Atmospheric pressure discharge filaments and microplasmas: physics, chemistry and diagnostics,» *J. Phys. D: Appl. Phys.*, τόμ. 46, p. 464001, 2013.
- [65] N. E. Jewell-Larsen, G. G. Joseph και K. A. Honer, «Scaling laws for electrohydrodynamic air movers,» *ASME/JSME 2011, 8th Thermal Engineering Joint Conf. (ASME)*, p. T10109, 2011.
- [66] R. Tirumala, Y. Li, D. A. Pohlman και D. B. Go, «Corona discharges in sub-millimeter electrode gaps,» *J. Electrostat.*, τόμ. 69, pp. 36-42, 2011.
- [67] A. O. A. Ong, A. R. A. Abramson και N. C. Tien, «Electrohydrodynamic microfabricated ionic wind pumps for thermal management applications,» *J. Heat Transf.*, τόμ. 136, p. 61703, 2014.
- [68] V. T. Dau, T. X. Dinh, T. T. και T. T. Bui, «Ion wind generator utilizing bipolar discharge in parallel pin geometry,» *IEEE Trans. Plasma Sci.*, τόμ. 44, pp. 2979-87, 2016.

- [69] V. T. Dau, T. X. Dinh, T. Terebessy και T. T. Bui, «Bipolar corona discharge based air flow generation with low net charge,» *Sensors Actuators A*, τόμ. 244, pp. 146-55, 2016.
- [70] V. T. Dau, T. X. Dinh, T. T. Bui και T. Terebessy, «Bipolar corona assisted jet flow for fluidic application,» *Flow Meas. Instrum.*, τόμ. 50, pp. 252-60, 2016.
- [71] V. T. Dau, T. X. Dinh, T. T. Bui, C. D. Tran, H. T. Phan και T. Terebessy, «Corona based air-flow using parallel discharge electrodes,» *Exp. Therm. Fluid Sci.*, τόμ. 79, pp. 52-6, 2016.
- [72] A. M. Drews, L. Cademartiri, G. M. Whitesides και K. J. M. Bishop, «Electric winds driven by time oscillating corona discharges,» *J. Appl. Phys.*, τόμ. 114, p. 143302, 2013.
- [73] M. J. Johnson και D. B. Go, «Piezoelectric transformers for low-voltage generation of gas discharges and ionic winds in atmospheric air,» *J. Appl. Phys.*, τόμ. 118, p. 243304, 2015.
- [74] M. J. Johnson και D. B. Go, «Impingement cooling using the ionic wind generated by a low-voltage piezoelectric transformer,» *Front. Mech. Eng.*, τόμ. 2, p. 24, 2016.
- [75] R. Tirumala και D. B. Go, «Ionic winds: a new frontier for air cooling,» *Electron. Cool.*, τόμ. 18, pp. 8-11, 2012.
- [76] N. E. Jewell-Larsen, H. Ran, Y. Zhang, M. Schwiebert, K. A. Honer και A. V. Mamishev, «Electrohydrodynamic (EHD) cooled laptop,» *25th IEEE Semicond. Therm. Meas. Manag. Symp.*, pp. 261-6, 2009.
- [77] D. H. Shin, S. H. Baek και H. S. Ko, «Development of heat sink with ionic wind for LED cooling,» *Int. J. Heat Mass Transf.*, τόμ. 93, pp. 516-28, 2016.
- [78] W. J. Sheu, J. J. Hsiao και C. C. Wang, «Effect of oscillatory EHD on the heat transfer performance of a flat plate,» *Int. J. Heat Mass Transf.*, τόμ. 61, pp. 419-24, 2013.
- [79] A. Singh, V. Orsat και V. Raghavan, «A comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bioprocessing,» *Dry. Technol.*, τόμ. 30, pp. 1812-20, 2012.
- [80] T. Kudra και A. Matyenko, «Energy aspects in electrohydrodynamic drying,» *Dry. Technol.*, τόμ. 33, pp. 1534-40, 2015.
- [81] A. Starikovskiy και N. Aleksandrov, «Plasma-assisted ignition and combustion,» *Prog. Energy Combust. Sci.*, τόμ. 39, pp. 61-110, 2013.
- [82] S. M. Starikovskaia, «Plasma assisted ignition and combustion,» *J. Phys. D: Appl. Phys.*, τόμ. 39, pp. R265-99, 2006.
- [83] Y. Ju και W. Sun, «Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry,» *Prog. Energy Combust. Sci.*, τόμ. 48, pp. 21-83, 2015.

- [84] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu και Y. Zebboudj, «Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator,» *J. Electrostat.*, τόμ. 70, pp. 20-4, 2012.
- [85] M. Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg και F. Carleton, «Maximizing ion-driven gas flows,» *J. Electrostat.*, τόμ. 64, pp. 368-76, 2006.
- S. Chen, J. C. P. Y. Nobelen και S. Nijdam, «The effect of humidity on ionic wind velocity in ambient air,» σε *APS Gaseous Electronics Conf.*, Bochum, Germany, 2016.
- [87] C. G. Noll και P. A. Lawless, «Comparison of germanium and silicon needles as emitter electrodes for air ionizers,» *J. Electrostat.*, τόμ. 44, pp. 221-38, 1998.
- [88] J. Argyris και D. Scharpf, «Finite elements in time and space,» *Nuclear Eng. Des.*, τόμ. 10, αρ. 4, pp. 456-464, 1969.
- [89] K. H. Huebner, *The Finite Element Method for Engineers*, New York, NY, USA: Wiley, 1975.
- [90] D. Meeker, «Finite Element Method Magnetics (FEMM), Version 4.2 [online],» <http://femm.berlios.de>, 2006. [Ηλεκτρονικό].
- [91] A. Bouwers και P. G. Cath, «The Maximum Electrical Field Strength for Several Simple Electrode Configurations,» *Philips Technical Review*, τόμ. 6, αρ. 9, pp. 270-278, 1941.
- [92] «<https://www.arctic.de/en/F12-PWM/AFACO-120P2-GBA01>,» [Ηλεκτρονικό].
- [93] «<https://www.skroutz.gr/s/2274360/Spire-Orion-Case-Fan-70mm-%CE%BC%CE%B5-%CE%A3%CF%8D%CE%BD%CE%B4%CE%B5%CF%83%CE%B7-3-Pin.html#specs>,» [Ηλεκτρονικό].
- [94] «<https://www.skroutz.gr/s/4647018/StarTech-FAN6X1TX3-Case-Fan-60mm-%CE%BC%CE%B5-%CE%A3%CF%8D%CE%BD%CE%B4%CE%B5%CF%83%CE%B7-3-Pin.html#specs>,» [Ηλεκτρονικό].
- [95] «<https://noctua.at/en/products/fan/nf-a4x20-pwm/specification>,» [Ηλεκτρονικό].