ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(06):393-406

Experimental Study of the Performance Parameters of a Plasma Thruster Using Dielectric Barrier Discharge with the Magnetic Field

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Ahangar M.[1*] ,
Hoseini A.[1]

How to cite this article
Ahangar M, Hoseini A. Experimental Study of the performance parameters of a plasma thruster using dielectric barrier discharge with the magnetic field. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(06):393-406

[1] Faculty of New Technology & Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

***Correspondence**
Address: Faculty of New Technology & Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
m_ahangar@sbu.ac.ir

Article History
Received: January 23, 2021
Accepted: August 01, 2022
ePublished: May 07, 2022

ABSTRACT

In this research, the dielectric barrier discharge plasma driven channel flow with the applied magnetic field has been proposed for use as a thruster in propulsion applications and studied experimentally. Measurements of the thrust and consumed power of thruster for different values of the barrier thickness have been performed and the data have been compared with the corresponding ones without magnetic field. It is found that consumed power and thrust of the thruster in the presence of magnetic field are respectively little reduced and increased than that without the magnetic field. The measurements show that the effectiveness increases to a maximum and then drops as the operating voltage monotonically increases over a range from 12 to 26 kV. A power law analysis for revealing the relationships among the effectiveness, thrust, consumed power, and operating voltage has been presented for the thruster with and without the magnetic field. It is seen that the applied magnetic field and thicker dielectric barrier can lead to a higher effectiveness at the point of transition from the glow regime to the filamentary regime. The effects of micro-discharge channels on the effectiveness in the both regimes have been discussed. The observations indicate that in the presence of magnetic field, the additional micro-discharge channels are generated and develop along the magnetic field lines and the diffuse background emission of the discharge is stronger in plasma. The underlying physical mechanisms of mentioned phenomena have been explained and mainly ascribed to the enhanced ionization by applying the magnetic field.

Keywords Experimental Measurements, Power Law, Filamentary Regime, Monitor Capacitor Method.

CITATION LINKS

[1] Recent advances in electrohydrodynamic... [2] A comparative study of alternating current ... [3] Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators ... [4] Recent developments in ... [5] Turbulent boundary layer separation control ...[6] nvestigation of the boundary layer characteristics ... [7] Airfoil Stall Hysteresis Control with ... [8] Dynamic stall control over a rotor airfoil based on ... [9] Experimental investigation of separation...[10] An experimental study of icing... [11] Plasma Micro-Thrusters for ... [12] Experimental Study of a DBD-Plasma ... [13] Measurements and simulations of ...[14] Plasma channel flows: Electro-fluid ... [15] Characterization of plasma actuator based ... [16] Ionic wind produced by an electro-aerodynamic... [17] Experimental Study of Dielectric ... [18] Effect of permittivity and frequency on ... [19] Fundamentals of electric propulsion ... [20] The Effect of Permanent Magnet on ... [21] The Characteristics of Dielectric Barrier ... [22] Experimental study on the effects of ... [23] Repelling Force Magnet Calculato [24] Evaluation of thrust measurement techniques for ... [25] PIV-Estimated DBD Plasma-Actuator Thrust ... [26] Force measurements of single... [27] Investigation of Impedance Characteristics ... [28] Progress Toward Accurate Measurement of ... [29] Role of the electric waveform supplying ... [30] Capacitance and power consumption quantification of ... [31] Pulsed Plasma Thruster [32] Pulsed plasma thruster performance... [33] Numerical simulation of non-equilibrium ... [34] Numerical Investigation of Plasma Behavior ... [35] Effect of parallel magnetic field on ... [36] Semiempirical Thrust Model of ... [37] Effect of magnetic field, airflow ... [38] The impacts of magnetic field on ... [39] Experimental investigation on the ... [40] E_xNOx Removal Using DC Corona ... [41] On the classification of dielectric ... [42] Manufacturing of Dielectric Barrier Discharge ... [43] Understanding SDBD Actuators ... [44] Optimization of Dielectric Barrier Discharge ... [45] Performance Characterization andQuantification of ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه تجربی عوامل عملکردی یک تراستر پلاسمایی با رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک تحت میدان مغناطیسی

مهدی آهنگر*
دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
عارفه حسینی
دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

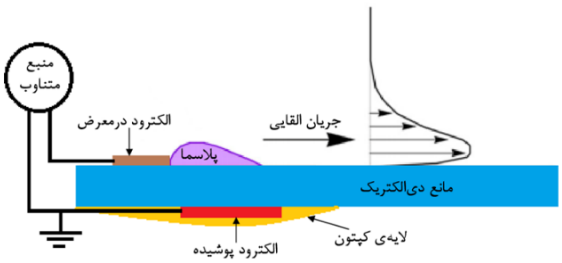
چکیده
در این پژوهش، جریان کانال ناشی از پلاسمای تخلیه مانع دی الکتریک تحت میدان مغناطیسی اعمالی برای استفاده به عنوان تراستر در کاربردهای پیشرانشی پیشنهاد شده و به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های مقادیر نیروی پیشران و توان مصرفی تراستر به ازای مقادیر مختلف ضخامت مانع دی‌الکتریک انجام شده و داده‌ها با مقادیر متناظر با حالت بدون میدان مغناطیسی مقایسه شده‌اند. مشخص گردید که توان مصرفی و نیروی پیشران تراستر در حضور میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون آن، به ترتیب قدری کاهش و افزایش پیدا می‌کنند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که با افزایش یکنواخت ولتاژ اعمالی در دامنه ۱۲ تا ۲۶ کیلوولت، عامل کارایی تا حداکثر مقدار خود افزایش و سپس کاهش می‌یابد. یک تحلیل مبتنی بر قانون توانی برای آشکار کردن روابط بین عامل کارایی، نیروی پیشران، توان مصرفی و ولتاژ اعمالی برای تراستر برای حالت با و بدون میدان مغناطیسی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که حضور میدان مغناطیسی و مانع دی‌الکتریک ضخیم‌تر می‌توانند منجر به مقادیر بالاتر عامل کارایی به ویژه پس از انتقال از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای شوند. اثرات میکروکانال‌های تخلیه در هر دو رژیم مذکور بر عامل کارایی مورد بحث قرار گرفته است. مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که در حضور میدان مغناطیسی، ریزکانال‌های تخلیه‌ی اضافی تولید شده و در امتداد خطوط میدان مغناطیسی توسعه می‌یابند، به طوری که انتشار نفوذی تخلیه در پلاسما قوی‌تر می‌شود. سازوکار فیزیکی حاکم بر این پدیده‌ها تشریح شده و عمدتاً به میزان یونیزاسیون افزایش یافته ناشی از میدان مغناطیسی مرتبط شده است.

کلیدواژه‌ها: اندازه‌گیری تجربی، قانون توانی، رژیم رگه‌ای، روش خازن ناظر

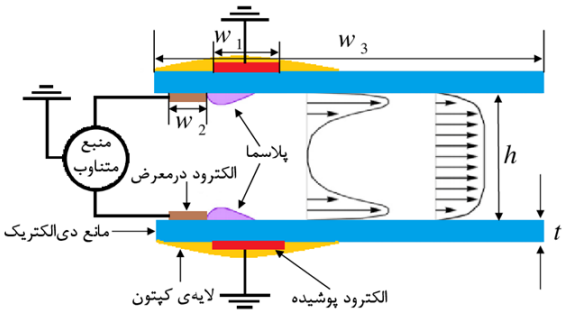
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۳
*نویسنده مسئول: m_ahangar@sbu.ac.ir

۱- مقدمه
محرک پلاسمایی از نوع رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک جریان متناوب یکی از روش‌های رایج در تولید پلاسمای سرد می‌باشد (شکل ۱). در این روش، بین دو الکترود که یکی از آن‌ها به زمین و دیگری به یک منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل است و با یک مانع دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند، میدان الکتریکی قابل توجهی ایجاد می‌گردد. الکترودهای متصل به زمین و منبع تغذیه، به ترتیب الکترود پوشیده و درمعرض خوانده می‌شوند. تحت میدان الکترواستاتیکی به وجود آمده بین دو الکترود، جریان هوای مجاور الکترودِ درمعرض یونیزه شده و به تبع آن نیروی کولمب به گاز یونیزه شده، شتاب می‌دهد. جریان هوای یونیزه شده که پلاسما نامیده می‌شود، حاوی یون‌های سنگینی است که به واسطه انتقال مومنتوم‌شان به مولکول‌های هوا، یک جریان القایی موسوم به باد یونی تولید می‌شود[1]. در صورتی که در چیدمان تخلیه مانع دی‌الکتریک، الکترود درمعرض به جای اتصال به منبع تغذیه ولتاژبالای متناوب به یک منبع تغذیه پالسی نانوثانیه‌ای متصل شود، به جای تولید نیروی الکتروهیدرودینامیکی کولمب، مقداری انرژی الکتروگرمایی موسوم به حرارت ژول را در هر پالس آزاد می‌کند که باعث تولید امواج تراکمی در لایه نازکی از پلاسما می‌شود. این امواج با ایجاد گردابه‌هایی، مومنتوم را به جریان هوا منتقل می‌کنند[2].

به دلایلی همچون سادگی، سبکی، پاسخ زمانی بالا و عدم وجود متعلقات مکانیکی، در بیش از یک دهه اخیر، استفاده از این محرک‌ها در حوزه مهندسی هوافضا با رویکرد حل برخی از مشکلات در حیطه کاربردهای آیرودینامیکی به طور چشمگیری رو به افزایش بوده است. به طور کلی عمده مطالعات در این حوزه معطوف به موضوعاتی نظیر کنترل جریان[3-4]، تاخیر در جدایش لایه مرزی[5-6]، تعویق واماندگی[7-8] و رفع موانع ناشی از یخ‌زدگی اجسام پرنده[9-10] می‌باشد. با این حال، ایده استفاده از این محرک‌ها برای کاربردهای پیشرانشی در حوزه مهندسی هوافضا موضوعی نوپا بوده و اولین بار توسط اوزترک و همکارانش (۲۰۰۸) مطرح شد[11]. در چند سال اخیر، تلاش‌های محدودی برای معرفی و استفاده از این نوع از محرک‌ها در قالب تراسترهای پلاسمایی انجام شده است. ساده‌ترین چیدمان هندسی برای شتاب‌دهی جریان هوا در یک تراستر و تولید نیروی پیشران توسط آن، نصب محرک‌های پلاسمایی بر روی دیواره‌های داخلی یک کانال صفحه‌ای مشابه شکل ۲ است. در این تراستر، دو جت القایی حاصل از محرک‌های نصب شده بر دیواره بالایی و پایینی، در فضای محصور داخل کانال با هم ترکیب شده و با انتقال مومنتوم، باعث حرکت محوری و شتاب‌گیری جریان هوا به سمت خروجی کانال و تولید نیروی پیشران می‌شوند.



شکل ۱) چیدمان محرک پلاسمایی با تخلیه مانع دی‌الکتریک



شکل ۲) چیدمان تراستر پلاسمایی رژیم تخلیه‌ی مانع دی‌الکتریک به همراه معرفی پارامترهای هندسی

اولین بار دبیاسی و مینگ (۲۰۱۱)، جریان داخل یک کانال صفحه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت بیشینه با کاهش ارتفاع افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد اگرچه با افزایش ارتفاع کانال، سرعت هسته جریان کم می‌شود اما در مقابل به دلیل افزایش سطح مقطع کانال، دبی ورودی زیاد شده و نیروی القایی با افزایش ارتفاع، ابتدا زیاد و سپس کاهش می‌یابد[12]. در پژوهشی مشابه، ریهرد و روی (۲۰۱۲) اثر افزایش تعداد محرک‌های پلاسمایی درون یک کانال را به طور تجربی و عددی مطالعه کردند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بازده کانال که به صورت نسبت توان هیدرودینامیکی به توان الکتریکی ورودی تعریف می‌شود، کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد[13]. کمپبل و روی (۲۰۱٤) الکترودهای درمعرض نصب شده در دیواره‌های داخلی بالا و پایین کانال را حذف کرده و یک سیم متصل به منبع تغذیه ولتاژ بالا را در خط تقارن کانال نصب کردند. با این چیدمان جدید برای الکترود ولتاژ بالا، بازده رانشگر به طور قابل تاملی تا ۰/۷ درصد افزایش یافت[14]. سونی (۲۰۱٤) برای اولین بار قابلیت به کارگیری محرک‌های پلاسمایی را در نقش میکروتراسترها برای ارتفاع‌های پروازی بالاتر در شرایط فشاری مختلف از رژیم اتمسفری تا استراتوسفری مطالعه کرد. نتایج حاکی از این است که با افزایش فشار (کاهش ارتفاع)، نیروی القایی ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، روندی کاهشی را طی می‌کند[15]. دیفورت و همکارانش (۲۰۱۷) چیدمان‌های متفاوتی از محرک پلاسمایی مشابه شکل ۲ و همچنین چیدمان پیشنهادشده در مرجع[14] را به صورت جزئی‌تر در یک کانال مطالعه کردند[16]. نتایج نشان می‌دهد بازده رانشگر تا حدود ۰/۱۵ درصد افزایش یافته که در مقایسه با مقدار گزارش شده در مرجع[14]، مقدار آن کمتر می‌باشد. برونینگ و همکارانش (۲۰۱۷) در طرحی جدید برای سامانه پیشرانش میکرو/نانو پرنده‌های بدون سرنشین در ورودی کانال، یک نازل واگرا با زوایای متغیر از صفر تا ٦۰ درجه نصب کردند. در این چیدمان، علاوه بر نصب محرک پلاسمایی در دیواره‌های کانال، دو محرک در دیواره‌های بالایی و پایینی نازل واگرای دوبعدی نیز نصب شد تا به فرآیند مکش جریان هوا از ورودی کمک شود[17]. وجودکا و همکارانش (۲۰۲۰) اثر پارامترهای فرکانس جریان الکتریکی، ضخامت و ثابت دی-الکتریک عایق را بر روی عملکرد کانال بررسی کردند. مشاهده شد که در فرکانس ۱۲ کیلوهرتز سرعت جریان در داخل کانال به مقدار بیشینه ٤/٦ متر بر ثانیه می‌رسد[18]. بررسی مراجع مرور شده نشان می‌دهد که پژوهش انجام شده در مرجع[15] دارای جامعیت بیشتری است. در این مرجع، برای اولین بار ایده استفاده از میدان مغناطیسی برای بهبود فرآیند یونیزاسیون در جریان پلاسما با الهام از تراسترهای فضایی اثر هال[19] مطرح شد. اعمال میدان مغناطیسی باعث می‌شود که الکترون‌ها در مسیری منحنی‌الخط پیرامون خطوط میدان مغناطیسی حبس شده و در نتیجه با افزایش احتمال برخوردشان با مولکول‌های هوا، فرآیند یونیزاسیون تقویت شود. اخیراً در دو پژوهش جداگانه، موردیا و همکارانش (۲۰۲۰) [20] و زین و همکارانش (۲۰۲۰) [21] اثر میدان مغناطیسی را برای کاربردهای غیرپیشرانشی به ترتیب بر روی تولیدکننده اُزُن و رآکتور پلاسمایی با رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک جریان متناوب بررسی کردند. همچنین، در پژوهشی دیگر، گو و همکارانش (۲۰۲۰) اثر میدان مغناطیسی را در یک رآکتور پلاسمایی با رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک جریان پالسی نانوثانیه‌ای مطالعه کردند[22]. صرف‌نظر از نوع رژیم تخلیه و کاربرد آن، نتایج سه پژوهش اخیر حاکی از این است که استفاده از میدان مغناطیسی منجربه تولید پلاسمای یکنواخت‌تر شده و همچنین بر روی شدت نور جریان پلاسما و توان الکتریکی مصرفی اثرگذار است.

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که اثر اعمال میدان مغناطیسی بر عوامل عملکردی تراستر رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک جریان متناوب با چیدمان کانال تخت، تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. ازینرو، پژوهش حاضر در نظر دارد تا برای اولین بار ایده تراستر پلاسمایی مغناطیسی رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک را با الهام از فیزیک تراستر اثر هال بررسی نماید. بنابراین، هدف این پژوهش، مطالعه تجربی پارامترهای عملکردی تراستر پلاسمایی مغناطیسی و همچنین مقایسه داده‌های به دست آمده با نتایج مربوط به حالت تراستر بدون میدان مغناطیسی، می‌باشد. بر این اساس، نوآوری‌های این پژوهش عبارتند از: ۱) ارائه منحنی‌های پارامتر کارآیی و به دست آوردن نقطه اشباع تراستر پلاسمایی مغناطیسی و همچنین تعیین نحوه ارتباط آن با فیزیک رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای، ۲) توصیف پدیده‌های ناشی از حضور میدان مغناطیسی در پلاسما و بررسی کیفی اثر هر یک از آن‌ها بر روی پارامترهای عملکردی تراستر، ۳) ارائه روابط تجربی برای عوامل عملکردی مبتنی بر قانون تابع توانی برحسب عوامل هندسی و مشخصات الکترومغناطیسی تراستر. در بخش بعدی، جزئیات روش اندازه‌گیری نیروی پیشران و توان مصرفی و همچنین شرایط انجام آزمون‌ها تشریح شده

است. داده‌های کمی و کیفی به دست آمده، در بخش ۳ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. نهایتاً، نتایج حاصل از این پژوهش در بخش ٤ جمع بندی و ارائه شده است.

۲- جزئیات آزمایشگاهی

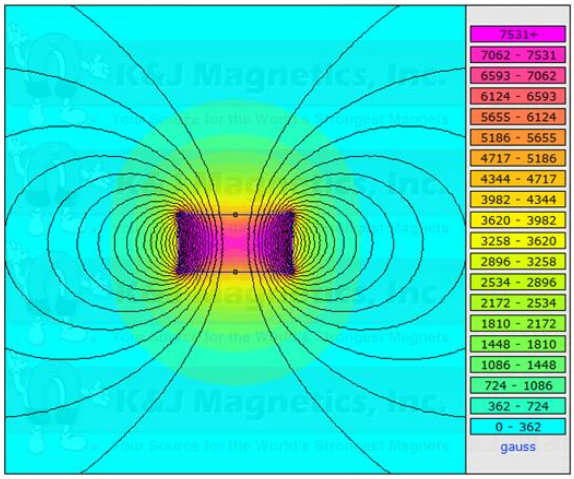
۲-۱- منبع تولید پلاسما و تجهیزات اندازه‌گیری

در این پژوهش، یک دستگاه تغذیه جریان متناوب ولتاژ بالا با شکل موج سینوسی و بیشینه ولتاژ پیک تا پیک ۷۰ کیلوولت و بیشینه فرکانس حامل ۳۰ کیلوهرتز برای ایجاد جریان پلاسما مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ۱) مولد سیگنال برای تولید موج سینوسی با فرکانس حامل متغیر، ۲) تقویت‌کننده جریان متغیر برای دستیابی به توان‌های خروجی موردنظر و ۳) ترانسفورماتور ولتاژ بالا برای تنظیم ولتاژ اعمالی موردنیاز. این منبع تغذیه به گونه‌ای طراحی شده است که همه تنظیمات سیگنال الکتریکی خروجی، شامل بزرگی دامنه ولتاژ اعمالی، فرکانس حامل و چرخه کاری، به طور مستقل از هم و بدون هیچ اثری بر روی یکدیگر، قابل تغییر و تنظیم هستند. در طول انجام آزمون‌ها، برای اندازه‌گیری دامنه‌ی ولتاژ اعمالی، کابل هادی جریان ولتاژبالای خروجی از منبع تغذیه در نقطه اتصال به ورودی الکترودهای درمعرض تراستر، از طریق یک پراب ولتاژبالا (Lutron HV-40) با نسبت ۱:۱۰۰۰ به یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال چهارکاناله (GW Instek GDS-3504) متصل شده است. همچنین، برای اندازه‌گیری فرکانس حامل، یک مولتی‌متر دیجیتال (Victor VC97) به صورت فرکانس‌سنج تنظیم و به خروجی مدار مولد سیگنال وصل شده است (شکل ۳).

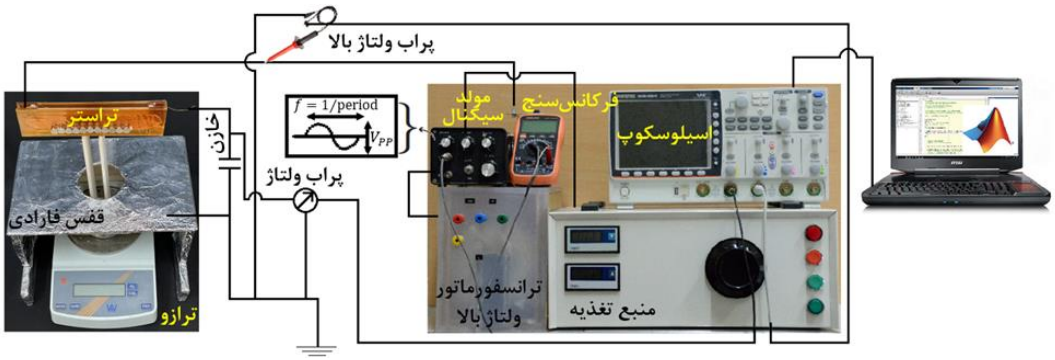
۲-۲- مشخصات تراستر

در این پژوهش، هندسه‌ی تراستر مطابق با شکل ۲ با طول الکترود (L) ۱۵ سانتی‌متر و با سه ضخامت (t) جداگانه ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر برای مانع دی‌الکتریک از جنس پلکسی‌گلس در نظر گرفته شد. با توجه به هدف پژوهش که مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر روی تراستر است، از هر هندسه دو نمونه برای حالت‌های با و بدون آهنربا ساخته شد. بنابراین، در مجموع ٦ مدل تراستر جداگانه مورد آزمایش و مطالعه قرارگرفت. در همه‌ی مدل‌ها، عرض الکترودهای پوشیده (w_1) و درمعرض (w_2) به ترتیب ۲۵ و ۵ میلی‌متر بوده و از جنس مس با ضخامت ۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، مقادیر ارتفاع کانال (h)، عرض کانال (w_3) و فرکانس حامل در کلیه‌ی مدل‌ها و آزمون‌ها ثابت و به ترتیب برابر با ۷/۲ میلی‌متر، ۵۰ میلی‌متر و ۱۲ کیلوهرتز فرض شده‌اند. مقدار ولتاژ پیک تا پیک برای آزمون‌های هر مدل از یک مقدار کمینه (که معادل کمترین ولتاژی است که در آن حداقل نیروی تولیدی توسط ترازوی دیجیتال حس می‌شود) تا مقدار بیشینه (که در آن به واسطه وقوع قوس الکتریکی یا افزایش توان الکتروگرمایی پلاسما، الکترود یا مانع دی‌الکتریک آسیب می‌بیند)، با گام ۱ کیلوولت تغییر داده شده است. برای تولید میدان مغناطیسی، از آهنربای استوانه‌ای نئودیمیومی N42 با قطر ۱۰ و ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است. توزیع میدان مغناطیسی برای این آهنربا که از مرجع[23] استخراج شده، در شکل ٤ نشان داده شده است. براساس داده‌های مرجع اخیر، شدت میدان در مرکز سطح بالایی و پائینی آهنربا ٤٦٦٧ گاوس می‌باشد.

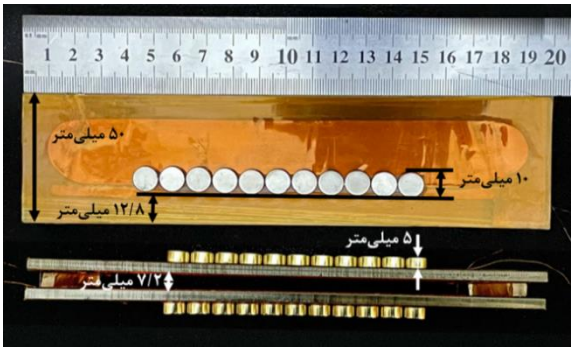
نحوه نصب آهنرباها بر روی دیواره‌ی بیرونی تراستر در شکل ۵ قابل مشاهده است. ملاحظه می‌شود که در طرفین هر دیواره ۱۱



شکل ۴) توزیع میدان مغناطیسی برای آهنربای N42 با قطر ۱۰ و ضخامت ۵ میلی‌متر [23]



شکل ۳) تجهیزات تولید پلاسما، وسایل اندازه‌گیری، چیدمان آزمون و طرح واره‌ی مدار الکتریکی



شکل ۵) چیدمان آهنرباها بر روی دیواره‌ی تراستر

عـدد آهنربا به گونه‌ای نصب شده است که فاصله خط مماس برآن‌ها تا دیواره ۱۲/۸ میلی‌متر باشد. در این فاصله، مرکز آهنرباها تقریباً در جلوی لبه الکترود درمعرض قرار می‌گیرد، تا میدان مغناطیسی بیشترین اثرگذاری را بر روی ناحیه یونیزاسیون داشته باشد.

۲-۳- نحوه اندازه‌گیری نیروی پیشران تراستر

به طور کلی، نیروی الکتروهیدرودینامیکی حاصل از باد یونی تولید شده توسط محرک‌های پلاسمایی با دو روش غیرمستقیم[24-25] و مستقیم[26] قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در این پژوهش برای اندازه-گیری مستقیم نیروی تولید شده توسط تراستر از یک ترازوی دیجیتالی (WT2003CH, WANT CO. Ltd) با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شده است. برای جلوگیری از اثرگذاری میدان‌های الکترواستاتیکی القایی پیرامون تراستر و کابل ولتاژبالای متصل به آن بر مدارات الکترونیکی ترازو و حذف نویز و خطای ناشی از آن‌ها در داده‌برداری، ترازو در یک قفس فارادی که از طریق یک سیم به زمین متصل گردیده، جانمایی شده است. علاوه بر این، برای ایجاد فاصله ایمن بین تراستر و ترازو و همچنین جلوگیری از تجمع بار الکتریکی بر روی ترازو، تراستر بر روی یک تکیه‌گاه سبک که از چوب بالسا ساخته شده است، قرار گرفته و از طریق آن نیروی القایی به کفه ترازو منتقل می‌گردد (شکل ۳).

۲-۴- نحوه‌ی اندازه‌گیری توان مصرفی تراستر

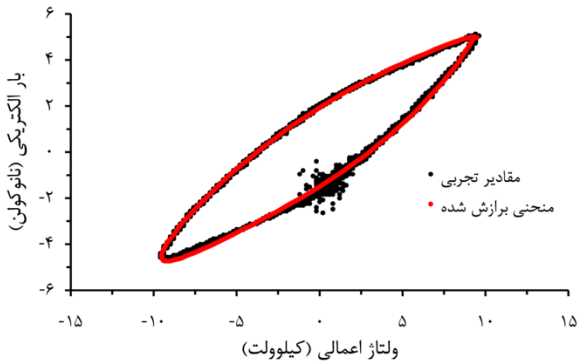
توان الکتریکی مصرفی محرک پلاسمایی را می‌توان با دو روش جداگانه مبتنی بر اندازه‌گیری جریان الکتریکی و بار الکتریکی محاسبه کرد. در روش اول، جریان الکتریکی لحظه‌ای خروجی از محرک یا با استفاده از سیم‌پیچ القایی روگوفسکی و یا با قرار دادن یک مقاومت الکتریکی به صورت سری بین الکترود پوشیده و زمین، اندازه‌گیری می‌شود. با انتگرال‌گیری از حاصل ضرب مقادیر لحظه‌ای ولتاژ اعمالی $V_a(t)$ و جریان الکتریکی در یک چرخه، توان متوسط مصرفی به دست می‌آید.

در مجموع، محاسبه توان براساس انتگرالگیری از حاصل‌ضرب مقادیر لحظه‌ای جریان و ولتاژ، به دلیل شکل سیگنال‌های تسخیرشده و بستگی آن به شرایط داده‌برداری می‌تواند با مشکلاتی همراه شود[27]. بررسی‌های مرجع[28] نشان می‌دهد، روش موسوم به خازن ناظر دارای مزیت و دقت بهتری است. در این روش مطابق شکل ۳، یک خازن در مسیر بین الکترود پوشیده محرک و زمین قرار داده می‌شود و با متصل کردن دو سر آن از طریق یک پراب و اتصال خروجی پراب به اسیلوسکوپ، ولتاژ لحظه‌ای خازن $V_m(t)$ اندازه‌گیری می‌شود. بر این اساس، توان مصرفی متوسط در زمان تناوب یک سیکل (T) از رابطه زیر قابل محاسبه است[28] ،

$$\bar{P} = \frac{1}{T}\oint V_a dQ_m \qquad (۱)$$

که در آن $Q_m(t) = C_m V_m(t)$ بار الکتریکی خازن و C_m ظرفیت خازن می‌باشد. با رسم بار الکتریکی لحظه‌ای برحسب ولتاژ اعمالی لحظه‌ای، یک منحنی بسته بادامی شکل حاصل می‌شود که موسوم به منحنی لیساژو (Lissajous curve) می‌باشد (شکل ٦). معادله‌ی (۱) بیانگر این است که سطح داخلی منحنی لیساژو برابر با مقدار توان الکتریکی مصرفی تراستر است. در پژوهش حاضر، یک کد محاسباتی در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده تا بتواند با دریافت مقادیر اندازه‌گیری شده $V_m(t)$ و $V_a(t)$ که از اسیلوسکوپ به طور آنلاین به کامپیوتر انتقال می‌یابند، سطح داخلی منحنی لیساژو را برای هر آزمون محاسبه نماید. بایستی توجه داشت که برای حصول اطمینان از اندازه‌گیری دقیق بار الکتریکی بایستی ظرفیت خازن مورد استفاده ثابت بوده و از مقدار ظرفیت خازنی محرک بیشتر باشد. برای این منظور، مشابه پژوهش[29] از یک خازن MKP 630 V با ظرفیت ٤٧ نانوفاراد استفاده شده است.

مزیت اندازه‌گیری با روش بار الکتریکی نسبت به روش جریان الکتریکی در این است که به دلیل این که روش خازن ناظر از کل جریان الکتریکی عبوری از محرک در زمان انتگرالگیری می‌کند، قادر است اثرات سیگنال‌های متناظر با همه میکروکانال‌های تخلیه را تسخیر کند[30]. لذا در این پژوهش، از روش مذکور برای محاسبه توان الکتریکی مصرفی استفاده شده است.



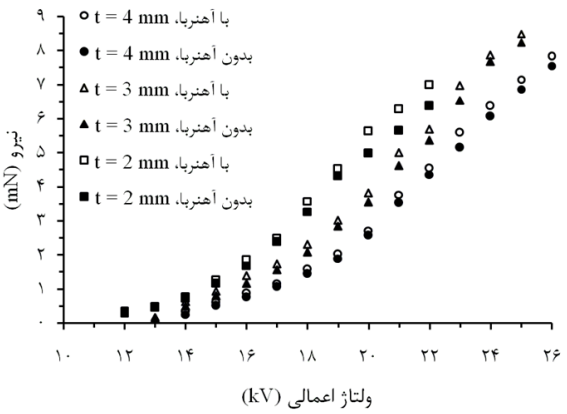
شکل ۶) منحنی لیساژو برای تراستر با ولتاژ اعمالی ۱۹ کیلوولت و $t = 3$ mm

۳- بررسی و تحلیل نتایج

۳-۱- نیروی پیشران

در شکل ۷، تغییرات نیروی پیشران تراستر برحسب ولتاژ پیک تا پیک در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی برای ضخامت‌های مختلف مانع دی‌الکتریک ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که صرف‌نظر از حضور یا عدم حضور آهنربا برای تمامی ضخامت‌ها با افزایش ولتاژ اعمالی، مقدار نیرو افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش ولتاژ، شدت میدان الکترواستاتیکی بین الکترودها زیاد شده و در پی آن نیروی الکتروهیدرودینامیکی کولمب اعمالی بر ذرات پلاسما تقویت شده و باعث می‌شود تا مومنتوم بیشتری از ذرات باردار به جریان هوای داخل کانال انتقال پیدا کند. در نتیجه، نیروی جریان گاز خروجی از کانال که عکس‌العمل آن توسط ترازو اندازه‌گیری می‌شود، افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت مانع دی‌الکتریک در یک ولتاژ اعمالی معین، در حضور و یا عدم حضور آهنربا، مقدار نیرو کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ضخامت، شدت میدان الکترواستاتیکی کاهش یافته و به تبع آن از قدرت نیروی القایی به ذرات پلاسما کاسته می‌شود. با توجه به داده‌های تجربی، این نکته مهم استنتاج می‌شود که اثر میدان مغناطیسی حاصل از اعمال آهنربا باعث افزایش نیرو در مقایسه با حالت بدون آهنربا می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ اعمالی، اختلاف نیروی پیشران در شرایط با آهنربا در مقایسه با حالت بدون آهنربا، افزایش می‌یابد.

به طور کلی، بر ذرات باردار پلاسما تحت میدان‌های الکترواستاتیکی و مغناطیسی به ترتیب نیروهای کولمب و لورنتز اعمال می‌گردد. در پژوهش حاضر، اندازه‌گیری سهم هر یک از نیروهای مذکور درتولید نیروی پیشران به دلیل عدم دسترسی به ابزار و تجهیزات اندازه‌گیری مورد نیاز امکان‌پذیر نمی‌باشد. با این وجود، برحسب مطالعه‌های تجربی و عددی انجام شده در سایر تراسترهای الکترومغناطیسی همچون تراسترهای پالس پلاسمایی [31-32] و پلاسمایی مغناطیسی[33-34]، ملاحظه می‌شود که اثر نیروی لورنتز به عنوان نیروی حجمی، زمانی قابل توجه می‌شود که پلاسمای تولید شده در تراستر، جریان الکتریکی بالایی از مرتبه چند صد آمپر تا چند کیلوآمپر را از خود عبور دهد. این در حالی است که در تراستر پژوهش حاضر، جریان الکتریکی عبوری از مرتبه چند ده میلی‌آمپر می‌باشد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد اهمیت میدان مغناطیسی اعمالی را نباید در قالب اثر مستقیم نیروی لورنتز بر روی یون‌های سنگین در جریان پلاسما جستجو کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که یون‌ها برخلاف الکترون‌ها در رژیم‌های تخلیه مانع دی‌الکتریک تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرند [35]. بنابراین، بایستی اثر میدان مغناطیسی را در ایجاد پدیده‌های دیگری که با پر رنگ کردن نقش الکترون‌ها باعث بهبود فرآیند



شکل ۷) نیروی پیشران تراستر برحسب ولتاژ اعمالی

یونیزاسیون می‌شوند، دنبال کرد. این پدیده‌ها در بخش ۳-۲ مورد بررسی قرار می‌گیرند.

برخی از پژوهش‌های صورت گرفته بر روی محرک پلاسمایی صفحه تخت نشان داده‌اند که نیروی پیشران در قالب قانون توانی، تابعی از ولتاژ اعمالی است ($F_t \propto V^m$). به طور مثال، یون و هان[36] نشان دادند که نیروی پیشران تابع مرتبهٔ دو ولتاژ اعمالی است.

$$F_t = K_t V^2 \qquad (۲)$$

در رابطه بالا، ضریب K_t در یک فرکانس مشخص و برای یک ثابت دی‌الکتریکی معین، تنها وابسته به مشخصات هندسی محرک می‌باشد. به منظور استخراج یک رابطه تجربی برای نیروی پیشران تراستر باید ضریب K_t و توان m تعیین شوند. در این پژوهش با تجزیه و تحلیل فراوانی که بر روی داده‌های ارائه شده در شکل ۷ انجام شد، ضریب هندسی K_t که تنها بیانگر اثر پارامترهای هندسی بر نیروی پیشران است به صورت زیر به دست آمده است:

$$K_t = \left[t^{C_1 - C_2(C_3 - t)} \frac{\ln t}{L} \left(1 + \frac{t}{L}\right)^{1/L} (1 + L)^{1 + C_4(C_5 - L)} \right]^{-1} \qquad (۳)$$

ثوابت C_1 تا C_5 بر اساس داده‌های تجربی قابل استخراج می‌باشند. با توجه به رابطه ۳، می‌توان تابع نیروی پیشران را به شکل کلی‌تری به صورت زیر تعریف کرد:

$$F_t = K_t \beta_t F(V) \qquad (٤)$$

که در آن $F(V)$ نیروی پیشران مقیاس (Scaled thrust) نامیده می‌شود که بیانگر سهمی از نیروی پیشران می‌باشد که صرفاً تابع ولتاژ اعمالی است،

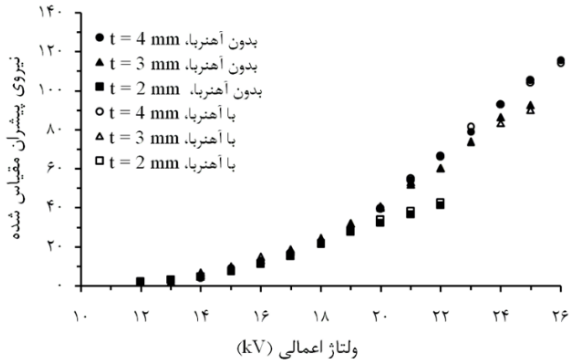
$$F(V) = \frac{F_t}{K_t \beta_t} = \alpha V^m \qquad (٥)$$

و β_t ضریب اثر میدان مغناطیسی بر نیروی پیشران می‌باشد که در این پژوهش به صورت زیر تعریف شده است.

$$\beta_t = \left(\frac{B_{max} L}{t}\right)^{\lambda} \qquad (٦)$$

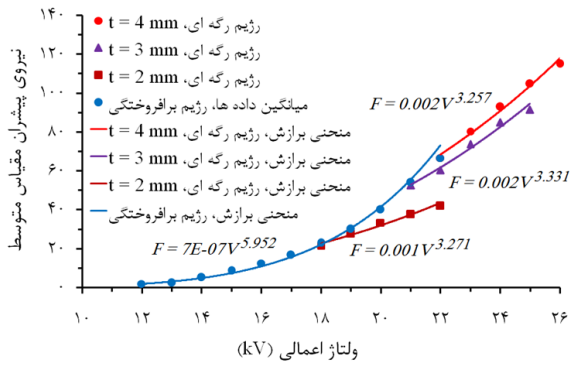
در این رابطه B_{max} مقدار میدان مغناطیسی بیشینه در رانشگر و λ کمیتی تجربی است که براساس داده‌های اندازه‌گیری شده قابل استخراج می‌باشد. لازم به ذکر است در صورت عدم حضور میدان مغناطیسی، مقدار ضریب β_t برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. با توجه

به مقادیر اندازه‌گیری شده نیروی پیشران در شکل ۷ و تعیین ضرایب K_t و β_t از روابط ۳ و ٦، نیروی پیشران مقیاس محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸) نیروی پیشران مقیاس برحسب ولتاژ اعمالی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در ولتاژهای پایین‌تر، داده‌های نیروی پیشران مقیاس تقریباً منطبق بر یکدیگرند. این در حالی است که با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی، رفتار منحنی‌ها از ولتاژهای ۱۹، ۲۱ و ۲۳ کیلوولت به بعد به ترتیب برای ضخامت‌های دی‌الکتریک ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر تغییر می‌کند. علت وقوع این رفتار، پدیده انتقال پلاسما از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای است. در رژیم رگه‌ای، بخش قابل توجهی از توان الکتریکی ورودی به صورت اتلافات حرارتی مستهلک می‌شوند و ازینرو افزایش ولتاژ تاثیر قابل توجهی در افزایش نیروی پیشران نخواهد داشت. مشاهده می‌شود که مقدار ولتاژ نقطه انتقال با افزایش ضخامت مانع دی‌الکتریک، افزایش می‌یابد و این به معنای این است که افزایش ضخامت، انتقال به رژیم رگه‌ای را به تاخیر می‌اندازد. جزئیات بیشتر این پدیده در زیربخش ۳-٤-۱ تشریح خواهد شد.به منظور استخراج توان m در رابطه‌ی ۵، مقادیر نیروی پیشران مقیاس ارائه شده در شکل ۸، در هر ولتاژ معین به ازای ضخامت‌های دی‌الکتریک مختلف برای حالت‌های با و بدون آهنربا، متوسط‌گیری شده و چهار منحنی بر این داده‌ها برازش شده که نتایج آن در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۹) منحنی‌های برازش شده بر روی مقادیر متوسط نیروی پیشران مقیاس برحسب ولتاژ اعمالی

با توجه به منحنی آبی رنگ (در شکل ۹) که از برازش داده‌های مربوط به ضخامت‌های دی‌الکتریک مختلف برای حالت‌های با و بدون آهنربا در رژیم برافروختگی به دست آمده است، مقدار توان m برابر با ۵/۹۵۲ می‌باشد. این در حالی است که با توجه به منحنی‌های قهوه‌ای، بنفش و قرمز رنگ که به ترتیب مربوط به ضخامت‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر در رژیم رگه‌ای می‌باشند، مقدار توان m برابر با ۳/۲۷۱، ۳/۳۳۱ و ۳/۲۵۷ است که میانگین آن‌ها ۳/۲۸٦ می‌باشد. بنابراین، ملاحظه می‌شود که نیروی پیشران تراستر در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب به صورت $F_t \propto V^6$ و $F_t \propto V^{3.3}$ تابعی از ولتاژ اعمالی است.

۳-۲- بررسی اثر پدیده‌های ناشی از حضور میدان مغناطیسی بر نیروی پیشران

معادلات حاکم بر فیزیک پلاسما نشان می‌دهند که به‌دلیل وجود پدیده‌های گرادیان فشار و برخورد بین ذرات مختلف در پلاسما، نفوذی از جریان پلاسما از نواحی پرچگالی به سمت نواحی کم چگالی، هم در راستای خطوط میدان مغناطیسی و هم در عرض آن‌ها به وجود می‌آید. در صورتی که بردارهای سرعت و میدان الکترواستاتیکی دارای مولفه‌های محوری و محیطی باشند و میدان مغناطیسی کاملاً محوری باشد، شار جریان در راستای محوری (Γ_z) از رابطه زیر حاصل می‌شود[19]،

$$\Gamma_z = nv_z = \pm\mu n E_z - D\frac{\partial n}{\partial z} \qquad (۷)$$

که در آن μ و D به ترتیب ضرایب نفوذ و تحرک کلاسیک نام دارند. n و E هم به ترتیب بیانگر چگالی ذرات و میدان الکترواستاتیکی می‌باشند. این در حالی است که به‌واسطه میدان مغناطیسی محوری عمود بر مولفه محیطی میدان الکترواستاتیکی، شار عرضی عمود ($\Gamma_\perp$) بر میدان مغناطیسی نیز جریان می‌یابد[19]،

$$\Gamma_\perp = n\boldsymbol{v}_\perp = \pm\mu_\perp n\boldsymbol{E} - D_\perp\nabla n + \frac{n}{1+\Omega^{-2}}\frac{\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}}{B^2} \qquad (۸)$$

که در آن

$$\mu_\perp = \frac{\mu}{1+\Omega^2} \qquad (۹)$$

$$D_\perp = \frac{D}{1+\Omega^2} \qquad (۱۰)$$

به ترتیب، ضرایب نفوذ و تحرک عمودی و $\Omega = eB/mv$ عامل هال می‌باشد. برای درک بهتر چگونگی اثرگذاری میدان مغناطیسی بر روی کیفیت فرآیند یونیزاسیون، نقش هر یک از عبارات سمت راست معادله‌ی ۸ بررسی می‌شود. نخست اینکه الکترون‌ها به دلیل سبک بودن تحت نیروی لورنتز $F_\perp = e\mathbf{v}\times\mathbf{B}$ قرار می‌گیرند. در اینجا، اندازه بردار میدان مغناطیسی برابر با شدت میدان مغناطیسی محوری حاصل از آهنرباهاست و اندازه بردار سرعت هم برابر با مقدار مولفه محیطی سرعت است. در صورتی که فقط عبارت اول سمت راست معادله ۸ در نظر گرفته شود، نیروی لورنتز بر الکترون‌های تحت میدان مغناطیسی محوری با سرعت اولیه عمودی $\mathbf{v}_\perp = \pm\mu_\perp\mathbf{E}$، اثر گذاشته و باعث می‌شود که الکترون‌ها حول خطوط میدان مغناطیسی و در امتداد آن‌ها حرکتی چرخشی

پیدا کنند. مقدار شعاع این چرخش که معروف به شعاع لارمور می‌باشد برابر است با $R = mv/eB$، که در آن m جرم ذره باردار است. ملاحظه می‌شود که الکترون‌ها به دلیل جرم بسیار کمتر نسبت به یون‌ها دارای شعاع لارمور کمتری هستند و به همین دلیل است که تحت تاثیر میدان قرار می‌گیرند و اصطلاحاً مغناطیسیده می‌شوند، در حالی‌که یون‌ها غیرمغناطیسیده باقی می‌مانند. در شرایطی که میدان مغناطیسی وجود ندارد، الکترون‌ها مسیر مستقیمی را از سمت الکترود کاتد به آند طی می‌کنند. در حالی که حرکت چرخشی الکترون‌های مغناطیسیده شده در امتداد خطوط میدان مغناطیسی باعث می‌شود که الکترون‌ها مسیر طولانی‌تری بپیمایند و این امر باعث می‌شود احتمال برخورد الکترون‌ها با مولکول‌های هوا بیشتر شده و یونیزاسیون افزایش یابد[35]. دوم این که ملاحظه می‌شود با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر میدان الکترواستاتیکی، پارامتر هال افزایش و ضریب نفوذ عمودی الکترون‌ها طبق رابطه‌ی ۱۰ کاهش یافته $(D_\perp < D)$ و در نتیجه شار جریان در جهت محیطی طبق معادله ۸ افزایش می‌یابد. به معنای دیگر میدان مغناطیسی اعمالی اثر حبس‌کنندگی بر روی الکترون‌ها دارد و این امر باعث می‌شود که ماندگاری الکترون‌ها در ناحیه یونیزاسیون بیشتر شده و احتمال برخورد بین الکترون‌ها و ذرات خنثی بیشتر شود[37-38]. سوم این که، به واسطه‌ی عبارت آخر در سمت راست معادله‌ی ۸، که اثر رانش $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ نام دارد، در میدان‌های متقاطع الکترواستاتیکی و مغناطیسی، الکترون‌ها در جهت عمود بر میدان‌ها، حرکت سیکلوئیدی پیدا می‌کنند. در نتیجه، الکترون‌ها مسیری منحنی شکل و طولانی‌تری را نسبت به حالتی که میدان مغناطیسی وجود ندارد، طی می‌کنند. در این شرایط، زمان ماندگاری الکترون‌ها در فضای بین الکترودها بیشتر شده و به تبع آن احتمال برخورد ذرات افزایش می‌یابد[39]. در نهایت، می‌توان گفت که اعمال میدان مغناطیسی در قالب تقویت سه پدیده حرکت چرخشی، نفوذ جانبی و رانش $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$، منجر به بهبود فرآیند یونیزاسیون شده و به تبع آن چگالی ذرات باردار افزایش می‌یابد. افزایش چگالی ذرات باردار بمعنای افزایش نیروی کولمب و انتقال مومنتوم بیشتر به جریان هوای داخل کانال است لذا به مقدار نیروی پیشران افزوده می‌شود.

۳-۳- توان مصرفی

توان مصرفی الکتریکی تراستر برحسب ولتاژ پیک تا پیک در حالت‌های با و بدون آهنربا در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود میدان مغناطیسی، برای هر ضخامت مانع دی‌الکتریک دلخواه، با زیاد شدن ولتاژ اعمالی، توان مصرفی تراستر افزایش می‌یابد. بخشی از این توان منجر به تولید نیروی پیشران مطابق با داده‌های شکل ۷ می‌شود. همچنین، در یک ولتاژ معین، با افزایش ضخامت مانع دی‌الکتریک، توان مصرفی کاهش می‌یابد. افزایش ضخامت به معنای افزایش ضریب مقاومت مانع دی‌الکتریک بوده و بنابراین در ولتاژ مشخص، جریان الکتریکی عبوری کاهش یافته و به تبع آن توان مصرفی کم می‌شود. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در هر ضخامت مانع دی‌الکتریک دلخواه، توان مصرفی در حالتی که از آهنربا استفاده شده در مقایسه با حالت بدون آهنربا کاهش پیدا می‌کند و اختلاف بین مقادیر آن‌ها با افزایش ولتاژ اعمالی، بیشتر می‌شود. مطالعات تجربی جداگانه برای رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک[21] و رژیم تخلیه کرونا[40] در رآکتورهای پلاسمایی نیز حاکی از این است که با به کارگیری میدان مغناطیسی، توان مصرفی الکتریکی کاهش می‌یابد. در زیربخش‌های ۳-٤-۱ و ۳-٤-۲، با توجه به ساختار جریان پلاسما و پدیده‌های حاکم بر آن، دلایل کاهش توان مصرفی تحت میدان مغناطیسی تشریح شده است. بررسی داده‌های تجربی شکل ۱۰ حاکی ازین است که توان الکتریکی مصرفی تابعی توانی از ولتاژ است که مشابه پژوهش[41] می‌توان آن را در قالب قانون توانی نمایش داد $(\bar{P} \propto V^n)$. مطالعات تجربی صورت گرفته تاکنون نشان می‌دهند که مقدار عامل n برای محرک‌های صفحه تخت در بازه ۲ تا ٤ متغیر می‌باشد[42]. جهت به دست آوردن مقدار n برای تراستر مورد مطالعه در این پژوهش، مشابه رابطه‌ی ٤، تابع توان مصرفی به صورت زیر در نظر گرفته شده است،

$$\bar{P} = K_p \beta_p P(V) \tag{۱۱}$$

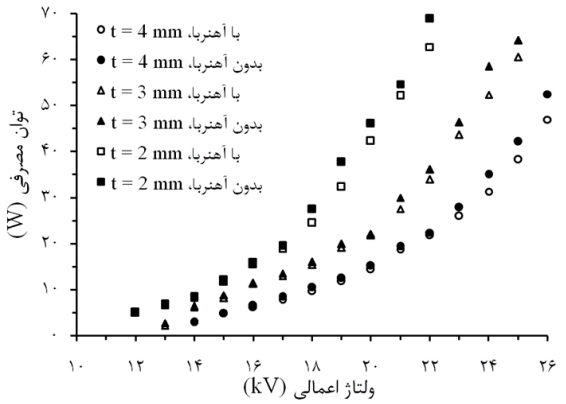
که در آن $P(V)$ توان مصرفی مقیاس است که صرفاً تابع ولتاژ اعمالی می‌باشد.

$$P(V) = \frac{\bar{P}}{K_p \beta_p} = \vartheta V^n \tag{۱۲}$$

K_p ضریب هندسی توان مصرفی است که بر اساس بررسی‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$K_p = \left[t^{C_6 - C_7 (C_8 - t)} \frac{\ln t}{L} \left(1 + \frac{t}{L}\right)^{1/L} \right]^{-1} \tag{۱۳}$$

که در آن، ثابت‌های C_6 تا C_8 بر اساس داده‌های تجربی قابل استخراج می‌باشند. در رابطه ۱۱، β_p ضریب اثر میدان مغناطیسی



شکل ۱۰) توان الکتریکی مصرفی تراستر برحسب ولتاژ اعمالی

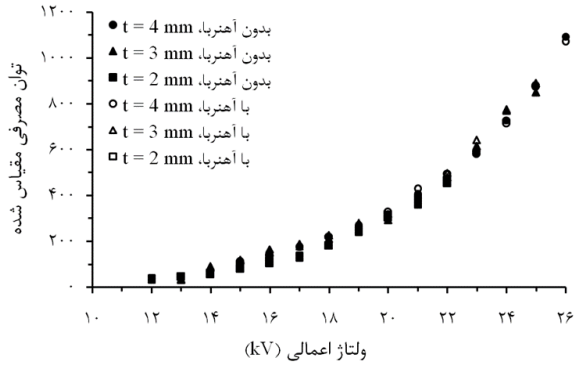
بر توان مصرفی نامیده می‌شود که در این پژوهش به صورت زیر تعریف شده است.

$$\beta_p = \left(\frac{B_{max}L}{t}\right)^{\gamma} \quad (۱۴)$$

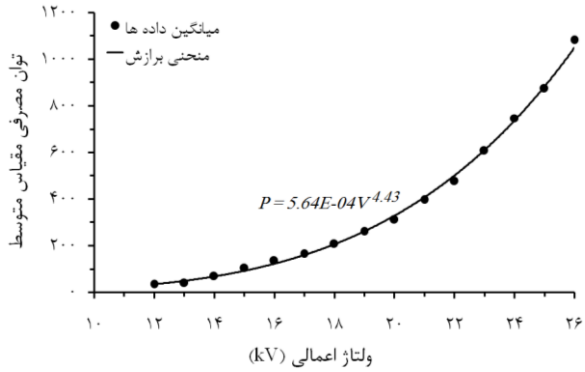
γ کمیتی تجربی است که براساس داده‌های اندازه‌گیری شده استخراج می‌شود. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده توان مصرفی در شکل ۱۰ و با استفاده از روابط ۱۲ تا ۱۴، توان مصرفی مقیاس محاسبه گردیده و نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برخلاف رفتار داده‌های مربوط به نیروی پیشران مقیاس در شکل ۸، هیچ گونه شکستگی (ناشی از پدیده‌ی انتقال از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای) در شیب داده‌های توان مصرفی مقیاس دیده نمی‌شود و به ازای مقادیر مختلف ضخامت دی‌الکتریک، داده‌ها تقریباً بر یکدیگر منطبق‌اند و به طور پیوسته با زیاد شدن ولتاژ افزایش می‌یابند.

برای تعیین توان n در رابطه‌ی ۱۲، مقادیر توان مصرفی مقیاس ارائه شده در شکل ۱۱، در هر ولتاژ معین به ازای ضخامت‌های دی‌الکتریک مختلف و در حالت‌های با و بدون آهنربا، متوسط‌گیری شده و یک منحنی بر این داده‌ها برازش شده که نتایج آن در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

با توجه به منحنی خط‌پیوسته (در شکل ۱۲) که از برازش بر روی همه داده‌های میانگین‌گیری شده در هر دو رژیم برافروختگی و رگه‌ای به دست آمده است، مقدار توان n برابر با ۴/۴۳ می‌باشد.



شکل ۱۱) توان مصرفی مقیاس برحسب ولتاژ اعمالی



شکل ۱۲) منحنی برازش شده بر روی مقادیر متوسط نیروی پیشران مقیاس برحسب ولتاژ اعمالی

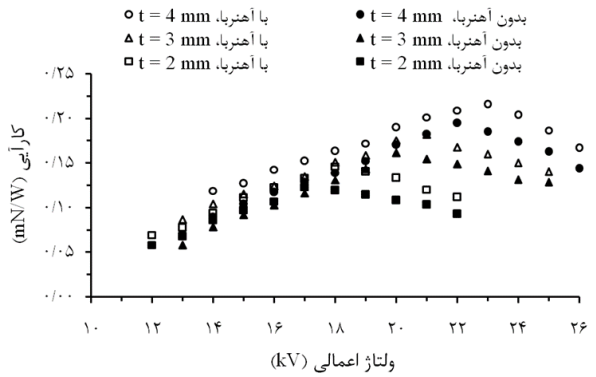
بنابراین، صرف‌نظر از نوع رژیم پلاسما، توان مصرفی تراستر به صورت $\bar{P} \propto V^{4.4}$ تابعی از ولتاژ است.

۳-۴- عامل کارآیی

یکی از عوامل مهم در تحلیل عملکرد تراسترهای پلاسمایی، کارآیی می‌باشد که براساس نسبت نیروی پیشران (F_t) به توان مصرفی تراستر تعریف می‌شود[41].

$$\eta^*_{eff} = \frac{F_t}{\bar{P}} \quad (۱۵)$$

در شکل ۱۳، منحنی‌های کارآیی برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت‌های مختلف دی‌الکتریک رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌ها به صورت قله‌ای شکل هستند و با افزایش ولتاژ اعمالی تا رسیدن به یک نقطه بیشینه افزایش و بعد ازآن کاهش می‌یابند. این رفتار در پژوهش‌های مشابه برای محرک صفحه تخت نیز دیده شده است[41-43].

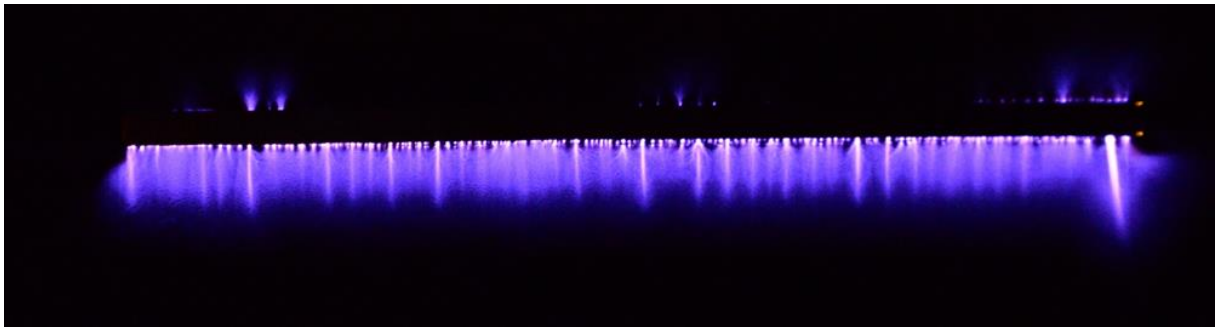


شکل ۱۳) پارامتر کارآیی تراستر برحسب ولتاژ اعمالی

۳-۴-۱- بررسی اثر رژیم‌های مختلف تخلیه پلاسما بر عامل کارآیی

نقطه بیشینه منحنی‌های عامل کارآیی، نقطه حالت اشباع (Saturation condition) نامیده می‌شود[44]. نقطه اشباع متناظر با مقدار ولتاژی است که به ازای آن جریان پلاسما از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای انتقال می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، در رژیم برافروختگی، جریان پلاسما در نقاط ریز نورانی در لبه الکترود درمعرض (ناحیه کرونا) قابل رویت بوده و برخی از این نقاط در قالب مجاری شاخه‌ای (میکروکانال‌های تخلیه) به سمت پایین‌دست پخش شده و نواحی هموژنی را مشابه ستون دود به وجود می‌آورند. با ورود به رژیم رگه‌ای، مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که به دلیل رشد و تجمیع ریزکانال‌های تخلیه، تعداد زیادی از رشته‌ها و رگه‌های قوی و درخشنده در جریان پلاسما ایجاد می‌شود که بخش قابل توجهی از توان الکتریکی ورودی را به صورت اتلافات حرارتی مستهلک می‌کنند و ازینرو افزایش بیشتر ولتاژ بعد از نقطه‌ی اشباع، تاثیر کمتری در افزایش نیروی پیشران خواهد داشت. در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که ولتاژ نقطه اشباع با افزایش ضخامت مانع دی‌الکتریک، بیشتر می‌شود و این به معنای این است که افزایش

شکل ۱۴) تصویر جریان پلاسما تحت ولتاژ اعمالی ۱۷ کیلوولت (رژیم برافروختگی، بدون آهنربا و $t = 4$ mm)

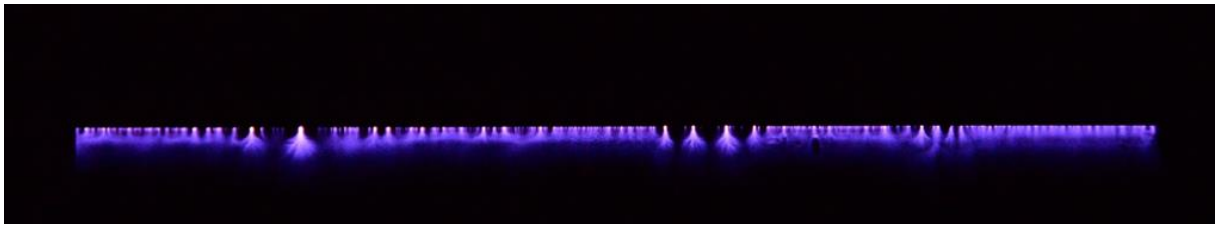


شکل ۱۵) تصویر جریان پلاسما تحت ولتاژ اعمالی ۳۲ کیلوولت (رژیم رگه‌ای، بدون آهنربا و $t = 4$ mm)

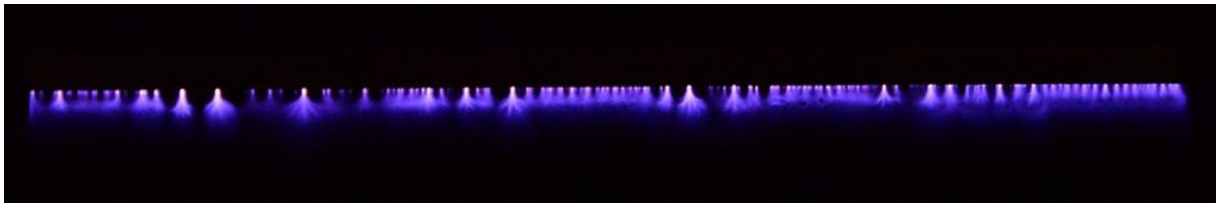
ضخامت، گذار به رژیم رگه‌ای را به تاخیر می‌اندازد. به طور کلی در هر ولتاژ دلخواه، با زیاد شدن ضخامت مانع دی‌الکتریک، مقدار عامل کارآیی در رژیم رگه‌ای افزایش می‌یابد.

۳-۴-۲- بررسی اثر میدان مغناطیسی بر عامل کارآیی

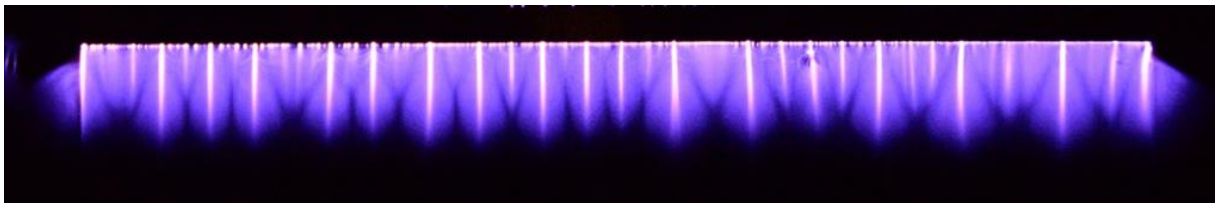
با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که عامل کارآیی در صورت وجود میدان مغناطیسی در مقایسه با حالت بدون آهنربا به طور قابل تاملی افزایش می‌یابد. به طور مشخص، این افزایش در رژیم رگه‌ای نسبت به رژیم برافروختگی بیشتر است. برای درک بهتر نقش میدان مغناطیسی در رژیم رگه‌ای در مقایسه با رژیم برافروختگی، تصاویر جریان پلاسما در ولتاژهای ١٤ و ٢٦ کیلوولت برای محرک با ضخامت ۲ میلی‌متر در حالت‌های بدون آهنربا و با آهنربا در شکل‌های ١٦ تا ١٩ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ولتاژ ١٤ کیلوولت برای هر دو حالت با و بدون آهنربا، رژیم برافروختگی حاکم است. در این رژیم، با توجه به شکل‌های ١٦ و ١٧ مشخص است که استفاده از آهنربا باعث شده تا نقاط کرونا در لبه الکترود درمعرض، قدری بزرگتر و نورانی‌تر باشند و تعداد ریزکانال‌های تخلیه‌ی منبعث از آن‌ها بیشتر بوده و تقریباً درخشانتر هستند. همچنین با کشیده شدن این ریزکانال-ها به سمت پایین دست، سرشاخه‌های آن‌ها بیشتر پخش شده و به طور جانبی نفوذ می‌کنند و لذا جریان پلاسما در مقایسه با حالت بدون آهنربا قدری پراکنده‌تر است. این نتیجه کیفی با تحلیل ذکر شده در بخش ۳-۲ در مورد پدیده نفوذ جانبی تحت میدان مغناطیسی هم‌خوانی دارد. در ولتاژ اعمالی ٢٦ کیلوولت که رژیم کاملاً رگه‌ای حاکم است، تفاوت ساختار جریان پلاسما در حالت با و بدون آهنربا در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ بیشتر مشهود است. در هر دو حالت ریزکانال‌های تخلیه تجمیع شده و رشته‌های نورانی و درخشنده‌ای را ایجاد کرده‌اند. با این حال دیده می‌شود که در حالت با آهنربا، تعداد رشته‌های درخشان بیشتر بوده و فواصل بین آن‌ها کمتر بوده و به طور جانبی در هم نفوذ کرده‌اند. در حالی که در شرایط بدون آهنربا، تعداد رگه‌های جریان تخلیه کمتر بوده و فواصل بین‌شان بیشتر است. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که میدان مغناطیسی باعث می‌شود تا جریان پلاسما ساختار هموژن و نفوذی پیدا کند که البته این اثر در رژیم رگه‌ای نسبت به رژیم برافروختگی به مراتب برجسته‌تر است. داده‌های کمی مربوط به توان مصرفی در شکل ۱۰ و رفتار کیفی پلاسما در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ این نتیجه را متبادر می‌کند که ساختار هموژن و نفوذی‌تر جریان پلاسما در حالت با آهنربا نسبت به حالت بدون آهنربا باعث می‌شود که توان مصرفی کاهش یابد. در واقع، در ساختار هموژن حاصل از اعمال آهنربا، الکترون‌های حبس شده ناشی از وجود



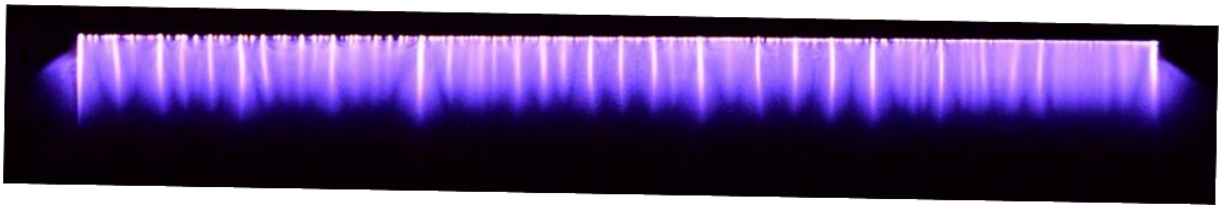
شکل ۱۶) تصویر جریان پلاسما تحت ولتاژ اعمالی ۱۴ کیلوولت (رژیم برافروختگی، بدون آهنربا و $t = 2$ mm)



شکل ۱۷) تصویر جریان پلاسما تحت ولتاژ اعمالی ۱۴ کیلوولت (رژیم برافروختگی، با آهنربا و $t = 2$ mm)



شکل ۱۸) تصویر جریان پلاسما تحت ولتاژ اعمالی ۲۶ کیلوولت (رژیم رگه‌ای، بدون آهنربا و $t = 2$ mm)

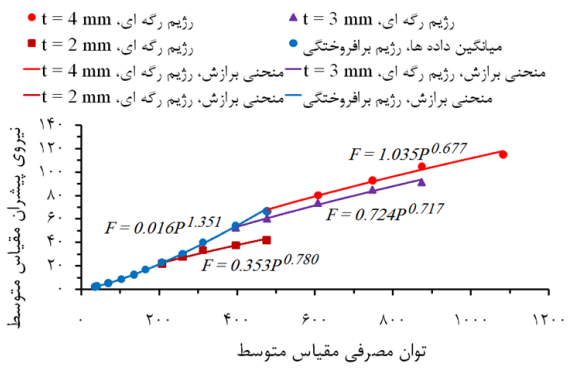


شکل ۱۹) تصویر جریان پلاسما تحت ولتاژ اعمالی ۲۶ کیلوولت (رژیم رگه‌ای، با آهنربا و $t = 2$ mm)

پدیده‌های رانش، چرخش و نفوذ، باعث می‌شوند تا تمرکز رگه‌های تخلیه منسجم که در حالت بدون آهنربا مشاهده شده‌اند، در راستای عرضی پخش شده و با نفوذ در همدیگر رگه‌های بیشتری تشکیل شوند و به این ترتیب پلاسمای یکنواخت‌تری تحت میدان مغناطیسی به وجود آید. بنابراین در حضور میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی که در فاصله بین دو الکترود و در بستر پلاسمای یونیزه شده برقرار می‌شود، به جای آن که از طریق رگه‌های متمرکز تخلیه شود، در قالب تعداد رگه‌های بیشتر با شدت تمرکز کمتر تخلیه می‌شود. ساختار یکنواخت‌تر و هموژن پلاسما، باعث می‌شود تا بخشی از توان ورودی به جای آن که در قالب اتلاف حرارتی هدر رود، منجر به افزایش نیروی پیشران بیشتر و توان مصرفی کمتر شود. ازینرو، مشاهده می‌شود که در ضخامت‌های مختلف مانع دی‌الکتریک در شکل ۱۳، مقدار عامل کارآیی در رژیم رگه‌ای تحت میدان مغناطیسی به ازای هر ولتاژ اعمالی دلخواه نسبت به حالت بدون آهنربا بیشتر است. داده‌ها نشان می‌دهند که به ازای ضخامت‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر، مقدار ولتاژ نقطه‌ی اشباع در حالت بدون آهنربا به ترتیب ۱۷، ۲۰ و ۲۲ کیلوولت و برای شرایط با آهنربا ۱۸، ۲۱ و ۲۳ کیلوولت می‌باشد. لذا ملاحظه می‌شود که اعمال میدان مغناطیسی گذار از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای را به تاخیر انداخته است. در داده‌های به دست آمده بیشینه مقدار عامل کارآیی در حالت با و بدون آهنربا متعلق به تراستر با ضخامت مانع دی‌الکتریک ٤ میلی‌متر است که به ترتیب برابر با ۰/۲۱۵ و ۰/۱۹۵ میلی‌نیوتن بر وات می‌باشد که افزایش ۱۰ % را به دلیل اعمال میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

۳-۴-۳- تحلیل رفتار منحنی عامل کارآیی

تبیین علت پیداش رفتار قله‌ای شکل نمودار کارآیی، نیازمند تعیین ارتباط نیروی پیشران با توان مصرفی است. برای تعیین چگونگی وابستگی نیروی پیشران با توان مصرفی ($F = P^r$)، مقادیر متوسط‌گیری شده این کمیات که در شکل‌های ۱۲ و ۹ ارائه شده‌اند، با حذف متغیر ولتاژ به طور جداگانه برحسب یکدیگر در شکل ۲۰ رسم شده‌اند. با توجه به منحنی آبی رنگ که از برازش داده‌های مربوط به رژیم برافروختگی به دست آمده است، مقدار توان r برابر با ۱/۳۵۱ می‌باشد. این در حالی است که با توجه به منحنی‌های قهوه‌ای، بنفش و قرمز رنگ که به ترتیب مربوط به ضخامت‌های ۲، ۳ و ٤ میلی‌متر در رژیم رگه‌ای می‌باشند، مقدار توان r به ترتیب برابر با ۰/۷۸۰، ۰/۷۱۷ و ۰/٦۷۷ است که میانگین آن‌ها ۰/۷۲۵ می‌باشد. بنابراین، ملاحظه می‌شود که

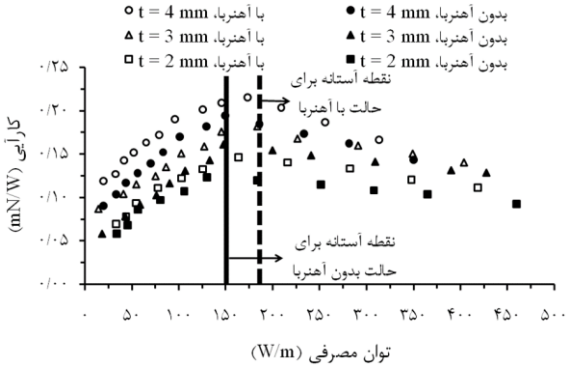


شکل ۲۰) تعیین تابعیت نیروی پیشران مقیاس برحسب توان مصرفی مقیاس در قبل و بعد از نقطه‌ی اشباع

نیروی پیشران تراستر در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب تابعیتی از توان مصرفی به شکل تقریبی $F = P^{1.35}$ و $F = P^{0.72}$ دارد. این امر موید آن است که در رژیم برافروختگی بخش قابل توجهی از توان مصرفی منجربه تولید نیروی پیشران می‌شود. در حالی که در رژیم رگه‌ای همانطور که پیشتر ذکر شد، به دلیل استهلاک بیشتر توان مصرفی، نیروی پیشران کمتری تولید می‌شود. با توجه به رابطه‌ی ۱۵، پارامتر کارآیی با مرتبه‌ی توان $1 - r$ ولتاژ متناسب است $(\eta^*_{eff} \propto V_a^{1-r})$. بنابراین، در رژیم برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب تناسب‌های $\eta^*_{eff} \propto V^{0.35}$ و $\eta^*_{eff} \propto V^{-0.28}$ برقرار می‌باشد. ازینرو، منحنی عامل کارآیی، برای هر دو حالت با و بدون آهنربا با افزایش ولتاژ تا نقطه‌ی اشباع روندی صعودی داشته و بعد از آن با افزایش بیشتر ولتاژ، کاهش می‌یابد و در نهایت به شکل قله‌ای در می‌آید.

۳-۴-۴- بررسی ارتباط عامل کارآیی و توان مصرفی

در شکل ۲۱، توزیع عامل کارآیی برحسب توان مصرفی نسبی (توان الکتریکی بر واحد طول الکترود) نشان داده شده است. مشابه شکل ۱۳، منحنی‌ها رفتار قله‌ای شکل دارند. بررسی داده‌ها حاکی است که بیشترین مقدار عامل کارآیی که متناظر با نقطه اشباع است برای حالت با آهنربا و بدون آهنربا تقریباً در توان نسبی ۱۸۰ و ۱۵۰ وات بر متر رخ می‌دهد که آن را توان آستانه انتقال (Threshold of transition) از رژیم برافروختگی به رگه‌ای می‌نامند. بنابراین، اعمال میدان مغناطیسی مقدار توان مصرفی نقطه انتقال را افزایش داده و آستانه انتقال را به تاخیر می‌اندازد. همچنین، ملاحظه می‌شود که صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود آهنربا تقریباً برای ضخامت‌های مانع دی‌الکتریک مختلف، گذار از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای در نقطه آستانه اتفاق افتاده و روند صعودیِ منحنی‌ها در توان‌های پایین تا رسیدن به نقطه آستانه ادامه داشته و بعد از آن در توان‌های بالاتر روند آن‌ها نزولی می‌گردد. اگرچه تاکنون مرجعی مقدار توان آستانه انتقال را برای تراستر با چیدمان کانال تخت بیان نکرده، اما این مقدار برای محرک صفحه تخت در مرجع[45]، ٤٠ وات بر متر گزارش شده است.



شکل ۲۱) پارامتر کارآیی تراستر برحسب توان مصرفی نسبی

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش، مشخصات عملکردی (نیروی پیشران، توان مصرفی و پارامتر کارآیی) یک تراستر پلاسمایی رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک تحت میدان مغناطیسی مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. همچنین، داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی این مشخصات با مقادیر به دست آمده برای شرایط بدون میدان مغناطیسی مقایسه و تفاوت‌های موجود در نتایج تحلیل شدند. در مجموع، نتایج اصلی حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۱- با افزایش ولتاژ و اعمال میدان مغناطیسی، نیروی پیشران افزایش یافته، به طوری که اثرات افزایش ولتاژ و اعمال میدان مغناطیسی بر روی نیروی پیشران به ترتیب در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای قابل توجه‌تر هستند.

۲- اعمال میدان مغناطیسی منجر به ایجاد حرکت چرخشی الکترون‌ها، نفوذ جانبی جریان، حبس شدن الکترون‌ها و همچنین وقوع حرکت سیکلوئیدی الکترون‌ها به سبب رانش $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ شده و به تبع آن جریان پلاسما هموژن و یکنواخت‌تر شده و در نتیجه فرآیند یونیزاسیون تقویت می‌شود. ازینرو، نیروی پیشران افزایش و توان مصرفی کاهش پیدا می‌کند. این اثر در منحنی‌های عامل کارآیی به ویژه بعد از نقطه اشباع محسوس است.

۳- اعمال میدان مغناطیسی باعث می‌شود مقدار ولتاژ نقطه اشباع افزایش یافته و همچنین گذار از رژیم برافروختگی به تعویق بیافتد.

٤- مشاهدات کیفی نشان می‌دهند که در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب تعداد نقاط کرونا در لبه الکترود ولتاژبالا و تعداد رشته‌های مجاری تخلیه جریان الکتریکی، با اعمال میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و نهایتاً جریان نفوذی‌تری حاصل می‌شود.

٥- داده‌های نیروی مقیاس برای هندسه‌هایی با ضخامت مانع دی‌الکتریک مختلف در رژیم برافروختگی تقریباً بر همدیگر منطبق هستند و مقدارشان تابعی توانی از ولتاژ اعمالی است. با ورود به رژیم رگه‌ای شیب منحنی داده‌ها به ازای ضخامت‌های مانع دی‌الکتریک مختلف تغییر می‌کند. مرتبه توان ولتاژ در این منحنی‌ها در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب $m = 6$ و $m = 3.3$ می‌باشد.

٦- داده‌های توان مصرفی مقیاس برای هندسه‌هایی با ضخامت مانع دی‌الکتریک مختلف، در هر دو رژیم برافروختگی و رگه‌ای تقریباً بر همدیگر منطبق هستند و مقدارشان تابعی توانی از ولتاژ اعمالی با مرتبه $n = 4.4$ است.

۷- نیروی پیشران تابعی توانی از توان مصرفی است که تابعیت آن به ترتیب در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای از مرتبه $r = 1.35$ و $r = 0.72$ می‌باشد.

۸- عامل کارآیی براساس تناسب‌های $\eta^*_{eff} \propto V^{0.35}$ و $\eta^*_{eff} \propto V^{-0.28}$ به ترتیب در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای تابعی مستقیم

و معکوس از ولتاژ است و لذا نمودار آن شامل نقطه بیشینه بوده و دارای شکل قله‌ای می‌باشد.

۹- مقدار توان مصرفی متناظر با نقطه‌ی انتقال از رژیم برافروختگی به رگه‌ای در حضور میدان مغناطیسی و همچنین در غیاب آن به ترتیب برابر با۱۸۰ و ۱۵۰ وات بر متر می‌باشد.

در این پژوهش ایده تراستر پلاسمایی مغناطیسی رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک مطرح و مورد ارزیابی تجربی قرار گرفت. برای بهبود عملکرد این تراستر بایستی اثر شدت میدان‌های مغناطیسی بیشتر را که نیازمند استفاده از آهنرباهای قوی‌تر است، بررسی کرد. البته آهنرباهای قوی‌تر چالش وزن بیشتر را با خود به همراه دارند که با توجه به ظرفیت محدود ترازوهای دیجیتالی دقت بالای در دسترس، باید سازوکار نصب آهنرباها و نحوه اعمال میدان مغناطیسی بر روی تراستر مورد تدبیر و مداقه قرار گیرد. همچنین برای تقارن بهتر جریان، مناسب است که هندسه‌هایی با کانال استوانه‌ای و همچنین به شکل استوانه‌های هم‌محور مطالعه شوند. این امر نیازمند استفاده از آهنرباهای هلالی و دایروی شکل است. ازینرو، تهیه و نحوه نصب مدل‌های قویتر این نوع از آهنرباها چالش‌های مختص به خود را در پی خواهد داشت.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده ایشان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی: توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

1- Johnson MJ, Go DB. Recent advances in electrohydrodynamic pumps operated by ionic winds: a review. Plasma Sources Science and Technology. 2017 (10):103002.

2- Zheng JG, Cui YD, Khoo BC. A comparative study of alternating current and nanosecond plasma actuators in flow separation control. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 ;135:1097-117.

3- Corke TC, Enloe CL, Wilkinson SP. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. Annual review of fluid mechanics. 2010;42:505-29.

4- Wang JJ, Choi KS, Feng LH, Jukes TN, Whalley RD. Recent developments in DBD plasma flow control. Progress in Aerospace Sciences. 2013 ;62:52-78.

5- Zhang X, Huang Y, Wang X, Wang W, Tang K, Li H. Turbulent boundary layer separation control using plasma actuator at Reynolds number 2000000. Chinese Journal of Aeronautics. 2016 ;29(5):1237-46.

6- Pescini E, Marra F, De Giorgi MG, Francioso L, Ficarella A. Investigation of the boundary layer characteristics for assessing the DBD plasma actuator control of the separated flow at low Reynolds numbers. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017 ;81:482-98.

7- Batlle EC, Pereira R, Kotsonis M. Airfoil stall hysteresis control with dbd plasma actuation. In55th AIAA Aerospace Sciences Meeting 2017 (p. 1803).

8- Zhao G, Huang Y, Yang Y, Li G, Yang H. Dynamic stall control over a rotor airfoil based on AC DBD plasma actuation. Advances in Aerodynamics. 2021(1):1-3.

9- Pouryoussefi SG, Mirzaei M, Alinejad F, Pouryoussefi SM. Experimental investigation of separation bubble control on an iced airfoil using plasma actuator. Applied Thermal Engineering. 2016 ;100:1334-41.

10- Cai J, Tian Y, Meng X, Han X, Zhang D, Hu H. An experimental study of icing control using DBD plasma actuator. Experiments in Fluids. 2017 (8):1-8.

11- Ozturk C, Jacob J. Plasma micro-thrusters for micro-aerial vehicles. SAE Technical Paper; 2008.

12- Debiasi M, Li JM. Experimental study of a DBD-Plasma driven channel flow. In49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 2011 (p. 954).

13- Riherd M, Roy S. Measurements and simulations of a channel flow powered by plasma actuators. Journal of applied physics. 2012 ;112(5):053303.

14- Campbell NS, Roy S. Plasma channel flows: Electro-fluid dynamic jets. Applied Physics Letters. 2014 ;105(13):132906.

15- Soni J. Characterization of plasma actuator based microthruster concepts for high altitude aircrafts and CubeSats. University of Florida; 2014.

16- Defoort E, Benard N, Moreau E. Ionic wind produced by an electro-aerodynamic pump based on corona and dielectric barrier discharges. Journal of Electrostatics. 2017 ;88:35-40.

17- Browning P, Shambaugh B, Dygert J. Experimental study of dielectric barrier discharge driven duct flow for propulsion applications in unmanned aerial systems. SAE Technical Paper; 2017.

18- Wojewodka MM, White C, Kontis K. Effect of permittivity and frequency on induced velocity in ac-DBD surface and channel plasma actuators. Sensors and Actuators A: Physical. 2020 ;303:111831.

19- Goebel DM, Katz I. Fundamentals of electric propulsion: ion and Hall thrusters. John Wiley & Sons; 2008.

20- Murdiya F, Hamzah A, Andrio D. The Effect of Permanent Magnet on Dielectric Barrier Discharge (DBD) and Ozone Production. InJournal of Physics: Conference Series 2020 (Vol. 1655, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.

21- El-Zein A, Talaat M, El-Aragi G, El-Amawy A. The Characteristics of Dielectric Barrier Discharge Plasma Under the Effect of Parallel Magnetic Field. IEEE Transactions on Plasma Science. 2020 ;48(4):1022-9.

22- Guo H, Xu Y, Wang Y, Ren C. Experimental study on the effects of airflow, magnetic field and combination of airflow with magnetic field on nanosecond pulsed dielectric barrier discharge in atmospheric air. Physics of Plasmas. 2020 ;27(2):023519.

23- https://www.kjmagnetics.com/calculator.asp

24- Durscher R, Roy S. Evaluation of thrust measurement techniques for dielectric barrier discharge actuators. Experiments in fluids. 2012;53(4):1165-76.

25- Wu L, Gao C, Yan X, Liu F, Luo S. PIV-Estimated DBD Plasma-Actuator Thrust Verified by Measurement in Quiescent Air. In54th AIAA Aerospace Sciences Meeting 2016 (p. 0198).
26- Hoskinson AR, Hershkowitz N, Ashpis DE. Force measurements of single and double barrier DBD plasma actuators in quiescent air. Journal of Physics D: Applied Physics. 2008 ;41(24):245209.
27- Zito J, Arnold D, Durscher R, Roy S. Investigation of impedance characteristics and power delivery for dielectric barrier discharge plasma actuators. In48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 2010 (p. 964).
28- Ashpis DE, Laun MC, Griebeler EL. Progress toward accurate measurement of dielectric barrier discharge plasma actuator power. AIAA Journal. 2017;55(7):2254-68.
29- Benard N, Moreau E. Role of the electric waveform supplying a dielectric barrier discharge plasma actuator. Applied Physics Letters. 2012 ;100(19):193503.
30- Kriegseis J, Möller B, Grundmann S, Tropea C. Capacitance and power consumption quantification of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators. Journal of Electrostatics. 2011 ;69(4):302-12.
31- Burton RL, Turchi PJ. Pulsed plasma thruster. Journal of Propulsion and Power. 1998;14(5):716-35.
32- Pottinger SJ, Krejci D, Scharlemann CA. Pulsed plasma thruster performance for miniaturised electrode configurations and low energy operation. Acta Astronautica. 2011 ;68(11-12):1996-2004.
33- Ahangar M, Ebrahimi R, Shams M. Numerical simulation of non-equilibrium plasma flow in a cylindrical MPD thruster using a high-order flux-difference splitting method. Acta Astronautica. 2014 ;103:129-41.
34- Ahangar M, Ebrahimi R, Shams M. Numerical investigation of plasma behavior and anode sheath in a magnetoplasmadynamic thruster. Journal of Propulsion and Power. 2016;32(2):420-30.
35- Liu Y, Yan H, Guo H, Fan Z, Wang Y, Wu Y, Ren C. Effect of parallel magnetic field on repetitively unipolar nanosecond pulsed dielectric barrier discharge under different pulse repetition frequencies. Physics of Plasmas. 2018 ;25(3):033519.
36- Yoon JS, Han JH. Semiempirical thrust model of dielectric barrier plasma actuator for flow control. Journal of Aerospace Engineering. 2015 ;28(1):04014041.
37- Pekárek S. Effect of magnetic field, airflow or combination of airflow with magnetic field on hollow needle-to-cylinder discharge regimes. Journal of Physics D: Applied Physics. 2013 ;46(50):505207.
38- Liu Y, Qi H, Fan Z, Yan H, Ren C. The impacts of magnetic field on repetitive nanosecond pulsed dielectric barrier discharge in air. Physics of Plasmas. 2016 ;23(11):113508.
39- Liu Y, Yan H, Guo H, Fan Z, Wang Y, Ren C. Experimental investigation on the repetitively nanosecond pulsed dielectric barrier discharge with the parallel magnetic field. Physics of Plasmas. 2018 ;25(2):023512.
40- Park JY, Kim GH, Kim JD, Koh HS, Lee DC. NOx removal using DC corona discharge with magnetic field. Combustion science and technology. 1998 ;133(1-3):65-77.
41- Kriegseis J, Duchmann A, Tropea C, Grundmann S. On the classification of dielectric barrier discharge plasma actuators: A comprehensive performance evaluation study. Journal of Applied Physics. 2013 ;114(5):053301.
42- Houser N. Manufacturing of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Degradation Resistance (Doctoral dissertation, University of Toronto).
43- Leyland P, Pimentel RG, Geuns R, Goekce S, Peschke P, Hollenstein C, De Champlain A. Understanding SDBD Actuators: An Experimental Study on Plasma Characteristics. In45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference 2014 (p. 2811).
44- Thomas FO, Corke TC, Iqbal M, Kozlov A, Schatzman D. Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control. AIAA journal. 2009;47(9):2169-78.
45- Kriegseis J. Performance characterization and quantification of dielectric barrier discharge plasma actuators.