

بررسی تجربی مشخصات عملکردی یک رانشگر پلاسمایی تخلیه مانع دی الکتریک برای کاربردهای پیشرانشی

مهدی آهانگر*

استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، تهران، ایران،
m.ahangar@dena.kntu.ac.ir

سروگل احمدیان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، تهران، ایران،
s.ahmadian@mail.sbu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، جریان کانال ناشی از پلاسمای تخلیه مانع دی الکتریک برای استفاده به عنوان رانشگر در کاربردهای پیشرانشی پیشنهاد شده و به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های مقادیر نیروی پیشران و توان مصرفی به ازای مقادیر مختلف ضخامت مانع دی الکتریک و طول الکترودها انجام شده است. داده‌های مربوط به پارامترهای مذکور که برای کمی‌سازی اثر ولتاژ اعمالی بر روی پارامتر کارایی رانشگر مورد استفاده قرار گرفته، نشان‌دهنده شکل قله‌ای برای منحنی‌های کارایی با مقدار بیشینه ۰/۱۹ میلی‌نیوتن بر وات در نقطه‌ی پیک منحنی می‌باشد. همچنین، یک تحلیل مبتنی بر قانون توانی برای استخراج روابط بین پارامتر کارایی، نیروی پیشران و توان مصرفی برحسب ولتاژ اعمالی رانشگر ارائه شده است. بر اساس این تحلیل مشخص شد که توان مصرفی رانشگر با ولتاژ اعمالی به توان ۴ متناسب بوده و نیروی پیشران نیز در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب تابعی از کمیت مذکور با مرتبه ۵/۸ و ۲/۲ می‌باشد. در نهایت نشان داده شد که پارامتر کارایی در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای تابعیت توان مصرفی از مرتبه ۰/۵ و ۰/۵- را دارد. **واژه‌های کلیدی:** رانشگر پلاسمایی، تخلیه مانع دی الکتریک، اندازه‌گیری‌های تجربی، قانون توانی، منحنی لیساجوس، روش خازن ناظر.

Experimental performance characterization of a dielectric barrier discharge plasma thruster for propulsion applications

M. Ahangar
S. Ahmadian

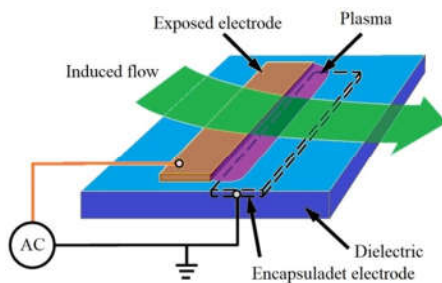
New Tech. & Aero. Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran
New Tech. & Aero. Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran

Abstract

In this research, the dielectric barrier discharge plasma driven channel flow has been proposed for use as a thruster in the propulsion's applications and has been experimentally studied. Measurements of the thrust and consumed power with different values of barrier thicknesses and electrodes' lengths have been performed. The data of the mentioned parameters have been taken in order to quantify the effects of operating voltage on the effectiveness parameter of thruster, showing a peak-shaped profile for the effectiveness with maximum value of 0.19 mN/W at the profile summit. Also, a power law analysis has been used to derive relationships for the effectiveness, thrust and consumed power in terms of the applied voltage. It has been found that the thruster's power is proportional to the voltage with exponent of 4, and the thrust is function of voltage with exponent of 5.8 and 2.2 for the glow and filamentary regimes, respectively. Finally, it has been shown that the effectiveness can be correlated to consumed power with exponent of 0.5 and -0.5 for the glow and filamentary regimes, respectively.

Keywords: Plasma thruster; Dielectric Barrier Discharge; Experimental Measurements, Power Law, Lissajous Curve, Monitor Capacitor Method.

در معرض به سمت پایین دست ایجاد می‌گردد.



شکل ۱- چیدمان محرک پلاسمایی با تخلیه مانع دی الکتریک

در دو دهه اخیر، عمده مطالعات صورت گرفته پیرامون کاربرد این

۱- مقدمه

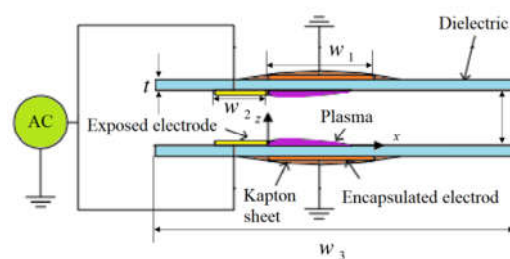
محرک تخلیه مانع دی الکتریک عموماً شامل دو الکترود است که در طرفین یک عایق الکتریکی نصب می‌شوند (شکل ۱). با اتصال الکترودهای در معرض و پوشیده به ترتیب به یک منبع تغذیه ولتاژ بالای جریان متناوب و زمین، پدیده تخلیه الکتریکی در هوای مجاور سطح الکترود در معرض رخ داده و مولکول‌های هوا به طور موضعی یونیز شده و جریان پلاسمای سرد به وجود می‌آید. نیروی الکتروهایدرودینامیکی کولمب که به واسطه حضور ذرات باردار موجود در پلاسمای تحت میدان الکتریکی قوی بین دو الکترود تولید شده، باعث شتاب گرفتن یون‌ها می‌شود. با انتقال مومنتوم از یون‌ها به مولکول‌های خنثی، یک جریان جت هوا موسوم به باد الکتریکی یا باد یونی با سرعتی از مرتبه ۰/۱ تا ۱۰ متر بر ثانیه در امتداد سطح الکترود

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_ahangar@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۰/۲۰

نوع محرک‌ها در حوزه مهندسی هوافضا، عمدتاً معطوف به استفاده از آن‌ها در زمینه مسائل آیرودینامیکی به ویژه در حیطه کنترل جریان، تاخیر در جدایش لایه مرزی و تعویق واماندگی جریان بوده است [1-5]. با این حال، در سالیان اخیر چند پژوهش محدود ایده به کارگیری از این نوع محرک‌ها را به عنوان میکرورانشرهای الکتریکی برای تولید نیروی پیشران به منظور استفاده در پرنده‌های هوایی بدون سرنشین کوچک و ریزپرنده‌ها مطرح و مطالعه کرده‌اند. اوزترک و همکارانش (۲۰۰۸) با نصب محرک پلاسمایی در یک کانال استوانه‌ای و تولید جت پیشران در داخل این استوانه، میکرورانشری جهت به کارگیری در میکروروبات‌های پرنده‌های بدون سرنشین طراحی کردند که سرعت و نیروی بیشینه جت خروجی از آن به ترتیب ۲ متر بر ثانیه و ۱/۲ میلی‌گرم گزارش شده است [6-7]. گریک و همکارانش (۲۰۱۳) با استفاده از چند حلقه محرک پلاسمایی، یک رانشگر دایروی ساختند که توانست تحت ولتاژ بیشینه ۱۲/۵ کیلوولت و فرکانس ۷ کیلوهرتز، ۱۰ میلی-نیوتن نیرو تولید نماید. نتایج بیانگر وجود یک رابطه خطی بین ولتاژ اعمالی و نیروی اندازه‌گیری شده است [8]. ساده‌ترین چیدمان هندسی برای شناخت‌گیری جریان داخلی که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است، نصب محرک‌های پلاسمایی بر روی دیواره‌های داخلی یک کانال صفحه‌ای مشابه شکل ۲ است. در این چیدمان، 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 مومنوم، باعث حرکت محوری و شناخت‌گیری جریان هوا به سمت خروجی کانال می‌شوند. با توجه به این که محرک‌های پلاسمایی از نوع عملگرهای با شار جرمی خالص صفر هستند، بواسطه لزوم حفظ قانون بقای جرم، خروج جریان از کانال منجر به مکش هوا از ورودی کانال می‌شود. بنابراین، میکرورانشرهای پلاسمایی اتمسفری از نوع هوائنفسی می‌باشند.



شکل ۲- هندسه‌ی رانشگر پلاسمایی متشکل از دو محرک نصب شده بر دیواره‌های کانال

دبیایی و مینگ (۲۰۱۱)، اولین بار پروفیل سرعت در داخل یک کانال با ارتفاع متغیر از ۲ تا ۳۰ میلی‌متر را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان می‌دهد، سرعت بیشینه با کاهش ارتفاع افزایش یافته و مقدارش برای ارتفاع ۲ میلی‌متر به ازای ولتاژ اعمالی ۱۲ کیلوولت در فواصل مختلف از لبه الکتروود در معرض، در پایین‌دست کانال به ۳ تا ۴ متر بر ثانیه می‌رسد. اگرچه با افزایش ارتفاع، سرعت هسته جریان کاهش می‌یابد اما در مقابل به دلیل افزایش سطح مقطع کانال، دبی ورودی زیاد شده و نیروی القایی (حاصل از ضرب دبی جرمی در سرعت خروجی) با افزایش ارتفاع، ابتدا زیاد و سپس کاهش می‌یابد. این به

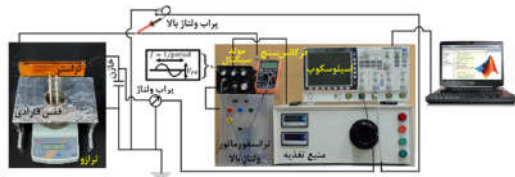
معنای آن است که در یک ارتفاع بهینه، نیروی پیشران مقدار بیشینه خود را اختیار می‌کند [9]. در پژوهشی مشابه، ریهرد و روی (۲۰۱۲) اثر افزایش تعداد محرک‌های پلاسمایی درون یک کانال را به طور تجربی و عددی مطالعه کردند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ و تعداد محرک‌ها، مقادیر سرعت بیشینه و جریان جرمی بر واحد عرض کانال افزایش می‌یابند و سرعت جریان در خروجی کانال، ۱ تا ۳ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین داده‌های تجربی بیانگر این است که بازده کانال که به صورت نسبت توان هیدرودینامیکی به توان الکتریکی ورودی تعریف گردید، کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد [10]. کانال مذکور در پژوهش تجربی [9]، در تحقیقی جداگانه توسط ابراهیم و اسکوت (۲۰۱۴) به صورت عددی شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی از نرم‌افزار Comsol برای حل معادلات حاکم بر سیال و از مدل اصلاح شده سوزن-هانگ برای حل معادلات چگالی ذرات باردار و پتانسیل الکتریکی حاکم بر ناحیه پلازما استفاده شد [11]. اگرچه این شبیه‌سازی عددی توانست مقادیر سرعت را برای کانال‌های با ارتفاع زیاد به طور قابل قبولی پیش‌بینی کند، اما مقادیر به دست آمده برای کانال‌های با ارتفاع کم از مقادیر تجربی مرجع [9] کمتر بود. به منظور افزایش بازده کانال، کمپبل و روی (۲۰۱۴) طرح جدیدی از چیدمان محرک پلاسمایی در کانال را ارائه کردند. در این چیدمان، برخلاف محرک‌های پلاسمایی به کار گرفته شده در پژوهش‌های قبلی، الکتروودهای در معرض نصب شده در دیواره‌های داخلی بالا و پایین کانال حذف شده و یک سیم متصل به منبع تغذیه ولتاژ بالا در خط تقارن کانال نصب گردید. با این چیدمان جدید برای الکتروود ولتاژ بالا، جت‌های سطحی پلازما از روی دیواره حذف شده و یک جت حجمی از سمت سیم ولتاژ بالا به سمت پایین دست کانال تشکیل و در امتداد طول کانال منبسط می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که سرعت بیشینه جت به ۵ تا ۷ متر بر ثانیه رسیده و بازده رانشگر به طور قابل تاملی تا ۰/۷ درصد افزایش یافته است [12]. سونی (۲۰۱۴) برای اولین بار قابلیت به کارگیری محرک‌های پلاسمایی را در نقش میکرورانشرها برای ارتفاع‌های پروازی بالاتر بررسی کرد. برای این منظور عملکرد محرک پلاسمایی در شرایط فشاری مختلف از رژیم اتمسفری تا استراتوسفری مورد مطالعه قرار گرفت. 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. به طور مثال، برای دی‌الکتریک تفلون با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، مقدار نیرو در فشار ۰/۲۶ اتمسفر بیشینه شده و مقدار آن به بیش از ۵۰ میلی‌گرم می‌رسد که تقریباً ۸ برابر بیشتر از مقدار نیرو القایی در فشار اتمسفری است [13]. دیفورت و همکارانش (۲۰۱۷) چیدمان‌های متفاوتی از محرک پلاسمایی کلاسیک و محرک پیشنهاد شده در مرجع [۷] را به صورت جزئی‌تری در یک کانال مطالعه کردند [14]. مشابه با نتایج به دست آمده توسط کمپبل و روی، در پژوهش اخیر نیز سرعت بیشینه جریان در حالت استفاده از سیم مرکزی در مقایسه با محرک کلاسیک، بیشتر بوده و مقدار آن به ۳/۵ متر بر ثانیه می‌رسد. همچنین بازده رانشگر تا حدود ۰/۱۵ درصد افزایش یافته که در مقایسه با نسبت ازدیاد بازده ذکر شده در مرجع [12]، مقدار قابل توجهی نمی‌باشد. برونینگ و همکارانش (۲۰۱۷) در طرحی جدید برای سامانه پیشران میکروروبات‌های پرنده‌های بدون

صورت گرفته برای توسعه ایده رانشگر پلاسمایی مانع تخلیه دی-الکتريک [6-7، 13، 15]، نتایج و تحلیل‌های ارائه شده در پژوهش حاضر نیز می‌تواند راه‌گشای استفاده از این نوع رانشگرها به عنوان سامانه‌های پیش‌رانشی نوین در میکرو/نانو پرند‌های بدون سرنشین باشد و توسط سایر محققین و صنایع داخلی مربوطه در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۲- جزئیات آزمایشگاهی

۲-۱- تولید پلاسما و اندازه‌گیری پارامترهای ورودی

در این پژوهش، یک دستگاه تغذیه جریان متناوب ولتاژ بالا با شکل موج سینوسی و بیشینه ولتاژ قله تا قله 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 (۳) ترانسفورماتور ولتاژ بالا برای تنظیم ولتاژ اعمالی موردنیاز. این منبع تغذیه به گونه‌ای طراحی شده است که همه‌ی تنظیمات سیگنال الکتریکی خروجی، شامل بزرگی دامنه ولتاژ اعمالی، فرکانس حامل و سیکل کاری، به طور مستقل از هم و بدون هیچ اثری بر روی یکدیگر، قابل تغییر و تنظیم هستند. در طول انجام آزمون‌ها، برای اندازه‌گیری دامنه ولتاژ اعمالی، کابل هادی سیگنال ولتاژ بالای خروجی از منبع تغذیه در نقطه اتصال به ورودی الکترودهای در معرض رانشگر، از طریق یک پراب ولتاژ بالا (۴۰ Lutron HV) با نسبت ۱:۱۰۰۰ به یک دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال چهارکاناله (GW Instek GDS-۳۵۰۴) متصل شده است. همچنین، برای اندازه‌گیری فرکانس حامل، یک مولتی‌متر دیجیتالی (Victor VC ۹۷) به صورت فرکانس‌سنج تنظیم و به خروجی مدار مولد سیگنال وصل شده است (شکل ۳).



شکل ۳- تجهیزات تولید پلاسما و اندازه‌گیری مشخصه‌های الکتریکی

۲-۲- مشخصات رانشگر

پارامترهای هندسی رانشگر در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. به منظور بررسی اثرات طول الکتروود و ضخامت مانع دی‌الکتريک بر روی پارامترهای عملکردی، با در نظر گرفتن سه طول الکتروود (L) متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر هر کدام با سه ضخامت (t) جداگانه ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر برای مانع دی‌الکتريک از جنس پلکسی‌گلس، در مجموع ۹ مدل رانشگر جداگانه ساخته شد. در همه مدل‌ها، عرض الکترودهای پوشیده (w₁) و در معرض (w₂) 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 (w₃) و فرکانس حامل در کلیه مدل‌ها و آزمون‌ها ثابت و به ترتیب برابر با ۶ میلی‌متر،

سرنشین در ورودی کانال، یک نازل واگرا با زوایای متغیر از صفر تا ۶۰ درجه نصب کردند. در این هندسه، 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. در این پژوهش علاوه بر بررسی اثر زاویه نازل واگرا، اثر شکل موج جریان متناوب ولتاژ بالا نیز مورد مطالعه قرار گرفت [15]. نتایج به دست آمده گویای این نکته است که فراخور مقدار ولتاژ اعمالی و شکل موج جریان متناوب، نیروی القایی می‌تواند در زوایای مختلف بیشینه شود. به طور مثال برای موج سینوسی، مقدار نیرو برای ولتاژهای ۴/۶، ۶/۸ و ۸/۴ کیلوولت به ترتیب در زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. آدامیاک (۲۰۲۰) با به کارگیری یک مدل یونیزاسیون دوجزئی در نرم‌افزارهای Comsol و Fluent، توانست جریان الکتروهیدرودینامیکی حاصل از محرک پلاسمایی را در یک کانال استوانه‌ای شبیه‌سازی کند. نتایج مدلسازی عددی نشان می‌دهند که دبی حجمی هوای ورودی، جریان تخلیه الکتریکی و توان الکتریکی ورودی به ترتیب تابعی از توان اول، دوم و سوم ولتاژ اعمالی هستند. همچنین، سرعت بیشینه جریان به ۴ متر بر ثانیه رسیده و مقدار بازده در ولتاژ اعمالی ۱۵ کیلوولت، ۰/۱۲ درصد می‌باشد [16]. در پژوهش عددی دیگر، لیلی و همکارانش (۲۰۲۰) کانال مطالعه شده در مرجع [12] را شبیه‌سازی کردند. اگرچه پروفیل‌های سرعت به دست آمده در ورودی و خروجی کانال با نتایج تجربی قرابت دارند، اما در مجاورت سیم ولتاژ بالا نتایج عددی و تجربی تطابق خوبی را نشان نمی‌دهند [17]. وجودکا و همکارانش (۲۰۲۰) اثر پارامترهای فرکانس جریان الکتریکی، ضخامت و ثابت دی‌الکتريک عایق را بر روی عملکرد کانال بررسی کردند. مشاهده شد که به ازای کمترین ارتفاع کانال و عایقی با ثابت دی‌الکتريک بیشتر، در فرکانس ۱۲ کیلوهرتز سرعت جریان در داخل کانال به مقدار بیشینه ۴/۶ متر بر ثانیه می‌رسد. همچنین، ملاحظه شد که تغییر ارتفاع کانال، در بازه فرکانس ۱۴ تا ۲۴ کیلوهرتز تأثیری بر روی سرعت القایی ندارد [18].

بررسی‌ها نشان می‌دهند که در زمینه کاربرد محرک‌های تخلیه مانع دی‌الکتريک برای استفاده به عنوان رانشگر پلاسمایی در حوزه کاربردهای پیش‌رانشی تاکنون مطالعه‌ای در داخل کشور انجام نشده است. عمده پژوهش‌های صورت گرفته محدود به حوزه کاربردهای آبرودینامیکی محرک‌های پلاسمایی برای کنترل جریان در صفحه تخت یا انواع مختلف ایرفویل‌ها بوده است. همچنین مطالعات تجربی انگشت‌شمار در سطح جهانی که پیشتر مرور شد با کاستی‌هایی مواجه‌اند که لزوم مطالعه و پژوهش بیشتر در این حوزه را تایید می‌نماید. مهمترین محدودیت‌های پژوهش‌های یاد شده را می‌توان بدین شکل برشمرد: (۱) عدم اندازه‌گیری و ارائه داده‌های جامع برای کمیات نیروی الکتروهیدرودینامیکی و کارایی در ولتاژهای بالاتر از نقطه اشباع و به خصوص در رژیم رگ‌های، (۲) عدم بررسی دقیق اثر پارامترهای هندسی طول الکتروود و ضخامت مانع دی‌الکتريک بر روی پارامترهای عملکردی رانشگر، (۳) عدم اندازه‌گیری دقیق توان مصرفی الکتریکی رانشگر (۴) عدم ارائه تحلیل قوی و ارتباط بین پارامترهای الکتریکی و رژیم‌های مختلف جریان پلاسما. ازینرو، پژوهش حاضر در نظر دارد تا با رفع نقاط ضعف ذکر شده، پارامترهای هندسی و عملکردی اصلی رانشگر را به طور جامع مورد بررسی قرار دهد. در امتداد فعالیت‌های

۵۰ میلی‌متر و ۱۲ کیلوهرتز فرض شده‌اند. مقدار ولتاژ قله تا قله 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، الکتروود یا مانع دی‌الکتریک آسیب می‌بیند)، با گام ۱ کیلوولت تغییر داده شده است.

۲-۳- اندازه‌گیری نیرو و توان مصرفی رانشگر

به طور کلی، نیروی الکتروهیدرودینامیکی حاصل از باد یونی تولید شده توسط محرک‌های پلاسمایی با دو روش غیرمستقیم [19-20] و مستقیم [21] قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در این پژوهش، از یک ترازوی دیجیتالی (CH 2003 WT, WANT Co., Ltd.) با دقت ۰/۰۰۱ گرم برای اندازه‌گیری مستقیم نیروی تولید شده توسط رانشگر استفاده شده است. برای جلوگیری از اثرگذاری میدان‌های الکترواستاتیکی القایی پیرامون رانشگر و کابل ولتاژبالای متصل به آن بر مدارات الکترونیکی ترازو و به تبع آن ایجاد نویز و خطا 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 رانشگر و ترازو و همچنین جلوگیری از تجمع بار الکتریکی بر روی ترازو، رانشگر 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).

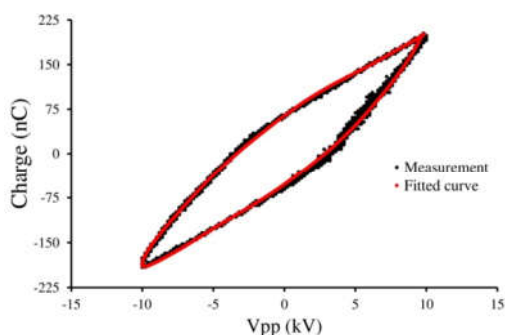
توان الکتریکی مصرفی محرک پلاسمایی را می‌توان با دو روش جداگانه مبتنی بر اندازه‌گیری جریان الکتریکی و بار الکتریکی محاسبه کرد. در روش اول، جریان الکتریکی لحظه‌ای خروجی از محرک یا با استفاده از سیم‌پیچ القایی روگوفسکی و یا با قرار دادن یک مقاومت الکتریکی به صورت سری بین الکتروود پوشیده و زمین، اندازه‌گیری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

در مجموع، محاسبه توان بر اساس انتگرال‌گیری از حاصلضرب مقادیر لحظه‌ای جریان و ولتاژ، به دلیل شکل سیگنال‌های تسخیر شده و بستگی آن به شرایط داده برداری می‌تواند با مشکلاتی همراه شود [22]. بررسی‌های مرجع [23] نشان می‌دهد، روش موسوم به خازن ناظر دارای مزیت و دقت بهتری است. در این روش مطابق شکل ۳، یک خازن در مسیر بین الکتروود 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 چرخه T از رابطه زیر قابل محاسبه است [23].

$$\bar{P}_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a dQ_m \quad (1)$$

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 لیسازو می‌باشد (شکل ۴). معادله (۱) بیانگر این است که سطح داخلی منحنی لیسازو برابر با مقدار توان الکتریکی مصرفی رانشگر است. در پژوهش حاضر، یک کد محاسباتی در نرم‌افزار MATLAB

توسعه داده شده تا بتواند با دریافت مقادیر اندازه‌گیری شده $V_m(t)$ و $V_a(t)$ که از اسیلوسکوپ به طور برخط به کامپیوتر انتقال می‌یابند، سطح داخلی منحنی لیسازو 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 خازن رانشگر بیشتر باشد. برای این منظور، مشابه پژوهش [24] از یک خازن 630 MKP با ظرفیت ۴۷ نانوفاراد استفاده شده است.



شکل ۴- منحنی لیسازو برای رانشگر با ولتاژ قله تا قله ۲۰ کیلوولت، $t = 4 \text{ mm}$ و $L = 150 \text{ mm}$

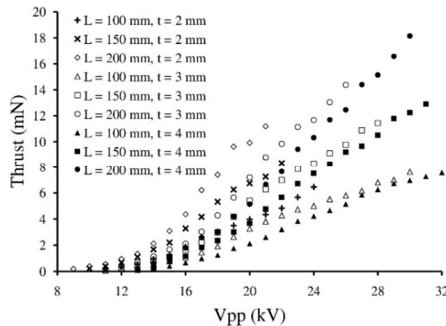
مزیت اندازه‌گیری با روش بار الکتریکی نسبت به روش جریان الکتریکی در این است که به دلیل این که روش خازن ناظر از کل جریان الکتریکی عبوری از محرک در زمان انتگرال‌گیری می‌کند، قادر است اثرات سیگنال‌های متناظر با همه میکروکانال‌های تخلیه را تسخیر کند [25]. لذا در این پژوهش، از روش مذکور برای محاسبه توان الکتریکی مصرفی استفاده شده است.

۳- بررسی و تشریح نتایج تجربی

۳-۱- مرئی‌سازی جریان

در شکل ۵، تصاویر مرئی‌سازی جریان در داخل رانشگر در ۶ فریم متوالی با فواصل زمانی ۱۷۰ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. برای این منظور یک چشمه دود به نحوی در فاصله تقریباً ۲ سانتی‌متری از دهانه ورودی به کار گرفته شده که جریانی با سرعت کمتر از ۰/۱ در ورودی رانشگر ایجاد نماید تا مومنتوم جریان دود در دهانه ناچیز باشد. همچنین جهت آشکارسازی دود در داخل رانشگر از یک لیزر دیودی سبز رنگ ۲۰۰ میلی‌وات و برای عکس‌برداری از دوربین دیجیتالی کیفیت بالای Nikon D610 DSLR Camera استفاده شده است. تصاویر، فرآیند توسعه گذرای جریان در داخل رانشگر از ناحیه مکش در ورودی تا تشکیل جت پایا در ناحیه بعد از الکتروودها به سمت خروجی رانشگر را به خوبی نشان می‌دهند. نواحی آبی-بنفش رنگ در تصاویر، محل تولید پلاسما در مجاورت الکتروودهاست که با انتقال مومنتوم از آن‌ها به جریان داخل کانال، حرکت محوری جریان دود در امتداد عرض کانال ایجاد شده و جریان در قالب یک جت قوی که تقریباً کل کانال را پر می‌کند به سمت دهانه خروجی شتاب می‌گیرد.

شده و نیروی کولمب وارده بر ذرات پلاسما افزایش پیدا می کند. سوم، ملاحظه می شود به طور کلی در هر طول الکتروود و ضخامت مانع دی-الکتریک دلخواه، افزایش ولتاژ اعمالی منجر به زیاد شدن مقدار نیروی پیشران می شود. به طور کلی، با توجه به این که افزایش ضخامت مانع دی-الکتریک امکان افزایش ولتاژ اعمالی (بدون وقوع قوس الکتریکی و آسیب دیدن احتمالی رانشگر) را فراهم می کند، لذا بیشترین مقدار نیرو در رانشگر با هندسه $L=200\text{mm}$ و $t=4\text{mm}$ به دست آمده که بیشینه آن حدوداً برابر با $18/15$ میلی نیوتن در ولتاژ قله تا قله 30 کیلوولت می باشد.



شکل ۶- نیروی پیشران تولیدی رانشگر برحسب ولتاژ اعمالی برای هندسه های مختلف

برخی از پژوهش های صورت گرفته بر روی محرک پلاسمایی صفحه تخت بیانگر این هستند که نیروی پیشران در قالب قانون توانی، تابعی از ولتاژ اعمالی است ($F_t \propto V_a^m$). به طور مثال، هان و یون [26] نشان دادند که نیروی پیشران تابعیت مرتبه دو ولتاژ اعمالی را دارد.

$$F_t = K_t V_a^2 \quad (2)$$

در رابطه ی بالا، ضریب K_t در یک فرکانس مشخص و برای یک ثابت دی-الکتریکی معین، تنها وابسته به مشخصات هندسی محرک می باشد. به منظور حصول یک رابطه ی تجربی برای نیروی پیشران رانشگر باید ضریب K_t و توان m تعیین شوند. در این پژوهش با تجزیه و تحلیل فراوانی که بر روی داده های ارائه شده در شکل 6 انجام شد، ضریب هندسی K_t که تنها بیانگر سهم اثرات پارامترهای هندسی بر نیروی پیشران است به صورت زیر به دست آمده است:

$$K_t = \left[t^{C_1 - C_2} (C_3 - t) \frac{\ln\left(1 + \frac{t}{L}\right)}{L} (1 + \frac{t}{L})^{1/L} (1 + C_4(C_5 - L)) \right]^{-1} \quad (3)$$

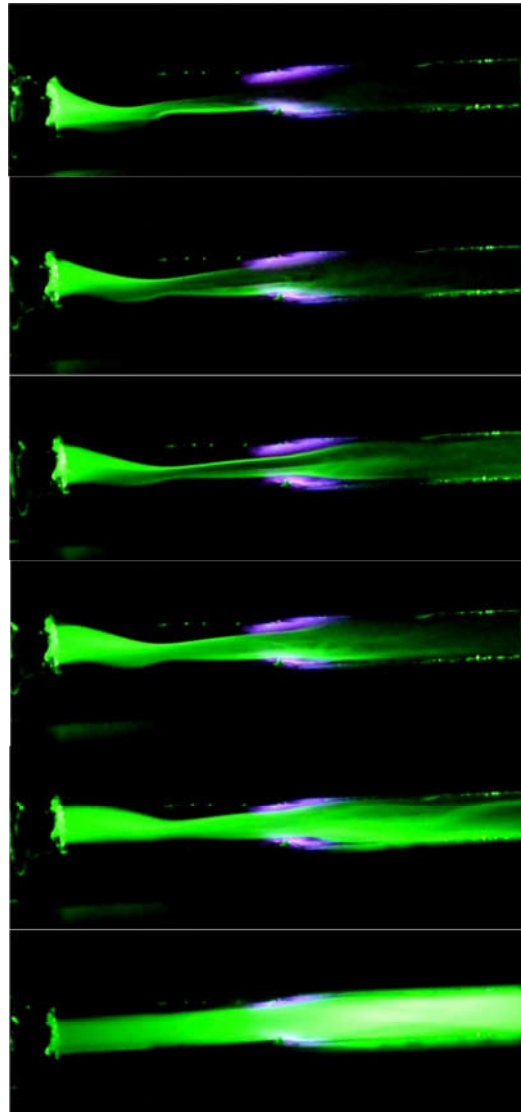
بر این اساس، نیروی پیشران از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$F_t = K_t F(V) \quad (4)$$

که در آن $F(V)$ نیروی پیشران مقیاس بوده و بیانگر سهمی از نیروی پیشران می باشد که صرفاً تابع ولتاژ اعمالی است.

$$F(V) = \frac{F_t}{K_t} = \alpha V_a^m \quad (5)$$

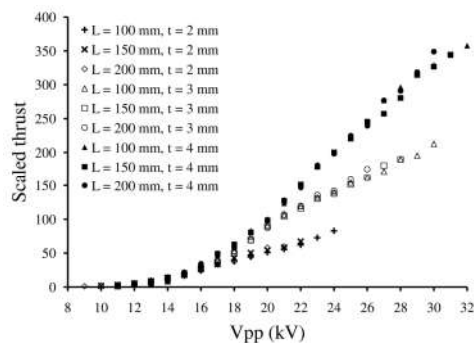
با توجه به در دسترس بودن مقادیر اندازه گیری شده نیروی پیشران در شکل 6 و قابل محاسبه بودن ضریب K_t از رابطه ی 3، نیروی پیشران مقیاس محاسبه گردیده و نتایج آن در شکل 7 ارائه شده است.



شکل ۵- آشکارسازی جریان در داخل رانشگر با ولتاژ قله تا قله 30 کیلوولت، $L=150\text{mm}$ و $t=4\text{mm}$

۲-۳- نیروی پیشران

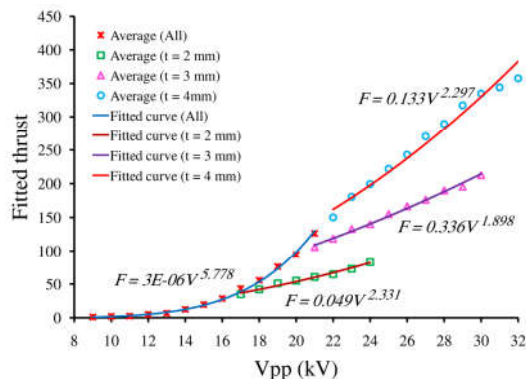
در شکل 6، نیروی اندازه گیری شده برحسب ولتاژ قله تا قله اعمالی بر رانشگر برای حالت های مختلف طول الکتروودها و ضخامت دی-الکتریک ها نمایش داده شده است. بررسی داده ها، بیانگر نتایج قابل توجهی است. نخست مشاهده می شود که در یک ضخامت و ولتاژ معین، افزایش طول الکتروود از زیاد نیروی پیشران را در پی دارد. افزایش طول الکتروود به معنای افزایش طول دهانه رانشگر است. از اینرو، در رانشگرهای با دهانه بزرگتر، حجم پلاسمای تولیدی افزایش یافته و به تبع آن مومنتوم القایی انتقال یافته از ذرات باردار به مولکول های هوا زیاد شده و در خروجی رانشگر نیروی پیشران بیشتری تولید می شود. دوم این که با کاهش ضخامت مانع دی-الکتریک در یک ولتاژ و طول الکتروود معین، نیروی پیشران افزایش می یابد. در حقیقت با کاهش ضخامت مانع دی-الکتریک، شدت میدان الکتریکی بین دو الکتروود زیاد



شکل ۷- نیروی پیشران مقیاس برحسب ولتاژ اعمالی برای هندسه‌های مختلف

همانطور که ملاحظه می‌شود، در ولتاژهای پایین‌تر از ۲۲ کیلوولت، به ازای مقادیر مختلف طول الکترود، منحنی‌های نیروی پیشران مقیاس تقریباً منطبق بر یکدیگرند. این در حالی است که با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی، رفتار منحنی‌ها در ولتاژهای ۱۷، ۲۰، ۲۳ کیلوولت به ترتیب برای ضخامت‌های دی‌الکتریک ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر تغییر می‌کند. علت وقوع این رفتار، پدیده‌ی انتقال پلاسما از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای است. در رژیم برافروختگی، جریان پلاسما نسبتاً همگن بوده و دارای پخش شدگی است. با ورود به رژیم رگه‌ای، مشاهده شده که به دلیل رشد و تجمع میکروکانال‌های تخلیه، تعداد زیادی از رشته‌های قوی و درخشان در جریان پلاسما ایجاد می‌شود که بخش قابل توجهی از توان الکتریکی ورودی را به صورت اتلافات حرارتی مستهلک می‌کنند و ازینرو افزایش ولتاژ تاثیر قابل توجهی در افزایش نیروی پیشران نخواهد داشت [۲۷]. با توجه به شکل ۷ ملاحظه می‌شود که ولتاژ نقطه‌ی انتقال با افزایش طول الکترود تغییر نمی‌کند، اما با افزایش ضخامت مانع دی‌الکتریک، مقدار آن افزایش می‌یابد و این به معنای این است که افزایش ضخامت، انتقال به رژیم رگه‌ای را به تاخیر می‌اندازد.

به منظور استخراج تابع $F(V)$ و به تبع آن توان m ، مقادیر نیروی پیشران مقیاس ارائه شده در شکل ۷، در هر ولتاژ معین به ازای طول الکترود و ضخامت دی‌الکتریک مختلف، متوسط‌گیری شده و چهار منحنی بر این داده‌ها برازش شده که نتایج آن در شکل ۸ قابل مشاهده است.

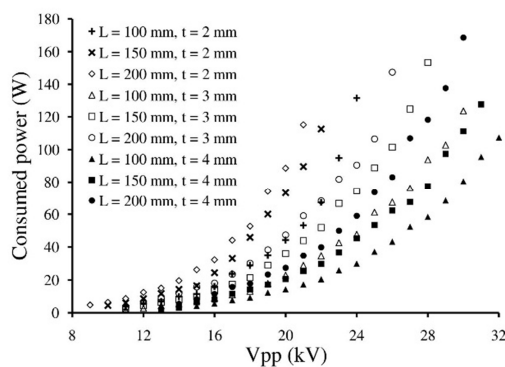


شکل ۸- منحنی‌های برازش شده بر روی مقادیر میانگین نیروی پیشران مقیاس برحسب ولتاژ اعمالی

با توجه به منحنی آبی رنگ که از برازش داده‌های مربوط به طول الکترود و ضخامت دی‌الکتریک مختلف در رژیم برافروختگی به دست آمده است، مقدار توان m برابر با $۵/۷۷۸$ می‌باشد. این در حالی است که با توجه به منحنی‌های قهوه‌ای، بنفش و قرمز رنگ که به ترتیب مربوط به ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر در رژیم رگه‌ای می‌باشند، مقدار توان m به ترتیب برابر با $۲/۳۳۱$ ، $۱/۸۹۸$ و $۲/۲۹۷$ است که میانگین آن‌ها $۲/۱۷۵$ می‌باشد. بنابراین، ملاحظه می‌شود که نیروی پیشران رانشگر در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب تابعیتی تقریبی به صورت $F_t \propto V_a^{2.2}$ و $F_t \propto V_a^{5.8}$ دارد.

۳-۳- توان مصرفی

نمودار توان الکتریکی مصرفی رانشگر برحسب ولتاژ اعمالی، در شکل ۹ قابل مشاهده است. نتایج حاکی ازین است که به طور کلی با زیاد شدن ولتاژ اعمالی، توان الکتریکی مصرفی رانشگر افزایش می‌یابد. بخشی ازین افزایش توان همانطور که در شکل ۶ ملاحظه شد باعث ازدیاد نیروی پیشران می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت مانع دی‌الکتریک، در یک طول الکترود و ولتاژ اعمالی معین، توان الکتریکی مصرفی کاهش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش طول الکترود در یک ضخامت دی‌الکتریک مشخص و ولتاژ دلخواه، توان افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج، بیشترین توان مصرفی متناظر با نیروی پیشران بیشینه ($۱۸/۱۵$ میلی‌نیوتن) است که مقدار آن برابر با $۱۶۸/۶$ وات می‌باشد.



شکل ۹- توان الکتریکی مصرفی رانشگر برحسب ولتاژ اعمالی برای هندسه‌های مختلف

مشابه آنچه که برای نیروی پیشران ذکر شد، توان مصرفی نیز تابعی از ولتاژ اعمالی می‌باشد ($\bar{P}_a \propto V_a^n$). مطالعات تجربی صورت گرفته تاکنون نشان می‌دهند که مقدار توان n برای محرک صفحه تخت در بازه ۲ تا ۴ می‌باشد [۲۸]. جهت به دست آوردن مقدار n برای رانشگر مورد مطالعه در این پژوهش، مشابه رابطه‌ی ۴، تابعیت توان مصرفی برحسب ولتاژ اعمالی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

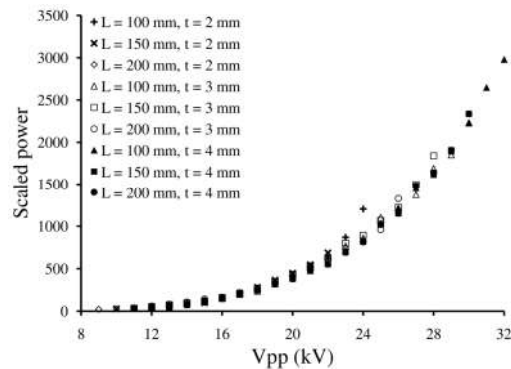
$$\bar{P}_a = K_p P(V) \quad (۶)$$

که در آن $P(V)$ توان مصرفی مقیاس است که صرفاً تابع ولتاژ اعمالی می‌باشد. K_p ضریب هندسی توان است که بر اساس بررسی‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش به صورت زیر پیشنهاد می‌-

گردد:

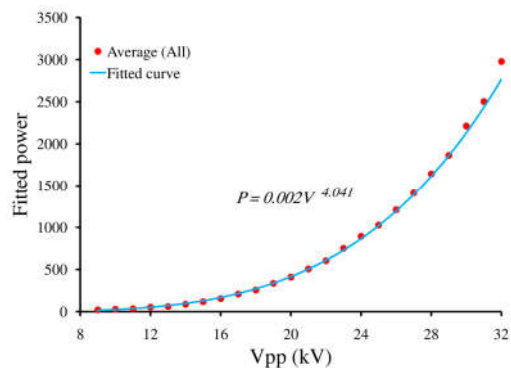
$$K_p = \left[t^{C_1 - C_2} (C_3 + t) \frac{\ln t}{L} \right]^{-1} \quad (7)$$

با توجه به در دسترس بودن مقادیر اندازه‌گیری شده توان مصرفی در شکل ۹ و با استفاده از روابط ۶ و ۷، توان مصرفی مقیاس محاسبه گردیده و نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود برخلاف رفتار داده‌های مربوط به نیروی پیشران مقیاس در شکل ۵، هیچ گونه شکستگی (ناشی از پدیده‌ی انتقال از رژیم برافروختگی به رگه‌ای) در شیب داده‌های توان مصرفی مقیاس دیده نمی‌شود و به ازای مقادیر مختلف طول الکتروود و ضخامت دی‌الکترونیک، داده‌ها تقریباً بر یکدیگر منطبق‌اند و به طور پیوسته با زیاد شدن ولتاژ افزایش می‌یابند.



شکل ۱۰-توان مصرفی مقیاس برحسب ولتاژ اعمالی برای هندسه‌های مختلف

برای استخراج تابع $P(V)$ و به تبع آن توان n ، مقادیر توان مصرفی مقیاس ارائه شده در شکل ۱۰، در هر ولتاژ معین به ازای طول الکتروود و ضخامت دی‌الکترونیک مختلف، متوسط‌گیری شده و یک منحنی بر این داده‌ها برازش شده که نتایج آن در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱-منحنی برازش شده بر روی مقادیر میانگین توان مصرفی مقیاس بر حسب ولتاژ اعمالی

با توجه به منحنی آبی رنگ 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 $4/0.41$ می‌باشد. بنابراین، صرفنظر از نوع

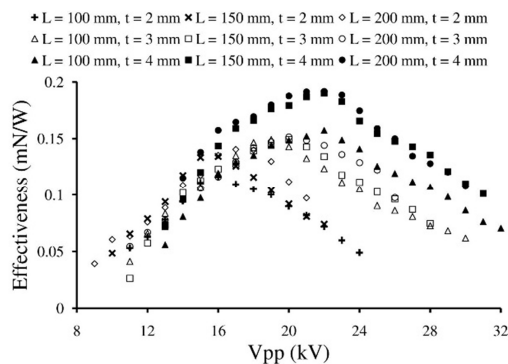
رژیم پلاسما، توان مصرفی رانشگر تابعیتی تقریبی به صورت $\bar{P}_a \propto V_a^4$ دارد.

۴-۳- پارامتر کارآیی

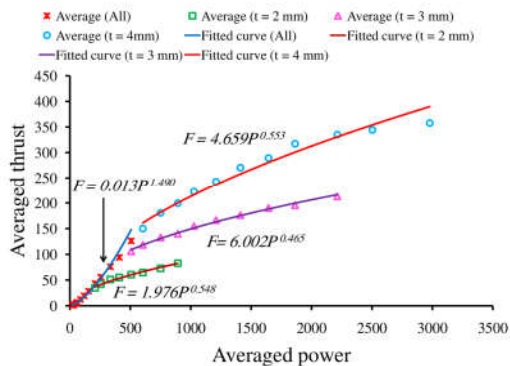
یکی از پارامترهای مهم در تحلیل عملکرد رانشگرهای پلاسمایی، کارآیی می‌باشد که براساس نسبت نیروی پیشران (F_p) به توان مصرفی رانشگر تعریف می‌شود [۲۹].

$$\eta_{\text{eff}}^* = \frac{F_p}{P_a} \quad (8)$$

در شکل ۱۲ منحنی‌های کارآیی برحسب ولتاژ اعمالی برای شرایط هندسی مختلف ترسیم 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 از آن کاهش می‌یابند. این رفتار در پژوهش‌های مشابه برای محرک صفحه تخت نیز دیده شده است [۲۹ و ۳۰]. نقطه بیشینه منحنی‌ها معمولاً نقطه حالت اشباع نامیده می‌شود [۲۷]. 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 ۱۳ دیده می‌شود، در رژیم برافروختگی، جریان پلاسما دارای پخش شدگی است. با ورود به رژیم رگه‌ای، مطابق شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که به دلیل رشد و تجمع میکروکانال‌های تخلیه، تعداد زیادی از رشته‌های قوی و درخشان در جریان پلاسما ایجاد می‌شود که بخش قابل توجهی از توان الکتریکی ورودی را به صورت اتلافات حرارتی مستهلک می‌کنند و ازینرو افزایش ولتاژ تاثیر قابل توجهی در افزایش نیروی پیشران نخواهد داشت. ملاحظه می‌شود که ولتاژ نقطه اشباع با افزایش طول الکتروود تغییر نمی‌کند، اما با افزایش ضخامت مانع دی‌الکترونیک، مقدار آن افزایش می‌یابد و این به معنای این است که افزایش ضخامت، گذار به رژیم رگه‌ای را به تاخیر می‌اندازد. داده‌ها نشان می‌دهند که به ازای ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر، مقدار ولتاژ اشباع حدوداً ۱۶، ۲۰ و ۲۲ کیلوولت می‌باشد. به طور کلی، با افزایش طول الکتروود و ضخامت مانع دی‌الکترونیک، مقدار پارامتر کارآیی در رژیم رگه‌ای افزایش می‌یابد. بیشینه پارامتر کارآیی متعلق به رانشگر با هندسه $L=200\text{ mm}$ و $t=4\text{ mm}$ است که برابر با $0/191$ میلی‌نیوتن بر وات می‌باشد.

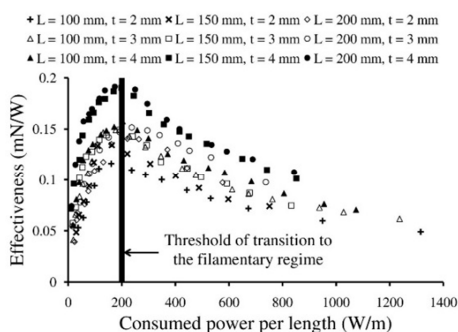


شکل ۱۲- پارامتر کارآیی رانشگر برحسب ولتاژ اعمالی برای هندسه‌های مختلف



شکل ۱۵- منحنی برازش شده بر روی مقادیر متوسط گیری شدهی نیروی پیشران مقیاس بر حسب توان مصرفی مقیاس

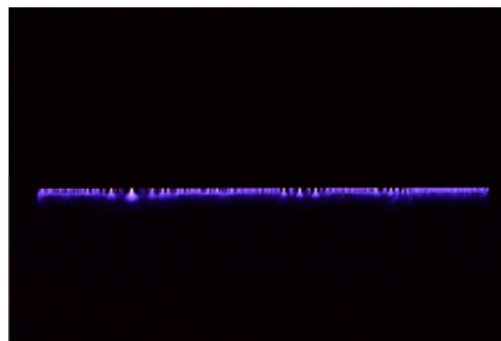
در شکل ۱۶، توزیع پارامتر کارایی بر حسب توان مصرفی نسبی (توان مصرفی بر واحد طول الکتروود) نشان داده شده است. مشابه شکل ۱۲، منحنی‌ها رفتار قله‌ای شکل دارند. بررسی داده‌ها حاکی از این است که بیشترین مقدار پارامتر کارایی که متناظر با نقطه اشباع است تقریباً در توان نسبی $\bar{P}_a/L \approx 200 \text{ W/m}$ رخ می‌دهد که آن را توان آستانه انتقال^۱ از رژیم برافروختگی به رگه‌ای می‌نامند. ملاحظه می‌شود که تقریباً برای تمامی هندسه‌ها، گذار از رژیم برافروختگی به رژیم رگه‌ای در مقدار آستانه 200 W/m اتفاق افتاده و روند صعودی منحنی‌ها در مقادیر توان‌های کم ادامه داشته و بعد از عبور از نقطه آستانه در توان‌های بالاتر نزولی می‌گردد. اگرچه تاکنون مرجعی مقدار توان آستانه گذار را برای پیکره‌بندی با شکل کانال بیان نکرده، اما این مقدار برای محرک صفحه تخت در مرجع [۳۱]، ۴۰ وات بر متر گزارش شده است.



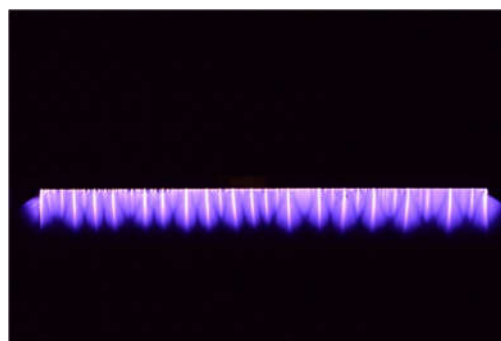
شکل ۱۶- کارایی رانشگر بر حسب توان مصرفی نسبی برای هندسه‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جریان پلاسمای رژیم تخلیه مانع دی‌الکتریک در یک کانال دوبعدی در قالب یک رانشگر الکتریکی مطالعه و بررسی شد. بر این اساس، توان الکتریکی مصرفی با استفاده از روش خازن ناظر و نیروی پیشران با روش مستقیم به کمک ترازوی دقت بالای دیجیتال



شکل ۱۳- تصویر جریان پلازما تحت ولتاژ اعمالی ۱۴ کیلوولت (رژیم برافروختگی)، $t = 2 \text{ mm}$ و $L = 150 \text{ mm}$



شکل ۱۴- تصویر جریان پلازما تحت ولتاژ اعمالی ۲۶ کیلوولت (رژیم رگه‌ای)، $t = 2 \text{ mm}$ و $L = 150 \text{ mm}$

برای تعیین چگونگی وابستگی نیروی پیشران با توان مصرفی ($F \propto P^r$)، مقادیر متوسط‌گیری شدهی این کمیت که در شکل‌های ۸ و ۱۱ ارائه شده‌اند، با حذف تابعیت ولتاژ به طور جداگانه بر حسب یکدیگر در شکل ۱۵ رسم شده‌اند.

با توجه به منحنی آبی رنگ که از برازش داده‌های مربوط به طول الکتروود و ضخامت دی‌الکتریک مختلف در رژیم برافروختگی به دست آمده است، مقدار توان r برابر با $1/490$ می‌باشد. این در حالی است که با توجه به منحنی‌های قهوه‌ای، بنفش و قرمز رنگ که به ترتیب مربوط به ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر در رژیم رگه‌ای می‌باشند، مقدار توان r به ترتیب برابر با $0/548$ ، $0/465$ و $0/553$ است که میانگین آن‌ها $0/522$ می‌باشد. بنابراین، ملاحظه می‌شود که نیروی پیشران رانشگر در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای به ترتیب تابعیتی از توان مصرفی به شکل تقریبی $F \propto P^{1.5}$ و $F \propto P^{0.5}$ دارد. این امر موید آن است که در رژیم برافروختگی بخش قابل توجهی از توان مصرفی منجر به 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 رابطه (۸) پارامتر کارایی با مرتبه توان $r-1$ ولتاژ اعمالی متناسب است ($\eta_{\text{eff}}^* \propto P^{r-1}$). بنابراین در رژیم برافروختگی و رگه‌ای، به ترتیب تناسب‌های $\eta_{\text{eff}}^* \propto P^{0.5}$ و $\eta_{\text{eff}}^* \propto P^{-0.5}$ برقرار می‌باشند. ازینرو، منحنی پارامتر کارایی با افزایش ولتاژ و به تبع آن توان مصرفی تا نقطه اشباع روند صعودی داشته و بعد از آن با افزایش بیشتر ولتاژ، کاهش می‌یابد و نهایتاً به شکل قله‌ای درمی‌آید.

¹ Threshold of transition

۵- مراجع

- [1] Taleghani, A.S., Shadaram, A., Mirzaei, M. and Abdolahipour, S., 2018. Parametric study of a plasma actuator at unsteady actuation by measurements of the induced flow velocity for flow control. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 40, No. 4, pp. 1-13, 2018
- [2] A. Shams Taleghani, A. Shadaram, M. Mirzaei, Effects of duty cycles of the plasma actuators on improvement of the pressure distribution over NLF0414 airfoil, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 106-114, 2012.
- [3] A. Shams Taleghani, A. Shadaram, M. Mirzaei, Experimental Investigation of Active Flow Control for Changing Stall Angle of a NACA0012 Airfoil Using Plasma- Actuator, *Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal*, Vol. 1, pp. 89-97, 2012.
- [4] Mohammadi, M. and Taleghani, A.S., 2014. Active flow control by dielectric barrier discharge to increase stall angle of a NACA0012 airfoil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39, pp. 2363-2370, 2014.
- [5] Mirzaei, M., Taleghani, A.S. and Shadaram, A., 2012. Experimental study of vortex shedding control using plasma actuator. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 186, pp. 75-86, 2012. Trans Tech Publications Ltd.
- [6] Ozturk C., and Jacob J. D., Plasma Micro-Thrusters for Micro-Aerial Vehicles. *SAE Technical Paper Series*, No. 2008-01-2244, 2008.
- [7] Ozturk C., Bolitho M., and Jacob J. D., Parametric Study of Thrust Generation in Plasma Microthrusters. In *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA, No. AIAA-2008-539, 2008.
- [8] Greig A., Birzer C. H., and Arjomandi M., Atmospheric Plasma Thruster: Theory and Concept. *AIAA Journal*, Vol. 51 No. 2, pp. 362-371, 2012.
- [9] Debiasi M., and Jiun-Ming L., Experimental Study of a DBD-Plasma Driven Channel Flow. In, *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, No. AIAA-2011-954, Orlando, Florida, USA, 2011.
- [10] Riherd M., and Roy S., Measurements and Simulations of a Channel Flow Powered by Plasma Actuators. *International Journal of Applied Physics*, Vol. 112, No. 5, p. 053303, 2012.
- [11] Ibrahim I. H., and Skote M., Simulating Plasma Actuators in a Channel Flow Configuration by Utilizing the Modified Suzen-Huang Model. *Computer & Fluids*, Vol. 99, pp. 144-155. 2014.
- [12] Campbell N. S., and Roy S., Plasma Channel Flows: Electro-Fluid Dynamic Jets. *Applied Physics Letters*, Vol. 105, No. 13, p. 132906, 2014.
- [13] Soni J., *Characterization of Plasma Actuator Based Micro Thruster Concepts for High Altitude Aircrafts and CubeSat*, Ph.D. Thesis, University of Florida, 2014.
- [14] Defoort E., Benard N., and Moreau E., Ionic Wind Produced by an Electro-Aerodynamic Pump Based on Corona and Dielectric Barrier Discharges. *Journal of Electrostatics*, Vol. 88, pp. 35-40. 2017.
- [15] Browning P., Shambaugh B., and Dygert J., Experimental Study of Dielectric Barrier Discharge Driven Duct Flow for Propulsion Applications in Unmanned Aerial Systems. *SAE Technical Paper Series*, No. 2017-01-2063, 2017.
- [16] Adamiak K., Two-Species Modeling of Electro Hydrodynamic Pump Based on Surface Dielectric Barrier Discharge. *Journal of Electrostatics*, Vol. 106, p. 103470, 2020.
- [17] Lilley A. J., Michels L. Z., and Roy S., Experiment Integrated Numerical Modeling of a Channel Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator. In *AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, Florida, 2020.

اندازه‌گیری شدند. همچنین پارامتر کارایی محاسبه شد و با تحلیل رژیم‌های مختلف جریان پلاسما، رفتار آن تبیین شد. در مجموع نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- ۱- با افزایش ولتاژ اعمالی، مقادیر نیروی پیشران و توان مصرفی برای هر هندسه دلخواه افزایش می‌یابد. با این حال، نرخ افزایش نیروی پیشران بعد از ولتاژ اشباع کاهش می‌یابد.
- ۲- با افزایش طول الکترودها در یک ولتاژ معین، مقادیر نیروی پیشران و توان الکتریکی افزایش پیدا می‌کنند. با این وجود، بخشی از افزایش توان مصرفی بعد از نقطه اشباع به جای آن که منجر به تولید نیروی پیشران بیشتر شود در قالب تلفات گرمایی مستهلک می‌گردد.
- ۳- با افزایش ضخامت مانع دی‌الکتریک در یک ولتاژ معین، نیروی پیشران و توان الکتریکی ورودی کاهش می‌یابند. این در حالی است که نسبت آن‌ها که مبین پارامتر کارایی رانشگر می‌باشد، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش ضخامت دی‌الکتریک باعث بهبود عملکرد رانشگر می‌شود.
- ۴- داده‌های توان مصرفی مقیاس برای هندسه‌هایی با ضخامت مانع دی‌الکتریک و طول الکترودهای مختلف تقریباً بر همدیگر منطبق هستند و مقدارشان تابعی توانی از ولتاژ اعمالی با مرتبه $n \approx 4$ است.
- ۵- داده‌های نیروی مقیاس برای هندسه‌هایی با ضخامت مانع دی‌الکتریک یکسان و طول الکترودهای متفاوت تقریباً بر همدیگر منطبق هستند و مقدارشان تابعی توانی از ولتاژ اعمالی است که مقدار مرتبه‌شان به ترتیب در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای $m \approx 5.8$ و $m \approx 2.2$ می‌باشد.
- ۶- پارامتر کارایی دارای شکل قله‌ای بوده و نقطه بیشینه آن معرف حالت اشباع رژیم برافروختگی است. به طوری که با افزایش ولتاژ بعد از این نقطه، منحنی نزولی شده و پلاسما وارد رژیم رگه‌ای می‌شود. مقدار ولتاژ نقطه اشباع به طور قابل توجهی به ضخامت مانع دی‌الکتریک وابسته است و با افزایش ضخامت، مقدار آن نیز افزایش می‌یابد.
- ۷- در قبل از نقطه اشباع، پلاسما ماهیتی هموزن دارد و با فاصله گرفتن از نواحی کرونا در لبه الکتروود در معرض به سمت پایین دست، پلاسما دچار پخش‌شدگی می‌شود. در حالی که بعد از نقطه اشباع، رشته‌های نسبتاً ضخیم، نورانی و درخشان در رژیم رگه‌ای مشاهده می‌شود.
- ۸- نیروی پیشران تابعی توانی از توان مصرفی است که تابعیت آن به ترتیب در رژیم‌های برافروختگی و رگه‌ای از مرتبه $r \approx 1.5$ و $r \approx 0.5$ می‌باشد.
- ۹- با بررسی منحنی توان نسبی-کارایی ملاحظه شد که برای همه هندسه‌های مختلف رانشگر، یک نقطه آستانه گذار از رژیم برافروختگی به رگه‌ای وجود دارد که در پژوهش حاضر مقدار آن $\bar{P}_a/L \approx 200 \text{ W/m}$ به دست آمده است.

- [18] Wojewodka M. M., White C., and Kontis K., Effect of Permittivity and Frequency on Induced Velocity in Ac-DBD Surface and Channel Plasma Actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 303, p. 111831, 2020.
- [19] Durscher R., and Roy S., Evaluation of Thrust Measurement Techniques for Dielectric Barrier Discharge Actuators. *Experiments in Fluids*, Vol. 53, No. 4, pp. 1165-1176, 2012.
- [20] Wu L., Gao C., Yan X., Liu F., and Luo S., PIV-Estimated DBD Plasma-Actuator Thrust Verified by Measurement in Quiescent Air. In *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, p. 0198, 2016.
- [21] Hoskinson A. R., Hershkowitz N., and Ashpis D. E., Force Measurements of Single and Double Barrier DBD Plasma Actuators in Quiescent air. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41, No. 24, p. 245209, 2008.
- [22] Zito J., Arnold D., Durscher R., and Roy S., Investigation of Impedance Characteristics and Power Delivery for Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. In *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, p. 964, 2010.
- [23] Ashpis D. E., Laun M. C., and Griebeler E. L. Progress toward Accurate Measurement of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Power. *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 7, pp. 2254-2268, 2017.
- [24] Benard N., and Moreau E., Role of the Electric Waveform Supplying a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator. *Appl. Physics Letters*, Vol. 100, No. 19, p. 193503, 2012.
- [25] Kriegseis J., Möller B., Grundmann S., and Tropea C., Capacitance and Power Consumption Quantification of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators. *Journal of Electrostatics*, Vol. 69, No.4, pp. 302-312, 2011.
- [26] Yoon, J. S., and Han, J. H., Semiempirical thrust model of dielectric barrier plasma actuator for flow control. *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 28, No. 1, 04014041, 2005.
- [27] Thomas F. O., Corke T. C., Iqbal M., Kozlov A., and Schatzman D., Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic Flow Control. *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 9, pp. 2169-2178, 2009.
- [28] Houser N., *Manufacturing of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Degradation Resistance*, Ph.D. Thesis, University of Toronto, Toronto, 2013.
- [29] Kriegseis J., Duchmann A., Tropea C., and Grundmann S., On the Classification of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators: A Comprehensive Performance Evaluation Study. *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, No. 5, p. 053301, 2013.
- [30] Geuns R., Goekce S., Plyushchev G., Leyland P., Pimentel R., de Champlain A., and Jean Y., Understanding SDBD Actuators: An Experimental Study on Plasma Characteristics. In *AIAA Aviation, 45th AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference*, p. 2811, 2014.
- [31] Kriegseis J., *Performance Characterization and Quantification of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators*, Ph.D. Thesis, University of Darmstadt, Germany, 2011.