

Experimental Parametric Study of Factors Affecting the Negative Corona Plasma Propulsion System

Seyed Abolfazl Mousavi¹, Farshad Pazooki^{2*}, Seyed Hossein Sadati³, Rouhollah Khoshkhoo⁴

¹ PhD student, Department of Aerospace Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email Address: seyedabolfazl.mousavi@iau.ac.ir

²Correspondence: Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email Address: pazooki_fa@srbiau.ac.ir

³Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. Email Address: Hsadati@mut.ac.ir

⁴Assistant Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. Email Address: khoshkhoo@mut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 18 November 2025

Received in revised form: 4 January 2026

Accepted: 2 February 2026

Available online: 20 February 2026

Keywords:

Propulsion

Corona Discharge

Effectiveness Factor

Parametric Study

Environmental Conditions

ABSTRACT

Corona plasma propulsion (electro-aerodynamics) is an innovative method for generating thrust using strong electric fields to create ionic flow in a neutral gas. These systems, due to their elimination of fossil fuel dependency, simple design without moving parts, and low-noise operation, have emerged as a promising option for aerospace applications. This emerging propulsion technology holds significant potential for both aerospace and industrial applications. In this study, the key factors affecting the efficiency of corona plasma propulsion were experimentally investigated. Additionally, environmental factors such as temperature and humidity impacting the corona propulsion system were examined. The objective was to identify the key factors influencing efficiency (effectiveness coefficient) based on variables including applied voltage up to 34 kV, current intensity up to 0.6 mA, electrode spacing ranging from 2 cm to 5 cm, emitter electrodes made of copper, stainless steel, and steel, the number of electrodes ranging from 2 to 10, temperatures between 21°C and 26°C, humidity from 0.1 to 0.24, and structural characteristics. The results indicate that, in addition to key influential factors such as applied voltage and current, electrode material, and spacing, environmental factors like temperature and humidity also significantly affect efficiency (effectiveness coefficient).

Cite this article: Mousavi S. A , Pazooki F, Sadati S. H, and Khoshkhoo R., “Experimental Parametric Study of Factors Affecting the Negative Corona Plasma Propulsion System, 2026; Vol(14): 15-24.

[DOR: 20.1001.1.23223278.1404.14.2.2.7](https://doi.org/10.1001.1.23223278.1404.14.2.2.7)



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University



بررسی پارامتریک عوامل مؤثر بر سامانه پیشرانش کرونای منفی به صورت تجربی

سید ابوالفضل موسوی^۱، فرشاد پازوکی^{۲*}، سید حسین ساداتی^۳، روح اله خوش خوی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی هوافضا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. seyedabolfazl.mousavi@iau.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی هوافضا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول). pazooki_fa@srbiau.ac.ir

^۳ استاد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. Hsadati@mut.ac.ir

^۴ استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. khoshkhoo@mut.ac.ir

چکیده

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

پیشرانش پلاسمای کرونا (الکترو آیرودینامیک)، یک روش نوین برای تولید نیروی پیشران با استفاده از میدان‌های الکتریکی قوی است که جریان یونی را در یک گاز خنثی ایجاد می‌کند. این سامانه‌ها به دلیل حذف وابستگی به سوخت‌های فسیلی، طراحی ساده بدون قطعات متحرک، عملکرد کم‌صدا، به‌عنوان گزینه‌ای نوآورانه برای کاربردهای هوافضایی مطرح شده‌اند. این فناوری نوظهور در حوزه پیشران، پتانسیل بالایی برای کاربردهای هوافضایی و صنعتی دارد. در این تحقیق، عوامل کلیدی مؤثر بر راندمان پیشران پلاسمای کرونا به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. همچنین عوامل محیطی مانند دما و رطوبت مؤثر بر سیستم پیشران کرونا نیز مورد مطالعه قرار گرفت. هدف، استخراج عوامل کلیدی مؤثر بر راندمان (ضریب اثربخشی) باتوجه به متغیرهایی از قبیل اختلاف پتانسیل اعمالی تا حداکثر ۳۴ Kv، شدت جریان تا ۰/۶ mA، فاصله الکترودها در بازه ۲ cm تا ۵ cm، الکترودهای ساطع از جنس مس، استیل و فولاد، تعداد الکترودها از ۲ تا ۱۰ الکترود، دمای ۲۱°C تا ۲۶°C، رطوبت ۰/۱ تا ۰/۲۴ و ویژگی‌های ساختاری بوده است. نتایج نشان می‌دهد علاوه بر عوامل تاثیرگذار کلیدی از جمله ولتاژ و جریان اعمالی، جنس و فاصله الکترودها، عوامل محیطی همچون دما و رطوبت نیز تأثیر چشمگیری بر راندمان (ضریب اثربخشی) دارند.

کلیدواژه‌ها:

پیشران

تخلیه ی کرونا

ضریب اثربخشی

بررسی پارامتریک

شرایط محیطی

استناد: موسوی، سید ابوالفضل، پازوکی، فرشاد، ساداتی، سید حسین، خوش خوی، روح اله. بررسی پارامتریک عوامل مؤثر بر سامانه پیشرانش کرونای منفی به صورت تجربی. مکانیک سیالات و آیرودینامیک (۱۴۰۴): ۱۴ (۲): ۱۵-۲۴.

DOR: <https://20.1001.1.23223278.1404.14.2.3.8>



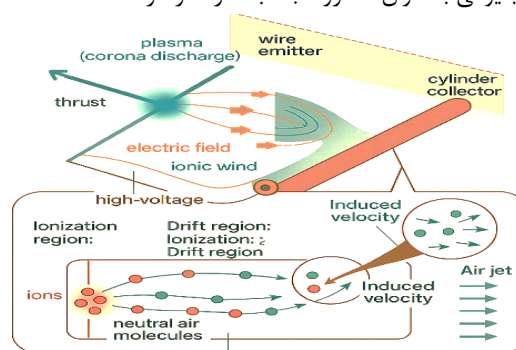
© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین (ع).

۱- مقدمه

تولید نیروی پیشران با استفاده از سامانه های پلاسمایی کرونا یکی از فناوری های نوین در عرصه پیشران است که قابلیت به کارگیری در حوزه های مختلف بخصوص حوزه های هوافضایی را دارا است. پیشران پلاسمای کرونا مبتنی بر تخلیه الکتریکی در میدان های با ولتاژ بالا است که منجر به تولید یون ها و ایجاد تراست می شود. این فناوری به دلیل سادگی ساختار، وزن کم، و قابلیت استفاده در کاربردهای فضایی و صنعتی، به شدت مورد توجه قرار گرفته است. با وجود مزایای پیشران پلاسمایی کرونا، این فناوری با محدودیت هایی نظیر نیروی پیشران نسبتاً پایین (در مقایسه با پیشران های شیمیایی)، حساسیت به شرایط محیطی (مانند رطوبت بالا)، و احتمال ناپایداری تخلیه الکتریکی در ولتاژ های بالا مواجه است. عوامل متعددی از جمله طراحی الکترودها، جنس مواد و پارامترهای عملیاتی بر عملکرد سیستم اثر می گذارند [۱].

طرح واره ای از عملکرد کرونا با ساختار خطی در شکل (۱) نشان داده شده است. عملگرهای پلاسمای کرونا عملگرهایی هستند که بر پایه تخلیه الکتریکی کرونا هستند. در این نوع عملگر با افزایش اختلاف ولتاژ بین دو الکترودها با ضخامت های متفاوت تا جایی که قوس الکتریکی رخ ندهد، میدان الکتریکی در اطراف الکترودها قطب مثبت افزایش می یابد که به تبع آن گازهای اطراف قطب مثبت یونیزه شده و پدیده تخلیه کرونا به وجود می آید. با به وجود آمدن یک میدان الکتریکی قوی در اطراف الکترودها قطب مثبت مولکول های هوا یونیزه شده و به سمت الکترودها قطب منفی حرکت می کنند. برخورد یون ها با مولکول های خنثی باعث انتقال مؤنتم شده و جریانی را بین دو الکترودها به وجود می آورد. همان طور که در شکل (۱) که به صورت طرح واره ارائه شده یک سیم به عنوان الکترودها ساطع^۱ و استوانه آلومینیومی به عنوان الکترودها جاذب^۲ در نظر گرفته شده.



شکل (۱): طرح واره ای از عملکرد کرونا با ساختار خطی

با توسعه روش های عددی تحقیق و بررسی جریان الکترو هیدرودینامیک به صورت عددی نیز آغاز شد. در سال ۱۹۸۳ یویس نخستین پژوهش عددی در زمینه ی تخلیه کرونا را انجام داد [۲].

جوادی و همکارش در سال ۲۰۰۴ به بررسی یک مدل نیمه تجربی برای محاسبه میدان الکتریکی در اطراف دو الکترودها سیم سیلندر پرداختند. نتایج نشان داد که میزان میدان الکتریکی وابسته به فاصله بین دو الکترودها و میزان ولتاژ ورودی است [۳]. در سال ۲۰۰۸، جول لارسن و همکارانش شبیه سازی عددی جریان الکترو هیدرودینامیک را با دقت بالایی انجام دادند. سپس نتایج حاصله را با نتایج تجربی مقایسه کردند. میانگین خطا بین نتایج تجربی و شبیه سازی چهار درصد گزارش شده است [۴].

تامپسون و پرکینز در سال ۲۰۰۹، با حمایت و پشتیبانی ناسا، به بررسی استفاده از عملگر پلاسمای کرونا جهت تولید نیروی پیشران برای سیستم پیشران هواپیما اقدام نمودند. آن ها توانستند میزان نیروی پیشران ۵ نیوتن بر هر Kv را از عملگر پلاسمای کرونا به دست آورند [۵]. در سال ۲۰۱۰، کلاس و همکارانش، در چینش پنج الکترودها شامل یک قطب مثبت (متصل به ولتاژ مثبت) و دو قطب منفی متصل به زمین و دو قطب منفی متصل به ولتاژ منفی رژیم تخلیه کرونا را بهینه سازی کردند و به جریان باد یونی با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه دست یافتند [۶].

کاجی و همکارش در سال ۲۰۱۴، به بررسی تأثیر قرار گرفتن اشیاء فلزی متقارن در اطراف الکترودها پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که در صورت قرارگیری اشیاء فلزی در اطراف الکترودها، میزان ولتاژ آستانه تخلیه کرونا کاهش می یابد و میزان جریان الکتریکی افزایش می یابد [۷]. موریانو در پژوهش تجربی خود در سال ۲۰۱۵، سعی کرد با تغییر تعداد و نحوه ی چیدمان کاتدها، میزان راندمان به دست آمده سیستم پیشران کرونا را افزایش دهد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش تعداد الکترودها، نیروی پسای ناشی از قطب منفی کاهش می یابد [۸].

وانگ و همکاران، به منظور بهبود عملکرد انتقال گرما با کمک تخلیه کرونا، تأثیر تعداد الکترودهای قطب منفی و نحوه ی قرارگیری آن ها را بر روی ضخامت لایه مرزی گرمایی و تغییرات گرادیان های سرعت در آن مطالعه کردند. نتایج تحقیق نشان می دهد که ولتاژ بالاتر و تعداد بیشتر الکترودها سیم (الکترودها ساطع) می تواند به کاهش ضخامت لایه مرزی گرمایی و افزایش

^۱Emitter

^۲Collector

این پژوهش با تحلیل جامع ۵۰ مجموعه داده آزمایشگاهی، یک بررسی تجربی چندمتغیره از عوامل کلیدی مؤثر بر راندمان سامانه پیشرانش پلاسمایی کرونا ارائه می‌دهد. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر شبیه‌سازی‌های عددی یا تحلیل‌های محدود متمرکز بوده‌اند، این مطالعه با بررسی هم‌زمان پارامترهای الکتریکی (ولتاژ و جریان)، هندسی (فاصله و جنس الکترودها) و محیطی (دما و رطوبت)، یک دیدگاه یکپارچه برای بهینه‌سازی راندمان ارائه می‌کند. امید است که نتایج این پژوهش، با توجه به طراحی‌های مهندسی برای طراحی سامانه‌های پیشرانش پلاسمایی کارآمد، گامی نوین در توسعه فناوری‌های پیشرانش هوافضایی بردارد.

۲- ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی

ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی استفاده‌شده به شرح ذیل است: الکترودها: از سیم‌های مسی به طول ۲۰ cm و ضخامت ۱ mm به عنوان الکترودها ساطع و از استوانه‌های آلومینیومی توخالی به طول ۲۰ cm و با قطر ۵ mm به عنوان الکترودها جاذب مطابق شکل (۲) استفاده شده است.



شکل (۲): الکترودها (سیم‌های مسی الکترودها ساطع و استوانه‌های آلومینیومی الکترودها جاذب)

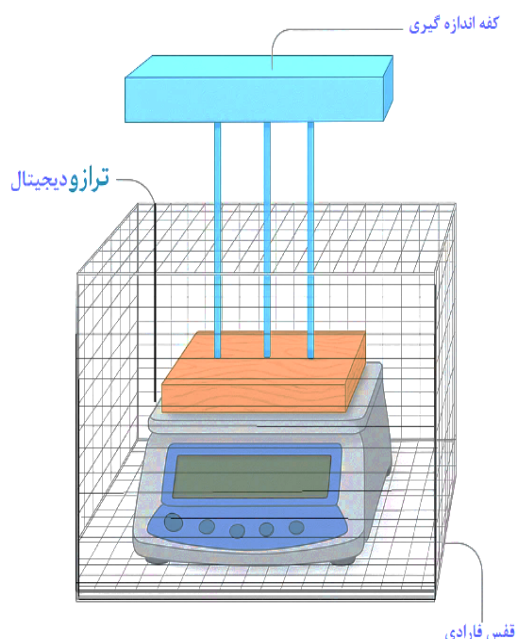
برای ایجاد یک تخلیه کرونا، باید از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا با جریان الکتریکی مستقیم استفاده کرد. در این آزمایش از یک منبع تغذیه مستقیم منفی ولتاژ بالا مطابق شکل (۳) استفاده شد. این منبع تغذیه از نوع ولتاژ متغیر تا ۳۵ Kv و جریان تا ۰/۶ mA است.

این منبع که به صورت یک دستگاه منفی با ولتاژ ورودی ۱۰۰-۲۴۰ V، تک فاز، ۵۰-۶۰ هرتز و ولتاژ خروجی ۳۵ Kv و همچنین توان دستگاه ۳۵ وات است، دارای نمایشگر ولتاژ خروجی با دقت دهم (۷۱۰۰) Kv و نمایشگر جریان الکتریکی خروجی با دقت هزارم mA است. میزان توان مصرفی عملگر پلاسمایی با استفاده از مدار الکتریکی واسط که به همین منظور

شیب سرعت لایه مرزی کمک کند و در نتیجه باعث افزایش انتقال گرما شود [۹]. زو و همکاران، با مطالعه نظری عملکرد عملگرهای پلاسمای کرونا به این نتیجه رسیدند که در فضای نظریه یک بعدی بازده یک پیشرانش الکترو آیرودینامیک ایدئال بیشتر از ۵۰ درصد خواهد بود [۱۰]. در سال ۲۰۱۸، برای نخستین بار، درو و همکارانش، یک میکرو ربات را با استفاده از نیروی پیشران حاصل از تخلیه کرونا با حسگر پردازنده و بدون نیاز به بخش متحرک به پرواز درآوردند و ویژگی‌های مختلف آن را بررسی کردند [۱۱]. شین تارو و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی تأثیر استفاده از عملگرهای پلاسمای به صورت چندگانه پرداختند، نتایج آن‌ها حاکی از این مسئله است که در صورت استفاده از مدلی صحیح با فاصله مناسب بین عملگرها می‌توان افزایش چشمگیری در میزان نیروهای هیدرودینامیک، سرعت باد یونی و همچنین نیروی پیشران شاهد بود [۱۲].

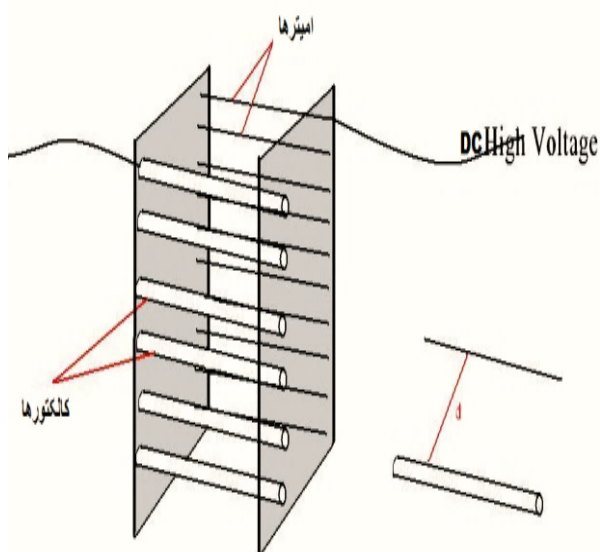
کولو و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی استفاده از تخلیه کرونا با پیکربندی سیم - صفحه جهت خنک کاری در لایه مرزی و انتقال گرما پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که این روش، نسبت به روش‌های متعارف مناسب‌تر و دارای راندمان بالاتر هست [۱۳]. گو و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی تأثیر کرونا مثبت و منفی بر میزان نیروی پیشران در پیکربندی صفحه - سوزن پرداختند. نتایج نشان داد که کرونا منفی، میزان نیروی پیشران بیشتری در این پیکربندی نسبت به کرونا مثبت تولید می‌کند [۱۴].

در سال ۲۰۱۹، رژیم تخلیه الکتریکی کرونا در یک پیکربندی سیم - سیلندر در دانشگاه شهید بهشتی شبیه‌سازی شد و مشاهده شد که میزان اختلاف نتایج شبیه‌سازی با مقدار نتایج اندازه‌گیری شده در حدود شش درصد بود [۱۵]. در سال ۲۰۱۹، فتحی و همکارش، به شبیه‌سازی جریان پلاسمای در یک رانشگر الکترو هیدرودینامیک به صورت دو الکتروده قطب منفی و یک الکتروده قطب مثبت پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت افزایش تعداد کاتدها، میزان نیروی پیشران و راندمان افزایش می‌یابد [۱۶]. در سال ۱۴۰۲، شبیه‌سازی‌های عددی متعددی برای تخلیه کرونا در پیکربندی سیم - ایرفویل صورت گرفت و فاصله بین دو الکتروده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده‌های خاصی افزایش هر کیلوولت ولتاژ، نیروی پیشران را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد [۱۷-۱۸].



شکل (۵): ترازوی دیجیتال و کفه اندازه گیری داخل قفس فارادی جهت اندازه گیری تراست

در شکل (۶) طرح‌واره‌ای از پیشرانش پلاسمایی به صورت خطی نشان داده شده است. مطابق شکل (۷) و (۸) محفظه پیشرانش از جنس پلاستیک ABS با ابعاد $8 \times 21 \times 21$ سانتی متر توسط چاپگر سه بعدی ساخته شد. الکترودهای ساطع و جاذب در این محفظه به صورت موازی با قابلیت تنظیم فاصله قرار گرفتند. تخلیه کرونا با اعمال ولتاژ بالا بین الکترودهای ساطع (سیم) و الکترودهای جاذب (استوانه آلومینیومی) ایجاد شد که منجر به تولید باد یونی و نیروی پیشران گردید.



شکل (۶): طرح‌واره پیشرانش پلاسمایی با ساختار خطی

طراحی و در خروجی منبع تغذیه تعبیه شده، اندازه گیری می شود. یک مقاومت به صورت سری با مدار قرار داده شده تا از آسیب دیدن منبع تغذیه در صورت وقوع جرقه جلوگیری کند. برای مشاهده شکل موج‌ها و زمان تناوب از اسیلوسکوپ استفاده گردید.



شکل (۳): منبع تغذیه مستقیم منفی ولتاژ بالا

اندازه گیری نیروی پیشران تولید شده به وسیله عملگر پلاسمایی، پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد آن است. برای اندازه گیری نیروی پیشران از ترازوی دیجیتال مدل EK-3200i با دقت صدم گرم که در شکل ۴ مشاهده می شود، استفاده شده است. دقت اندازه گیری نیروی پیشران با این روش $\pm 0.2 \text{ mN/m}$ است.



شکل (۴): ترازوی دیجیتال (EK-3200i)

مطابق شکل (۵)، قفس فارادی برای جلوگیری از تأثیر امواج الکترومغناطیسی به ترازو و ایجاد اختلال در اندازه گیری و آسیب به دستگاه ساخته شد. برای به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیسی ناشی از عملکرد منبع تغذیه ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً تجهیزات اندازه گیری و داده برداری، از کابل‌های دارای پوشش محافظ الکتریکی استفاده شده است. همچنین رعایت حفظ فاصله حداکثری بین منبع تغذیه و ابزارهای اندازه گیری در طول آزمایش، مدنظر قرار گرفت.

دما و رطوبت محیط با استفاده از سنسور دیجیتال مدل DHT22 با دقت ± 0.5 درجه سانتی گراد برای دما و $\pm 2\%$ برای رطوبت نسبی اندازه گیری شدند.

۳- روش انجام آزمایش

تخلیه کرونا با یونیزه کردن مولکول های هوا در اطراف الکتروود ساطع، جریانی از یون ها به سمت الکتروود جاذب ایجاد می کند. برخورد این یون ها با مولکول های خنثی هوا، مؤمنتم را منتقل کرده و باد یونی تولید می کند. این باد یونی، طبق قانون سوم نیوتن، نیروی پیشران (تراست) در جهت مخالف ایجاد می کند که توسط ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد.

آزمایش ها بر روی پیشران پلاسمای کرونا با ساختار خطی مطابق شکل های (۷) و (۸) در شرایط محیطی مختلف از جمله دما و رطوبت، ولتاژها و جریان های اعمالی متفاوت و با چند نوع الکتروود در فاصله های مختلف انجام شدند. مراحل انجام آزمایش به شرح زیر است:

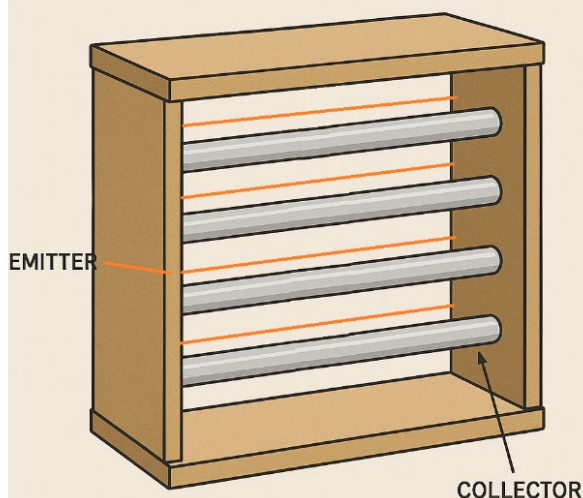
الکتروودهای ساطع و جاذب مطابق طرحواره شکل (۶) در فواصل مشخص به صورت موازی با یکدیگر تنظیم شدند. این الکتروودها مطابق شکل (۸) در داخل یک محفظه (کانال/داکت) پیشران که توسط چاپگر سه بعدی ساخته شده است قرار داده شدند.

فرایند تولید و شتاب دهی یون ها و برخورد آن ها با مولکول های خنثی در هوا باعث ایجاد جریان بادی موسوم به باد یونی می شود. برخورد جریان هوای تولید شده با الکتروودهای جاذب که همان استوانه های آلومینیومی هستند که طبق قانون سوم نیوتن منجر به ایجاد نیروی تراست می شود. از آنجایی که نیروی تراست تولید شده در جهت مخالف جریان باد و به سمت ترازوی دیجیتال است، با مشاهده تغییرات صفحه نمایش ترازو و ثبت وزن نشان داده شده، میزان تراست تولید شده در آزمایش به واحد گرم قابل اندازه گیری است. نحوه اتصال منبع تغذیه به الکتروودها و اندازه گیری نیروی تراست در شکل (۹) به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

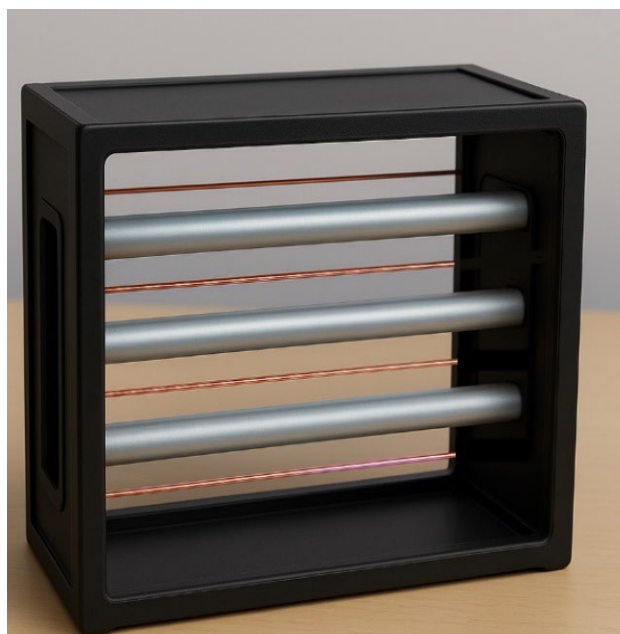
مدار الکتریکی شامل یک منبع تغذیه ولتاژ بالا (۳۵ Kv، ۰.۶ mA)، مقاومت سری ۱۰ مگا اهم برای جلوگیری از جرقه، و الکتروودهای ساطع و جاذب است.

محفظه پیشران پلاسمای پس از اتصال به منبع تغذیه ولتاژ بالا مطابق شکل بر روی کفه اندازه گیری که بر روی ترازوی دیجیتال تعبیه شده، قرار می گیرد و سپس فرایند کالیبراسیون ترازوی دیجیتال با دقت صورت می پذیرد.

CORONA PLASMA PROPULSION



شکل (۷): طرحواره محفظه پیشران پلاسمایی



شکل (۸): پیشران پلاسمایی (ساخته شده با چاپگر سه بعدی)

در جدول (۱)، تجهیزات استفاده شده در آزمایش ها و میزان دقت و خطای اندازه گیری هریک بیان شده است.

جدول (۱): میزان دقت تجهیزات استفاده شده

دستگاه		دقت
منبع تغذیه	ولتاژ	۱/۰ kv
	جریان	۱/۰ mA
ترازو		۱/۰ gr
اسیلوسکوپ		۳%

که در آن A سطح موثرالکترودها و d فاصله بین الکترودها و ولتاژ اعمالی و C_g ضریب هندسی و γ_m راندمان مواد (الکترودهای مسی و آلومینیومی) است. لازم به ذکر است که مقادیر توان الکتریکی از معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$P = V \times I \quad (3)$$

در رابطه فوق، P نشان‌دهنده توان الکتریکی مصرف‌شده، I نشان‌دهنده جریان الکتریکی و V میزان ولتاژ است. همچنین، راندمان الکتریکی یا در حقیقت، ضریب اثربخشی (η) با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$\eta = \frac{T}{P} \quad (4)$$

که در آن T نیروی پیشران و P میزان توان مصرفی است. ضریب اثربخشی (η) به‌صورت نسبت نیروی پیشران (T)، به میلی‌نیوتن) به توان مصرفی (P ، به وات) تعریف می‌شود. این پارامتر مشابه تکان ویژه (Isp) در پیشران‌های توربینی بوده و معیاری برای کارایی تبدیل توان الکتریکی به نیروی پیشران است

۵- نتایج، تحلیل داده‌ها و شناسایی عوامل مؤثر بر ضریب اثربخشی

۵-۱- بررسی تأثیر ولتاژ و جریان

همان‌گونه که در جدول (۲) و شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در بازه‌ی ولتاژ ۲۹ تا ۳۴ کیلوولت و جریان ۰/۴۲ تا ۰/۵۶ میلی‌آمپر، افزایش ولتاژ عموماً منجر به افزایش نیروی تراست و راندمان می‌شود، اما افزایش جریان اگر از یک حد فراتر رود، باعث کاهش راندمان می‌گردد (ردیف‌های آزمایش ۳۲ و ۱۶)

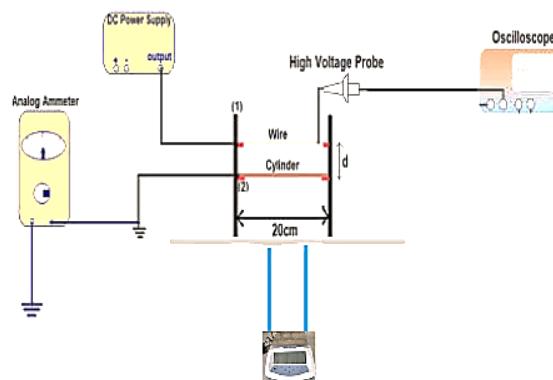
به نظر می‌رسد که افزایش کنترل‌شده ولتاژ و انتخاب جریان بهینه، مؤثرترین عملکرد برای افزایش ضریب اثربخشی را ارائه داده است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، راندمان نیز به‌طور کلی افزایش می‌یابد، اما این افزایش تا یک نقطه بهینه ادامه دارد و پس‌از آن ممکن است، کاهش یابد.

در ولتاژهای پایین (کمتر از ۲۸ Kv)، راندمان به‌طور قابل‌توجهی پایین است. بیشترین راندمان در محدوده ولتاژ ۳۰ تا ۳۴ Kv به‌دست آمده است. عملکرد پیشران‌ش در ولتاژهای بالاتر از ۳۴ Kv، به نظر می‌رسد تا حدی با افت راندمان همراه باشد. این ممکن است به‌دلیل افزایش تلفات انرژی در ولتاژهای بالا باشد.

جدول (۲): برخی از ردیف‌های آزمایش از مجموع آزمایش‌های انجام‌شده

منبع تغذیه روشن‌شده و ولتاژ به‌تدریج افزایش داده شد. جریان و نیروی تراست (با استفاده از ترازوی دیجیتال) برای هر ولتاژ پس از ۱۰ ثانیه عملکرد پایدار ثبت شد. دما و رطوبت توسط حسگرها برای هر آزمایش ثبت گردید. این مراحل برای فواصل مختلف الکترودها که به‌صورت خطی و موازی باهم قرارگرفته‌اند، تکرار شد.

راندمان (ضریب اثربخشی) که نسبت نیروی پیشران‌ش به توان مصرفی است در هر آزمایش محاسبه و ثبت شد. جهت اعتبارسنجی روش آزمایش، نیروی پیشران تولیدشده در پیکربندی سیم - استوانه با نتایج شبیه‌سازی عددی جول لارسن مقایسه شد [۴]. میانگین خطای نیروی پیشران اندازه‌گیری‌شده نسبت به مقادیر شبیه‌سازی‌شده ۵,۸٪ بود که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول روش آزمایش است.



شکل (۹): اتصال منبع تغذیه به الکترودها و اندازه‌گیری نیروی پیشران‌ش در آزمایش‌های تجربی ساختار خطی

۴- فرمول‌ها و روابط

فرمول‌ها و روابط زیر بنیان نظری آزمایش‌ها و تحلیل‌های ارائه‌شده در این تحقیق را تشکیل می‌دهند و تأثیر عوامل مختلف و پارامترهای مؤثر بر راندمان (ضریب اثربخشی) پیشران‌ش پلاسمای کرونا را بیان می‌کند. قانون گاوس برای توزیع میدان الکتریکی به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho \quad (1)$$

که در آن ϵ_0 گذردهی خلأ ($8.85 \times 10^{-12} F/m$) و ϵ_r ثابت دی‌الکتریک نسبی و E شدت میدان الکتریکی و ρ چگالی بارفضایی است.

رابطه (۲) تولید تراست بر اساس نیروی کولنی:

$$F = \frac{\epsilon_0 A}{2d^2} V^2 \cdot C_g \cdot \gamma_m \quad (2)$$

در جریان‌های پایین (کمتر از ۰/۴۵ mA)، راندمان به‌طور قابل توجهی پایین است. این نشان می‌دهد که برای رسیدن به راندمان مناسب، باید جریان در یک محدوده مشخص حفظ شود. در جریان‌های بالاتر (بیشتر از ۰/۵ mA)، به نظر می‌رسد که افزایش جریان، تأثیر کمتری بر راندمان دارد و نمودار به حالت اشباع نزدیک می‌شود.

بهینه‌سازی سیستم برای کار در محدوده جریان ۰/۴۵ mA تا ۰/۵۵ mA می‌تواند منجر به راندمان بالاتری شود. بررسی دقیق‌تر عوامل مؤثر در جریان‌های پایین می‌تواند به بهبود عملکرد در این شرایط کمک کند. بیشترین راندمان در ردیف آزمایش ردیف شماره ۳۰ با جریان ۰/۵۰ mA و راندمان ۳/۱۴۵ ثبت شد. در ردیف‌های ۴۵ و ۴۸ با شدت جریان‌های کمتر، راندمان‌های پایینی به ثبت رسید.

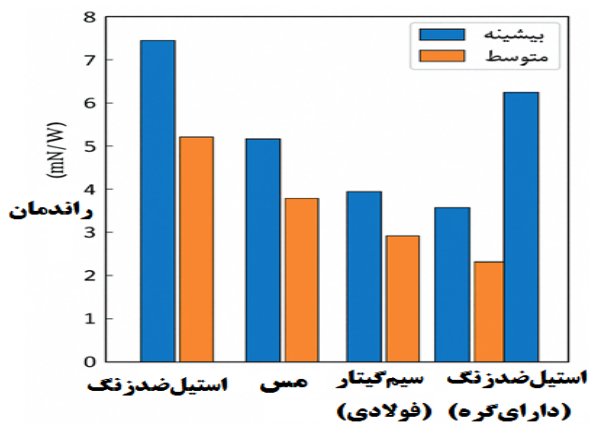
۵-۲- تأثیر فاصله الکترودها

باتوجه به میزان ولتاژ ورودی، فاصله‌ی الکترودها عامل مؤثری بر راندمان است؛ در فاصله ۴ cm تا ۵ cm به‌طور مکرر بیشترین راندمان ثبت گردید. در فواصل کمتر یا بیشتر ضریب اثربخشی کاهش یافت.

۵-۳- تأثیر نوع و تعداد الکترود ساطع و جاذب

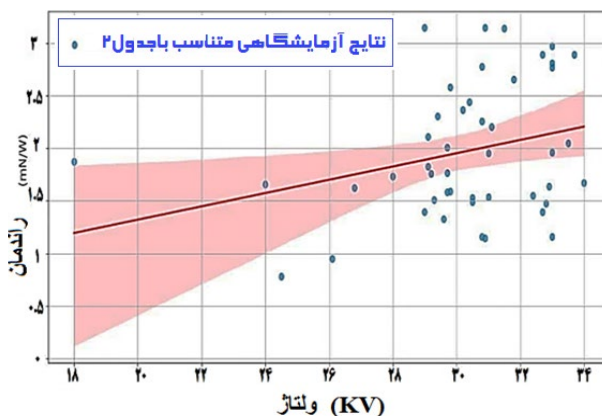
در شکل (۱۲)، نمودار تغییرات راندمان برحسب جنس الکترود ساطع کننده را نشان می‌دهد. در ردیف‌های آزمایشی که از الکترود ساطع از جنس سیم استیل ضدزنگ استفاده شد، راندمان بالاتری نسبت به سیم‌های مسی و فولادی ثبت گردید و همچنین با تغییر جنس الکترود جاذب از فویل نازک به ورق ضخیم، راندمان به‌طور محسوسی کاهش یافت.

تعداد الکترودهای ساطع کمتر از ۳ نیز درعین حالی که چیدمان هندسی مناسب باشد، به بازده قابل قبول رسیده است. افزایش تعداد الکترودها بیش از حد الزاماً مفید نیست و منجر به افزایش ضریب اثربخشی نخواهد شد.



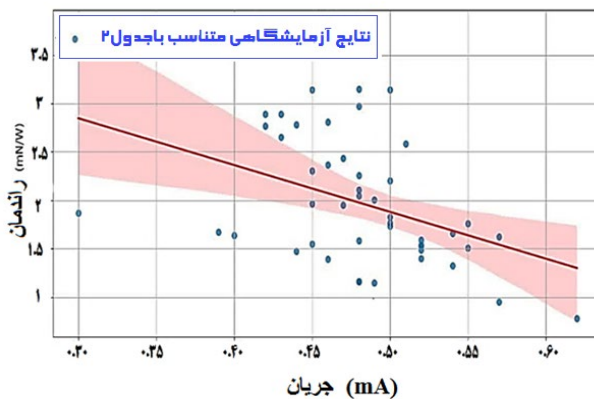
شکل (۱۲): تغییرات راندمان برحسب جنس الکترود ساطع

شماره آزمایش	ولتاژ KV	جریان mA	دما °C	رطوبت	فاصله CM	جنس الکترود ساطع	راندمان T/W
۱۴	۳۱/۱	۰/۵۰	۲۲/۸	۰/۱۲	۴	سیم مسی	۲/۲۰
۳۱	۲۹/۱	۰/۵۰	۲۴/۵	۰/۱۲	۴	سیم مسی	۱/۸۲
۱۶	۳۰/۸	۰/۴۸	۲۰/۶	۰/۲۵	۵	استیل ضدزنگ	۲/۲۵
۲۶	۳۲/۷	۰/۴۲	۲۳/۲	۰/۱۲	۵	استیل ضدزنگ	۲/۸۹
۳۲	۳۳/۰	۰/۴۸	۲۰/۱	۰/۱۵	۵	استیل ضدزنگ	۲/۹۷
۳۴	۳۰/۹	۰/۴۸	۲۱/۵	۰/۱۵	۵	استیل ضدزنگ	۳/۱۵
۳۵	۱۸/۰	۰/۳۰	۲۲/۴	۰/۱۰	۲	استیل ضدزنگ	۱/۸۷



شکل (۱۰): تغییرات راندمان برحسب ولتاژ

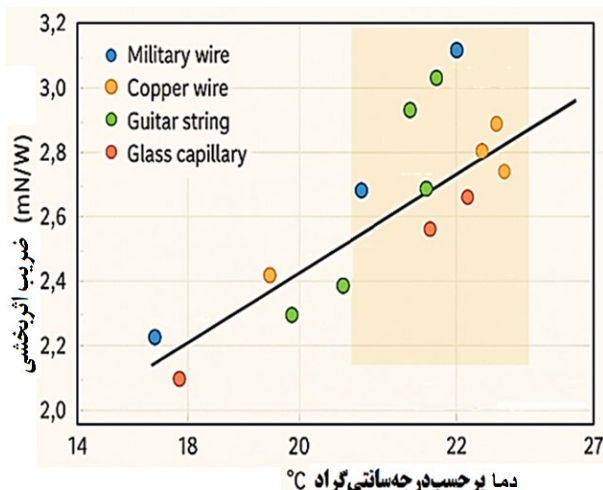
در شکل (۱۱)، نمودار راندمان برحسب جریان الکتریکی نشان داده شده است. بهینه‌سازی سیستم برای کار در محدوده ولتاژ KV ۳۰ تا ۳۴ می‌تواند منجر به راندمان بالاتری شود. بررسی دقیق‌تر عوامل مؤثر در ولتاژهای بالا می‌تواند به بهبود عملکرد در این شرایط کمک کند. آزمایش ردیف ۲۸ با ولتاژ ۳۱/۵ KV، بالاترین راندمان را با مقدار ۳/۱۴۱ mN/w داشته است. در ردیف‌های آزمایش با ولتاژهای پایین‌تر، راندمان‌های پایینی ثبت گردید.



شکل (۱۱): تغییرات راندمان برحسب جریان الکتریکی

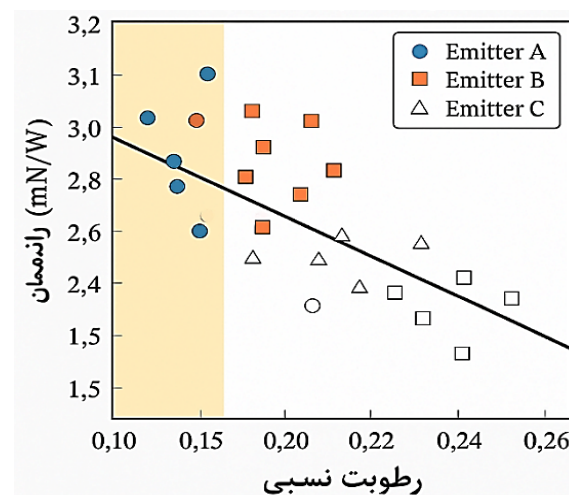
۴-۵- نقش دما و رطوبت

در شکل (۱۳)، نمودار تغییرات راندمان برحسب دما و نوع الکتروود ساطع کننده نشان داده شده است. افزایش دما معمولاً باعث بهبود نسبی راندمان شده است. همچنین رطوبت خیلی پایین (۰/۱۰ تا ۰/۱۲) بیشتر از مقدار متوسط کارایی ایجاد می کند، ولی افراط در کاهش یا افزایش می تواند منجر به بی ثباتی شود.



شکل (۱۳): تغییرات راندمان برحسب نوع الکتروود ساطع و دما

در شکل (۱۴)، نمودار ضریب اثربخشی برحسب رطوبت هوا را نشان می دهد. بیشترین راندمان معمولاً در رطوبت های ۰/۱۰-۰/۱۲ به دست آمده است. افزایش رطوبت به بالای ۰/۲۰ غالباً منجر افت راندمان شده است. در صورتی که در رطوبت متوسط (۰/۱۷-۰/۱۵) عملکرد مطلوب تری به ثبت است. نتایج در بسیاری از آزمایش ها نشان می دهد که با عبور از آستانه توان w ۱۵، ضریب اثربخشی به نقطه بهینه میل می کند. توان های کمتر (کمتر از ۱۲w) عموماً با ضریب اثربخشی کمتری همراه بوده است.



شکل (۱۴): تغییرات راندمان برحسب رطوبت

۶- نتیجه گیری

هدف این پژوهش، تحلیل تجربی عوامل کلیدی مؤثر بر راندمان پیشرانش پلاسمایی کرونا با استفاده از ۵۰ مجموعه داده آزمایشگاهی بوده است. نتایج نشان داد که پارامترهای الکتریکی، هندسی و محیطی به طور قابل توجهی بر ضریب اثربخشی تأثیر دارند. در دما و رطوبت کنترل شده، با انتخاب الکتروودهای ساطع از جنس استیل ضدزنگ و الکتروودهای جاذب از جنس فویل نازک (آلومینیومی) در بازه ولتاژ ۳۰ تا ۳۴ Kv در فواصل ۴ تا ۵ سانتی متر، بیشترین راندمان ثبت گردید.

در ولتاژ ۳۱/۵ Kv و جریان ۰/۵ mA بیشترین میزان راندمان ثبت گردید که مقدار آن ۳/۱۴ میلی نیوتن پروات بود. افزایش فاصله الکتروودها از ۴ به ۵ سانتی متر، موجب بهبود راندمان به میزان ۱۵٪ گردید، در حالی که رطوبت بالا (بیش از ۰/۲۰) منجر به کاهش راندمان تا ۲۰٪ شد.

ساختار الکتروود ساطع، فاصله و نوع الکتروود جاذب، در کنار پارامترهای الکتریکی ولتاژ و جریان، راندمان را تنظیم و بهینه می کنند. اما پارامتر محیطی و نوع سیم ها نیز سهم عمده ای دارند. افزایش زیاد ولتاژ یا کاهش بیش از حد فاصله، همواره مفید نیست و گاهی به پدیده های ناپایدار منجر می شود.

نتایج این آزمایش ها نشان می دهند که طراحی دقیق و انتخاب بهینه مواد و هندسه در سامانه های پیشرانش پلاسمای تأثیر بسزایی بر عملکرد آن ها دارد. این تحلیل می تواند به عنوان مبنای محکمی جهت بررسی دقیق راندمان (ضریب اثربخشی) برای پیشرفت های آینده در پروژه های پیشرانش پلاسمای مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، ادامه ی آزمایش ها با شرایط مختلف می تواند به درک بهتر تأثیر ویژگی های مواد و طراحی ها بر کارایی نهایی این سامانه ها کمک نماید. برای پژوهش های بعدی پیشنهاد می شود که آزمایش های تجربی در محدوده دما و رطوبت بالاتر جهت بررسی مواد نوین برای الکتروودهای ساطع و جاذب صورت گیرد.

۷- مراجع

- [1] Christenson, E. A., & Moller, P. S. (1967). Ion-neutral propulsion in atmospheric media. *AIAA Journal*, 5(10), 1768–1773. DOI 10.2514/3.4307
- [2] Davis J L, Hoburg J F. Wire-Duct Precipitator Field and Charge Computation Using Finite Element and Characteristics Methods. *Journal of Electrostatics*, 1983; 14:2:187–199. DOI 10.1016/S0304-3886(96)00031-9
- [3] Javadi H, Farzaneh M, Measuring of Corona Discharge Inception Voltage to Determine Electric Field over the nonhomogenous Electrodes in the Air Insulation, 19th International Power System Conference, 2004. (in Persian)
- [4] Jewell-Larsen N E, Karpov S V, Krichtafovitch I A, Vivi Jayanty, Hsu C P, Mamishev A V. Modeling of Corona- Induced

- Electrohydrodynamic Flow with COMSOL Multiphysics. Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics, Paper E1, 2008 DOI 10.1016/j.elstat.2020.103446
- [5] Wilson J, Perkins H D, and Thompson W K. An Investigation of Ionic Wind Propulsion. No. NASA/TM- 2009-215822. 2009. DOI 10.1109/ ICHVE49031.2020.9279492
- [6] Colas D F, Ferret A, Pai D Z, Lacoste D A, Laux C O, Ion Wind Generation by a Wire-Cylinder-Plate Corona Discharge in Air at Atmospheric Pressure. Journal of Applied Physics. 2010; 108:10; 1-6. DOI 10.1063/1.3514131
- [7] Kachi M, Dascalescu L, Corona Discharge in Asymmetric Electrode Configurations, Journal of Electrostatics, 2014; 72:6-12 DOI 10.1016/j.elstat.2013.11.001
- [8] Moreau E, Benard N, Alicalapa F, Douyère A, Electrohydrodynamic Force Produced by a Corona Discharge Between a Wire Active Electrode And Several Cylinder Electrodes. Application to Electric Propulsion. Journal of Electrostatics, 2015; 76:194-200. DOI 10.1016/j.elstat.2015.05.025
- [9] Wang W, Yang L, Wu K, Lin C, Huo P, Liu S, Huang D, Lin M. Regulation-Controlling of Boundary Layer by Multi- Wire-to-Cylinder Negative Corona Discharge. Applied Thermal Engineering, 2017; 119:438-448. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.092
- [10] XU H, He Y, Kieran L S, Christopher K G, Sean P K, Cooper C H, Sebastian T, Mark R W, David J P, & Steven R B. Flight of an Aeroplane with Solid-State Propulsion. Nature, 2018; 563. DOI 10.1038/s41586-018-0707-9
- [11] Drew D S, et al. Toward Controlled Flight of the Ionocraft: a Flying Microrobot Using Electrohydrodynamic Thrust with Onboard Sensing and No Moving Parts. IEEE Robotics and Automation Letters 3.4, 2018:2807-2813. DOI 10.1109/LRA.2018.2844461
- [12] Shintaro S, et al. Successively Accelerated Ionic Wind with Integrated Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator for Low-Voltage Operation. Scientific reports 9.1, 2019: 1-11. DOI 10.1038/s41598-019-42284-w
- [13] Cogollo M, Balsalobre P, Lantada A, Puage H, Design and Experimental Evaluation of Innovative Wire-to-Plane Fins' Configuration for Atmosphere Corona-Discharge Cooling Devices, Journal of Applied Science, 2020; 10, 1010: 1-15. DOI 10.3390/app10031010
- [14] Gu L, Tan W, Jiang Z, Chen X, Ren W, Jin Z, Relationship between Corona Discharge Thrust and Applied Voltage's Polarity, Journal of Energies, 2023; 16:1-11. DOI 10.3390/en16145257
- [15] Fathi A, Mehdi Ahangar, M. Numerical simulation of corona discharge regime created by cylinder wire configuration under atmospheric conditions, Journal of Mechanical Engineering, Modares, 2018, Vol. 18, No. 2, pp. 32-323(in Persian) dor:20.1001.1.10275940.1397.18.2.5.3
- [16] Fathi A, Ahangar, Plasma flow modeling in an electrohydrodynamic thruster, Second, Section Quarterly Scientific Research Journal of Space Science and Technology 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 1-10 DOI 10.30699/jsst.2019.82177 (in Persian)
- [17] Aghaei Malekabadi, Khoshkhor, Soltani Ahmadi H, Numerical simulation of corona discharge regime in cylinder wire configuration under atmospheric conditions, Journal of Aerospace Science and Technology 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 18-36 (in Persian)
- [18] Ahmadi, H.; Soltani, M. Investigation of electrohydrodynamic flow in corona discharge systems. J. Aerosp. Sci. Technol. Imam Hossein Univ., 2019, 12(1), 45-56 (In Persian). dor:20.1001.1.26762935.1398.12.1.3.2