

ISSN: 2821-157X		https://www.jasd.khadu.ir	
	Journal of Aerospace Defense Volume 4 Issue 1 Spring2025 Pages 102-120		
Research Paper; 			
Enhancing the Performance of Corona Plasma Propulsion by Replacing Linear Electrode Configuration with Nonlinear Geometries for Aerospace Applications ,Seyyed Abolfazl Mousavi¹, Farshad Pazuki², Seyyed Hossein Sadati³, Ruhollah Khoshkho⁴ 1. Islamic Azad University, Science and Research Branch 2. Islamic Azad University, Science and Research Branch 3. Malek Ashtar University of Technology 4. Assistant Professor, Aerospace Engineering, Aerodynamics Department, Mechanics University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Iran			
Article Information		Abstract	
Accepted: 2025/05/26 Received: 2025/03/19 Keywords: Corona Plasma, Propulsion, Thrust, Efficiency, Geometric Configuration Corresponding Author: Seyd Abolfazl Mousavi Email: seyedabolfazl.mousav i@iau.ac.ir		One of the emerging technologies in the field of plasma propulsion that has recently attracted attention is corona plasma propulsion systems. These systems generate ion flow and thrust force through electrical discharge between emitter and collector electrodes, utilizing a high-voltage power supply. In most previous studies, a linear configuration has been used to analyze the performance of these systems. The present study aims to enhance the performance of corona plasma propulsion systems through the geometric redesign of electrodes. To improve the performance of corona plasma propulsion systems for aerospace applications, new geometric configurations for the emitter electrodes—such as triangular and hexagonal structures—have been proposed and investigated. This research includes a systematic analysis of plasma propulsion design parameters and the effect of electrode geometry on system performance, using both experimental data and software modeling. Experimental tests were conducted at high voltages up to 33 kilovolts, with thrust measurements taken with an accuracy of ± 0.2 millinewtons per meter, using copper and aluminum electrodes. The experimental results from the linear structure and the modeling of geometric configurations indicate that non-linear arrangements—particularly the hexagonal configuration—demonstrate better performance due to radial symmetry and a more uniform distribution of the electric field. The hexagonal arrangement of emitter electrodes improved thrust by up to 49% and efficiency by up to 11% compared to the conventional linear configuration.	
HOW TO CITE: S. A.Seyyed Abolfazl Mousavi. (2025). Increasing Plasma Propulsion Performance by Changing the Linear Configuration of Electrodes to Other Geometric Structure. <i>Journal of Aerospace Defense</i>, Vol 4(Issue1), Page 102–120			



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

دوره ۴ شماره ۱
بهار ۱۴۰۴
صفحات ۱۲۰ - ۱۰۲



مقاله پژوهشی؛ doi

افزایش عملکرد پیشرانش پلاسمای کرونا

با تغییر پیکربندی خطی الکترودها با هندسه‌های غیر خطی برای کاربردهای هوافضایی

سید ابوالفضل موسوی^۱، فرشاد بازوکی^۲، سید حسین ساداتی^۳، روح اله خوشخو^۴^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات^۲ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات^۳ دانشگاه صنعتی مالک اشتر^۴ استادیار، مهندسی هوافضا، گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۰۵

کلیدواژه‌ها:

پلاسمای کرونا، پیشرانش،
تراست، راندمان، پیکربندی
هندسی

نویسنده مسئول:

سید ابوالفضل موسوی

ایمیل:

seyedabolfazl.mousavi@iauc.ac.ir

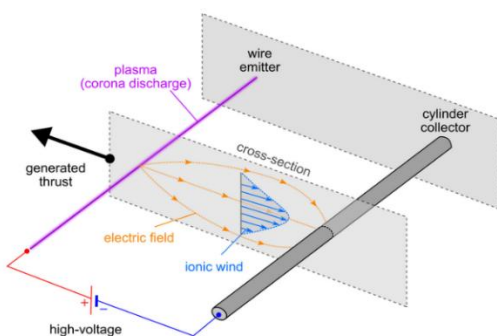
یکی از فناوری‌های نوین در حوزه پیشرانش پلاسمایی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته، پیشرانش‌های پلاسمای کرونا هستند. این سامانه‌ها با استفاده از تخلیه الکتریکی بین الکترودهای ساطع و جاذب و بهره‌گیری از منبع تغذیه ولتاژ بالا، جریان یونی و نیروی پیشران تولید می‌کنند. در اغلب پژوهش‌های پیشین، از پیکربندی خطی برای تحلیل عملکرد این سامانه‌ها استفاده شده است. پژوهش حاضر با هدف بهبود عملکرد سامانه پیشرانش پلاسمای کرونا، از طریق بازطراحی هندسی الکترودها انجام شده است. در این تحقیق، با هدف بهبود عملکرد سامانه‌های پیشرانش پلاسمای کرونا برای کاربردهای هوافضایی، پیکربندی‌های هندسی جدیدی برای الکترودهای ساطع نظیر ساختارهای مثلثی و شش ضلعی پیشنهاد و بررسی شده‌اند. در این تحقیق، تحلیل سیستماتیک پارامترهای طراحی پیشرانش پلاسمایی و تأثیر هندسه الکترودها بر عملکرد سیستم، با استفاده از داده‌های تجربی و مدل‌سازی نرم‌افزاری انجام شده است. آزمایش‌های تجربی در ولتاژهای بالا تا ولتاژ ۳۳ کیلوولت و با دقت اندازه‌گیری تراست ± 0.2 میلی نیوتن بر متر با استفاده از الکترودهای مسی و آلومینیومی صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌های تجربی در ساختار خطی و مدل‌سازی در پیکربندی‌های هندسی نشان می‌دهد که آرایش‌های غیرخطی، به‌ویژه شش ضلعی، به دلیل تقارن شعاعی و توزیع یکنواخت‌تر میدان الکتریکی، عملکرد بهتری دارند. آرایش شش ضلعی الکترودهای ساطع نسبت به پیکربندی خطی مرسوم، تراست را تا ۴۹ درصد و راندمان را تا ۱۱ درصد افزایش داده‌اند.

استاد: سید ابوالفضل موسوی (۱۴۰۴). افزایش عملکرد پیشرانش پلاسمای کرونا با تغییر پیکربندی خطی الکترودها با هندسه‌های غیرخطی.. دفاع هوافضایی، دوره ۴ (شماره ۱)، صفحه ۱۲۰ - ۱۰۲.

۱- مقدمه

تولید نیروی پیشران^۱ با استفاده از سامانه‌های پلاسمایی کرونا یکی از فناوری‌های نوین در عرصه پیشران^۲ است که قابلیت به‌کارگیری در حوزه‌های مختلف بخصوص حوزه‌های هوافضایی را داراست. پیشران پلاسمای کرونا مبتنی بر تخلیه الکتریکی در میدان‌های ولتاژ بالا است که منجر به تولید یون‌ها و ایجاد تراست می‌شود. این فناوری به دلیل سادگی ساختار، وزن کم و قابلیت استفاده در کاربردهای فضایی و صنعتی، به شدت مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، عوامل متعددی مانند طراحی الکترودها، مواد استفاده شده، و پارامترهای عملیاتی بر عملکرد سامانه تخلیه کرونا تأثیر می‌گذارند [۱].

طرحواره‌ای از عملگر کرونا با ساختار خطی در شکل ۱ نشان داده شده است. عملگرهای پلاسمای کرونا عملگرهایی هستند که بر پایه تخلیه الکتریکی کرونا می‌باشند. در این نوع عملگر با افزایش اختلاف ولتاژ بین دو الکترود با ضخامت‌های متفاوت تا جایی که قوس الکتریکی رخ ندهد، میدان الکتریکی در اطراف الکترود آند افزایش می‌یابد که به تبع آن گازهای اطراف آند یونیزه شده و پدیده تخلیه کرونا به وجود می‌آید. با به وجود آمدن یک میدان الکتریکی قوی در اطراف الکترود آند، مولکول‌های هوا یونیزه شده و به سمت الکترود کاتد حرکت می‌کنند. برخورد یون‌ها با مولکول‌های خنثی باعث انتقال مومنتم شده و جریان الکتریکی را بین دو الکترود به وجود می‌آورد. همانطور که در شکل ۱ بصورت طرحواره مشاهده می‌شود، یک سیم به عنوان الکترود ساطع^۳ و استوانه آلومینیومی به عنوان الکترود جاذب^۴ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: طرحواره‌ای از عملگر کرونا با ساختار خطی

¹ Thrust Force

² Propulsion

³ Emitter

⁴ Collector

با توسعه روش‌های عددی تحقیق و بررسی جریان الکترو هیدرودینامیک به صورت عددی نیز آغاز شد. در سال ۱۹۸۳ یویس نخستین پژوهش عددی در زمینه 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 الکتروود سیم-سیلندر پرداختند. نتایج نشان داد که میزان میدان الکتریکی وابسته به فاصله بین دو الکتروود و میزان ولتاژ ورودی می‌باشد [۳]. در سال ۲۰۰۸، جول لارسن و همکارانش شبیه‌سازی عددی جریان الکترو هیدرودینامیک را با دقت بالایی انجام دادند. سپس نتایج حاصله را با نتایج تجربی مقایسه شده است. میانگین خطا بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی چهار درصد گزارش شده است [۴].

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

کاجی و همکارش در سال ۲۰۱۴، به بررسی تاثیر قرار گرفتن اشیاء فلزی متقارن در اطراف الکترودها پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در صورت قرارگیری اشیاء فلزی در اطراف الکترودها، میزان ولتاژ آستانه تخلیه کرونا کاهش می‌یابد و میزان جریان الکتریکی افزایش می‌یابد [۷]. موریو در پژوهش تجربی خود در سال ۲۰۱۵، سعی کرد با تغییر تعداد و نحوه-ی چیدمان کاتدها، میزان ضریب اثربخشی^۱ به‌دست‌آمده سیستم پیشران کرونا را افزایش دهد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که با افزایش تعداد الکترودها، نیروی پسای ناشی از کاتد کاهش می‌یابد [۸].

وانگ و همکاران، به‌منظور بهبود عملکرد انتقال گرما با کمک تخلیه کرونا، تأثیر تعداد الکترودهای کاتد و نحوه‌ی قرارگیری آنها را بر روی ضخامت لایه مرزی گرمایی و تغییرات گرادیان‌های سرعت در آن مطالعه کردند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ولتاژ بالاتر و تعداد بیشتر الکتروود سیم (الکتروودساطع) می‌تواند به کاهش ضخامت لایه مرزی گرمایی و افزایش 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 تئوری یک‌بعدی بازده یک پیشران الکتروآیرو دینامیک ایده‌آل 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

^۱ efficiency

بخش‌های متحرک به پرواز درآوردند و ویژگی‌های مختلف آن را بررسی کردند [۱۱].

در سال ۲۰۱۸، 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 [۱۲].

شینتارو و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی تأثیر استفاده از عملگرهای پلاسما 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 را شاهد بود [۱۳].

در سال ۲۰۱۹، فتحی و همکارش، به شبیه‌سازی جریان پلاسما در یک رانشگر الکترو هیدرودینامیک به صورت دو الکتروود کاتد و یک الکتروود آنود پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت افزایش تعداد کاتدها، میزان نیروی پیشران و راندمان افزایش می‌یابد [۱۴].

در سال ۲۰۱۹، آقایی و همکاران به شبیه‌سازی عددی تخلیه کرونا برای پیکربندی سیم-ایرفویل پرداختند؛ و فاصله بین دو الکتروود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزایش هر کیلوولت ولتاژ، میزان نیروی پیشران را ۱۵ درصد افزایش می‌دهد [۱۵].

کولو و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی استفاده از تخلیه کرونا با پیکربندی سیم-صفحه جهت خنک‌کاری در لایه مرزی و انتقال گرما پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که این روش، نسبت به روش‌های متعارف مناسب‌تر و دارای راندمان بالاتر هست [۱۶]. گو و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی تأثیر کروناي مثبت و منفی بر میزان نیروی پیشران پیکربندی صفحه-سوزن پرداختند. نتایج نشان داد که کروناي منفی میزان نیروی پیشران بیشتری در این پیکربندی نسبت به کروناي مثبت تولید می‌کند [۱۷-۱۹].

اسمیت و جونز در سال ۲۰۲۴، بهینه‌سازی پیکربندی‌های ساطع‌کننده‌های پلاسما را با تمرکز بر بهبود توزیع میدان الکتریکی و راندمان یونیزاسیون بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که چیدمان‌های هندسی ساطع‌کننده‌ها، مانند ساختارهای خطی و چندضلعی، به طور قابل توجهی بر نیروی پیشران در سیستم‌های پیشران پلاسما تأثیر می‌گذارند [۲۰].

با توجه به تحقیقات صورت گرفته ساخته شده و فقدان بررسی پیکربندی با بیشترین عملکرد و بهره‌وری، در این تحقیق، به مقایسه ساختار خطی الکتروودها با ساختار مثلثی و شش‌ضلعی الکتروودها پرداخته شد. تا تأثیر هندسی الکتروودها بر میزان ضریب اثربخشی و تراست مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهای آزمایشگاهی شامل ولتاژ، جریان الکتریکی، وزن و نیروی پیشران الکتریکی در کروناي منفی مورد بررسی قرار گرفت. سپس پارامترهای به-دست آمده مقایسه شد، تا ساختار مناسب با بیشترین ضریب اثربخشی و نیروی پیشران مشخص شود.

۲- ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی

ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده به شرح ذیل می‌باشد:

الکترودها: از سیم‌های مسی به طول ۲۰ سانتی متر و ضخامت ۱ میلی‌متر به عنوان الکترودها و از استوانه‌های آلومینیومی توخالی به طول ۲۰ سانتی متر و با قطر ۵ میلی‌متر به عنوان الکترودها مطابق شکل ۲ استفاده شده است.



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

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 کیلوولت و جریان تا ۰/۶ میلی آمپر است. این منبع که به صورت یک دستگاه منفی با ولتاژ ورودی ۱۰۰-۲۴۰ ولت، تک فاز، ۵۰-۶۰ هرتز و ولتاژ خروجی ۳۵ کیلوولت و همچنین توان دستگاه ۳۵ وات است، دارای نمایشگر ولتاژ خروجی با دقت دهم کیلوولت (۱۰۰ ولت) و نمایشگر جریان الکتریکی خروجی با دقت هزارم میلی آمپر می‌باشد. میزان توان مصرفی عملکرد پلاسمایی با استفاده از مدار الکتریکی واسطه، که به همین منظور طراحی و در خروجی منبع تغذیه تعبیه شده، اندازه‌گیری می‌شود. یک مقاومت به صورت سری با مدار قرار داده شده تا از آسیب دیدن منبع تغذیه در صورت وقوع جرقه جلوگیری کند.



شکل ۳: منبع تغذیه مستقیم منفی ولتاژ بالا

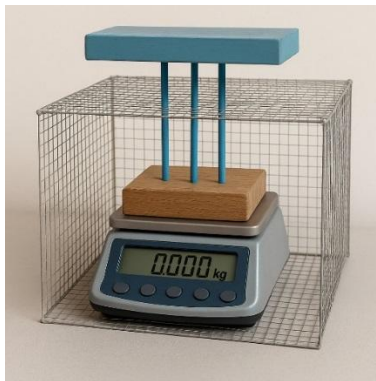
اندازه‌گیری نیروی پیشران تولیدشده به وسیله عملکرد پلاسمایی، پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد آن می‌باشد. برای اندازه‌گیری نیروی پیشران از ترازوی دیجیتالی مدل EK-3200i

با دقت صدم گرم که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری 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 تاثیر امواج الکترومغناطیسی به ترازو و ایجاد اختلال در اندازه‌گیری و آسیب به دستگاه ساخته شد. برای به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیس ناشی از عملکرد منبع تغذیه و ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً تجهیزات اندازه‌گیری و داده‌برداری، از کابل‌های دارای پوشش محافظ الکتریکی استفاده شده است. همچنین رعایت حفظ فاصله حداکثری بین منبع تغذیه و ابزارهای اندازه‌گیری در طول آزمایش، مدنظر قرار گرفت.



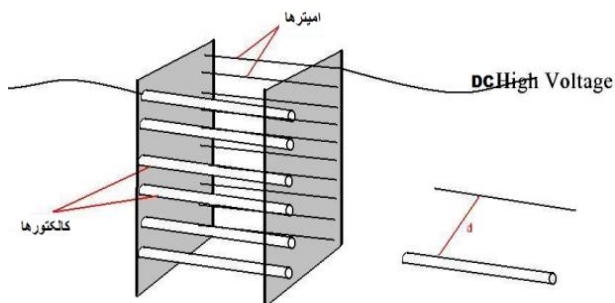
شکل ۵: ترازوی دیجیتال و کفه‌ی اندازه‌گیری داخل قفس فارادی

از اسیلوسکوپ که در شکل ۶ نمایش داده شده است، برای مشاهده شکل موج‌ها و اندازه‌گیری ولتاژ، زمان تناوب، اختلاف فاز استفاده گردید.

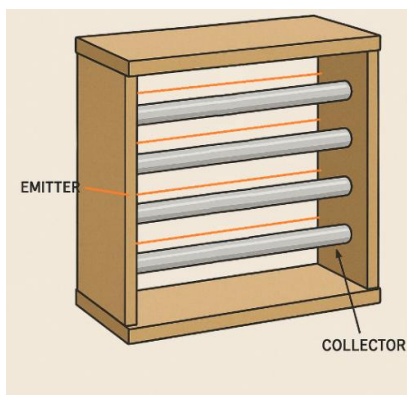


شکل ۶: اسیلوسکوپ مورد استفاده

الکترودهای ساطع و جاذب در کانالی که توسط پرینتر سه بعدی ساخته شده مطابق شکل ۷ در ساختار خطی، موازی هم بصورتی که فواصل بین الکترودها قابل تغییر و تنظیم باشد قرار گرفته اند. در جدول ۱، تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌ها و میزان دقت هر یک بیان شده است.



شکل ۷: طرحواره پيشرانش پلاسمایی با ساختار خطی



شکل ۸: پيشرانش پلاسمایی (ساخته شده با پرینتر سه بعدی)

جدول ۱: میزان دقت تجهیزات استفاده شده

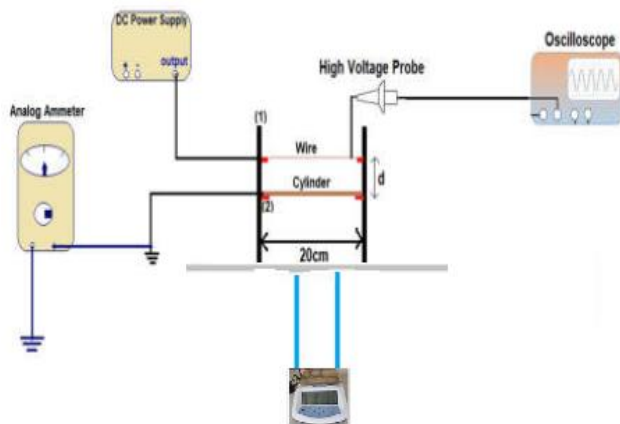
دستگاه		دقت
منبع تغذیه	ولتاژ	0.1 kv
	جریان	0.001 mA
ترازو		0.01 gr
اسیلوسکوپ		۳٪ (خطای نسبی در خوانش ولتاژ و زمان تناوب)

۳-روش انجام آزمایش

برای انجام این پژوهش، ابتدا آزمایش‌هایی با ساختار خطی انجام شد. داده‌های تجربی نظیر نیروی تراست و راندمان (ضریب اثربخشی) با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری دقیق ثبت شدند. سپس، با استفاده از روابط فیزیکی حاکم بر پلاسما و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری، عملکرد ساختارهای هندسی (مثلی با سه الکترودهای ساطع و شش ضلعی با شش الکترودهای ساطع) تخمین زده شد. متغیرهای کلیدی مانند تعداد الکترودهای ساطع، فاصله بین الکترودها، ولتاژ اعمال شده و جنس الکترودها در نظر گرفته شدند. تحلیل‌ها بر اساس اصول فیزیک پلاسما و دینامیک میدان الکتریکی انجام شد. آزمایش‌ها بر روی پیشران‌های پلاسمای کروم با ساختار متداول خطی (الکترودهای موازی) در شرایط دمای اتاق و فشار اتمسفر انجام شدند. مراحل انجام آزمایش به شرح زیر است:

الکترودهای ساطع و جاذب مطابق طرحواره شکل ۷ در فواصل مشخص بصورت موازی با یکدیگر (ساختار خطی) تنظیم شدند. این الکترودها مطابق شکل ۸ در داخل یک محفظه پیشران (کانال) که توسط پریتترسه بعدی ساخته شده است، قرار داده شدند. منبع تغذیه روشن شده و ولتاژ به تدریج افزایش داده شد. میزان جریان الکتریکی و نیروی پیشران (با استفاده از ترازو) برای هر ولتاژ ثبت شد.

این مراحل برای فواصل مختلف الکترودها که به صورت خطی و موازی باهم قرار گرفته اند، تکرار شد. نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی محاسبه شد. نحوه اتصال منبع تغذیه به الکترودها و همچنین اندازه‌گیری نیروی تراست توسط ترازوی دیجیتال در شکل ۹ نمایش داده شده است.



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

فرایند تولید و شتابدهی یون‌ها و برخورد آن‌ها با مولکول‌های خنثی در هوا باعث ایجاد جریان بادی موسوم به بادپونی می‌شود. برخورد جریان هوای تولید شده با الکترودهای جاذب که همان استوانه‌های آلومینیومی هستند طبق قانون سوم نیوتن منجر به ایجاد نیروی پیشران می‌شود. از آنجایی که نیروی تراست تولید شده در جهت مخالف جریان باد و به سمت ترازوی دیجیتالی می‌باشد، با مشاهده تغییرات صفحه نمایش ترازو و ثبت وزن نشان داده شده، میزان تراست تولید شده در آزمایش به واحد گرم قابل اندازه‌گیری است.

۴- آزمایش‌های صورت گرفته در ساختار خطی

در آزمایش‌های انجام شده در ساختار خطی، برای به دست آوردن تراست و ضریب اثربخشی، داده‌های مختلفی جمع‌آوری شد. این آزمایش‌ها شامل موارد مختلفی از قبیل تعداد الکترودهای ساطع، میزان ولتاژ، میزان جریان الکتریکی و فاصله بین الکترودهای ساطع و الکترودهای جاذب بود. اختلاف در برخی نتایج بدست آمده بدلیل اختلاف در شرایط محیطی و یا خطای کاربر می‌باشد که با میانگین‌گیری از آنها و حذف نتایج غیرقابل قبول، نتایج مناسبی بدست آمد. صرفاً جهت مشاهده، تعداد کمی از نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: برخی نتایج آزمایش‌های تجربی ساختارخطی با سه الکتروودساطع و سه الکتروودجاذب

فاصله cm	ولتاژ KV	جریان mA	قدرت W	تراست gr
۵	۲۹/۶	۰/۵۴	۱۵/۹۸	۳/۴۶
۴	۲۹/۳	۰/۵۵	۱۶/۱۱	۳/۳۸
۵	۳۱/۰	۰/۴۶	۱۵/۱۸	۴/۳۵
۴	۳۱/۱	۰/۵۵	۱۵/۵۰	۳/۴۰
۵	۳۰/۸	۰/۴۸	۱۴/۷۰	۳/۵۸
۵	۲۹/۸	۰/۵۱	۱۵/۲۰	۴/۰۰

تراست: در ساختار خطی با سه الکتروود بیشترین مقدار تراست ۴/۲۷ گرم (۴۱/۸۹ میلی‌نیوتن) مربوط به آزمایش با الکتروودجاذب ورق‌های نازک آلومینیوم بود. این نشان می‌دهد که نوع الکتروودجاذب می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد سیستم داشته باشد.

ضریب اثربخشی: در ساختار خطی با سه الکتروود ساطع، حداکثر ضریب اثربخشی ۲/۸۹ میلی‌نیوتن بر وات مشاهده شد.

تأثیر فاصله بین الکتروودها: فاصله ۵ سانتی‌متری در بیشتر آزمایش‌ها به عنوان فاصله ایده‌آل مشخص شده است. در مورد آزمایش‌هایی با فاصله‌های دیگر (کوتاه‌تر یا بلندتر)، عملکرد آن‌ها قابل قبول نبوده و در برخی موارد، کاهش تراست مشاهده شده است.

نکات تجربی: جزئیات توضیحات آزمایش‌ها نشان می‌دهند که تغییرات در اتصالات و نوع مواد استفاده شده تأثیر زیادی بر نتیجه نهایی دارند. به عنوان مثال، استفاده از اتصالات مستحکم‌تر و کوتاه‌تر به نتایج بهتری می‌انجامد.

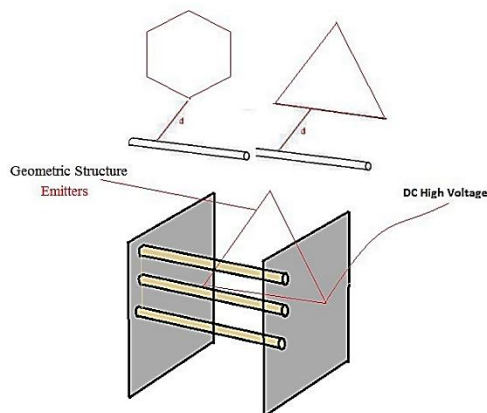
پس از انجام آزمایش‌ها برای فواصل مختلف الکتروودها در پیکربندی خطی و ثبت نتایج بدست آمده و تحلیل و بررسی و بهینه‌سازی داده‌ها، در نهایت، شبیه‌سازی چیدمان و آرایش الکتروودها در پیکربندی‌های هندسی مطابق شکل ۱۰ صورت گرفت و نتایج حاصله مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. از مدل‌ها و روابط ریاضی اساسی پیش‌رانش پلاسما در شبیه‌سازی استفاده شد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

شبیه‌سازی‌های عددی این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار COMSOL برای تحلیل عملکرد پیش‌رانش پلاسمای کرونا در پیکربندی‌های هندسی مثلثی، و شش‌ضلعی انجام شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، از ماژول‌های Electrostatics برای مدل‌سازی میدان الکتریکی و Plasma Module برای شبیه‌سازی تخلیه الکتریکی و دینامیک پلاسما استفاده شد. هندسه‌ها با بهره‌گیری از تقارن محوری برای کاهش هزینه محاسباتی آماده شدند و شبکه‌بندی با دقت بالا (۰/۱ میلی‌متر در لایه مرزی پلاسما) اعمال شد. پارامترهای کلیدی شبیه‌سازی، از جمله ولتاژ ۳۳ کیلوولت، جریان ۰/۴۶ میلی‌آمپر، و ضخامت لایه مرزی ۰/۵

میلی‌متر، بر اساس داده‌های تجربی در جدول ۳ تنظیم شدند. حلگر غیرخطی مبتنی بر روش نیوتن-رافسون با معیار همگرایی خطای نسبی 10^{-6} به کار رفت. شبیه‌سازی، که با داده‌های تجربی با انحراف نسبی حدود ۶ درصد اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان‌دهنده بهبود ۲۰ درصد تراست در آرایش مثلثی و ۴۹ درصد در آرایش شش ضلعی نسبت به ساختار خطی است، که عمدتاً به دلیل تقارن شعاعی و توزیع یکنواخت‌تر میدان الکتریکی است.

جدول ۳: پارامترهای شبیه‌سازی نرم‌افزاری

پارامتر	مقدار
اندازه شبکه	۰/۱ میلی‌متر (لایه مرزی پلاسما) ۱ میلی‌متر (نواحی دورتر)
نوع حلگر	غیرخطی، روش نیوتن-رافسون
معیار همگرایی	خطای نسبی 10^{-6}
ضخامت لایه مرزی	۰/۵ میلی‌متر
تقارن	تقارن محوری برای کاهش هزینه محاسباتی



شکل ۱۰: طرحواره پیشراش پلاسمایی در شبیه‌سازی ساختار هندسی

۵- فرمول‌ها و روابط

فرمول‌ها و روابط زیر بنیان نظری تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته را تشکیل می‌دهند و به صورت کمی بهبودهای مشاهده شده در آرایش‌های هندسی پیشرفته را نشان می‌دهد. قانون گاوس برای توزیع میدان الکتریکی بصورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho \quad (۱)$$

که در آن ϵ_0 گذردهی خلا ($8.85 \times 10^{-12} F/m$) و ϵ_r ثابت دی الکتریک نسبی و E شدت میدان الکتریکی و ρ چگالی بار فضایی است. رابطه (۲) تولید تراست براساس نیروی کولن را نشان می دهد.

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

که در آن A سطح موثر الکترودها و d فاصله بین الکترودها و V ولتاژ اعمالی و C_g ضریب هندسی و γ_m راندمان مواد (الکترودهای مسی و آلومینیومی) است.

$$J = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (3)$$

که در آن J چگالی جریان و m_i جرم یون می باشد. و همچنین ضریب تمرکز میدان برای الکترودهای ساطعی شش ضلعی که از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\beta_{hex} = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \ln \left(\frac{2R}{r} \right) \quad (4)$$

که در آن R و r شعاع آرایش شش ضلعی و شعاع الکترودهای ساطع است. توان الکتریکی از معادله (۵) محاسبه می شود.

$$P = V \times I \quad (5)$$

در رابطه فوق، P نشان دهنده توان الکتریکی مصرف شده، I نشان دهنده جریان الکتریکی و V میزان ولتاژ است. همچنین، راندمان الکتریکی یا در حقیقت، ضریب اثربخشی (η) با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$\eta = \frac{T}{P} \quad (6)$$

که در آن T نیروی پیشران و P میزان توان مصرفی است. شبیه سازی با آماده سازی هندسه متناسب با داده های تجربی، مدل سازی چندمقیاسی که بر اساس ایجاد هندسه سه بعدی مبتنی بر داده های تجربی و استفاده از تقارن محوری برای کاهش هزینه محاسباتی مطابق با مشاهدات تجربی در ساختار خطی و با استفاده از ماژول های مورد نیاز برای میدان الکتریکی و مدل سازی تخلیه الکتریکی صورت گرفت.

۶- شبیه سازی و بیان نتایج

ساختار هندسی مثلی الکترودهای ساطع

در این پیکربندی سه الکتروود الکتروود ساطع که جنس الکترودهای ساطع و الکترودهای جاذب مطابق آزمایش ها در ساختار خطی است، تشکیل یک مثلث متساوی الاضلاع را می دهند. مرکز مثلث بر مرکز محفظه پیشران منطبق است ولتاژ ۳۳ کیلوولت و جریان ۰/۴۶

میلی‌آمپر مشابه بخش‌های قبلی برای اطمینان از مقایسه اعمال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در هندسه مثلثی الکترودهای ساطع افزایش ۲۰ درصدی تولید نیروی تراست در پیشران‌ش پلاسمای را نشان می‌دهد. با توجه به توزیع بهتر میدان الکتریکی و افزایش سطح فعال الکترودها، این طراحی بهینه‌تر از طراحی خطی خواهد بود.

ساختار نوین شش‌ضلعی الکترودهای ساطع

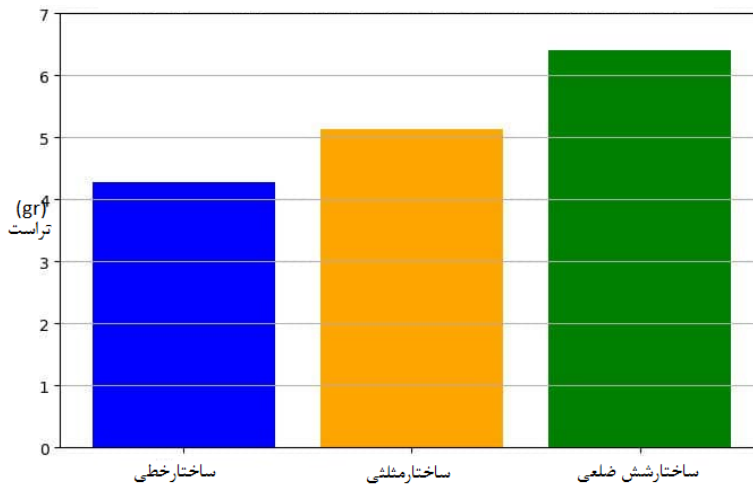
در این ساختار، الکترودهای ساطع به شکل یک شش‌ضلعی منظم که طول هر ضلع آن ۱۰ سانتی‌متر است، قرار می‌گیرند. به جهت حفظ تقارن، مرکز شش‌ضلعی بر مرکز محفظه پیشران‌ش منطبق است. این چیدمان به دلیل تقارن شعاعی بالا، میدان الکتریکی را به طور یکنواخت‌تری در مرکز تقویت می‌کند. این تقارن می‌تواند توزیع یون‌ها را بهبود بخشد و در نتیجه نیروی پیشران را افزایش می‌دهد.

در تحلیل میدان الکتریکی در ساختار شش‌ضلعی می‌توان گفت میدان الکتریکی از هر الکترودهای ساطع به سمت الکترودهای جاذب هدایت می‌شود. تقارن شش‌ضلعی باعث ایجاد تداخل‌های سازنده در مرکز می‌شود که چگالی یون‌ها را افزایش می‌دهد. این ویژگی می‌تواند رانش را نسبت به ساختارهای دیگر (مانند خطی و مثلثی) بهبود بخشد، اما ممکن است به دلیل پیچیدگی میدان، مصرف انرژی نیز بیشتر شود.

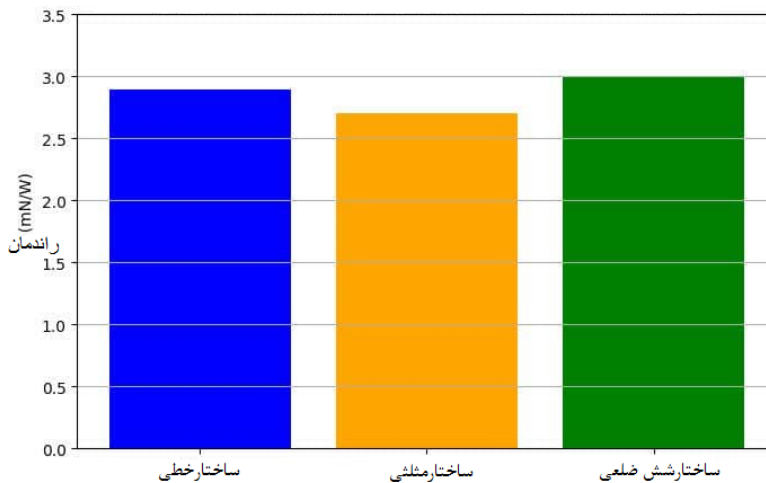
از مزایای استفاده از آرایش شش‌ضلعی می‌توان به افزایش رانش به دلیل تقارن بیشتر و چگالی بالاتر یون‌ها و نیز بهبود نسبی راندمان نسبت به ساختار مثلثی اشاره کرد. افزایش مصرف انرژی به دلیل تعداد بیشتر الکترودهای ساطع و پیچیده‌تر شدن ساخت و احتمال تداخل‌های ناخواسته در میدان الکتریکی از معایب این آرایش به حساب می‌آیند. نتایج بدست آمده در جدول ۳ و نمودارهای ۱۱ و ۱۲ بصورت مقایسه ساختار خطی و هندسی (مثلثی و شش‌ضلعی) قابل مشاهده می‌باشد. ساختار مثلثی الکترودهای ساطع نسبت به ساختار خطی و نیز پیکربندی شش‌ضلعی نسبت به هر دو آرایش مثلثی و خطی نیروی پیشران بیشتری تولید می‌کند.

جدول ۴: مقایسه تراست تولیدی در سه ساختار مختلف

راندمان ($\frac{mN}{W}$)	تراست (mN)	تراست (gr)	تعداد الکترودهای ساطع	پیکربندی الکترودهای ساطع
۲/۸	۴۱/۸۹	۴/۲۷۰	۳	خطی
۲/۷	۵۰/۲۸	۵/۱۲۴	۳	مثلثی
۳	۶۲/۸۳	۶/۴۰۵	۶	شش‌ضلعی



شکل ۱۱: مقایسه تراست در پیکربندی‌های مختلف



شکل ۱۲: مقایسه راندمان در پیکربندی‌های مختلف

ضریب اثربخشی (راندمان) شش ضلعی نیز با میزان حدود ۳ میلی نیوتن بر وات، تقریباً ۱۱ درصد نسبت به ساختار مثلثی افزایش داشته است. ضریب اثربخشی ساختار مثلثی با ۲/۷ میلی نیوتن بر وات کمتر از ساختار خطی با ۲/۸۹ میلی نیوتن بر وات است. این نتایج نشان دهنده پتانسیل بالای ساختار شش ضلعی برای افزایش رانش و حفظ راندمان در پیشران‌های پلاسما می‌کرونا است. با این حال، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، انجام آزمایش‌های تجربی ضروری است.

۷-تشریح و قدردانی

به پاس الطاف بی‌دریغ و همت والایان، صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را تقدیم می‌دارم و قدردان بزرگواری و فضل شما هستم.

۸-تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۹-دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۱۰-نتیجه گیری

نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که طراحی دقیق و انتخاب بهینه مواد و هندسه در سیستم‌های پیشران‌ش پلاسمای تأثیر بسزایی بر عملکرد آن‌ها دارد. این تحلیل می‌تواند به عنوان مبنای محکمی برای پیشرفت‌های آینده در پروژه‌های پیشران‌ش پلاسمای مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، ادامه‌ی آزمایش‌های با شرایط مختلف می‌تواند به درک بهتر تأثیر ویژگی‌های مواد و طراحی‌ها بر کارایی نهایی سامانه پیشران کرونا کمک نماید.

در این پژوهش به بررسی پارامترهای طراحی پیشران‌ش پلاسمایی و نقش طراحی هندسی الکترودها خصوصاً الکترودهای ساطع در بهبود عملکرد سیستم‌های پیشران‌ش پلاسمایی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی متعدد در ساختار خطی و همچنین شبیه‌سازی‌های نرم افزاری پرداخته شد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که طراحی هندسی الکترودها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم‌های پیشران‌ش پلاسمای کرونا دارد. آرایش‌های غیرخطی، به‌ویژه ساختار شش ضلعی با ۶ الکترودهای ساطع، تراست را تا ۶۲/۸۳ میلی‌نیوتن (افزایش ۴۹ درصد نسبت به ساختار خطی) و راندمان را تا ۳ میلی‌نیوتن بر وات (افزایش ۱۱ درصد نسبت به ساختار مثلثی) بهبود داده است. این بهبود به دلیل تقارن شعاعی بالاتر و توزیع یکنواخت‌تر میدان الکتریکی در ساختار شش ضلعی است، که چگالی یون‌ها را افزایش می‌دهد.

این فناوری می‌تواند در کاربردهای نظامی و هوافضایی، مانند پیشران‌ش نانوماهورها و به‌عنوان پیشران در پهناده‌ها، در رفع مشکلات مربوط به وزن و مصرف انرژی کارساز باشد.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، هندسه‌های فراکتال یا لانه‌زنبوری برای توزیع بهینه‌تر میدان الکتریکی بررسی شوند.

۱۱- فهرست علائم

مساحت مؤثر الکتروود، (m^2)	A
ضریب هندسی برای پیکربندی شش ضلعی	C_g
فاصله الکتروود، (mm)	d
قدرت میدان الکتریکی، (V/m)	E
نیروی پیشران، (mN)	F
جریان، (mA)	I
چگالی جریان، (A/m^2)	J
جرم یون، (kg)	m_i
مصرف توان، (W)	P
نیروی پیشران، (mN)	T
ولتاژ اعمالی، (kV)	V
ضریب تقویت میدان برای ساطع‌کننده‌های شش ضلعی	β_{hex}
گذردهی فضای آزاد، (F/m)	ϵ_0
ثابت دی‌الکتریک نسبی	ϵ_r
راندمان مواد	γ_m
راندمان رانش، (mN/W)	θ
چگالی بار فضایی، (C/m^3)	ρ

۱۲- مراجع

- [1] Christenson, E. A., & Moller, P. S. (1967). Ion-neutral propulsion in atmospheric media. *AIAA Journal*, 5(10), 1768–1773. <https://doi.org/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 nonhomogeneous 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*, 2018 3.4, 2018:2807-2813. **DOI:**10.1109/LRA.2018.2844461

[12] Fathi A, Ahangar M, 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)

[13] 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

[14] Fathi A, Ahangar M, M., 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](https://doi.org/10.30699/jsst.2019.82177) (in Persian)

[15] Aghaei Malek Abadi M, Khoshkhoo R, 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)

[16] 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](https://doi.org/10.3390/app10031010)

[17] Li, T., Chen, K., & Zhao, H. (2020). Influence of electrode spacing on plasma propulsion efficiency. International Journal of Aerospace Engineering, 2020, 789–801. <https://doi.org/10.1155/2020/789801>

[18] Chen, L., Yang, M., & Zhang, F. (2022). Theoretical modeling of ion acceleration in plasma propulsion systems. Aerospace Science and Technology, 140, 567–578. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.03.012>

[19] 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](https://doi.org/10.3390/en16145257)

[20] Smith, J., & Jones, R. (2024). Optimization of plasma emitter configurations. Nature Communications, 15, 1234. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-01234-5>