

بررسی تجربی سه مدل بالا رونده با استفاده از تخلیه کرونا مثبت و منفی

عارف زمانی^۱، روح الله خوشخو^{۲*}، غلامرضا هاشم‌زاده^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲ و ۳- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷)

چکیده

عملگرهای پلازما بخصوص عملگر پلاسمای کرونا به علت توان الکتریکی مصرفی کم، عدم داشتن بخش متحرک، عدم تولید صدا و راندمان بالا و عدم تولید امواج مادون قرمز به عنوان یک سیستم پیشران بسیار مورد توجه دانشمندان و محققان قرار گرفته‌اند. یک نمونه از کاربردهای تخلیه کرونا، ساخت بالارونده (لیفتر) است. در این تحقیق، سه مدل بالارونده مثلثی، مربعی و سه ضلعی با رأس مشترک طراحی و ساخته شد. سپس، پارامترهای توان مصرفی، میزان ضریب اثربخشی و میزان نیروی پیشران تولیدی در تخلیه کرونای مثبت و منفی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد، در هر سه مدل، رابطه بین تغییرات ولتاژ با نیروی پیشران در کرونای مثبت و منفی به صورت تقریباً خطی است و افزایش میزان ولتاژ باعث افزایش نیروی پیشران می‌شود. اما رابطه بین ولتاژ و توان الکتریکی در هر سه مدل در کرونای مثبت و منفی به صورت سهموی شکل است. بیشترین میزان نیروی پیشران در هر دو کرونای مثبت و منفی، به ترتیب مربوط به مدل مربعی و سپس مدل سه ضلعی با رأس مشترک بود. در نهایت، بیشترین میزان ضریب اثربخشی در کرونای مثبت به ترتیب مربوط به مدل مربعی و سپس مدل سه ضلعی با رأس مشترک و در کرونای منفی، به ترتیب مربوط به مدل مربعی و مدل مثلثی است.

کلیدواژه‌ها: بالارونده، طراحی و ساخت، عملگر پلاسمای کرونا، باد یونی

Experimental Study of Three Lifters Using Positive and Negative Corona Discharge

A. Zamani, R. Khoshkhoo*, Gh. Hashemzadeh

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 13/08/2022, Accepted: 17/01/2023)

Abstract

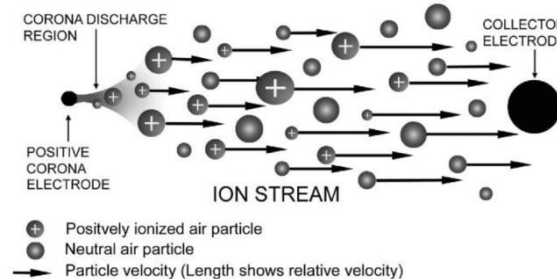
Scientists and researchers have been interested to plasma actuators, especially corona plasma actuators as propulsion system, due to their low power consumption, no moving part, silent, high efficiency and infrared waves. An example of corona discharge applications is lifters. In this research, triangular, square and three sides' with a common vertex models with a common vertex were designed and built. Then, the parameters of electric power, effectiveness coefficient and thrust in the discharge of positive and negative coronas were investigated in the experimental study. The results of the research show that in all three models, the relationship between voltage changes and thrust in positive and negative coronas is almost linear, and increasing the amount of voltage causes an increase thrust. But the relationship between voltage and electric power in all three models in positive and negative coronas is parabolic. The highest amount of thrust in both positive and negative coronas was related to the square model and then the three sides' model with a common vertex. Finally, the highest effectiveness coefficient in the positive corona is related to the square model and then the three sides' model with a common vertex, and in the negative corona, it is related to the square model and the triangular model, respectively.

Keywords: Lifter, Design and Manufacture, Corona Plasma Actuator, Ionic Wind.

۱. مقدمه

یکی از اقسام پیشران که بعد از جنگ جهانی دوم همواره مورد توجه بشر بوده است، استفاده از پیشران‌های پلاسما است. این نمونه از عملگرهای پلاسما به علت داشتن توان مصرفی کم و راندمان بالا مورد توجه دانشمندان و محققان قرار گرفته است. یک نمونه از کاربردهای آن، به‌عنوان بالارونده و یا لیفت‌ر است. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد پیشران پلاسمایی، نسبت نیروی پیشران به توان مصرفی بالای آن نسبت به موتورهای جت و عدم داشتن بخش‌های متحرک است. یک نمونه از پیشران‌های پلاسمایی، استفاده از عملگر پلاسمای کرونا است که از تخلیه الکتریکی جریان برق مستقیم مابین دو الکتروود غیرممتقارن در هوا، باعث تولید ذرات باردار شده و ذرات باردار تحت تأثیر میدان الکتریکی بین دو الکتروود، به سمت الکتروود بزرگ‌تر حرکت کرده و در نتیجه باعث تولید باد یونی و نیروی پیشران بر روی سطح می‌گردد. چگونگی شکل‌گیری باد یونی و پلاسما، به میزان زیادی بسته به هندسه مسئله از جمله نحوه استقرار الکتروودها، ضخامت الکتروودها و فاصله آن‌ها از یکدیگر، شدت و نوع میدان الکتریکی اعمالی به دو الکتروود... دارد [۱].

تخلیه کرونا یک تخلیه الکتریکی موضعی است که به همراه یونیزاسیون هوا در مجاورت الکتروودی با شعاع انحنای کوچک و ولتاژ بالا رخ می‌دهد. برای تخلیه کرونا معمولاً از دو الکتروود، یکی با شعاع انحنای کوچک و دیگری با شعاع انحنای بزرگ مانند سیم و صفحه استفاده می‌شود. شعاع انحنای کوچک تضمین‌کننده تغییرات شدید پتانسیل الکتریکی در اطراف الکتروود است. یونیزه‌شدن هوای مجاور الکتروود به‌صورت ظاهری قطر الکتروود را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب، به شعاع انحنای الکتروود افزوده‌شده و پیشروی فرایند یونیزاسیون متوقف می‌شود. در خارج این ناحیه، ذرات باردار خود را به الکتروود مقابل رسانده و خنثی می‌شوند. ذرات باردار در مسیر حرکت خود به سمت الکتروود مقابل با مولکول‌های خنثی هوا برخورد کرده و با تبادل ممنتوم، جریانی از توده هوا را به نام باد کرونا ایجاد می‌کنند. ولتاژ اعمالی به الکتروود با شعاع انحنای کوچک تعیین‌کننده نوع کرونا است. اگر الکتروود نازک دارای پتانسیل مثبت باشد، تخلیه کرونا مثبت و اگر منفی باشد، تخلیه کرونا منفی نامیده می‌شود. شماتیکی از تخلیه کرونا در شکل (۱) نشان داده شده است [۱].



شکل ۱. شماتیک تخلیه کرونا [۱]

اولین مشاهده جریان الکترو هیدرودینامیک در سال ۱۷۰۹ توسط هاگزبی [۲] صورت گرفت. وی متوجه تولید جریان هوایی با سرعت کم هنگام اعمال ولتاژ بین دو الکتروود شد که بعدها این پدیده توسط نیوتن [۳] "باد الکتریکی" نامیده شد. در اواخر قرن نوزدهم، چتوک [۴] برای نخستین بار باد الکتریکی را به‌صورت کمی مطالعه کرد. در سال ۱۹۵۷ هارنی [۵]، مشخصات الکتریکی تخلیه کرونا و تغییر پارامترهای آیرودینامیکی جریان را برای بررسی میزان نیروی تولیدشده توسط این پدیده بررسی نمود.

سان برون و همکاران [۶] به بررسی اصول فیزیکی حاکم بر عملگر پلاسمای کرونا پرداختند. کارهای تحقیقاتی در زمینه عملگر پلاسمای کرونا توسط کریستنسون و همکاران [۷] انجام گرفت. در این تحقیقات متوجه شدند که میزان تولید پلاسما با مقدار ولتاژ کاربردی برای عملگر متناسب است.

بوندار و باستین [۸] در پژوهش خود با استفاده از سرعت ورودی 50 m/s توانستند میزان ضریب اثربخشی رانشگر را تا $7/5$ درصد بهبود بخشند. در این پژوهش پیشنهاد استفاده از نیروی الکترو هیدرودینامیک در سیستم پیشران کنترلی بالن‌ها و هواپیماهای کوچک با در نظر گرفتن انرژی خورشیدی و سامانه‌های تبدیل انرژی فتوولتائیک (به‌منظور تولید ولتاژ لازم برای شروع تخلیه کرونا) جهت تأمین انرژی لازم نیز مطرح شد.

ویلسون و همکاران [۹]، با حمایت و پشتیبانی ناسا، به بررسی استفاده از عملگر پلاسمای کرونا جهت تولید نیروی پیشران به‌عنوان سیستم پیشران هواپیما اقدام نمودند. آن‌ها توانستند میزان نیروی پیشران ۵ نیوتن بر هر کیلوولت را از عملگر پلاسمای کرونا به دست آورند. بارت و همکارش [۱۰]، شکل‌های مختلفی از عملگر پلاسمای کرونا را جهت ایجاد سامانه پیشران مورد بررسی قراردادند تا بیشترین میزان نیروی پیشران را بر واحد ولتاژ الکتریکی تولید نماید. بارت و همکارش [۱۱]، میزان نیروی پیشران بر واحد حجم را توانستند به میزان معقولی برسانند که قابل‌رقابت با سیستم پیشران متعارف باشد و موفق به طراحی و ساخت یک بالارونده با استفاده از پیشران یونی شدند.

کولاس و همکاران [۱۲]، در یک پیکربندی متشکل از ۵ الکتروود شامل یک آند متصل به ولتاژ مثبت، دو کاتد متصل به زمین و دو کاتد متصل به ولتاژ منفی، رژیم تخلیه کرونا را بهینه‌سازی کردند. آن‌ها سرعت را تا 10 m/s اندازه گرفتند و با استفاده از پروفیل‌های سرعت، نیروی الکترو هیدرودینامیک را تا 350 میلی نیوتن بر واحد طول الکتروود محاسبه نمودند.

کیوسیسی و همکاران [۱۳]، پژوهشی مشابه انجام دادند؛ با این تفاوت که در این پژوهش به مطالعه پارامتریک مشخصه‌های هندسی الکتروودها توجه بیشتری نشان داده شد. تأثیرات تغییر شعاع آند و کاتد و فاصله بین الکتروودها بر نیروی پیشران تولیدی در پژوهش مذکور بررسی شد و یک رابطه خطی بین جریان الکتریکی و نیروی پیشران تولیدی مشاهده گردید. سرعت

معیار استفاده شد. در پژوهش مذکور یک بالارونده سه ضلعی با راس مشترک با مشخصات: طول اضلاع ۴۲۰ میلی متر، فاصله الکترودها از هم ۴ سانتی متر و وزن نهایی ۴/۷۰ گرم ساخته شده بود. این بالارونده توانست در ولتاژ ۴۰ کیلوولت به صورت کامل پرواز کند. همچنین در مرجع [۱۹] نیز یک بالارونده مثلثی مورد بررسی قرار گرفته بود و نتایج حاصل از تحقیق با نتایج آن مرجع نیز مقایسه و اعتبارسنجی گردید.

در این تحقیق، به دلیل محدودیت‌های منبع تغذیه، تصمیم گرفته شد که با کاهش ابعاد به نصف و به تبع آن کاهش وزن، یک بالارونده سه ضلعی با راس مشترک ساخته شود. بعد از ساخت بالارونده سه ضلعی با راس مشترک، دو بالارونده مثلثی و مربعی نیز متناسب با وزن بالارونده سه ضلعی با راس مشترک ساخته شدند و سپس کلیه پارامترهای ذکر شده در بالا به صورت آزمایشگاهی محاسبه شد و نتایج حاصل از تحقیق، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

لازم به ذکر است که مقادیر توان الکتریکی از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$P = V \times I \quad (1)$$

در رابطه فوق، P نشان دهنده توان الکتریکی مصرف شده، I نشان دهنده جریان الکتریکی و V میزان ولتاژ است. همچنین، ضریب اثربخشی (η) با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$\eta = T/P \quad (2)$$

که در آن T نیروی پیشران و P میزان توان مصرفی است.

۳. تجهیزات آزمون

در این بخش، مجموعه تجهیزات و ابزار مورد نیاز برای آزمون‌ها و سیستم داده برداری به طور خلاصه ارائه شده است.

۳-۱. تجهیزات تولید و نظارت پلاسمای سرد غیر تعادلی

برای ایجاد یک تخلیه کرونا، باید از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا با جریان الکتریکی مستقیم استفاده کرد. منابعی که هم قابلیت تولید پلاریته مثبت و هم پلاریته منفی را داشته باشند. این منابع که به صورت دو دستگاه جدا مثبت و منفی با ولتاژ ورودی ۱۰۰-۲۴۰ ولت، تک فاز، ۵۰-۶۰ هرتز و ولتاژ خروجی ۳۵+ کیلوولت، ۳۵- کیلوولت و همچنین توان دستگاه ۳۵ وات است که دارای نمایشگر ولتاژ خروجی با دقت دهم کیلوولت (۱۰۰ ولت) و نمایشگر جریان الکتریکی خروجی با دقت هزارم میلی آمپر است. میزان توان مصرفی عملگر پلاسمایی با استفاده از مدار الکتریکی واسط که به همین منظور طراحی و در خروجی منبع تغذیه تعبیه شده، اندازه گیری می‌شود. شکل (۲ الف) مربوط به منبع تغذیه مثبت و شکل (۲ ب) مربوط به منبع تغذیه منفی است.

ایجاد شده ناشی از تخلیه کرونا در این پژوهش تا میزان ۲/۸۸ m/s اندازه گیری شد. همچنین گیلومر و برت [۱۴] سعی کردند با تغییر پارامترهای هندسی، مقدار بیشینه چگالی نیروی پیشران را برای یک رانشگر الکترو هیدرو دینامیکی به صورت تجربی اندازه گیری کنند. آنها موفق شدند مقادیر نیروی پیشران بر واحد سطح را تا $۳/۳ \text{ N/m}^2$ و نیروی پیشران بر واحد حجم را تا ۱۵ N/m^3 محاسبه نمایند.

پرواد و همکاران [۱۵] در فرانسه توانستند اثرات آیرودینامیکی استفاده از عملگر پلاسمای کرونا بر روی سطح هواپیمای بدون سرنشین فوق سبک مورد بررسی قرار دهند و متوجه شدند که با توجه به تغییرات اعمالی در شکل عملگر پلاسمای کرونا و مدار الکتریکی آن، استفاده از آن برای هواپیما مقرون به صرفه است. در همان سال، پروولت و همکاران [۱۶] در آمریکا توانستند یک مبدل ولتاژ بالا با وزن کم و ابعاد کوچک جهت نصب بر روی هواپیمای بدون سرنشین ایجاد نمایند. در سال ۲۰۱۸، دانشمندان برای اولین بار در دانشگاه کالیفرنیا در آمریکا توانستند یک بالارونده میکروروبات پرنده با استفاده عملگرهای الکترو هیدرو دینامیک و بدون استفاده از اجزای متحرک به پرواز درآوردند [۱۷].

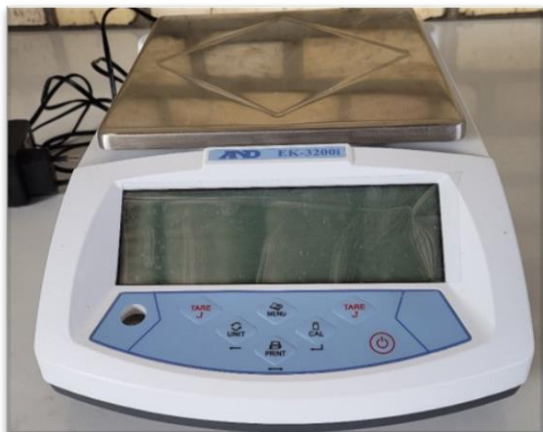
کاتانی و همکاران [۱۸]، یک بالارونده مثلثی با راس مشترک را به پرواز درآوردند، در این مقاله، به این نتیجه رسیدند که نوع کرونا مثبت و منفی بر عملکرد بالارونده اثرگذار است. همچنین، اینات و همکارش [۱۹]، یک بالارونده مثلثی را مورد بررسی قرار دادند و در این تحقیق، سعی کردند که رابطه‌ای بین شکل بالارونده و نیروی پیشران به دست آمده از این بالارونده را به دست آورند.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته و بالارونده‌های مختلف ساخته شده، در این تحقیق، سه بالارونده در شکل‌های مختلف طراحی و ساخته شده و سپس پارامترهای آزمایشگاهی شامل ولتاژ، جریان الکتریکی، وزن و نیروی پیشران الکتریکی در دو کرونا مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفت. سپس پارامترهای به دست آمده مقایسه شد تا بالارونده با بیشترین ضریب اثربخشی و نیروی پیشران مشخص شود.

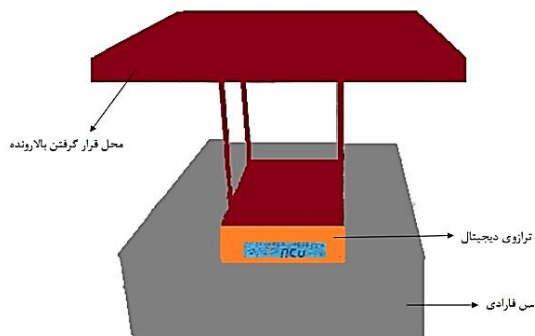
۲. روش تحقیق

در این تحقیق، عملکرد سه بالارونده یونی در مقیاس کوچک، بررسی شده است. ابتدا سه نوع بالارونده یونی به شکل‌های مثلثی، مربعی و سه ضلعی با راس مشترک طراحی و ساخته شد. سه بالارونده در چندین پارامتر شامل ولتاژ خروجی، وزن بالارونده، نیروی پیشران تولید شده، توان مصرفی و میزان ضریب اثربخشی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ساخت بالارونده‌ها و به دست آوردن کمترین وزن ممکن سازه، به جهت اطمینان از پرواز آنها، از پژوهشی توسط کاتانی و همکاران [۱۸] انجام شده به عنوان

عمل می‌کند، فقط از انرژی الکتریکی استفاده می‌کند و قادر است وزن خود را با بار اضافی بلند کند [۲۰].



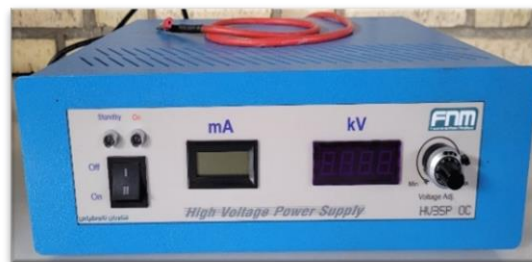
الف) ترازوی دیجیتال (EK-3200i)



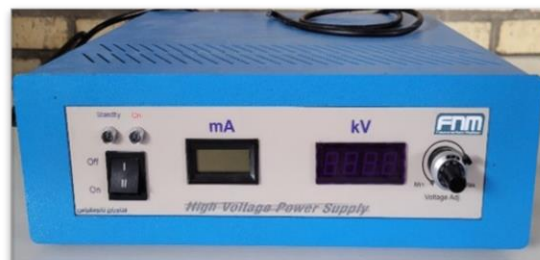
ب) نحوه استقرار ترازو در قفس فارادی و اندازه‌گیری نیروی پیشران
شکل ۳. شکل از ترازوی دیجیتال و قرار گرفتن ترازو در قفس فارادی

سه نیرو بر روی یک بالارونده برای به حرکت درآوردن آن وجود دارد: باد یونی، رانش یونی و اثر بیفتد - براون. کانینگ و همکاران [۲۱]، فرض کردند که نیروی الکترواستاتیکی، باد یونی را تولید می‌کند که بیشترین نیروی رانش را برای بالارونده ایجاد می‌کند. باد یونی، جریانی از محیط یونیزه شده است که توسط میدان الکتریکی با ولتاژ بالا تولید می‌شود. بارهای الکتریکی روی هادی‌ها روی سطوح خارجی باقی می‌مانند و بیشتر در اطراف نقاط نوک تیز و لبه‌ها متمرکز می‌شوند. این بدان معناست که میدان الکتریکی ایجاد شده توسط بارهای روی یک نقطه رسانای تیز، بیشتر و متمرکزتر از میدان تولید شده توسط همان بار موجود در یک پوسته رسانای کروی است. هنگامی که این شدت میدان الکتریکی از ولتاژ ابتدایی تخلیه کرونا فراتر رود، مولکول‌های هوا را در نوک یونیزه می‌کند که منجر به تولید مولکول‌های هوای یونیزه شده با قطبیت یکسان با نوک باردار می‌شود؛ بنابراین نوک سیم امی‌تر، ابر یونی باردار مولکول‌های هوا را دفع می‌کند و ابر یونی به دلیل دافعه بین خود یون‌ها بلافاصله منبسط می‌شود. این دافعه یون‌ها یک "باد" الکتریکی ایجاد می‌کند که همان باد یونی است که از نوک آن دور می‌شود. از آنجایی که الکترون منفی که فویل آلومینیومی است، چگالی بار منفی و میدان الکتریکی منفی

برای ایجاد سازگاری الکترومغناطیس و در واقع به حداقل رساندن تأثیرات ناخواسته و تداخلات الکترومغناطیس ناشی از عملکرد منبع تغذیه ولتاژ بالا روی سایر ابزار و تجهیزات الکتریکی مخصوصاً تجهیزات اندازه‌گیری و داده‌برداری، از کابل‌های دارای پوشش محافظ الکتریکی استفاده شده است. همچنین حداکثر فاصله بین منبع تغذیه و ابزارهای اندازه‌گیری در تست، مدنظر قرار گرفته است.



الف) منبع تغذیه ولتاژ بالا مثبت



ب) منبع تغذیه ولتاژ بالا منفی

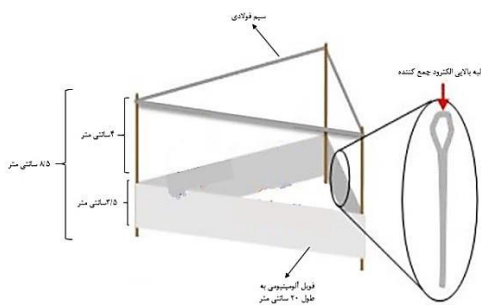
شکل ۲. منابع تغذیه مورد استفاده.

۳-۲. دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشران

اندازه‌گیری نیروی پیشران تولید شده به وسیله عملگر پلاسمایی، پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد آن است. برای اندازه‌گیری نیروی پیشران ترازوی دیجیتال (EK-3200i) با دقت صدم گرم برای محاسبه نیرو که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، استفاده شده است. به دلیل ولتاژ و فرکانس بالای عملکردی عملگر پلاسمایی، همواره تابش امواج الکترومغناطیس از سیستم عملگر پلاسمایی، سیم‌های انتقال ولتاژ روی می‌دهد. به منظور جلوگیری از این آثار بر روی ترازوی دیجیتالی، ترازو درون قفس فارادی قرار داده شده است که در شکل (۳) شماتیکی از قفس فارادی و نحوه اندازه‌گیری نیروی پیشران نشان داده شده است. دقت اندازه‌گیری نیروی پیشران با این روش $\pm 0.2 \text{ mN/m}$ است.

۳-۳. طرحی و ساخت بالارونده

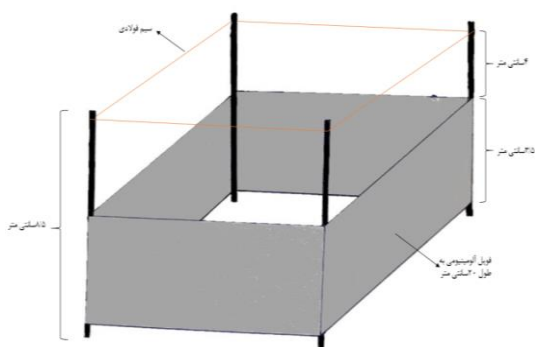
بالارونده، یک دستگاه رانشگر الکترونیکی است که دارای دو الکترون رسانای موازی است، یکی به صورت سیم ظریف و نازک و دیگری که ممکن است از یک شبکه سیمی، لوله یا فویل با سطح گرد و صاف تشکیل شده باشد. بالارونده، بدون هیچ قطعه متحرک



شکل ۴. شماتیک بالارونده مثلثی



شکل ۵. بالارونده مثلثی ساخته شده



شکل ۶. شماتیک بالارونده مربعی



شکل ۷. بالارونده مربعی ساخته شده

بالارونده سه ضلعی با راس مشترک: بالارونده سه ضلعی با رأس مشترک، از یک سیم مفتولی فولادی با قطر ۰/۲ میلی متر و مشخصات AISI-304L به عنوان ساطع کننده یا امیتر استفاده شده است. برای الکتروود جمع کننده از ۴ عدد فویل آلومینیومی به ابعاد ۲۰×۵ سانتی متری استفاده شده است، سعی شده تا زاویه بین اضلاع ۱۲۰ درجه باشد. شماتیک بالارونده سه ضلعی با رأس مشترک در شکل (۸) نشان داده شده است. لبه سمت الکتروود

بیشتری دارد، ابر یونی بار مثبت مولکول های هوا به سمت آن حرکت می کند.

بالارونده یونی، از طریق یک سیم امیتر نازک و با بار مثبت (منفی) کار می کند، سیم امیتر شارژ شده که سیم کرونا است. در یک فاصله نزدیک به سطح صاف و جذب کننده فویل آلومینیومی (کالکتور) قرار دارد. ذرات هوا در اطراف سیم کرونا شارژ و یونیزه می شوند. سپس ذرات هوا به سمت بار منفی فضای اطراف سطح صاف فویل آلومینیوم جذب می شوند.

بالارونده مثلثی: شماتیک بالارونده مثلثی در شکل (۴) نشان داده شده است. برای ساخت آن، از یک سیم مفتولی فولادی^۱ با قطر ۰/۲ میلی متر و مشخصات AISI-304L به عنوان امیتر استفاده شده است. برای الکتروود جمع کننده یا کالکتور، از فویل آلومینیومی به ابعاد ۲۰×۵ سانتی متری استفاده گردیده است. لبه سمت الکتروود ساطع کننده (لبه بالایی) را از فاصله ۱/۵ سانتی متری به گونه ای تازه شده که به صورت استوانه ای شود، در نهایت، عرض هر الکتروود جمع کننده ۳/۵ سانتی متر و طول آن ۲۰ سانتی متر است. سه عدد تیرک چوب بالسا با سطح مقطع ۲×۲ میلی متر و ارتفاع ۸/۵ سانتی متر که به عنوان پایه، فویل های آلومینیومی را با توجه به شکل سازه به هم متصل کرده و نگه داشته است. فاصله بین دو الکتروود امیتر و کالک تور چهار سانتی متر است. فاصله بالایی بالارونده تا سیم و همچنین فاصله زمین تا لبه فویل آلومینیومی ۰/۵ سانتی متر است. بالارونده مثلثی ساخته شده در شکل (۵) نشان داده شده است. بدنه اصلی این بالارونده مثلثی شکل است. وزن این بالارونده، ۲/۴۰ گرم است.

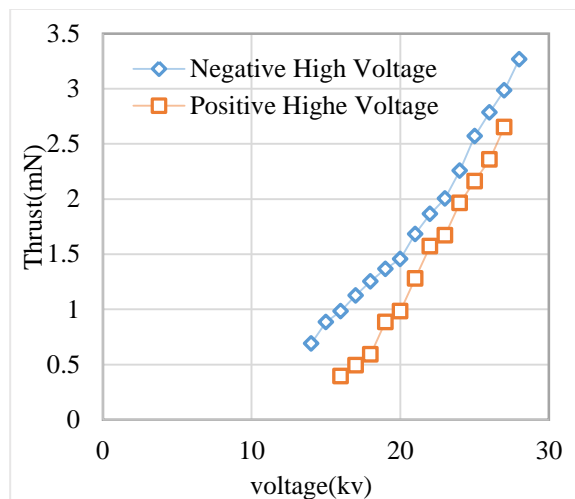
بالارونده مربعی: بالارونده مربعی، از یک سیم مفتولی فولادی با قطر ۰/۲ میلی متر و مشخصات AISI-304L به عنوان ساطع کننده استفاده شده است. برای الکتروود جمع کننده از فویل آلومینیومی به ابعاد ۲۰×۵ سانتی متری استفاده شده است. شماتیک بالارونده مربعی در شکل (۶) نشان داده شده است. لبه سمت الکتروود ساطع کننده (لبه بالایی) از فاصله ۱/۵ سانتی متری به گونه ای تازه شده که به صورت استوانه ای شود، در نهایت، عرض هر الکتروود جمع کننده ۳/۵ سانتی متر و طول آن ۲۰ سانتی متر است. چهار عدد تیرک چوب بالسا با سطح مقطع ۲×۲ میلی متر و ارتفاع ۸/۵ سانتی متر که به عنوان پایه، فویل های آلومینیومی را با توجه به شکل سازه به هم متصل کرده و نگه داشته است. فاصله بین دو الکتروود امیتر و کالکتور چهار سانتی متر است. فاصله بالایی بالارونده تا سیم و همچنین فاصله زمین تا لبه فویل آلومینیومی ۰/۵ سانتی متر است. بالارونده مربعی در شکل (۷) نشان داده شده است. بدنه اصلی بالارونده مربعی مشابه مدل مثلثی با ضلع اضافی برای ساخت مدل مربعی است. وزن بالارونده مربعی، ۲/۹۲ گرم است.

¹ Stainless Steel

جریان الکتریکی، توان الکتریکی و میزان ضریب اثربخشی مربوط به آنها است.

۴-۱. نتایج بررسی نیروی پیشران الکتریکی

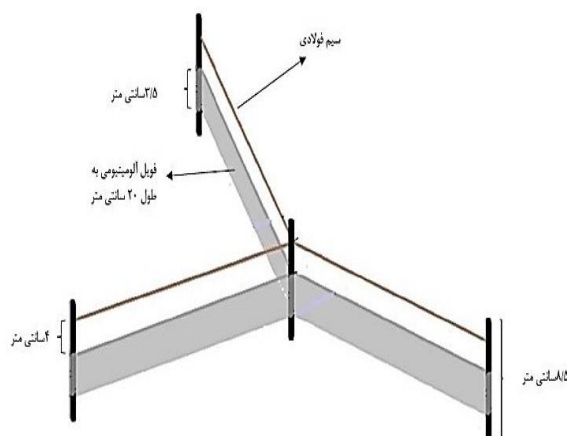
مدل اول، بالارونده مثلثی در کرونا مثبت و منفی: در ابتدا، بالارونده مثلثی مورد تست و آزمایش قرار گرفت. همان گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در مدل اول، با افزایش ولتاژ شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم، همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است تا قبل از تشکیل کرونا، نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. همان طور که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت ابتدا در ولتاژ ۱۶Kv، کرونا تشکیل شده و با افزایش آن تا ۲۷ Kv شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. با وصل کردن بالارونده به منبع تغذیه ولتاژ منفی (کرونا منفی)، کرونا زودتر تشکیل می‌گردد و در کرونا کیلو منفی از ۱۴ Kv شاهد نیروی پیشران هستیم که با افزایش میزان ولتاژ، میزان نیروی پیشران نیز افزایش می‌یابد. میزان نیروی پیشران حاصل از کرونا منفی از کرونا مثبت بیشتر است. همچنین هر دو نمودار به صورت تقریباً خطی هستند.



شکل ۱۰. نمودار نیروی پیشران برحسب ولتاژ در مدل اول (لیفتر مثلثی)

مدل دوم، بالارونده مربعی در کرونا مثبت و منفی: در مرحله دوم، بالارونده مربعی مورد تست و آزمایش قرار گرفت. همان گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در نمونه ۲ تا قبل از تشکیل کرونا، نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا، شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. همان طور که مشاهده می‌شود در کرونا مثبت و منفی ابتدا در ولتاژ ۱۳ Kv با شروع کرونا روبه‌رو می‌شویم و با افزایش آن تا ۲۵/۷ Kv شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم که در کرونا مثبت، نیروی پیشران هم تا ولتاژ ۱۹ Kv سیر صعودی داشته پس از آن با

ساطع‌کننده (لبه بالایی) را از فاصله ۱/۵ سانتی‌متری به گونه‌ای تازده شده که به صورت استوانه‌ای شود، در نهایت عرض هر الکتروود کالکتور ۳/۵ سانتی‌متر و طول آن ۲۰ سانتی‌متر است. تیرک چوب بالسا با سطح مقطع ۲×۲ میلی‌متر و ارتفاع ۸/۵ سانتی‌متر که به عنوان پایه، فویل‌های آلومینیومی را با توجه به شکل سازه به هم متصل کرده و نگه داشته است. فاصله بین دو الکتروود امیتر و کالکتور چهار سانتی‌متر است. فاصله بالای بالارونده تا سیم و همچنین فاصله زمین تا لبه فویل آلومینیومی ۰/۵ سانتی‌متر است. بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک ساخته شده در شکل (۹) نشان داده شده است. وزن بالارونده مثلثی با رأس مشترک، ۲/۳۰ گرم است.



شکل ۸. شماتیک بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک



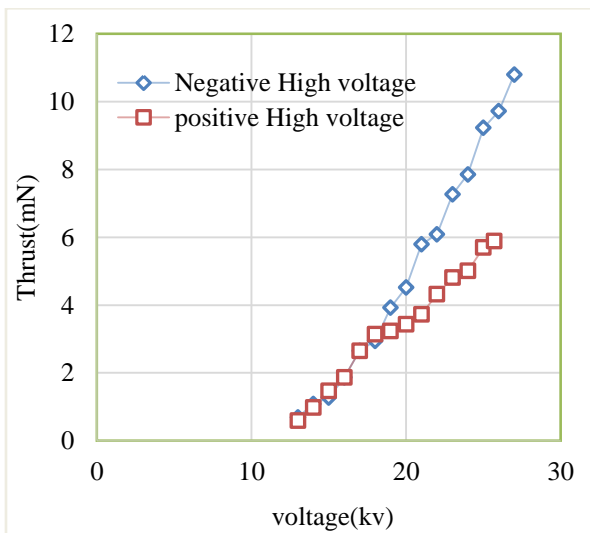
شکل ۹. بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک

جهت بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی هر آزمایش، چندین بار میزان نیروی پیشران و جریان الکتریکی اندازه‌گیری شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است؛ تا از دقت و صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. سپس، مقادیر اندازه‌گیری شده جهت ارزیابی میانگین گیری شده است تا یک مقدار معرف به دست آید.

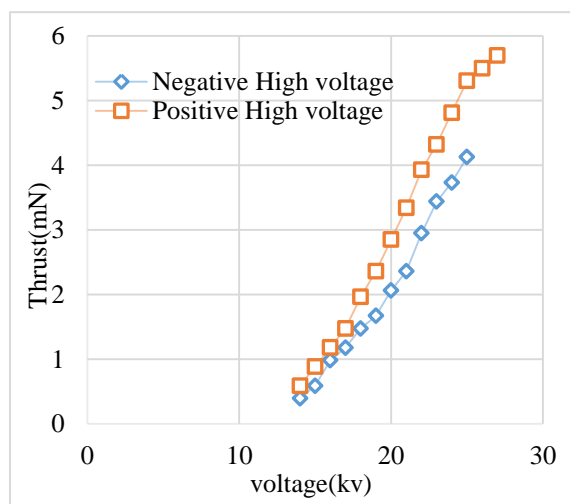
۴. نتایج و بحث

آزمایش‌ها و داده‌های این بخش، شامل نتایج تست‌های آیرودینامیکی است که شامل اندازه‌گیری نیروی پیشران مدل‌های بالارونده ساخته شده با توجه به تغییر ولتاژ و همچنین اندازه‌گیری

یک میزان تولید نیروی پیشران می‌کنند؛ اما میزان تولید نیروی پیشران برحسب ولتاژ در مدل مثلثی از همه کمتر است. در شکل (۱۳) نمودار مربوط به کرونا مثبت مشاهده می‌گردد، میزان تولید نیروی پیشران در مدل مربعی نسبت به مدل مثلثی و سه-ضلعی با رأس مشترک بیشتر است. نتایج حاصل از تحقیق، با نتایج مرجع [۱۸] انطباق دارد.



شکل ۱۱. نمودار نیروی پیشران برحسب ولتاژ در مدل دوم (لیفت مربعی)



شکل ۱۲. نمودار نیروی پیشران برحسب ولتاژ در مدل سوم (لیفت سه-ضلعی با رأس مشترک)

۴-۲. نتایج بررسی توان الکتریکی

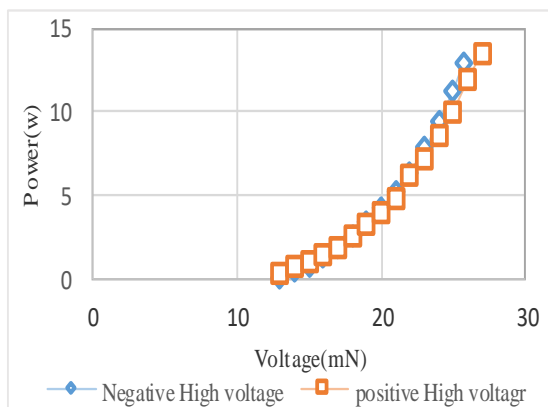
مدل اول، بالا رونده مثلثی در کرونا مثبت و منفی: جهت بررسی میزان توان الکتریکی مصرفی، در ابتدا، نمونه اول یا مدل مثلثی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود، افزایش جریان الکتریکی نداریم و در نتیجه توان مصرفی نیز صفر است و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد

قوی‌تر شدن کرونا ابتدا کمی روند صعودی با شیب ملایم‌تر و سپس دوباره شیب روند صعودی افزایش می‌یابد. ولی در کرونا منفی، شیب افزایش نیروی پیشران بیشتر از کرونا مثبت است و میزان نیروی پیشران تولیدی در یک ولتاژ ثابت، در کرونا منفی از کرونا مثبت بیشتر است. از مقایسه نمودارهای (۱۰) و (۱۱) نیز می‌توان متوجه شد که میزان تولید نیروی پیشران، در بالا رونده مربعی از بالا رونده مثلثی بیشتر بوده و این امر ممکن است به علت افزایش مساحت سطح بالا رونده مربعی نسبت به مثلثی باشد؛ بنابراین بهتر است برای مقایسه، ضریب اثربخشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مدل سوم، بالا رونده سه‌ضلعی با رأس مشترک در کرونا مثبت و منفی: در مرحله سوم، بالا رونده سه‌ضلعی با رأس مشترک مورد بررسی قرار گرفت. در مدل سوم، با افزایش ولتاژ شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم، همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود تا قبل از تشکیل کرونا، نیروی پیشران وجود ندارد و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا، شاهد افزایش نیرو هستیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت، ابتدا در ولتاژ ۱۳ Kv با شروع کرونا روبه‌رو می‌شویم و با افزایش آن تا ۲۵/۶Kv شاهد نیروی پیشران بیشتر هستیم و نمودار سیر صعودی را در پیش می‌گیریم. ولی در کرونا منفی، از ۱۴ Kv شاهد شروع کرونا هستیم؛ ولی در این مدل، در کرونا منفی شیب افزایش نیرو کمتر از کرونا مثبت است. این مدل برخلاف دو مدل قبلی، کرونا منفی نیروی پیشران کمتری نسبت به کرونا مثبت تولید می‌کند. در مقایسه با دو مدل قبلی، محدوده تشکیل کرونا در یک محدوده بوده و تغییر خاصی بین بالا رونده‌ها مشاهده نمی‌شود. مدل سه‌ضلعی با رأس مشترک، در کرونا مثبت و منفی نسبت به مدل مربعی دارای تولید نیروی پیشران کمتر و نسبت به مدل مثلثی، نیروی پیشران بیشتری تولید می‌کند. نکته جالب توجه در این نمودار، بیشتر بودن میزان نیروی پیشران ناشی از کرونا مثبت نسبت به کرونا منفی است که در دو مدل دیگر مشاهده نمی‌گردد. به نظر می‌رسد، عدم محدودیت سطوح بر روی یکدیگر، می‌تواند عامل مؤثری در میزان نیروی پیشران در کرونا منفی نسبت به مثبت باشد.

در شکل (۱۳ الف و ب) نمودار نیروی پیشران برحسب ولتاژ مربوط به مدل‌های اول، دوم و سوم در کرونا مثبت و منفی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که نمونه اول، دوم و سوم به ترتیب مدل مثلثی، مدل مربعی و مدل سه‌ضلعی با رأس مشترک هستند. نکته جالب توجه این است که افزایش ولتاژ در مدل‌های دوم و سوم، نسبت به مدل اول تأثیر بسزایی در تولید نیروی پیشران تولیدی توسط عملگرهای پلاسما (کرونا) دارد و منجر به افزایش نیروی به دست آمده از کرونا می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در کرونا منفی، مدل سوم و دوم به

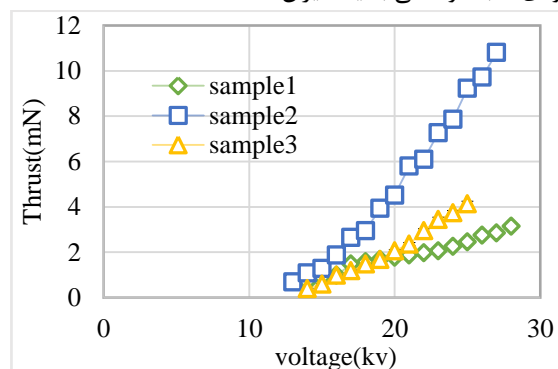
مدل دوم، بالارونده مربعی در کروناهای مثبت و منفی: در مرحله بعد، برای محاسبه میزان توان مصرفی، از مدل مربعی استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران وجود ندارد، افزایش جریان الکتریکی هم نداریم، پس توان مصرفی برابر صفر است و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد افزایش نیروی پیشران و در نتیجه افزایش توان مصرفی می‌باشیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت و منفی ابتدا در ولتاژ ۱۳ Kv، با شروع کرونا با افزایش توان الکتریکی روبه‌رو می‌شویم و با افزایش آن تا ۲۵/۷ Kv شاهد مقدار توان مصرفی بیشتر هستیم. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت روند صعودی بیشتر از کرونا منفی بیشتر است؛ اما در ولتاژهای کمتر از ۲۲ Kv، میزان توان مصرفی کروناهای مثبت و منفی فرقی نمی‌کند.



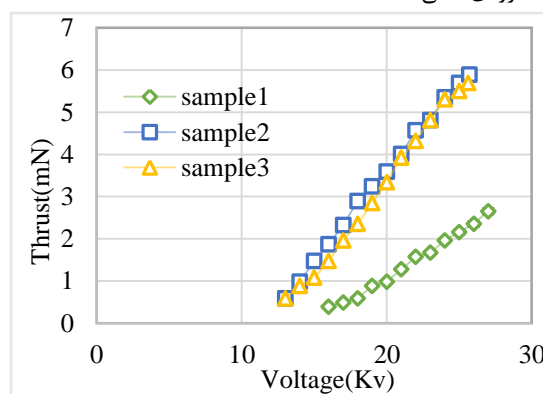
شکل ۱۵. نمودار توان مصرفی برحسب ولتاژ در مدل دوم (لیفت‌ر مربعی)

مدل سوم، بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک در کروناهای مثبت و منفی: در این بخش، به بررسی میزان توان مصرفی در مدل بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک پرداخته شده است. در این مدل، با افزایش ولتاژ، شاهد افزایش توان مصرفی هستیم، همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود تا قبل از تشکیل تخلیه کرونا، به علت فقدان نیروی پیشران، جریان الکتریکی ثابت مانده و در نتیجه توان مصرفی نیز وجود ندارد و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا، شاهد افزایش نیروی پیشران هستیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت، ابتدا در ولتاژ ۱۳ Kv با شروع تخلیه کرونا، توان الکتریکی قابل‌اندازه‌گیری است. میزان توان هم تا ولتاژ ۲۶ Kv سیر صعودی دارد. در کرونا منفی از ۱۴ Kv شاهد ایجاد توان هستیم و تا ۲۵ Kv میزان توان مصرفی برحسب ولتاژ افزایش می‌یابد. تا ولتاژ بیست کیلوولت، میزان توان مصرفی برای کروناهای مثبت و منفی برهم منطبق است اما با افزایش ولتاژ از ۲۰ Kv به بعد، میزان توان مصرفی در کروناهای مثبت از کروناهای منفی بیشتر است.

افزایش توان مصرفی هستیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود. در کرونا مثبت ابتدا در ولتاژ ۱۶ کیلوولت، با شروع تخلیه کرونا، توان الکتریکی قابل‌محاسبه می‌شود و با افزایش آن تا ۲۷ Kv شاهد افزایش مقدار توان الکتریکی مصرفی هستیم و در کرونا منفی، ولتاژ شروع، ۱۴ Kv است. هر دو نمودار مربوط به میزان توان مصرفی برحسب ولتاژ، به‌صورت سهموی بوده و نشان‌دهنده این است که با افزایش ولتاژ، میزان جریان الکتریکی نیز به‌صورت سهموی افزایش می‌یابد. میزان افزایش جریان الکتریکی در هر دو کروناهای مثبت و منفی به یک‌میزان است.

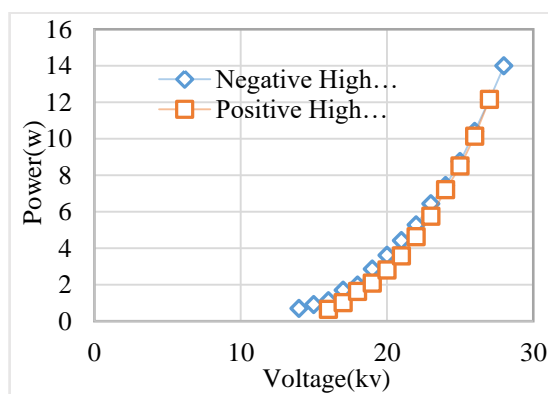


الف) کروناهای منفی



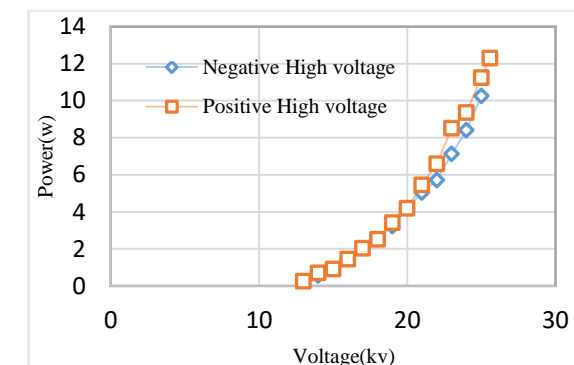
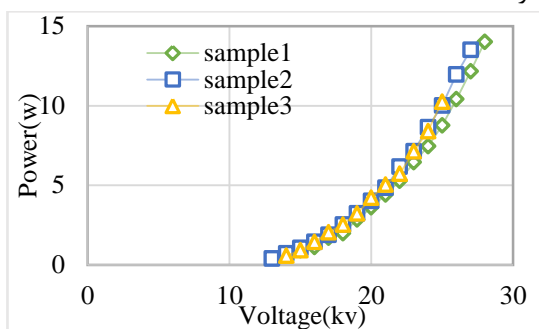
ب) کروناهای مثبت

شکل ۱۳. مقایسه بین نیروی پیشران هر سه مدل. مدل مثلثی (نمودار سبز)، مدل مربعی (نمودار آبی) و مدل سه‌ضلعی با رأس مشترک (نمودار زرد)



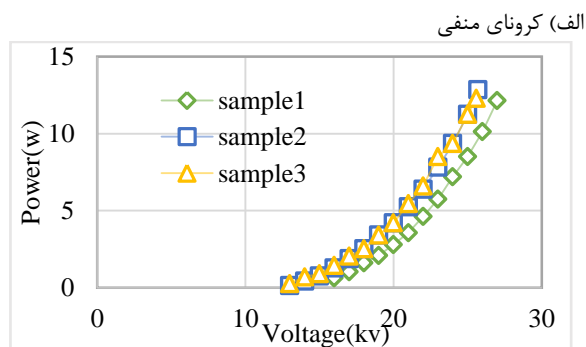
شکل ۱۴. نمودار توان مصرفی برحسب ولتاژ در مدل اول (لیفت‌ر مثلثی)

همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که در بالا رونده مثلثی، کرونا منفی، میزان ضریب اثربخشی بالاتری نسبت به کرونا مثبت دارد و شبیه تخلیه کرونا منفی در بالا رونده مثلثی از کرونا مثبت بیشتر است.



شکل ۱۶. نمودار توان بر حسب ولتاژ در مدل سوم (لیفتر سه ضلعی بارأس- مشترک)

در شکل (۱۷)، میزان توان الکتریکی مصرفی مربوط به مدل‌های اول، دوم و سوم در کرونا مثبت و منفی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نکته جالب توجه این است که افزایش ولتاژ در مدل‌های مربعی و سه ضلعی با رأس مشترک نسبت به مدل مثلثی منجر به افزایش توان مصرفی در کرونا مثبت می‌شود و منجر به افزایش نیروی به دست آمده از تخلیه کرونا می‌شود. با وجود افزایش میزان نیروی پیشران در مدل مربعی در تخلیه کرونا منفی نسبت به مدل‌های مثلثی و سه ضلعی، هر سه مدل به یک میزان توان الکتریکی مصرفی دارند.



(ب) کرونا منفی

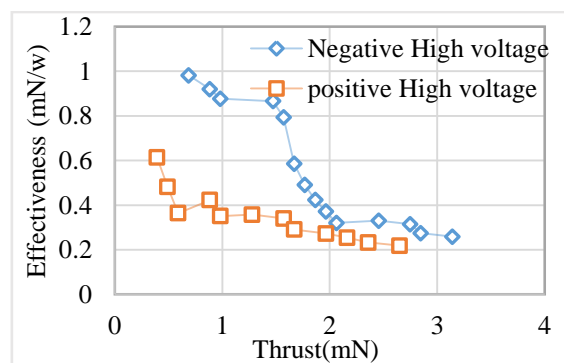
شکل ۱۷. مقایسه توان مصرفی بر حسب ولتاژ هر سه مدل. مدل مثلثی (نمودار سبز)، مدل مربعی (نمودار آبی) و مدل سه ضلعی با رأس مشترک (نمودار زرد)

۳-۴. نتایج بررسی ضریب اثربخشی

در این بخش، به بررسی ضریب اثربخشی در بالا رونده‌های مختلف بر حسب نیروی پیشران پرداخته شده است.

مدل اول، بالا رونده مثلثی در کرونا مثبت و منفی: در این

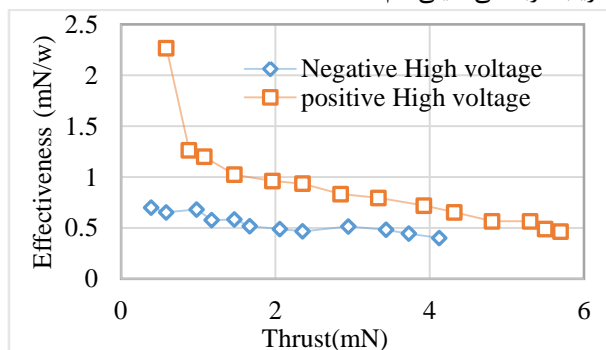
بخش، به بررسی تأثیر بالا رونده مثلثی بر ضریب اثربخشی پرداخته شده است. همان طور که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود، توان الکتریکی هم وجود ندارد و ضریب اثربخشی نیز قابل اندازه گیری نیست و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد افزایش نیروی پیشران و همچنین کاهش ضریب اثربخشی هستیم. در شکل (۱۸)، نمودار تغییرات ولتاژ بر ضریب اثربخشی نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت، ابتدا در نیروی پیشران 0.3928 mN با کاهش ضریب اثربخشی روبه‌رو می‌شویم و با افزایش آن تا 0.5892 mN شاهد کاهش ضریب اثربخشی هستیم و سپس در 0.8838 mN یک روند صعودی در ضریب اثربخشی داشته و مجدد با افزایش نیروی پیشران، ضریب اثربخشی روند نزولی خود را طی می‌کند. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان ولتاژ بالا رونده مثلثی، میزان ضریب اثربخشی نیز در کرونا مثبت کاهش می‌یابد و در کرونا منفی، نیروی پیشران از 0.6874 mN شروع و با کاهش ضریب اثربخشی روبه‌رو می‌شویم و روند نزولی را در کل مسیر طی می‌کند، در حقیقت می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان نیروی پیشران، میزان ضریب اثربخشی نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸. نمودار ضریب اثربخشی بر حسب نیروی پیشران در مدل اول (لیفتر مثلثی)

مدل دوم، بالا رونده مربعی در کرونا مثبت و منفی: در این بخش، به بررسی ضریب اثربخشی بالا رونده مربعی پرداخته شده است. نمودار تغییرات ضریب اثربخشی بر حسب نیروی پیشران در دو تخلیه کرونا مثبت و منفی در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مربوطه مشاهده می‌شود، تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود و توان الکتریکی هم قابل اندازه گیری نیست، در نتیجه ضریب اثربخشی هم معنا ندارد و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد افزایش نیروی پیشران و همچنین کاهش ضریب اثربخشی هستیم. همان طور که

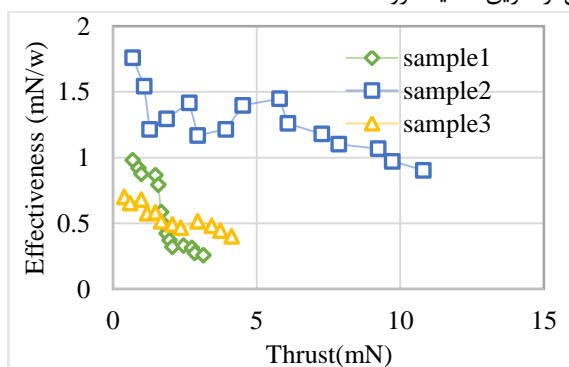
مربوط به مدل مربعی بود. در کرونا منفی، با افزایش نیروی پیشران در مدل سه‌ضلعی با رأس مشترک برخلاف دو مدل دیگر، میزان کاهش ضریب اثربخشی نیز خیلی کم است. ولی در کرونا مثبت، در مدل مثلثی، با افزایش نیروی پیشران، میزان تغییرات ضریب اثربخشی خیلی کم است.



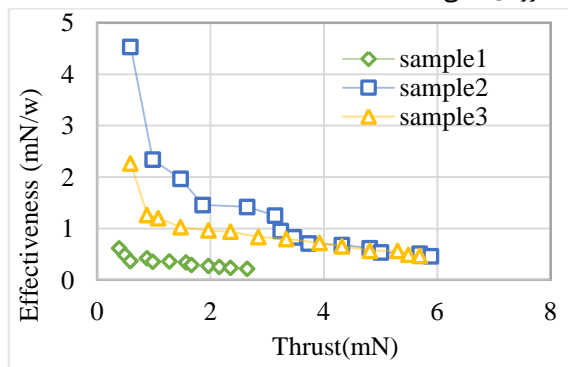
شکل ۲۰. نمودار ضریب اثربخشی برحسب نیروی پیشران در مدل سوم (لیفت‌ر سه‌ضلعی با رأس مشترک)

۴-۵. پرواز بالارونده‌ها از روی سطح

در انتها تصاویری از پرواز بالارونده‌ها از سطح نشان داده شده است و امکان پایداری کامل آنها در هوا نیز وجود داشت که در شکل (۲۲) تصاویری از پرواز بالارونده‌های مثلثی و سه‌ضلعی با رأس مشترک نشان داده شده است. دلیل پرواز، تولید نیروی پیشران و تولید باد یونی از طریق تخلیه کرونا است.



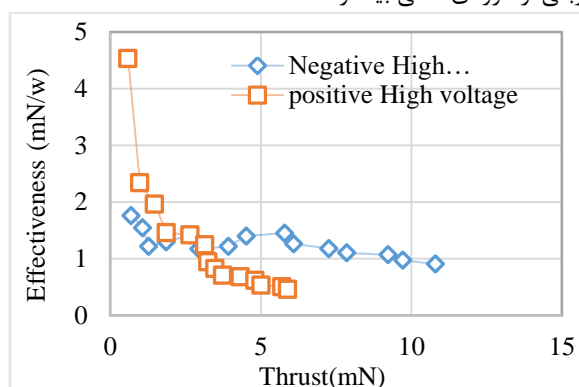
الف) کرونا منفی



ب) کرونا مثبت

شکل ۲۱. مقایسه ضریب اثربخشی برحسب نیرو هر سه مدل. مدل مثلثی (نمودار سبز)، مدل مربعی (نمودار آبی) و مدل سه‌ضلعی با رأس مشترک (نمودار زرد)

مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت ابتدا در نیروی پیشران $0/5892\text{mN}$ با کاهش ضریب اثربخشی روبه‌رو می‌شویم و با افزایش میزان نیروی پیشران، میزان ضریب اثربخشی نیز کاهش می‌یابد. در کرونا منفی در نیروی پیشران $0/6874\text{mN}$ ، ضریب اثربخشی بیشترین میزان خود را دارد که با افزایش میزان نیروی پیشران، میزان ضریب اثربخشی نیز با شیب خیلی کمی، کاهش می‌یابد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که در بالارونده مربعی، کرونای مثبت، میزان ضریب اثربخشی بالاتری نسبت به کرونای منفی در ولتاژهای پایین دارد و با افزایش میزان ولتاژ، این روند برعکس می‌شود. همچنین، شیب تخلیه کرونای مثبت در بالارونده مربعی از کرونای منفی بیشتر است.



شکل ۱۹. نمودار ضریب اثربخشی برحسب نیروی پیشران در مدل دوم (لیفت‌ر مربعی)

مدل سوم، بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک در کرونای مثبت و منفی: در این بخش، به بررسی ضریب اثربخشی بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک پرداخته شده است. نمودار تغییرات ضریب اثربخشی برحسب نیروی پیشران در شکل (۲۰) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در این مدل، در کرونای مثبت، با افزایش نیروی پیشران شاهد کاهش ضریب اثربخشی هستیم. تا قبل از تشکیل کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود، توان الکتریکی هم نداریم، پس ضریب اثربخشی نداریم و پس از آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل کرونا شاهد افزایش نیروی پیشران و همچنین کاهش ضریب اثربخشی هستیم. همان طور که مشاهده می‌شود، در کرونا مثبت ابتدا، نیروی پیشران $0/5892\text{mN}$ است که با افزایش میزان نیروی پیشران، با کاهش ضریب اثربخشی روبه‌رو می‌شویم و در کرونا منفی، میزان نیروی پیشران از $0/3928\text{mN}$ شروع و با افزایش نیروی پیشران، میزان ضریب اثربخشی به آرامی کاهش می‌یابد. همان گونه که مشخص است، روند کاهش ضریب اثربخشی در کرونای مثبت سریع‌تر از کرونای منفی صورت می‌گیرد.

در شکل (۲۱)، ضریب اثربخشی مربوط به مدل‌های اول، دوم و سوم در کرونا مثبت و منفی نسبت به نیروی پیشران با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نکته جالب توجه این است که کرونای منفی و مثبت، بیشترین میزان ضریب اثربخشی مربوط به مدل مربعی است. همان گونه که بیشترین میزان نیروی پیشران تولیدی نیز

آن، با افزایش ولتاژ و تشکیل تخلیه کرونا شاهد افزایش توان مصرفی هستیم. میزان توان مصرفی در کرونا منفی در همه مدل‌ها مشابه هم بود و تفاوت چندانی مابین توان مصرفی در کرونا مثبت و منفی در مدل‌ها وجود نداشت. در همه مدل‌ها، زمان تشکیل کرونا و ایجاد تخلیه الکتریکی در کرونا مثبت در محدوده ۱۳ الی ۱۴ کیلوولت و در کرونا منفی در حدود ۱۶ Kv صورت می‌گیرد. همچنین، در رابطه با ضریب اثربخشی می‌توان نتیجه گرفت، در کرونا مثبت، افزایش ولتاژ در نمونه‌های مربعی و سه‌ضلعی با رأس مشترک، نسبت به نمونه مثلثی تأثیر بسزایی در کاهش ضریب اثربخشی تولیدی دارد و منجر به کاهش شدیدتر ضریب اثربخشی می‌گردد. ولی در کرونا منفی، افزایش ولتاژ در نمونه‌های مثلثی و سه‌ضلعی با رأس مشترک نسبت به نمونه مربعی، تأثیر بسزایی در کاهش ضریب اثربخشی دارد. بیشترین میزان ضریب اثربخشی و نیروی پیشران برحسب ولتاژ در دو کرونا مثبت و منفی، مربوط به مدل مربعی بود. در آخر می‌توان بیان نمود که تخلیه کرونا منجر به تولید نیروی پیشران و می‌تواند باعث پرواز بالارونده‌ها شود.

۶. مراجع

- [1] Hauksbee, F. "Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects"; First Edition, London: Brugis, 1709, 44-47.
- [2] Hauksbee, F. "Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects"; First Edition, London: Brugis, 1709, 46-47.
- [3] Newton, I. "Optics"; London: Printers to the Royal Society, 1718, 25-27.
- [4] Chattock, A. P. "On the Velocity and Mass of the Ions in the Electric Wind in Air"; Philos. Mag. 1988, 48, 401-420.
- [5] Harney, D. J. "An Aerodynamic Study of the Electric Wind"; PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 1957.
- [6] Sanborn, L.; Brown, C. "Electrical Coronas: Their Basic Physical Mechanisms"; Academic Press, 1966, 19, 1.
- [7] Christenson, E. A.; Moller, P. S. "Ion- Neutral Propulsion in Atmospheric Media"; J. AIAA. 1967, 5, 1768-1773.
- [8] Bondar, H.; Bastein, F. "Effect of Neutral Fluid Velocity on Direct Conversion from Electric to Fluid Kinetic Energy in an Electro-Fluid-Dynamic Device"; J. Phys. D: Appl. Phys. 1986, 19, 1657-1663.
- [9] Wilson, J.; Perkins, H. D.; Thompson, W. K. "An Investigation of Ionic Wind Propulsion"; Report No. NASA/TM 2009-215822.
- [10] Barrett, S. H.; Masuyama, K. "On the Performance of Electro Hydrodynamic Propulsion"; Proc. Royal Soc. A. 2013, 469, 20120623.
- [11] Barrett, S. H.; Gilmore, C. K. "Electro Hydrodynamic Thrust Density Using Positive Corona-Induced Ionic Winds for In-Atmosphere Propulsion"; Proc. Royal Soc. A. 2015, 471, 20140912.
- [12] 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"; J. Appl. Phys. 2010, 108, 1-6.
- [13] Kioussis, K.; Moronis, N. A. X.; Fruh, W. G. "Electro-Hydrodynamic (EHD) Thrust Analysis in Wire-Cylinder



الف) تصویری از پرواز بالارونده مثلثی



ب) تصویری از پرواز بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک

شکل ۲۲. تصویری از پرواز بالارونده‌ها

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تخلیه کرونا در سه مدل بالارونده و همچنین به بررسی نیروهای آیرودینامیکی آنها پرداخته شده است. سه نوع بالارونده، شامل بالارونده مثلثی، بالارونده مربعی و بالارونده سه‌ضلعی با رأس مشترک است. در این تحقیق، تخلیه کرونا مثبت و منفی بر میزان نیروی پیشران، ضریب اثربخشی و توان مصرفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی دلالت بر این نکته دارد که تخلیه کرونا باعث به وجود آمدن یک باد یونی روی سطح مدل می‌شود، با توجه به میزان ولتاژ اولیه که با آن تخلیه کرونا تشکیل می‌شود، سرعت باد یونی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که تخلیه کرونا می‌تواند باعث ایجاد نیروی پیشران شود که به‌طور مستقیم با میزان ولتاژ ورودی آن در ارتباط است. در هر سه مدل، رابطه بین تغییرات ولتاژ با نیروی پیشران به‌صورت تقریباً خطی است و افزایش میزان ولتاژ باعث افزایش نیروی پیشران می‌شود؛ اما رابطه بین ولتاژ و توان مصرفی در هر سه مدل مربوطه به‌صورت سهموی شکل است. همچنین در صورت استفاده از کرونا مثبت و منفی، مدل‌های مربعی و سه‌ضلعی با رأس مشترک نتایج بهتری نسبت به مدل مثلثی در تولید نیروی پیشران دارند. در هر سه مدل بالارونده تا قبل از تشکیل تخلیه کرونا، چون نیروی پیشران مشاهده نمی‌شود، جریان الکتریکی نداریم و در نتیجه توان مصرفی نیز صفر است و پس از

- [17] Drew, D. S.; Lambert, N. O.; Schindler, C. B.; Pister, K. J. "Toward Controlled Flight of the Ionocraft: a Flying Micro Robot Using Electro Hydrodynamic Thrust with Onboard Sensing and no Moving Parts", IEEE Robot. Autom. Lett. 2018, 3, 2807-2813.
- [18] Cattani, M.; Vannucci, A.; Souza, V. G. "Lifter-High Voltage Plasma Levitation Device"; J. Revista Brasileira Ensico de Fisica 2015, 37, 3307-1-5.
- [19] Einat, M.; Kalderon, R. "High Efficiency Lifter Based on the Biefeld-Brown Effect", J. AIP Adv. 2014, 4, 077120-1-23.
- [20] Lavolette, A. P. "Secrets of Antigravity Propulsion"; Bear&Company, 2008.
- [21] Canning, X. F.; Melcher, C.; Winet, E. "Asymmetrical Capacitors for Propulsion"; NASA, 2004, NASAICR-2004-213312.
- Electrode Arrangement"; J. Plasma Sci. Technol. 2014, 16, 363-369.
- [14] Gilmore, C. K.; Barrett, S. R. H. "Electro Hydrodynamic Thrust Density Using Positive Corona-Induced Ionic Winds for In-Atmosphere Propulsion"; Proc. Royal Soc. A. 2015, 71, 20140912.
- [15] Praud, O.; Monrolin, N.; Ploouraboue, F. "Electrohydrodynamic Thrust for In-atmosphere Propulsion"; J. AIAA. 2017, 554296-4305.
- [16] Perreault, D. J.; He, Y.; Woolston, M. R. "Design and Implementation of a Lightweight High-Voltage Power Converter for Electro-Aerodynamic Propulsion"; IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electron. 2017.